



# **"UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO"**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS  
ALIMENTARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas  
residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de  
combustible microbiana**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. EDGARD OMAR LLONTOP GUERRERO**

**LAMBAYEQUE – PERU**

**2018**

**“Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Por**

**Bach. EDGARD OMAR LLONTOP GUERRERO**

**Sustentada y aprobada ante el  
Siguiente jurado**

**MSc. Ing. YSABEL NEVADO ROJAS  
PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_

**MSc. Ing. RONALD ALFONSO GUTIÉRREZ MORENO  
SECRETARIO**

\_\_\_\_\_

**MSc. Ing. RODOLFO PASTOR TINEO HUANCAS  
VOCAL**

\_\_\_\_\_

**MSc. Ing. JUAN CARLOS DÍAZ VISITACIÓN  
ASESOR**

\_\_\_\_\_

## **DEDICATORIAS**

### **A DIOS**

*“Por haberme permitido llegar hasta este momento, dado salud y la fortaleza que necesito para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor”.*

### **A MIS PADRES FAUSTINO Y ROSA:**

*“Por enseñarme desde pequeño a no rendirme, a ser paciente, a tener el valor para afrontar los problemas en los momentos en que uno cree haber perdido.*

*A ser una persona que no piense igual a los demás, a pensar diferente y luchar por ideales, aunque parezcan imposibles, ayudan a dar otra cara y pensamiento a la humanidad”.*

### **A MIS HERMANOS TANIA, DENIS Y VANESSA:**

*Les agradezco a ustedes, porque son y serán mis tres grandes amigos de toda la vida.*

*Siempre estuvieron en los momentos en que los necesite, me dieron la fuerza y aliento para seguir adelante.*

## ***AGRADECIMIENTO***

Agradezco a mi casa de estudios, a mi Alma Mater: La Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo De Lambayeque por estos 5 años que me albergó.

A ingeniero Juan Carlos Díaz Visitación, por ser mi asesor de tesis y darme los pilares para ser una buena sustentación.

A la Profesora Carmen Carreño, quien me enseñó microbiología industrial por brindarme su apoyo, colaboración y dirección para el estudio de este trabajo de investigación.

A don Floriano, técnico del laboratorio de fisicoquímica por brindarme las facilidades para realización de la parte experimental de la tesis.

A todos mis amigos, por darme las fuerzas para dar lo mejor de mí en esta bonita etapa de mi carrera, que es la sustentación de tesis.

# ÍNDICE GENERAL

---

## *Página*

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**CONTENIDO DE TABLAS.....IX**

**CONTENIDO DE FIGURAS.....X**

**CONTENIDO DE GRÁFICAS.....XIII**

**RESUMEN.....XIV**

**ABSTRACT.....XVI**

**INTRODUCCION.....XVIII**

**NOMENCLATURA.....152**

**GLOSARIO.....154**

## *CAPÍTULO I*

### ***CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA***

<b>1.1</b>	<b>CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA</b>	
1.2.1.	Celdas de combustible microbiana.....	2
1.2.2.	Tipos de celdas de combustibles Microbianas.....	3
1.2.3.	Mecanismo de oxidación anaeróbica de las celdas de combustible microbiana.....	12
1.2.4.	Bacterias generadoras de electrones o electrógenas .....	15
1.2.5.	Elementos de las celdas.....	21
1.2.6.	Fundamentos de la generación de voltaje en las celdas microbianas.....	23
1.2.6.1.	Termodinamica y la fuerza electromotriz.....	23
1.2.7.	Factores que controlan la eficiencia de las celdas microbianas.....	26
<b>1.2.</b>	<b>AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>35</b>
1.2.1.	Biodegradabilidad.....	35
1.2.2.	Caracterización de las aguas residuales .....	36
1.2.2.1.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBOo).....	36
1.2.2.2.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	37
1.2.2.3.	Nitrógeno amoniacal y orgánica.....	38
1.2.2.4.	Solidos sedimentables.....	39
1.2.3.	Utilización e instalación de las celdas de combustible biológicas en la vida moderna.....	39

## ***CAPÍTULO II***

### ***MATERIAL Y MÉTODOS***

<b>2.1</b>	<b>TIPO DE INVESTIGACION .....</b>	<b>46</b>
<b>2.2</b>	<b>DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3</b>	<b>POBLACION Y MUESTRA</b>	
	2.3.1 Población .....	47
	2.3.2 Muestra.....	47
<b>2.4</b>	<b>METODOLOGÍA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>	
2.4.1	Recolección De Muestras.....	47
2.4.2	Medición De La Demanda Bioquímica De Oxigeno De Las Aguas Residuales.....	50
2.4.3	Preparación de Muestras con DBO distintos.....	51
2.4.4	Preparación del Agua de enriquecimiento.....	51
2.4.5	Preparación del Consorcio Microbiano.....	52
2.4.6	Preparación de electrodos.....	52
2.4.7	Preparación de cámaras anódica y catódica.....	52
2.4.8	Preparación del puente salino.....	53
2.4.9	Armado de celdas de combustible microbiana.....	53
2.4.10	Funcionamiento de la celda de combustible microbiana.....	54
<b>2.5</b>	<b>LUGAR EXPERIMENTAL.....</b>	<b>55</b>
2.5.1	Equipos, instrumentos y materiales.....	55
<b>2.6</b>	<b>PROCESO PERACIONAL.....</b>	<b>57</b>

**CAPÍTULO III**

<b>3.0</b>	<b>RESULTADOS</b>	
<b>3.1</b>	<b>RESULTADOS DE LA CELDA #1.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>RESULTADOS DE LA CELDA #2.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3</b>	<b>RESULTADOS DE LA CELDA #3.....</b>	<b>61</b>
<b>3.4</b>	<b>DISCUSIONES.....</b>	<b>68</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERENCIA BLIOGRÁFICA.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## **CONTENIDO DE TABLAS**

### ***Página***

<b>Tabla 01.</b> Degradación Biológica De Los Constituyentes De Aguas Residuales (Nemerow, 1977) .....	7
<b>Tabla 02.</b> Diseño Experimental.....	32
<b>Tabla 03.</b> Composición Del Agua Residual Sintética.....	33
<b>Tabla 04.</b> Parámetros Medidos De La Celda Microbiana #1.....	48
<b>Tabla 05.</b> Caracterización inicial del agua residual utilizada.....	48
<b>Tabla 06.</b> Caracterización del agua residual al final del proceso .....	65
<b>Tabla 07.</b> Diseño experimental con dos factores de influencia: pH y DBO con la densidad de potencia.....	65
<b>Tabla 08.</b> Resultados del análisis de varianza de los dos factores DBO y pH con respecto a la cantidad de energía eléctrica .....	66
<b>Tabla 09.</b> Análisis de regresión de la densidad de potencia vs DBO y pH.....	103
<b>Tabla 10.</b> Tratamiento de acuerdo a la cantidad de DBO y solidos en suspensión .....	103
<b>Tabla 11.</b> Degradación biológica de constituyentes de aguas residuales.....	104
<b>Tabla 12.</b> Las alícuotas tomadas de acuerdo al % de dilución .....	105
<b>Tabla 13.</b> Composición del agua de enriquecimiento.....	105
<b>Tabla 14.</b> Parametros medidos de la celda microbiana con 50 mg/L DBO.....	106

<b>Tabla 15.</b> Parametros medidos de la celda microbiana con 150 mg/L DBO.....	117
<b>Tabla 16.</b> Parametros medidos de la celda microbiana con 242 mg/L DBO.....	128
<b>Tabla 17.</b> Datos del DBO de las aguas residuales al inicio y final.....	139
<b>Tabla 18.</b> Datos de pH en la cámara anódica al inicio y final.....	140

## *CONTENIDO DE FIGURAS*

---

	<i>Página</i>
<b>Figura1.</b> Clasificación general de las celdas de combustible biológicas .....	6
<b>Figura2.</b> Celda de electrolisis microbial acopladas a una MFC para la producción de hidrogeno.....	6
<b>Figura3.</b> Tipos de celdas de combustible biológicas, tipo sedimentaria (a), fotosintética (b).....	6
<b>Figura4.</b> Microscopia de Escaneo electrónico de <i>S. oneidensis</i> mostrando pilis de conexión entre dos <i>S. oneidensis</i> (a), Aálisis STM de un simple nanocable demostrando conductividad en blanco (b). Gorby et al .....	16
<b>Figura 5.</b> Mecanismo de transferencia directa de electrones (TED) por citocromos (a), Mecanismo de funcionamiento de la biofilms para la producción de electrones(b).....	16
<b>Figura6.</b> Bacterias electrógenas <i>Geobacter Sulfurreducens</i> (a), <i>shewanella oneidensis</i> (b), mensajero Químico Piocianina (c).....	18
<b>Figura7.</b> Mecanismo anaeróbico basado en Wilson (2014).....	18

<b>Figura8.</b> Elementos de una celda de combustible microbiana (a), electrodos: ánodo y cátodo (b), membrana de intercambio iónico (c), circuito eléctrico en una celda microbiana (d).....	25
<b>Figura9.</b> Boya de datos meteorológicos(centro) y una matriz de seis generadores de tipo celda de combustible microbiana bentónica desplegado en agosto del 2004 en el río Potomac. ....	43
<b>Figura10.</b> Robot híbrido equipado con celdas de combustible microbianas.....	43
<b>Figura11.</b> Celdas de desalinización microbiana.....	43
<b>Figura12.</b> Fotografía de Gastrobot (a), Ecobot-1 (b), Ecobot-II (c), cada uno de ellos potenciados por 8 celdas de combustible microbiano y Ecobot-III, potenciado con 48 pequeñas celdas de combustible microbianas(d).....	44
<b>Figura13.</b> Lagunas de estabilización de San José.....	49
<b>Figura14.</b> Proceso operacional del trabajo de investigación.....	57
<b>Figura15.</b> Cocina eléctrica.....	86
<b>Figura16.</b> Estufa para el enriquecimiento del agua residual.....	86
<b>Figura17.</b> Equipo de titulación.....	86
<b>Figura18.</b> Aireador para peceras.....	87
<b>Figura19.</b> Botella de pvc de 500 mL.....	88
<b>Figura20.</b> Unión universal de 1” .....	88
<b>Figura21.</b> Botella de vidrio preparación del consorcio microbiano.....	89
<b>Figura22.</b> Probeta graduada.....	89

<b>Figura23.</b> Reactivos utilizados para la medición del DBOo.....	91
<b>Figura24.</b> punto de muestreo.....	92
<b>Figura25.</b> Muestra obtenida del agua residual.....	92
<b>Figura26.</b> Medición de los parámetros fisicoquímicos.....	93
<b>Figura27.</b> Dilución de la muestra original .....	93
<b>Figura28.</b> Adición de reactivos.....	95
<b>Figura29.</b> Medición de la demanda bioquímica de oxígeno.....	95
<b>Figura30.</b> Burbujeo de aire por 5 minutos y adición de ácido sulfúrico.....	96
<b>Figura31.</b> Toma de 201 mL de la muestra residual tratada.....	98
<b>Figura32.</b> Titulación de la muestra con tiosulfato.....	98
<b>Figura33.</b> Enriquecimiento del agua residual.....	99
<b>Figura34.</b> Electrodo utilizado para las celdas microbianas.....	99
<b>Figura35.</b> Armado de las celdas microbianas.....	100
<b>Figura36.</b> Armado del puente salino.....	101
<b>Figura37.</b> Ensamble del cada uno de las celdas 1,2 y3.....	101
<b>Figura38.</b> Multitester utilizado para medir voltaje.....	101
<b>Figura39.</b> Laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG.....	102

## *CONTENIDO DE GRÁFICAS*

### *Página*

<b>Gráfica 1A:</b> Voltaje generada en la celda 1 vs Tiempo.....	57
<b>Gráfica 1B:</b> Potencia eléctrica de la celda 1 vs Tiempo.....	57
<b>Gráfica 2A:</b> Voltaje generada en la celda 2 vs Tiempo.....	58
<b>Gráfica 2B:</b> Potencia eléctrica de la celda 2 vs Tiempo.....	58
<b>Gráfica 3A:</b> Voltaje generada en la celda 3 vs Tiempo.....	59
<b>Gráfica 3B:</b> Potencia eléctrica de la celda 3 vs Tiempo.....	59
<b>Gráfica 4:</b> Comparación de los potenciales de celda 1,2 y 3 vs Tiempo.....	60
<b>Gráfica 5:</b> Comparación de los potenciales de celda 1,2 y 3 vs Demanda bioquímica de oxígeno inicial.....	60
<b>Gráfica 6:</b> Variación del pH con respecto al tiempo en las celdas 50, 150, 242 mg/L DBO.....	61
<b>Gráfica7:</b> Demanda bioquímica al final del proceso.....	61
<b>Gráfica8:</b> Efecto del pH en rangos donde las densidades de potencia son altos en las celdas con 50, 150, 242 mg/L DBO.....	62
<b>Gráfica9:</b> Resultados de la prueba de normalidad de los residuos con la variable respuesta cantidad de energía eléctrica.....	62
<b>Gráfica10:</b> Gráfica de la interacción de las variables DBO y PH con la cantidad de energía eléctrica.	

## ***RESUMEN***

En el Perú se investigan fuentes de energía que sean renovables, que contaminen en lo mínimo al medio ambiente y al mismo tiempo se pretende aprovechar las aguas residuales con elevados niveles de materia orgánica. El objetivo principal de esta investigación fue determinar la influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas y determinar si los ligeros incrementos del pH en las cámaras anódicas influyen con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano. Se midió la producción de electricidad en  $\text{mW}/\text{m}^2$  a tres distintos DBO, se escogieron tres puntos de pH comunes en las tres celdas y se determinó si el incremento pH tuvo efecto sobre la cantidad de electricidad, se calculó el % de remoción de DBO y el tiempo en que se alcanzó la máxima producción de electricidad. Se recolectó 6 L de muestra de agua residual del canal de descarga a las lagunas de estabilización de San José y se midió el DBO inicial. Se prepararon dos muestras adicionales de 150 mg/L y 50 mg/L de DBO del agua residual original mediante la técnica de dilución con agua destilada. Se probaron tres celdas microbianas con 242, 150, 50 ppm y durante el proceso de experimentación se reconocieron 3 valores de pH comunes a las tres celdas (7.00, 7.24, 7.30), la cantidad de energía eléctrica expresada en  $\text{mW}/\text{m}^2$  se calculó a partir de la medición de los voltajes eléctricos durante varios días. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante un análisis estadístico de varianza. Se consideró un error de 0.05 y un nivel de confianza del 95%. La celda con 242 mg/L alcanzó la potencia más alta de 190.021  $\text{mW}/\text{m}^2$ , un valor 215 % superior a la celda con 50 ppm que produjo un máximo de 60.19  $\text{mW}/\text{m}^2$ . En la celda con 242 mg/L DBO el aumento del pH desde 7.16 hasta 7.19, 7.24, 7.3, 7.32 se obtuvieron las densidades de potencia más altas (175.9  $\text{mW}/\text{m}^2$ ), la celda con 150 mg/L cuando el pH comenzó a aumentar desde 7.15 hasta 7.30, se obtuvieron las densidades de potencia más altas (137.4  $\text{mW}/\text{m}^2$ ), En la celda con 50 mg/L se observó un ligero aumento de

la densidad de potencia al aumentar el pH. El porcentaje de remoción de materia orgánica disminuyó con el incremento de DBO y la celda con 150 mg/L DBO obtuvo el máximo % 86.67, y al incrementar hasta 242 mg/L DBO el % de remoción fue de 76.00. La celda con 252 ppm produjo la máxima potencia eléctrica a las 83.3 h, en la celda con 150 ppm fue de 114.5 h y para la celda con 50 ppm fue de 54.4 h. Se concluyó que los niveles de DBO iniciales en las aguas residuales tuvo un efecto mayor con la cantidad de electricidad producida en CCM a diferencia del pH que su efecto fue menor dado a la presencia del buffer.

**Palabras claves: Celdas microbianas, bioelectricidad, DBO.**

**Área de investigación: Ingeniería y tecnología del medio ambiente.**

## ABSTRACT

In Peru, sources of energy that are renewable are investigated, which pollute the environment to a minimum and at the same time, wastewater with high levels of organic matter is exploited. The main objective of this research was to determine the influence of the levels of biochemical oxygen demand (BOD) of the raw wastewater and determine if the slight increases in pH in the anodic chambers influence the amount of electrical energy using microbial fuel cells. The electricity production in  $\text{mW} / \text{m}^2$  was measured to three different BOD, three common pH points were chosen in the three cells and it was determined if the pH increase had an effect on the amount of electricity, the % of BOD removal was calculated and the time in which the maximum production of electricity was reached. 6 L of residual water sample was collected from the discharge channel to the San José stabilization ponds and the initial BOD was measured. Two additional samples of 150 mg / L and 50 mg / L of BOD were prepared from the original wastewater using the dilution technique with distilled water. Three microbial cells were tested with 242, 150, 50 ppm and during the experimentation process 3 common pH values were recognized in the three cells (7.00 7.24, 7.30, the amount of electric power expressed in  $\text{mW} / \text{m}^2$  was calculated from Measurement of electric voltages for several days The results obtained were evaluated by means of a statistical analysis of variance. An error of 0.05 and a confidence level of 95% was considered. The cell with 242 mg / L reached the highest power of 190,021  $\text{mW} / \text{m}^2$ , a value 215% higher than the cell with 50 ppm that produced a maximum of 60.19  $\text{mW} / \text{m}^2$  In the cell with 242 mg / L dbO the increase in pH from 7.16 to 7.19, 7.24, 7.3, 7.32 obtained the highest power densities (175.9  $\text{mW} / \text{m}^2$ ), the cell with 150 mg / L when the pH began to increase from 7.15 to 7.30, the highest power densities (137.4  $\text{mW} / \text{m}^2$ ) were obtained, in the cell with 50 mg / L a slight increase in potency density was observed a when increasing the pH. The percentage of removal of organic matter decreased with

the increase of BOD and the cell with 150 mg / L BOD obtained the maximum% 86.67, and when increasing to 242 mg / L BOD the% removal was 76.00. The cell with 252 ppm produced the maximum electrical power at 83.3 h, in the cell with 150 ppm it was 114.5 h and for the cell with 50 ppm it was 54.4 h. It was concluded that the initial BOD levels in the wastewater had a greater effect with the amount of electricity produced in CCM as opposed to the pH that its effect was lower given the presence of the buffer.

**Keywords:** Microbial cells, bioelectricity, BOD.

**Research area:** Engineering and environmental technology.

## *INTRODUCCIÓN*

En el Perú y varios países del mundo se está sintiendo cada vez más una relativa crisis energética, dado a que fuentes principales como el petróleo, gas natural y el carbón que son utilizados como materias primas en plantas térmicas para la generación de electricidad (producen el 30% de la electricidad en el Perú) se encuentran agotándose.

De la misma manera nos enfrentamos a otro gran problema, que es la escasez del agua para consumo humano y para la existencia de la vida de cualquier ser vivo en la tierra. Todo ello consecuente por la contaminación que se ha hecho de las fuentes de agua por parte del mismo hombre, sean estos desechos originados de la industria, de las ciudades, etc. Ya que constantemente se vierte por negligencia desechos a los ríos, mares, etc. sin ningún tratamiento o por el deficiente tratamiento que se da en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

La investigación de esta problemática se realizó dado a los diferentes antecedentes positivos que se tiene, y uno de ellos es el trabajo hecho por Galardo.G.A.; Caisaguano.A.E. Denominado “Influencia de la demanda bioquímica de oxígeno en la producción de bioelectricidad dentro de la celda de combustible microbiana”, realizado en el laboratorio de Biotecnología de la Escuela de Ciencias Químicas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador; para aprovechar la demanda de oxígeno de las aguas residuales en la generación de energía sustentable. Se examinó la relación de materia orgánica del agua residual sintética con respecto a la producción de bioelectricidad entre las celdas; utilizando diferentes niveles de DBO. Se demostró que las aguas residuales con altas tasas de demanda bioquímica de oxígeno, daban mayores cantidades de bioelectricidad.

Se ha fundamentado también en los trabajos realizados por Park y Zeikus (2001), Scott y Murano (2007), Aelterman et al. (2006) que utilizaron aguas residuales como fuente materia organica y se logró demostrar que simultáneamente se producía electricidad.

El laboratorio de robotica de Bristol ha reportado el funcionamiento de robots como el EcoBot I, EcoBot II utilizando celdas de combustibles microbianas a través de microbios encontrados en lodos de desechos de alimentos, insectos muertos (Bristol Robotics Laboratory, 2016). En el laboratorio de Investigación Naval se ha desarrollado la celda de combustible bentónica como una fuente persistente de energía para aplicaciones desplegadas en el mar. Estos operan en el fondo del ambiente marino donde oxida la materia organica residente en el sedimento con el oxigeno del agua en las capas superiores (U.S. Naval Research Laboratory, 2008)

No olvidar que el primer prototipo de pila de combustible microbiana (Microbial fuel Cell, MFC) similar a las configuraciones actuales fue lanzado por S. Suzuki en 1973. Al final de la década de los 70, se generó el primer modelo computacional de pila de combustible biológica (di Salvo et al., 1979) a base de aguas residuales.

En nuestro país, que se producen millones de metros cúbicos de aguas residuales al día, provenientes de la urbe en actividades como lavado de ropa, aseo personal, necesidades fisiológicas, etc. y que poseen enormes cantidades de materia orgánico e inorgánico sería importante poder determinar la influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana. Por ello propuse la hipótesis de que la demanda bioquímica de oxígeno inicial de las aguas residuales crudas si tiene influencia con la cantidad de electricidad producida en celdas microbianas. Sin embargo, durante el proceso de experimentación se midió unas ligeras

variaciones del pH en el compartimiento anódico y por ello en este trabajo me encargue de demostrar si tenía un efecto sobre la cantidad de electricidad.

El objetivo principal de esta investigación fue determinar la influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas y determinar si los ligeros incrementos del pH en las cámaras anódicas influyen con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiano. Se midió la producción de electricidad en  $\text{mW/m}^2$  a tres distintos DBO, se escogieron tres puntos de pH comunes en las tres celdas y se determinó si el incremento pH tuvo efecto sobre la cantidad de electricidad, se calculó el % de remoción de DBO y el tiempo en que se alcanzó la máxima producción de electricidad.

El muestreo y la observación fueron muy importantes para la obtención de una muestra de agua residual representativa y en el proceso de la experimentación. Se obtuvieron muy buenos resultados de la incubación de las aguas residuales crudas para ser utilizadas en las celdas de combustible microbianas. Se concluyó que la demanda bioquímica de oxígeno (dbo) de las aguas residuales crudas y el pH si tienen influencia con la cantidad de electricidad producida en celdas microbianas. El pH en menor grado dado a la presencia del buffer.

En los siguientes capítulos se podrá tener una visión más detallada de cada uno conceptos empleados en esta investigación. En el capítulo 1 se explicará el fundamento teórico de funcionamiento de las celdas microbianas, en el capítulo 2 se expondrá la metodología de la investigación y los materiales utilizados, en el capítulo 3 se explicarán los fenómenos que ocurren y sus respectivos sustentos teóricos.

# *CAPÍTULO I*

## **1. Celdas De Combustible Microbiana**

### **1.1. Celdas De Combustible Microbianas.**

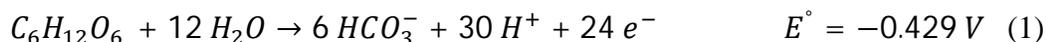
Las celdas de combustible microbiana son dispositivos en el que se convierte la energía química en energía eléctrica por la acción biocatalítica de microorganismos que oxida sustratos biodegradables tales como glucosa, acetatos o materia orgánica presente, por ejemplo, en las aguas residuales.

En condiciones anaeróbicas el resultado de la oxidación de la materia orgánica son un conjunto de gases compuestos por dióxido de carbono, ácidos de cadena corta, gas hidrógeno, protones y electrones, mientras que en condiciones aeróbicas únicamente se produciría dióxido de carbono y agua. Por ello resulta de interés mantener condiciones anaeróbicas para la generación de electrones.

Los electrones generados son transferidos desde las bacterias electrogénicas hacia la superficie del electrodo negativo (ánodo). Esta transferencia puede ocurrir de dos maneras, a través de proteínas conductoras de la membrana celular bacteriana o bien a través de mediadores. Los mediadores (también conocidos como lanzadores de electrones) son sustancias con propiedades redox que actúan como intermediarios entre la membrana celular y el ánodo. Pueden ser añadidos externamente o bien ser excretados como resultado del propio metabolismo microbiano. De aquí, los electrones pasan por un circuito eléctrico externo hacia el electrodo positivo (cátodo), donde son transferidos hacia un aceptor de electrones de alto potencial como puede ser el oxígeno. Una vez reducido el oxígeno, este se combina con protones procedentes del compartimiento anódico a través de la membrana semipermeable, formando agua. La producción de la energía tiene como fundamento clave el uso de bacterias como catalizadores biológicos de la degradación de la materia orgánica.

Las reacciones que se llevan a cabo en aguas residuales son muy complejas. Un sustrato generalmente usado como combustible en las celdas de combustible es la glucosa. Ver Ec. 1 y 2, la ecuación global (3) nos indica que se producirá 0.801 V.

Reacciones de oxidación: Ánodo



Reacciones de Reducción: Cátodo



Reaccion Global



## 1.2. Tipos de celdas de combustibles biológicos

### 1.2.1. Celdas de combustible basadas en biohidrogeno (MFC).

En este tipo de celdas se utilizan bacterias para la generación de hidrogeno molecular. El hidrogeno es el combustible intermediario que es posteriormente utilizado para la generación de electricidad. La producción directa de hidrogeno a partir de varios carbohidratos de la biomasa lignocelular usando celdas microbiales de electrolisis ha sido reportado por Catal (2015). Según Catal, para la producción de hidrogeno a partir de monosacáridos (glucosa, galactosa, manosa, xilosa y arabinosa) y disacáridos (maltosa, sacarosa y celobiosa) se utilizó un cultivo mixto microbiano enriquecido con cloroetano sulfonato y acetato de sodio como fuente de carbono.

Wan, Li, Zang, Wang, Zhang & Zhou (2015), reportaron un nuevo sistema de celda de electrolisis Microbial (MEC) para la generación de hidrogeno que estaba compuesto de una celda de combustible microbiana (MFC) y una celda bio fotoelectroquímica (BPEC). La BPEC consistió de un fotocátodo y un ánodo catalizado microbiallymente.

En el nuevo sistema MEC, el hidrogeno fue producido por el fotocátodo del BPEC cuando este fue iluminado con luz visible, y con el voltaje para la electrolisis suministrado por la MFC. Los electrones producidos del ánodo de la MFC fue transferencia al fotocátodo del BPEC a través de un circuito externo y luego los agujeros fotogenerados capturaron algunos de los electrones emitidos por el ánodo de la MFC bajo la luz visible. Ello evito la recombinación de los pares electrones y agujeros fotogenerados, capturando mas electrones fotogenerados disponibles para las reacciones de evolución del hidrogeno. Bajo la luz visible, el hidrogeno fue continuamente producido a partir del nuevo sistema MEC, con una velocidad de producción de hidrogeno de  $1.35 \pm 0.15$  mL/h (Fig. 2).

### **1.2.2. Celdas de combustible no basadas en biohidrogeno**

En este tipo de celdas se produce un combustible diferente al hidrogeno. Se encuentran aquellas que utilizan microorganismos propios de las aguas residuales para la producción directa de electricidad, sin la necesidad de producir un combustible como un intermediario. No se requiere otras celdas adicionales, sino que se produce en la misma celda en forma simultanea electricidad y la degradación del agua residual. Encontramos variantes como son las celdas combustibles microbinas, de combustible sedimentario y la fotosintética (Fig. 1).

#### **1.2.2.1. Celdas de combustible microbianas**

Son dispositivos que utilizan cultivos puros o mezclas de especies electros génicos puestos en un reactor (celda combustible) para la biodegradación de aguas residuales con la generación simultanea de electricidad.

#### **1.2.2.2. Celdas de combustible sedimentarias (SMFC):**

Son dispositivos que utilizan las comunidades bacterianas nativas de los sedimentos o lodos y que permiten la producción de electricidad. Estos sistemas permiten la producción de pequeñas cantidades de electricidad (hasta el momento, se trata de mejorar su desempeño como generador eléctrico). Por otro lado, y al mismo tiempo, estos sistemas bioelectroquímicos permiten conocer el estado metabólico, actividad y cantidad de bacterias en el suelo sumergido, por lo que son excelentes biosensores metabólicos (Fig.3a).

### **1.2.2.3.Celdas de combustible fotosintéticas (PMFC)**

En este tipo de celdas se utilizan a las plantas y bacterias como los generadores de electricidad. Su funcionamiento se basa en la capacidad de las plantas para captar la luz del sol y aprovecharla para producir sus propios nutrientes. En condiciones en donde el suelo o medio donde se encuentran fijados no poseen buenas condiciones, la planta pasa por un proceso de rizodeposición que es cuando destina la mayoría de sus nutrientes producidos a la fortificación de sus raíces. Hay ciertas bacterias que viven en simbiosis con las plantas y de manera conjunta estas aprovechan los nutrientes de las raíces y las convierten en electricidad. Las bacterias oxidan la materia orgánica y producen electrones, iones ácidos los cuales pasan del ánodo al cátodo (Fig.3b)

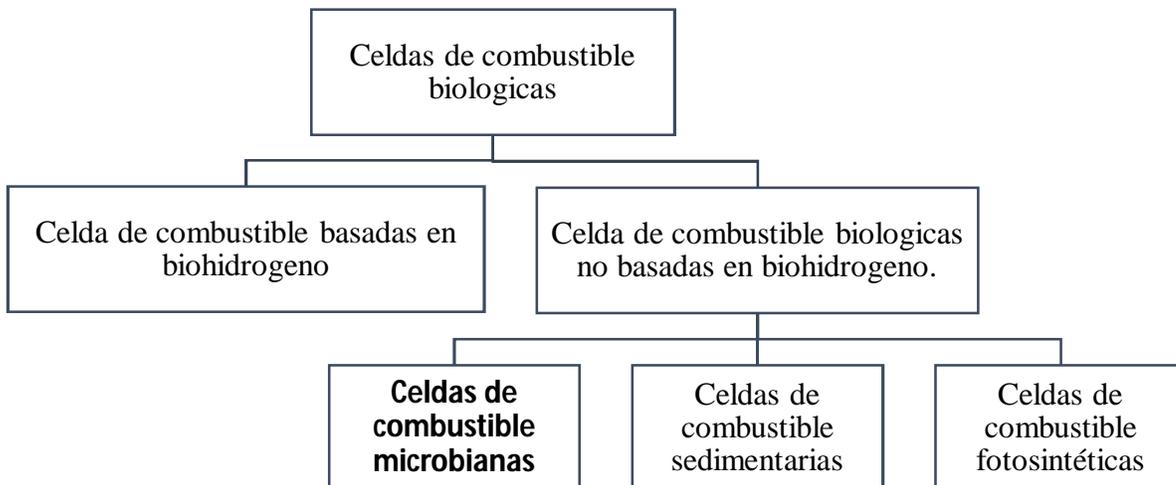


Figura 1. Clasificación general de las celdas de combustible biológicas

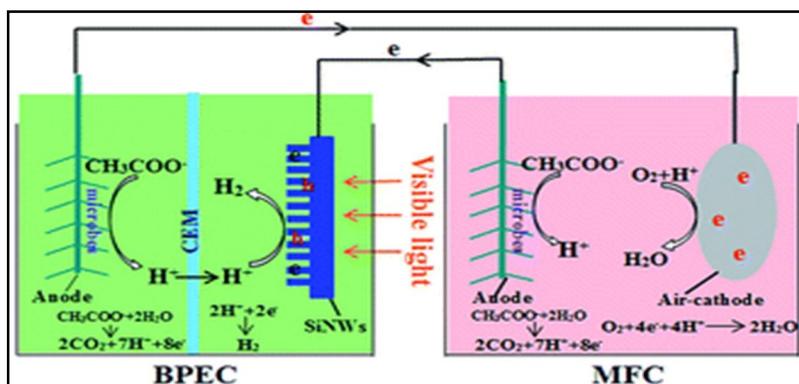


Figura 2. Celda de electrolisis microbiana acoplada a una MFC para la producción de hidrogeno,

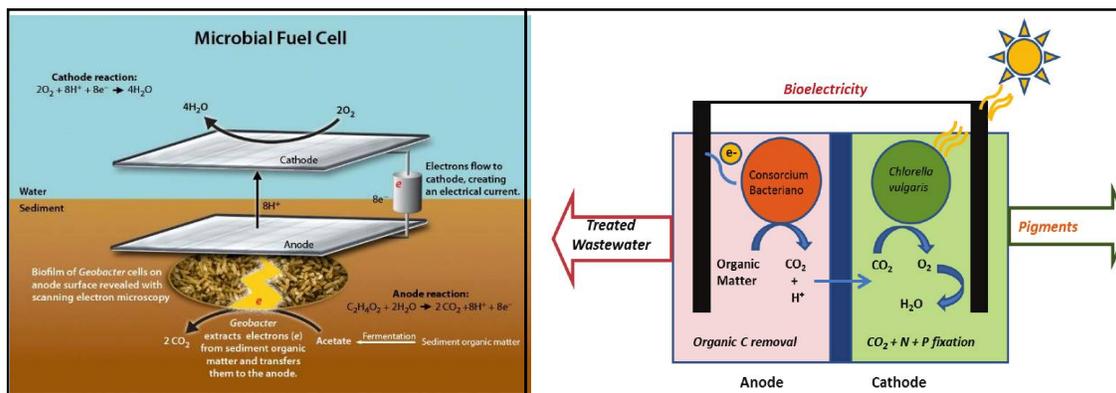


Figura 3. Tipos de celdas de combustible biológicas, tipo sedimentaria (a), fotosintética (b).

Tabla 01. Rendimiento de hidrogeno según el sustrato utilizado en MFC de hidrógeno

Sustrato	$Y_{H_2}$ mol H <sub>2</sub> /mol sustrato	$R_{H_2}$ (%)	Velocidad de produccion (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )
Glucosa	8.55	71	1.23
Celulosa	8.20	68	0.11
Acido acético	3.65	91	1.10
Acido butírico	8.01	80	0.45
Acido láctico	5.45	91	1.04
Acido propionico	6.25	89	0.72
Acido valerico	8.77	67	0.14

Nota: Obtenido de Cheng & Logan (2007)

### **1.3. Mecanismo de generación de electrones durante la oxidación anaeróbica en las celdas de combustible microbiana.**

#### **1.3.1. Generación de los sustratos necesarios para la generación de electricidad**

La oxidación de la materia orgánica presente en las aguas residuales se lleva a cabo en el ánodo, en donde la condición principal es la ausencia de oxígeno y por ende las bacterias deben buscar una ruta alterna para la producción de la energía necesaria para sus procesos metabólicos y reproductivos. En ese caso las bacterias convierten parcialmente los compuestos orgánicos hasta cadenas carbonadas de dos a tres carbonos y en algunos casos hasta dióxido de carbono. Los biodigestores son un ejemplo claro de reactores en donde se desarrollan condiciones anaeróbicas y de alguna manera solo ciertos tipos de procesos se lleven a cabo, como es la etapa hidrolítica, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis.

##### **1.3.1.1. Proceso hidrolítico**

Las aguas residuales son una mezcla compleja formada por proteínas, carbohidratos, grasas, ADN, etc. Y como primer paso son transformadas por bacterias hidrolíticas hasta compuestos simples denominados monómeros, que son mucho más fáciles de degradar para cualquier otra bacteria. El producto de hidrólisis de los carbohidratos son los monosacáridos y disacáridos, de las grasas es el glicerol y ácidos grasos, en las proteínas son los aminoácidos y del ADN, ARN son los respectivos azúcares (ribosa, desoxirribosa), purinas y fosfato.

##### **1.3.1.2. Proceso Acidogénico**

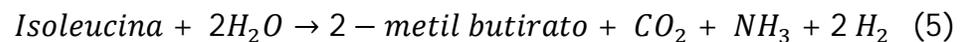
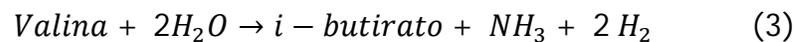
En el proceso acidogénico las bacterias fermentan todos los monómeros que encuentran: azúcares, aminoácidos, alcoholes, ésteres hasta hidrógeno, dióxido de

carbono y ácidos orgánicos de dos, tres y cuatro carbonos (butírico, propionico, acético). Según Baipai (2017), las bacterias acidogénicas y acetogénicas pertenecen a un grupo diverso que incluye a los anaerobios facultativos y obligados. Los organismos facultativos son capaces de vivir en medios tanto aerobios y anaerobios, en cambio las especies obligadas son estrictamente anaerobias. Algunas de las especies aisladas de digestores anaerobios incluyen Clostridium, Actinomyces, Peptococcus, Bifidobacterium, Desulfovibrio, Corynebacterium, Lactobacillus, Staphylococcus, Streptococcus, Micrococcus, Bacillus, Pseudomonas, Seimonas, Veillonella, Sarcina, Desulfobacter, Desulfomonas y Escherichia Coli.

Las proteínas, las grasas y los carbohidratos son metabolizados de diversas maneras, a continuación, se describe los procesos:

#### 1.3.1.2.1. Degradación de proteínas en condiciones anaeróbicas

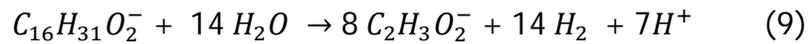
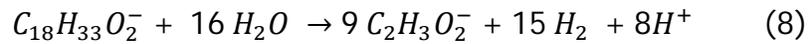
Las proteínas de las aguas residuales son hidrolizadas por proteasas que las descomponen hasta aminoácidos (monómeros). Cada uno de los aminoácidos son posteriormente desaminados (eliminación de amoníaco) y convertidos hasta ácidos orgánicos (butirato, formiato, acetato). (3, 4, 5, 6).



#### 1.3.1.2.2. Degradación de grasas en condiciones anaeróbicas

La degradación de las grasas en las aguas residuales se realiza gracias a la acción de las lipasas y fosfolipasas. Estas escinden las cadenas de grasas en una

molecula de glicerol y tres moléculas de acidos grasos, fosfato y colina o acidos grasos insaturados para facilitar su digestión. Los acidos grasos formados son nuevamente atacados por enzimas de bacterias fermentativas o por bacterias acetogenicas  $\beta$ - oxidativas que las esciden aun mas hasta acetatos Ec. 8, 9 y 10.



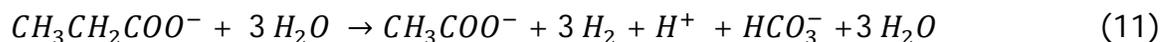
### 1.3.1.3. Proceso acetogénicos

Las bacterias acetogenicas son las encargadas de convertir acidos organicos ligeros hasta una mezcla de hidrogeno, dióxido de carbono y acido acético.

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato,  $CO_2$  e  $H_2$ . Esta oxidación es llevada a cabo por un grupo de organismos acetogenos productores obligados de hidrogeno (OHPA). Aunque la mayoría de este tipo de reacciones consume energia, en ambientes anaerobios donde la energia disponible es baja, el acoplamiento de la actividad de las bacterias con las bacterias consumidoras de  $H_2$  (metanogénicas hidrogenolíticas) permite el balance energético favorable. Las bacterias metanogénicas hidrogenolíticas consume el hidrogeno generado por las bacterias OHPA manteniendo una presión parcial de hidrogeno a un nivel adecuado para que termodinamicamente pueda darse la conversión de los acidos grasos volátiles (AGV) a acetato e hidrogeno. Entre las bacterias acetogenas que se han

podido aislar se encuentra: *Syntrophomonas sapovorans*, *Syntrophobacter wolnili*, *Syntromonas wolfei*, *Syntrophospara bryantii*, *Syntrophus buswellii*.

Dentro de las bacterias acetogenas existe un grupo de bacterias conocidas como bacterias homoacetogénicas, las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el CO<sub>2</sub> como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Rodríguez (s.f.). (Ec. 11).



#### 1.3.1.4. Proceso metanogenico

En esta etapa del proceso se encuentran los microorganismos encargados de producir metano. En base al tipo de sustrato utilizado, las bacterias metanogénicas se subdividen en tres grupos: Aquellos que utilizan como fuente de energía H<sub>2</sub> y alcoholes y como aceptor final de electrones al CO<sub>2</sub> que es reducido a metano (12), los que utilizan una amplia variedad de compuestos que tienen el grupo metilo, de los cuales algunos son oxidados a CO<sub>2</sub> y finalmente reducidos hasta metano, y la obtenida a partir del rompimiento del acetato (13). (Rodríguez, s.f.). Las bacterias metanogénicas abundan generalmente en ambientes donde los aceptores finales de electrones como el O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> son escasos (Fermentaciones y metanogénesis, s.f.), ya que de lo contrario competirían por la ganancia de los electrones y no se generaría metano.

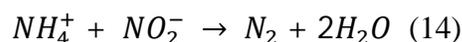
El proceso metanogenico además requiere que el pH sea mantenido muy cercano al neutro, dado a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a los cambios bruscos de pH.





### 1.3.1.5. Oxidación de amoníaco y nitrato a nitrógeno atmosférico

Este proceso se puede dar en océanos, en suelos, en aguas residuales ricas en nitrato y amoníaco. La oxidación de nitrato y amonio hasta nitrógeno molecular forma parte del ciclo del nitrógeno (EC. 14). Entre las bacterias que las realizan se pueden mencionar a las del género *Brocadia*, *Kuenenia*, *Jettenia*, *Anammoxoglobus* y la *Scanlindua*.



Los mecanismos citados anteriormente permiten explicar como las bacterias logran transformar compuestos altamente complejos en sustratos fácilmente degradables y que permiten la producción de electrones (electricidad) en el anodo.

### 1.3.2. Mecanismos para la conversión de los diferentes sustratos en corriente eléctrica

Los microorganismos que tienen la capacidad de generar electricidad son de gran utilidad para la construcción de celdas generadoras de corriente eléctrica. Según Santoro, Arbizzani, Erable, Leropoulos (2017), se han encontrado biopelículas electroactivas conformadas por cadenas de bacterias específicas de *Geobacter Sulfurreducens*, *Rhodospirillum rubrum*, *Shewanella sp.* que tienen la capacidad para intercambiar electrones con sustratos sólidos (electrodos). Pinto (2017), afirmó que los microorganismos pueden activar mecanismos especiales para transferir los electrones, actualmente se conocen tres tipos de transferencia de electrones extracelular (TEE): la transferencia de electrones mediada (TEM), la transferencia de electrones indirecta (TEI) y la directa (TED).

### **1.3.2.1. Biopelícula bacteriana**

Read, Dutta, Bond, Keller, Rabaey (2010) definen la biopelícula como una comunidad microbiana que está adherida a una superficie con la ayuda de una sustancia polimérica extracelular (EPS). La EPS físicamente inmoviliza la bacteria mientras al mismo tiempo proporciona oportunidad para el contacto célula-célula. (Rea et al.). La formación de una biopelícula se inicia con la adhesión y el crecimiento de células en la superficie del electrodo y por ello la secreción de exopolímeros (EPS) como una especie de pegamento para mantenerlos unidos. Una vez que las células se han aclimatado estas tienden a ocupar más áreas del electrodo permitiendo que el número de células que transfieren electrones aumente, además esto está relacionado con la disminución de las pérdidas de electrones debido a la proximidad entre la biopelícula y el ánodo.

Según Read et al., el desarrollo y estructura de una biopelícula son factores importantes a tomar en cuenta, ya que la distancia que debe recorrer el electrón hasta el aceptor de electrones son las restricciones correlacionadas a la distancia existente entre la biopelícula y el ánodo. Baranitharan, Khan, Prasad, Teo, Tan, Jose (2014) demostraron que la formación de una biopelícula en el ánodo tiende a disminuir la resistencia a la transferencia de cargas y por lo tanto mejoraba la producción de energía en una celda microbiana.

### **1.3.2.2. La transferencia de electrones mediada por transportadores no regenerables (TIE)**

También llamada transferencia indirecta, predomina cuando las bacterias oxidan parcialmente sustratos a moléculas más ligeras, tales como hidrógeno o alcoholes. Las moléculas excretadas por las bacterias son especies reducidas que son aún ricas

en electrones y que pueden donar sus electrones a aceptores sólidos(ánodo). Una vez que las moléculas son oxidadas ya no son utilizadas por las bacterias.

### **1.3.2.3. La transferencia de electrones mediada por transportadores regenerables (TEM)**

También llamadas transferencia mediada, es la utilización de moléculas solubles que participan como transportadores de electrones desde la bacteria hasta la superficie del electrodo. La diferencia entre el TEM y el TIE radica en que el primero utiliza mediadores regenerables. Los transportadores de electrones viajan desde el interior de la célula como formas reducidas y una vez que llegan a la superficie del electrodo sufren pérdida de los electrones(oxidación) volviendo a su forma oxidada. El mediador oxidado vuelve nuevamente a la célula completando su ciclo. La Piocianina ha sido identificada como responsable de la actividad electroquímica de la *P. aeruginosa*, la quinona (2-amino-3-dicarboxi-1,4 naftoquinona) para la *S. oneidensis* (Santoro et al).

### **1.3.2.4. Transferencia de electrones directa (TED)**

La transferencia directa de electrones se genera por el contacto íntimo que tiene la bacteria con la superficie del electrodo. Kim, Park, Hyun, Chang, Kim, Kim (2002) reportaron que utilizando la voltamperometría cíclica y celdas microbianas determinaron que la *Shewanella putrefaciens* mostró actividad electroquímica en condiciones anaeróbicas, la cual estuvo estrechamente correlacionada con la capacidad de generación de corriente y potencial eléctrico en la celda de combustible. Se identificaron a los citocromos ubicados en la membrana externa como los que facilitaron la transferencia directa de electrones al electrodo. Además, la concentración del donador de electrones fue crucial para el desarrollo del

potencial y capacidad de generación de corriente. Cuando la concentración de la bacteria y el área de contacto del electrodo fueron altas se obtuvo un alto rendimiento coulombico. Se ha identificado que en la transferencia directa interviene una proteína llamada citocromo tipo c, el cual ha sido demostrado mediante técnicas genéticas en el *G. sulfurreducens* que su eliminación o la sobre expresión tiene enormes consecuencias en la capacidad conductora de las bacterias. (Santoro et al). Según Mahadevan, Gunawardena & Fernando (2014) la distancia mínima para que los transportadores (Citocromos) donen los electrones desde la membrana de la célula hasta el electrodo debe ser de al menos de 10 Å. según Read et al. la transferencia directa ocurre via un flujo directo a través de proteínas de la membrana externa o apéndices bacteriales eléctricamente conductores tales como los nanocables que hacen contacto físico con el ánodo u otras bacterias en la vecindad de la biopelícula.

### **1.1. Bacterias generadoras de electrones o electrógenas.**

Normalmente las bacterias a través de su metabolismo transfieren electrones, desde un donador como la glucosa o materia orgánica a un aceptor de electrones. En una celda de combustible microbiano los electrones son desviados hacia el ánodo, a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble y los electrones fluyen a través de un circuito eléctrico, por lo que se considera que una celda de combustible microbiana convierte un sustrato biodegradable directamente en electricidad. Los microorganismos generadores de electrones o exoelectrogenos fueron estudiados desde 1911, por Potter, habiéndose demostrado la producción de voltaje con *Saccharomyces cerevisiae* y *Escherichia coli*. Desde entonces, fueron descubiertos mensajeros químicos externos

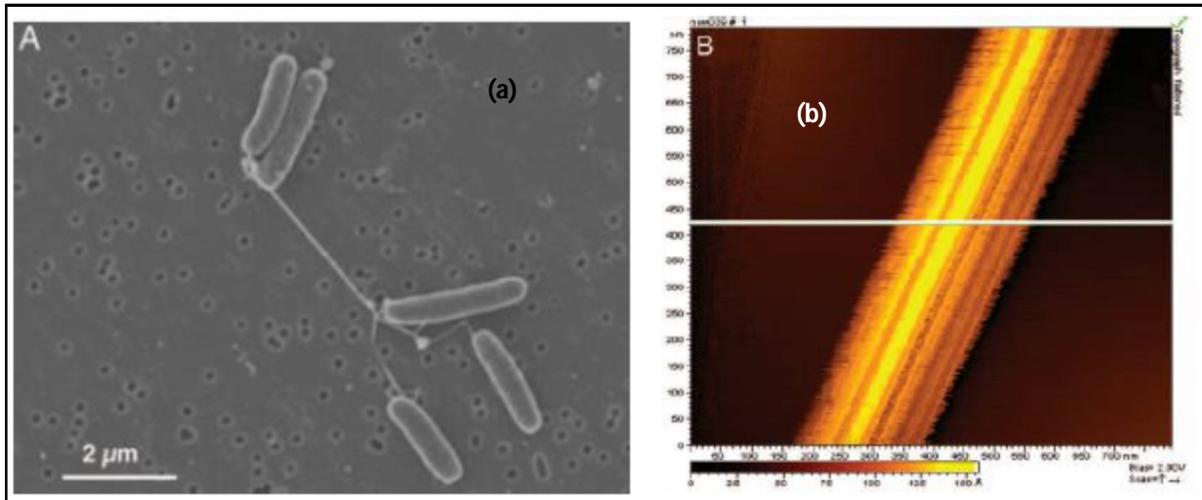


Figura 4. Microscopia de Escaneo electrónico de *S. oneidensis* mostrando pilis de conexión entre dos *S. oneidensis* (a), Aálisis STM de un simple nanocable demostrando conductividad en blanco (b). Gorby et al.

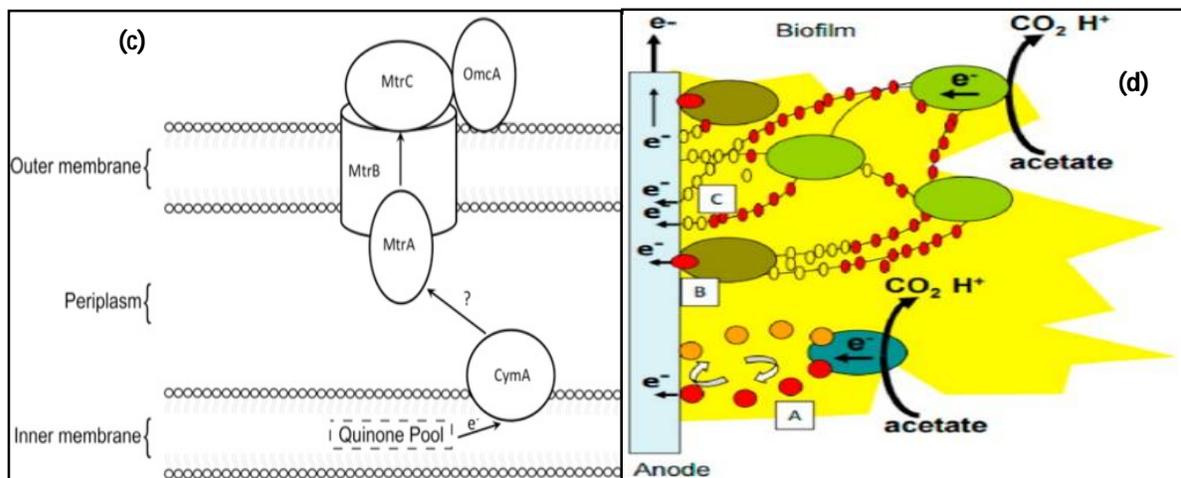


Figura 5. Mecanismo de transferencia directa de electrones (TED) por citocromos (a), Mecanismo de funcionamiento de la biofilms para la producción de electrones(b).

demonstraron como el rojo neutral, 2-6 antraquinonas, disulfonato, tionina y ferricianida de potasio, entre otros; sin embargo, que no es necesario adicionar mediadores externos para el transporte de electrones, debido a que algunas bacterias producen mediadores químicos como la Piocianina, pigmento conocido por sus propiedades antibióticas al inhibir la cadena respiratoria. También se ha demostrado que los metabolitos secundarios como formiato y acetato producidos en la fermentación anaeróbica pueden actuar como transportadores de electrones. Pocos ex electrógenos han sido aislados de las celdas de combustibles microbianos y por lo tanto gran parte de los conocimientos sobre sus propiedades se basan en estudios de cepas bacterianas que han demostrado producir electricidad utilizando el hierro como aceptor de electrones. Los microorganismos pueden metabolizar la biomasa orgánica presente en los residuos sólidos y líquidos obteniéndose una variedad de biocombustibles como son el biometanol, biogás, hidrogeno gaseoso, cuyas reacciones estequiometrias están establecidas.

En el caso de las celdas de combustibles microbianas es:



La reducción de sulfato es un proceso anaeróbico, donde la materia orgánica se oxida y el sulfato se reduce para formar sulfuro, que a su vez reacciona con el ion ferroso ( $Fe^{+2}$ ) u otro metal presente, formando sulfuros insolubles. En el tratamiento de aguas, los sulfuros precipitados pueden removerse fácilmente por sedimentación. Las bacterias sulfato reductoras utilizan sulfato y otros compuestos oxidados del azufre como aceptores de electrones, para obtener energía y pueden constituir inóculos en las celdas de combustibles microbianas, obteniéndose una densidad de potencia calculada de 35.30 uW/ cm-2, que se encuentra en el rango reportado de 4.0 a 360 uW/cm-2.

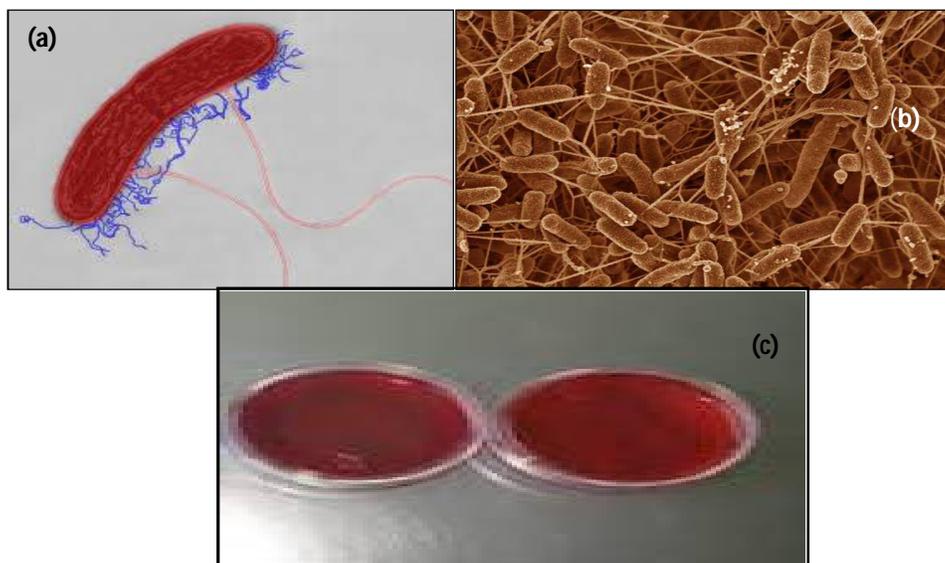


Figura 6: Bacterias electrogénas *Geobacter Sulfurreducens* (a), *shewanella oneidensis* (b), mensajero Químico Piocianina (c).

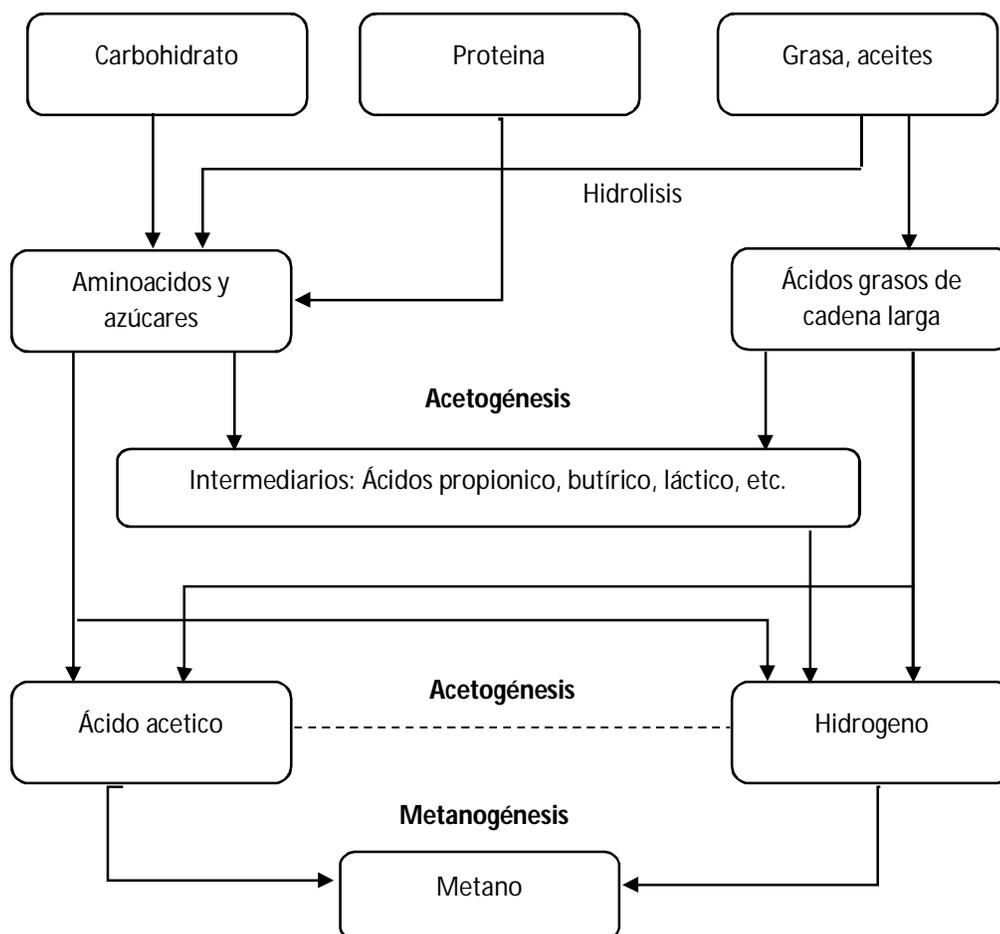


Figura 7: Mecanismo anaeróbico basado en Wilson (2014)

Según Falcón, Lozano, Juárez (2009): “La transferencia extracelular de electrones se puede definir como el proceso en el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones extracelular. Se han planteado diferentes mecanismos para explicar cómo los microorganismos liberan los electrones al electrodo: Transferencia directa con La participación de citocromos, transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo, transferencia de por medio de nanos cables bacterianos o pilis.

Los electrógenos son los microorganismos que liberan la energía generada por la oxidación de compuestos orgánicos a dióxido de carbono y transfieren directamente los electrones a los ánodos de las celdas de combustible microbiana. Estos microorganismos también son denominados anodofilos y entre los más estudiados se encuentran *Geobacter rhodoferrax*, los cuales poseen mecanismos de transporte de electrones internos y no requieren la ayuda de mediadores para liberar dichos electrones al ánodo. La ventaja es obtener la completa oxidación de la materia orgánica, que se traduce en una eficiencia coulombica en el proceso, además de la sustentabilidad a largo plazo, con periodos además de dos años sin disminución de la producción de electricidad”.

En cuanto a los mediadores, son compuestos que pueden ingresar a la célula, aceptar electrones de varios acarreadores intracelulares, salir de la célula en su estado reducido y entonces donar los electrones al ánodo. Los mediadores pueden ser producidos por el mismo microorganismo, como en el caso de las bacterias del *Shewanella*, que liberan quinonas solubles, acarreadoras de electrones de la superficie celular al óxido de hierro (III), aunque este se encuentre a una distancia considerable de la célula, de más de 50  $\mu\text{M}$ .

A su vez los mediadores también pueden ser adicionados exógenamente, como el rojo neutro, fenazinas, fenotiazinas y benzilviolageno, entre otros. La desventaja es que son tóxicos para los humanos y se mantienen estables por corto tiempo, lo cual limita el tiempo de vida de las celdas de combustible microbiano. Respecto a la transferencia por nanos cables o pilis, se han identificado estas estructuras en *Geobacter Sulfurreducens*, *shewanella oneidensis*, una bacteria fototrófica *synechocystis* y un microorganismo fermentador termofílico *pelotomaculum thermopropionicum*. Estos pilis especializados son encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe (III) que están siendo reducidos y deben estar en contacto directo con el ánodo de las celdas de combustible microbiano o formando una red entre las células para facilitar la transferencia de electrones a través de la biopelícula lo mejor posible.

El factor más importante para que una celda de combustible microbiana genere una corriente de electrones que pueda ser es, sin duda alguna, el microorganismo o microorganismos que degradan la materia orgánica en dióxido de carbono y agua con liberación de electrones al sistema. El inóculo bacteriano puede provenir de lodos activados, lodos anaerobios, agua residual domésticas, aguas residuales industriales, sedimentos acuáticos, aunque los mejores resultados se han obtenido empleando lodos activados o anaerobios.

Un factor que tiene gran relevancia en las celdas de combustible microbiana es la formación de la biopelícula en el ánodo. Se han identificado y caracterizado bacterias que conforman los consorcios que participan en la formación de la biopelícula y de la manera importante el aporte de energía. Las relaciones entre los de las comunidades microbianas y como contribuyen al flujo de electrones del ánodo al cátodo, aún no están completamente

comprendidos, así como los mecanismos que favorecen su formación y los procesos metabólicos que intervienen en su establecimiento. Se conoce que los cultivos mixtos generan una mayor energía, en comparación a los cultivos puros, debido a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo y a la participación de bacterias con capacidades metabólicas complementarias, habiéndose reportado que biopelícula constituidas por consorcios enriquecidos, han generado densidades de potencia de hasta 6.9 W/m<sup>2</sup>, acercándose incluso a los límites teóricos. (Anexo 1)

## **1.2. Elementos de las celdas**

Para el funcionamiento de una celda de combustible microbiana se requieren de cinco componentes básicos: los electrodos (ánodo y cátodo), conductor externo, puente salino, el combustible (aguas residuales) y las bacterias electrogénicas quienes hacen la función de los trabajadores. No obstante, las bacterias electrogénicas y las aguas residuales se detallarán de forma separada.

### **1.2.1. Electroodos.**

Los electrodos tienen contacto íntimo con el medio a tratar y son los responsables de desviar los electrones hacia o desde un circuito externo. Se diferencian el cátodo y ánodo. En el ánodo las bacterias oxidan la materia orgánica produciendo electrones y que son conducidos por un conductor externo. En el cátodo se recibe los electrones transportados por el conductor externo y se produce la reducción del oxígeno molecular a agua.

Los materiales usados como ánodo deben ser buenos conductores, biocompatibles y químicamente estables con el medio en el que se encuentran, en este caso son aguas residuales con una alta carga orgánica y bacterias sensibles a materiales tóxicos.

El material más versátil es el electrodo de carbón, disponible como placas, barras o gránulos compactos de grafito o como la forma de material fibroso (tela, fieltro, paño, papel, espuma) y como carbón vidrioso.

En el cátodo se utiliza generalmente al oxígeno es el aceptor final de electrones más adecuado, debido a su alto potencial de reducción, su disponibilidad, bajo coste, la sostenibilidad y la no formación de productos peligrosos (el agua es el único producto formado). La elección de los materiales catódicos afecta en gran medida al rendimiento y es muy diverso según el tipo de pila. El uso de cátodos en los que se utiliza carbono, presenta una cinética muy lenta para la reducción de oxígeno, y solo pueden ser utilizados en sistemas en los que la cinética anódica sea también lenta, de modo que no la reducción de oxígeno en el cátodo no sea un factor limitante.

### **1.2.2. Puente salino.**

El puente salino cumple la función de transportar los protones o iones ácido desde el ánodo al cátodo. Sin la presencia de esta membrana o puente salino no habría flujo de electrones externos. Al existir esta conexión estos iones ácidos viajan a través de la membrana que une los dos compartimientos del ánodo al cátodo permitiendo que reaccionen con el oxígeno molecular y los electrones provenientes del ánodo que juntos cierran este círculo.

La membrana de uso más común para la fabricación de membranas es el Nafion 115 o 117 (DuPont Co, USA) que está a disposición de numerosos proveedores. Y una alternativa al Nafion es la membrana Ultrex CMI-7000 que tiene una mejor relación coste- eficiencia que el Nafion. Cuando una PEM (Membrana intercambiadora de

iones) se utiliza en una celda microbiana es importante tener en cuenta que puede ser permeable a los productos químicos utilizados, tales como oxígeno, iones o de la materia orgánica utilizada como sustrato. Una opción importante a nivel de laboratorio es la utilización de una mezcla sólida de agar y salmura, que es muy útil, barata y estable frente a las bacterias que no la degradan.

#### **1.2.2.1. Conductor externo.**

El conductor externo es el encargado de cerrar el circuito eléctrico en una celda microbiana, ya que transporta los electrones desde el ánodo hacia el cátodo. Desde luego se deben escoger metales con alta capacidad de conducción, no tóxicos, fácil manejo, etc. Los más usados son los cables de cobre y de aluminio. El acoplamiento que realiza el conductor externo metálico al ánodo y al cátodo debe ser consistente y no susceptible de corrosión en el medio en que se sumerge. Así, por ejemplo, podría usarse acero inoxidable, pero no cobre debido a que la presencia de iones de cobre en la disolución, puede resultar tóxico para las bacterias.

#### **1.2.3. Fundamentos de la generación de voltaje en las celdas microbianas**

##### **1.2.3.1. Termodinámica y la fuerza electromotriz**

La electricidad es generada en la celda microbiana solamente si la reacción global es termodinámicamente favorable. La reacción puede ser evaluada en términos de la energía libre de Gibbs expresado en unidades de joule(J), que es una medida del trabajo máximo que puede ser derivado de la reacción, calculada como:

$$\Delta G_T = \Delta G_T^0 + RT \ln(\mu) \quad (7)$$

Donde:

$\Delta G_T$ : Es la energía libre de Gibbs para las condiciones específicas.

$\Delta G_T^0$  : Es la energía libre de Gibbs bajo condiciones estándares usualmente definidas como 298.15 K, a 1 bar de presión y a 1M de concentración para todas las especies.

R:  $8.314 \frac{J}{mol.K}$  es la constante universal de los gases.

T: es la temperatura absoluta, Kelvin

$\mu$ : Es el cociente de reacción calculada como la actividad de los productos dividido por la de los reactantes. La energía estándar libre de Gibbs de reacción es calculada de energías tabuladas de formación para compuestos orgánicos en agua, disponible en muchas fuentes.

Para cálculos en las celdas microbianas, es más conveniente evaluar la reacción en términos de la fuerza electromotriz global de la celda, definido como el diferencial de potencial entre el cátodo y el ánodo. Se calcula de la siguiente forma:

$$W = E_{emf} * Q = -\Delta G_T \quad (8)$$

Donde:

$Q = nF$ ; es la carga transferida en la reacción, expresada en Coulomb (C), que es determinada por el número de electrones intercambiados en la reacción, n es el número de electrones por mol de reacción, y F es la constante de Faraday (96500 C/mol). Combinando estas dos ecuaciones, nosotros tenemos:

$$E_{emf} = \frac{-\Delta G_t}{nF} \quad (9)$$

Si todas las reacciones son evaluadas a condiciones estándares,  $\mu = 1$ , luego:

$$E_{emf}^o = -\frac{\Delta G_t^o}{nF} \quad (10)$$

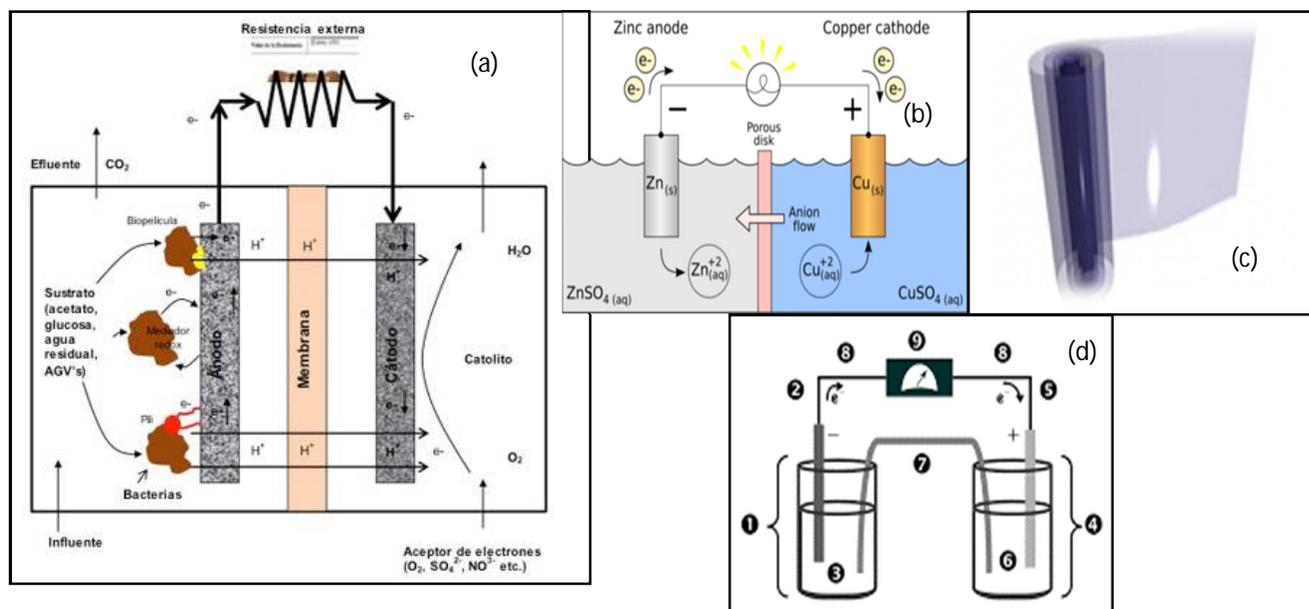
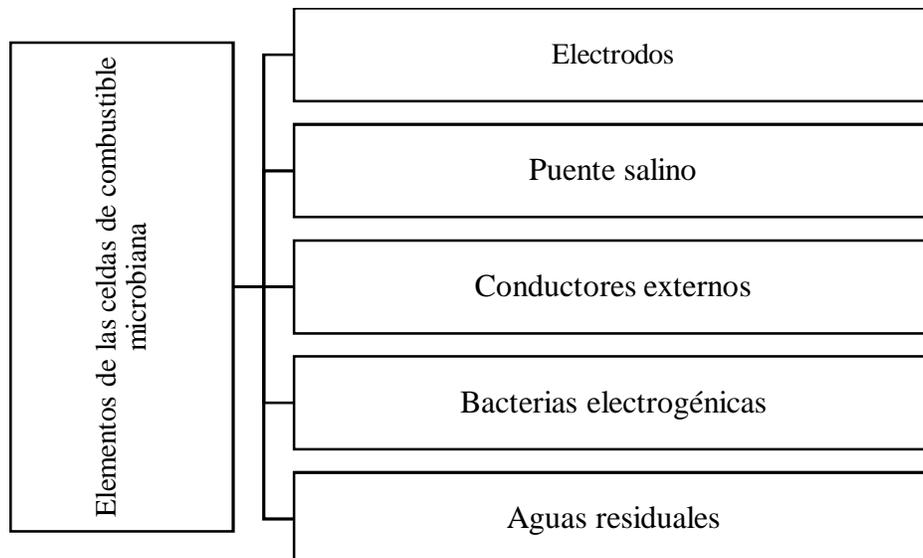


Figura 8. Elementos de una celda de combustible microbiana (a), electrodos: ánodo y cátodo (b), membrana de intercambio iónico (c), circuito eléctrico en una celda microbiana (d).

Donde  $E_{emf}^o (V)$  es la fuerza electromotriz estándar de la celda, nosotros podemos por lo tanto las ecuaciones anteriores para expresar la reacción global en términos del potencial como:

$$E_{emf} = E_{emf}^o - \frac{RT}{nF} * \ln(\Psi) \quad (11)$$

#### **1.2.4. Factores que influyen en la eficiencia de la celda de combustible microbianas.**

El buen funcionamiento de las celdas de combustible microbiano, depende del buen control de ciertos factores que incluyen el tipo de consorcio microbiano utilizado, el tipo y concentración de biomasa utilizada como combustible, fuerza iónica, pH, temperatura, resistencia externa, mediadores de electrones. Los parámetros de operación pueden ser regulados para bajar la polarización y así aumentar el desempeño de una celda de combustible microbiano. A continuación, se mencionan algunos parámetros que se toman en cuenta:

##### **1.2.4.1. pH del medio de reacción.**

Si no hay una solución amortiguadora en una celda microbiana, se producirá un diferencial de pH entre la cámara anódica y la catódica, aunque teóricamente no habría cambio de pH cuando la velocidad de reacción de protones y oxígeno en el cátodo es igual a la velocidad de producción de protones en el ánodo. La membrana de intercambio de protones se comporta como una barrera para el paso de otras moléculas; pero no para el transporte de protones. El paso de los protones a través de la membrana es más lento que su velocidad de producción en el ánodo y su velocidad de consumo en la cámara catódica en la etapa inicial de la operación de la celda. Así trae una diferencia de pH; sin embargo, la diferencia de pH incrementa la fuerza motriz de la difusión de protones en la cámara anódica a la cámara catódica y finalmente forme un equilibrio dinámico. Algunos de los

protones generados por la biodegradación de sustratos orgánicos transferidos a la cámara catódica pueden reaccionar con el oxígeno disuelto, mientras que algunos protones son acumulados en la cámara anódica cuando ellos no se transfieren a través de la membrana de intercambio de protones o de puentes salinos rápidamente a la cámara catódica. Gil et al. Detecto una diferencia de pH de 4.1 después de 5 horas de operación con un pH inicial de 7 sin utilizar amortiguadores. Con la adición de un amortiguador de fosfatos (pH = 7), el cambio de pH en el ánodo y cátodo fue menor de 0.5 unidades y la salida de corriente se incrementó alrededor de 1 a 2 veces (Falcón et al, 2009). Sin embargo, el proceso microbiano anódico prefiere un pH neutral y las actividades microbianas disminuyen en un pH más alto o más bajo, por lo que el empleo de amortiguadores es fundamental.

Para mantener un pH= 7 se debe utilizar una mezcla de:

$KH_2PO_4$  ..... *fosfato Dihidrogeno de potasio*

$K_2PO_4$  ..... *hidrogeno fosfato de dipotasio*

$K_3PO_4$  ..... *fosfato de potasio*

#### **1.2.4.2. Uso de mediadores de electrones**

Los mediadores de electrones ayudan a facilitar el transporte de electrones desde las bacterias hasta la superficie de los electrodos. Sund, Masters Harrell, Summer (2007), analizaron el efecto que tendrían los mediadores de electrones tales como 9,10 antraquinona-2,6 ácido disulfónico disódico, safranina O, rezasurina, azul de metileno y ácidos húmicos sobre los metabolitos finales que se obtenían en una MFCs. Concluyeron que la rezasurina aumentaba grandemente la producción de corriente; pero, no hubo cambios en los productos finales en comparación a las MFCs sin mediador. Los ensayos con lactato, acetato, y etanol indicaron que la presencia de

safranina disminuyó los metabolitos finales esperados, el azul de metileno incrementó la formación de lactato, los ácidos húmicos incrementó los metabolitos examinados. Se debe tener en cuenta que la concentración del mediador sí influye en la resistencia interna de las celdas, y así lo demostraron Taskan, Ozkaya, Hasar (2014) cuando estudiaron la eficiencia de las MFCs usando tres diferentes mediadores: Azul de metileno (MB), rojo neutral (NR) y 2-hidroxi-1,4-naftoquinona (HNQ). Estos fueron añadidos en concentraciones de 50, 100, 200, 300 y 400  $\mu\text{M}$ , concluyéndose que la máxima densidad de potencia para el MB, NR y HNQ fue de 300, 200, 50  $\mu\text{M}$ .

#### **1.2.4.3. Polarización de los electrodos.**

Según Ferrer & Carrera (1992), la polarización de un electrodo ocurre por la circulación de una corriente eléctrica que genera una variación en la concentración iónica que los rodea, aumentando el negativo (ánodo) y disminuyendo el positivo (cátodo). Este efecto se acentúa al aumentar la densidad de la corriente, el cual depende de la resistencia exterior (suponiendo una resistencia interna constante).

Según Pinto, Coradin, Robert (2017), la variación del potencial aplicado sobre el bioanodo afecta la formación y la electroactividad de una biopelícula establecida por *Shewanella oneidensis* en un electrodo de fieltro de grafito. Al variar el potencial de -0,3 V a +0,5 V y su aplicación inversa a un par de electrodos condujo a comportamientos electroquímicos, corriente anódica y a una arquitectura de la biopelícula distintas. Así cuando la bacteria fue confinada en el compartimiento anódico de una celda de doble cámara con la aplicación de un potencial negativo (-0,3V) en el bioanodo, se favoreció la transferencia mediada de electrones que se correlaciona con la progresiva formación de una biopelícula que llenó la porosidad

del fieltro y unió las fibras de grafito. Por el contrario, la aplicación de un potencial positivo (+0.3) en el bioanodo, estimuló una transferencia de electrones directa, resultando en una rápida colonización bacteriana de las fibras solamente.

Grobler, Virdis, Nouwens, Harnisch, Rabaey, Bond (2017), reportaron que la *Shewanella oneidensis* MR-1 puede utilizar la transferencia de electrones directa (DET) y la mediada (MET) como mecanismos para facilitar la transferencia extracelular de electrones (EET) en función al potencial anódico aplicado. Para ello se cultivaron *S. oneidensis* en celdas electroquímicas a diferentes potenciales ánodos desde +0.71 V, +0.21 V & -0.19 V, mientras la producción de corriente fue monitoreada simultáneamente. Utilizando técnicas electroquímicas y moleculares para el estudio del perfil proteómico del crecimiento del *S. oneidensis* a diferentes potenciales ánodos, se concluyó que el incremento en la producción de corriente se debió a la abundancia de proteínas EET y proteínas para la síntesis de mediadores de EET.

#### **1.2.4.4. Resistencia eléctrica externa**

Según lo reportado por Gonzales del campo, Cañizares, Lobato, Rodrigo y Morales (2014), cuando se incrementa la resistencia externa la potencia eléctrica tiende a disminuir. Además, la remoción de COD también disminuye cuando se incrementa la resistencia externa. La resistencia externa afecta la eficiencia de las celdas de combustible (MFCs) mediante el control al flujo de electrones desde el ánodo al cátodo (Rismani, Christy, Carver, Dehority, Tuovinen, 2011). Una resistencia externa muy alta actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo, con un aumento en la resistencia interna de la celda. En la prueba utilizando

*Shewanella oneidensis* se verificó la presencia de masas de biofilm y sustancias poliméricas extracelulares en el ánodo con una resistencia más alta (Liu, Yu, Li, Canción, Yan, Chen, 2016).

#### **1.2.4.5. Concentración de la materia orgánica.**

La alta concentración de sustrato estimula una elevada generación de electricidad en una variedad de concentraciones. Park y Zeikus determinaron que aumentando la concentración de lactato hasta 200mM se obtiene como resultado valores altos de energía en una CCM inoculada con *S.putrefaciens*. Investigaciones Moon et al (2006) indagaron el efecto de la concentración de sustrato en el rendimiento de una CCM, en este estudio se encontró además que la densidad de potencia se fue acreciendo con el aumento de la concentración del sustrato. Un trabajo reciente, se investigó que operando seis CCMs con agua residual diluida con agua des ionizada derivado de la industria cervecera, con un rango de concentraciones de 84 a 2240 mg DQO/L, se logró un aumento de la densidad de potencia de 29 a 205 mW/m<sup>2</sup>, correspondiente, pero la separación de DQO reveló directrices a un máximo relativo, extendió de 54 a 98% mientras la concentración del agua residual se modificó de 84 a 1600 mg DQO/L y reduce a 87% cuando la concentración de materia orgánica presentó un valor de 2240 mg DBO/L. No obstante, cuando se amplió la concentración de materia orgánica, la densidad de potencia bajo en casi 63%. (Feng.; et al.; 2008). Caisaguano y Galardo (2015)

#### **1.2.4.6. Temperatura**

Según lo reportado por Feng, Wang, Logan, Lee (2008): Disminuyendo la temperatura desde 30°C a 20°C redujo la densidad de potencia máxima, mientras que la remoción

de demanda química de oxígeno (COD) disminuyó ligeramente con la temperatura. Song, An, Chae (2017) probaron el efecto que tendría aumentar la temperatura de 25 a 35 y luego hasta 45°C y bajando nuevamente hasta 25°C en la densidad de potencia máxima. Llegando a la conclusión que durante todo el proceso de generación de electricidad la temperatura con que se inicia debe mantenerse constante, ya que si se varia podría influir de manera negativa en la eficiencia de la MFC. La celda a 25°C obtuvo la máxima potencia en comparación a las temperaturas 35 y 45°C, después de aumentar la temperatura y volver a las condiciones iniciales su desempeño no fue la misma. Las bacterias en una MFCs tardan un periodo de tiempo para aclimatarse a las condiciones impuestas como son una cierta temperatura, pero al variarse, va a tener que volver a aclimatarse y en su intento pueden morir.

Prasertsung & Ratanatamskul (2013), examinaron el efecto de la velocidad de carga orgánica y la temperatura de operación de las aguas residuales en la potencia generada utilizando MFCs. Las temperaturas seleccionadas fueron en el rango de 30°C (condición mesófila) y 45 °C (condición termofílica); no obstante, se obtuvo una mayor densidad de potencia con la primera.

Tabla 2. Factores de control en celdas microbianas

Parámetro de control	Efecto en la cantidad de electricidad mW/ m2		Ausencia-Parámetro de control
Buffer pH-presencia	Aumenta, debido a que mantiene un pH constante que favorece el crecimiento de bacterias en las superficies de los electrodos.	Disminuye, ya que ante un cambio brusco de pH afecta el crecimiento de bacterias y por ende la producción de electrones.	Buffer pH-Ausencia
concentración de DBO	Un incremento en la concentración del sustrato aumenta la cantidad de electricidad; no obstante, llegado a una concentración máxima esta causa efecto inverso.		
mediadores de electrones(ME)	La presencia de ME Aumenta la cantidad de electricidad en comparación a sistemas sin mediador, ya que facilita el transporte de electrones desde las bacterias al ánodo.		
Resistencia externa	El incremento de la resistencia externa hasta un valor límite aumenta la cantidad de electricidad; no obstante, un valor más alto a este tiende a causar efecto adverso.		

Nota: Ref significa referencia, \*se expresa en mA/ cm<sup>2</sup>, \*\* se expresa en W/m<sup>3</sup>, (-) no se reportaron.

Sustrato	Configuración MFC	pH en anolito	Fuente Microorganismo	Inóculo/cultivo	Concentracion inicial de DBO (g/L)	% Remocion DQO
Aguas residuales diarias	MFC doble cámara	7.0	-	-	1.6	91
Aguas residuales diarias de la industria	MFC doble cámara	7.0	-	-	3.6	90
Aguas residuales domesticas	-		Lodo anaeróbico	-	0.6	-
Sustrato complejo	-			Escherichia coli	-	-
Aguas residuales	MFC doble cámara		Aguas residuales	Consortio microbiano	-	-

Tabla 3. Antecedentes de celdas de combustible microbiana (Continuación)

Continuacion....	Maxima densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )	CE (%)	Material del cátodo	Membrana de intercambio ionico	Ref.
-	192	17	-	-	
-	621	37	-	-	
-	0.06*		-	-	Wang et al (2009)
-	600		-	-	Zhang et al. (2007)
Papel carbón	309 (** 77)	65	Tela de carbón (0.5 mg/cm <sup>2</sup> , 10 % Pt	Nafion 117	Mind and Logan (2004)

Fuente: Rabaey, Clauwaert (2006); Gude (2016); Chaturvedi, Verna (2016),

### **1.3. Aguas residuales**

Las aguas servidas o aguas negras son los desechos líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial. Llevan consigo disueltas o en suspensión materia orgánica e inorgánica. Proviene de la descarga de sumideros, fregaderos, inodoros, cocinas, lavanderías (detergentes), residuos de origen industrial (aceites, grasas, curtiembres, etc.). Donde existen sistemas de alcantarillado todas confluyen a un sistema colector de aguas cloacales o residuales, que deberían terminar en una planta de tratamiento.

#### **1.3.1. Tipos de tratamientos de acuerdo a los niveles de DBO y sólidos en suspensión**

Para el tratamiento de aguas residuales existen una infinidad de métodos, no obstante, se debe tener en cuenta que de acuerdo al contenido de demanda bioquímica de oxígeno se puede utilizar uno u otro método (Tabla 10).

#### **1.3.2. Biodegradabilidad**

Las aguas residuales llevan consigo numerosas sustancias disueltas o en suspensión, de las cuales no todas son biodegradables. Y la biodegradabilidad de las sustancias hace posible ser depuradas por medio de microorganismos, los que utilizan las mismas como alimento y fuente de energía para su metabolismo y reproducción.

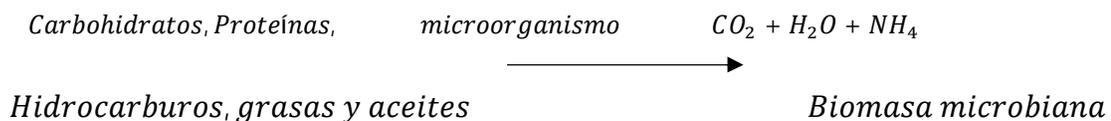
La biodegradabilidad está relacionada con dos parámetros importantes como son: DBO<sub>5</sub> y DQO. Según Osorio y Peña: Se hace una aproximación cuantitativa de la biodegradabilidad de un efluente, que es dado por la relación entre la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. De este índice se tiene una referencia de la Biodegradabilidad de un efluente determinado (Hernández, 1992). Si se presentara el caso en donde  $DQO/DBO_5$  es menor de 0.2 se recomienda un tratamiento fisicoquímico, si  $DQO/DBO_5$  es mayor de 0.4 se considera una fuente biodegradable. En

caso que se tenga DQO/DBO<sub>5</sub> mayor de 0.65 entonces los vertidos se consideran orgánicos y aptos para tratamientos biológicos (Calderón, Díaz, Gonzales, s.f). En conclusión, hay que tener en cuenta que la Biodegradabilidad no es una propiedad neta de las aguas residuales, sino que depende de la población microbiológica a la que se enfrenta (Osorio & Peña). A mayor población microbiana, mayor podrá ser la biodegradabilidad. Para degradar los distintos tipos de materia presente en las aguas residuales hace uso de una enorme cantidad de enzimas (proteinasas, Carboxidasas, amilasas, lipasas, etc.) (Tabla N° 01).

### 1.3.3. Caracterización de las aguas residuales.

#### 1.3.3.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C, para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente. Para la obtención de una medida que sea estable y confiable se mide el DBO<sub>5</sub>, que mide la demanda de cinco días. A continuación, se muestra un esquema de como la bacteria degrada la materia orgánica:



Durante los primeros dos días, los microorganismos rápidamente metabolizan los compuestos orgánicos disponibles y viables de degradar biológicamente. Tales cinéticas son obtenidas siempre que las condiciones medioambientales sean apropiadas, tales como: pH neutro, presencia de un inóculo lo suficientemente aclimatado, presencia de una cantidad adecuada de nutrientes minerales necesarios para el crecimiento microbianos (de particular importancia son N, P, Ca, Mg, Fe, S).

En investigaciones se ha demostrado que gran parte de los microorganismos metabolizan aeróbicamente los sustratos orgánicos, tales como lípidos, azúcares, alcoholes o proteínas, tal que alcanzan un máximo rendimiento de producción celular de 0.4 g de células en peso seco por gramo de DBO eliminado (Sikes,1975).

Este valor es de gran importancia ya que se relaciona con la cantidad de energía oxidable en el sustrato el cual es microbiológicamente usable por las células para sus requerimientos de energía y su posterior síntesis.

Esto implica que, cuando los microorganismos metabolizan aeróbicamente 1g de DBO, estos inmovilizan aproximadamente la mitad de la materia orgánica en la forma de biomasa y consumen oxígeno para oxidar la otra mitad. Lo que lleva a relacionar el máximo rendimiento celular y no tiene en cuenta la manutención del metabolismo de la bacteria durante la segunda fase del ensayo.

La respiración endógena constante para los cultivos microbianos promedio es aproximadamente 10 g de oxígeno consumido por gramo de biomasa peso seco por día. Se cita la siguiente relación para determinar el DBO<sub>5</sub>.

$$DBO_5 = O_2(\text{para crecimiento 1-2 días}) + O_2(\text{para respiración de biomasa 3-4 días})$$

$$DBO_5 = [DQO * 0.5] + [DQO * 0.40] * 0.1 * 3.5$$

$$DBO_5 = DQO * 0.65$$

### 1.3.3.2. Demanda Química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

En la práctica, la materia orgánica en agua es oxidada por K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> bajo condiciones estrictas (en medio de ácido sulfúrico concentrado, y a una temperatura de 160°C).

La cantidad de oxígeno del dicromato usado, es determinada y expresada como DQO (Osorio, Peña).

En aquellos casos en donde la fórmula de los compuestos es conocida, la DQO puede ser derivada de la estequiometría. Se tiene que 1 eq-g de carbohidrato o 1 eq- g de proteína corresponde a 1 eq-g de CO<sub>2</sub>. Se debe destacar que la DQO no incluye el oxígeno que convierte el nitrógeno reducido a nitrato. En cuanto al sulfuro reducido (R-S-H), sin embargo, es oxidado a sulfuro por los agentes químicos y por consiguiente se incluye en el valor de DQO (Osorio, Peña).

Una importante ventaja de este método es que cuantifica tanto la materia orgánica disuelta como la particulada. Considerando el hecho que el tratamiento de aguas residuales tiene que ver con la separación de ambos tipos de materia orgánica, la medida de DQO es ampliamente usada como parámetro cuantitativo. A continuación, se presenta algunos valores de DQO en relación a la concentración de sustrato: 1 g/l de glucosa posee una DQO de 1.4 g/l (Henze, 1995), 1 g/l de grasa de cerdo corresponde 2.1 g/l de DQO y 1 g/l de aceite girasol a 2 g/l de DQO (Cisterna, 1997).

#### **1.3.3.3. Nitrógeno amoniacal y orgánica**

El nitrógeno es uno de los elementos más importantes para la vida, pero es muy escaso en el agua. Sus fuentes principales son el aire (asimilado por algunas algas), adobos y materia orgánica en descomposición (hojas y aguas fecales). El nitrógeno que proviene de la descomposición de vegetales, animales y excrementos pasa por una serie de transformaciones. En el caso de los vegetales y animales, el nitrógeno se encuentra en forma orgánica. Al llegar al agua, es rápidamente transformado en nitrógeno amoniacal, pasando después a nitritos y finalmente a nitratos. Esas dos

últimas transformaciones solamente ocurren en las aguas que contengan bastante oxígeno disuelto, pues son efectuadas por bacterias de naturaleza aerobia- llamadas nitrógeno bacterias. De esa forma, cuando encontramos mucho nitrógeno amoniacal en el agua, estamos en presencia de materiales orgánicos en descomposición y por lo tanto en un medio pobre en oxígeno. (Fuente: Universidad Tecnológica de Panamá Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas Laboratorio de Sistemas Ambientales)

#### **1.3.3.4.Sólidos disueltos Totales**

Los sólidos sedimentables es el material de sedimentación que se desprende de la suspensión en un periodo definido. Los sólidos están formados por partículas más densas que el agua, que se mantienen dispersas dentro de ella en virtud de la fuerza de arrastre causada por el movimiento o turbulencia de la corriente. Por esta razón sedimentan rápidamente por acción de la gravedad cuando la masa de agua se mantiene en reposo. Para cuantificarlos se utiliza los sólidos sedimentable totales, SST. (Becerra, Gonzales, Ruiz, Mendieta, 2017)

$$SST \left( \frac{mg}{l} \right) = \frac{(peso \text{ antes de filtrar} - peso \text{ despues de filtrar}) \text{ mg}}{volumen \text{ de muestra de agua}(L)}$$

### **1.4. Utilización e instalación de las celdas de combustible biológicas en la vida moderna**

#### **1.4.1. Produccion de electricidad en instrumentos de monitorización oceanográficas**

Las celdas de combustible biológicas tipo sedimentario ha logrado tener muy buena aceptación en campos como la oceanografía, los hechos son corroborados por los últimos resultados obtenidos por el investigador químico y Jefe de la Rama en el Centro de Ciencia Bio/Molecular e Ingeniería en el Laboratorio de Investigación Naval de los EE. UU, el Dr. Lenny Tende quien es también el co-inventor de un tipo de celda de

combustible microbiana que utiliza los sedimentos marinos, la aplicación ha revolucionado el campo de estudio de la oceanografía al utilizar bacterias presentes en muchos sedimentos marinos para la generación de electricidad de manera indefinida para ser utilizados en los instrumentos utilizados en estudios oceanográficos. Las baterías que utilizaban los instrumentos tenían la desventaja de poseer un tiempo de vida determinada y pasado ese periodo se tenía que cambiar, haciendo una operación costosa y riesgosa. (Fig. 9).

#### **1.4.2. Celdas de combustible microbianas de robot híbridos que transforman el agua contaminada en vegetación**

Las celdas de combustible microbiana son el instrumento fundamental para transformar lo indeseado en vida. Un ejemplo que se puede citar, es el brazo de un robot móvil que transforma agua contaminada en plantas vivas. El descubrimiento fue realizado por Gilberto Esparza de Mexico. Según Esparza: “Usando una celda de combustible microbiana, el robot esta diseñado para funcionar con las bacterias que se encuentran en el agua contaminada, que descomponen y la transforman en energía que alimenta los circuitos cerebrales del robot. Esto a su vez permite que la vegetación transportada crezca. Cuando estos microorganismos necesitan alimento, la maquina busca agua sucia que luego se descompone para generar energía, cualquier excedente se usa para emitir un ruido y sostener las plantas que lleva en la espalda. La máquina y las plantas se vuelven co dependientes.” (Fig. 10).

#### **1.4.3. Celdas de combustible microbiales utilizados en la desalinización**

La desalinización del agua es una de las opciones que se han manejado desde hace años para la conversión del agua salada en dulce, dado a la escasez de fuentes de agua dulce. La desventaja del proceso es que se requiere una gran cantidad de energía para favorecer la separación de las sales del agua. En el mercado actual se comercializa equipos para la desalinización del agua como son osmosis inversa, la electrodiálisis, entre otras. Según los últimos reportes dados por Santoro, Arbizzani, Erable, Leropoulos se ha desarrollado la tecnología que acopla la desalinización del agua (osmosis inversa, la electrodiálisis) con las celdas de combustible microbiana. En la Fig 11 se observa como el agua salada circula por el compartimiento central, por el ánodo el agua residual y por el cátodo un mediador de electrones como es el ferricianuro. En el ánodo la materia orgánica se oxida gracias a la presencia de microorganismo, y como producto se obtienen dióxido de carbono, electrones e iones ácidos. Por el principio de neutralidad, la generación de iones ácidos produce el flujo de iones cloruro desde el compartimiento central hacia el ánodo. En el cátodo sucede algo muy similar, los electrones generados en el ánodo fluyen por el conductor externo hacia el cátodo, allí el ferricianuro se reduce hasta ferrocianuro y por el principio de neutralidad sucede el paso de iones sodio para neutralizar la carga adicional.

#### **1.4.4. Robotica**

EcoBot-I fue reportado como el primer robot que fue directamente potenciado por MFCs alimentadas con glucosa sin utilizar baterías, celdas solares o ninguna forma de fuente de potencia convencional. EcoBot-I empleó capacitores electrolíticos para temporalmente almacenar la energía desde la MFC, y una vez completamente llena, la energía fue liberada para activar el motor de locomoción y moverse hacia la luz

(comportamiento fotocatalítico). En el 2005, EcoBot-II fue reportado, que en adición a ser fototáctico, fue también capaz de reportar temperatura de forma inalámbrica, sin ser dependiente de mediadores químicos (Diferencia de EcoBot-I y Gastrobot). Esos tempranos reportes mostraron que es posible tener agentes artificiales potenciados por metabolismo microbiano internamente en MFCs, pero no demuestran el elemento esencial de la autosostenibilidad (o autonomía energética), ya que desde que el hombre interviene para reemplazar químicos y la alimentación de las MFCs. El primer ejemplo de un robot autosostenible que tuvo su propio sistema circulatorio y fue capaz de completar el ciclo termodinámico de ingestión, digestión y egestión fue el EcoBot-III. El robot demostró autonomía y simultáneamente mostró que la miniaturización de las MFCs y multiplicando las unidades dentro de una pila, es un enfoque viable para el escalamiento de esta tecnología (Fig. 12).

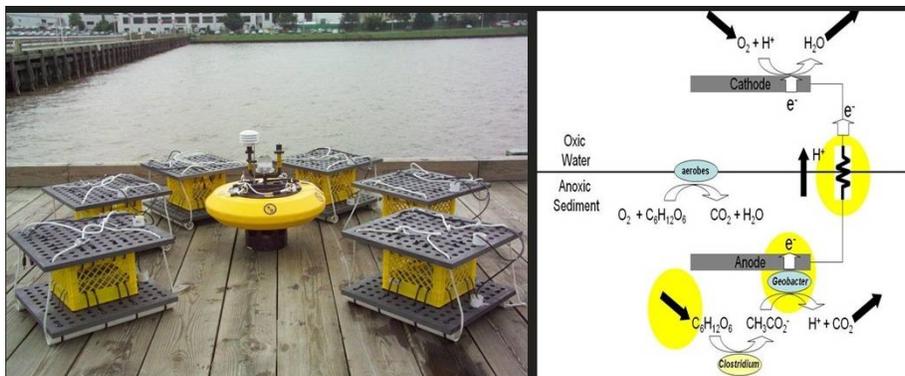


Figura 9: Boya de datos meteorologicos(centro) y una matriz de seis generadores de tipo celda de combustible microbiana bentónica desplegado en agosto del 2004 en el rio Potomac.

Nota: Foto tomada con permiso de Jamie Hartman, Laboratorio de Investigacion Naval de EE. UU.

10:



Figura Robot

hibrido equipado con celdas de combustible microbianas.

Nota: Foto tomada con permiso de Gilberto Esparza, Laboral Art and Industrial Creation Center, Guijon, España.

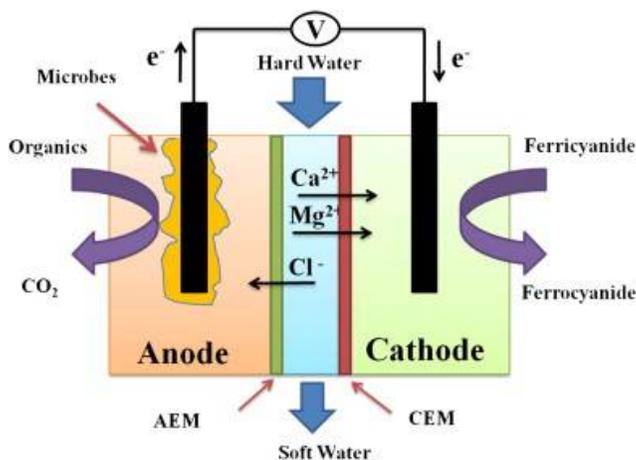
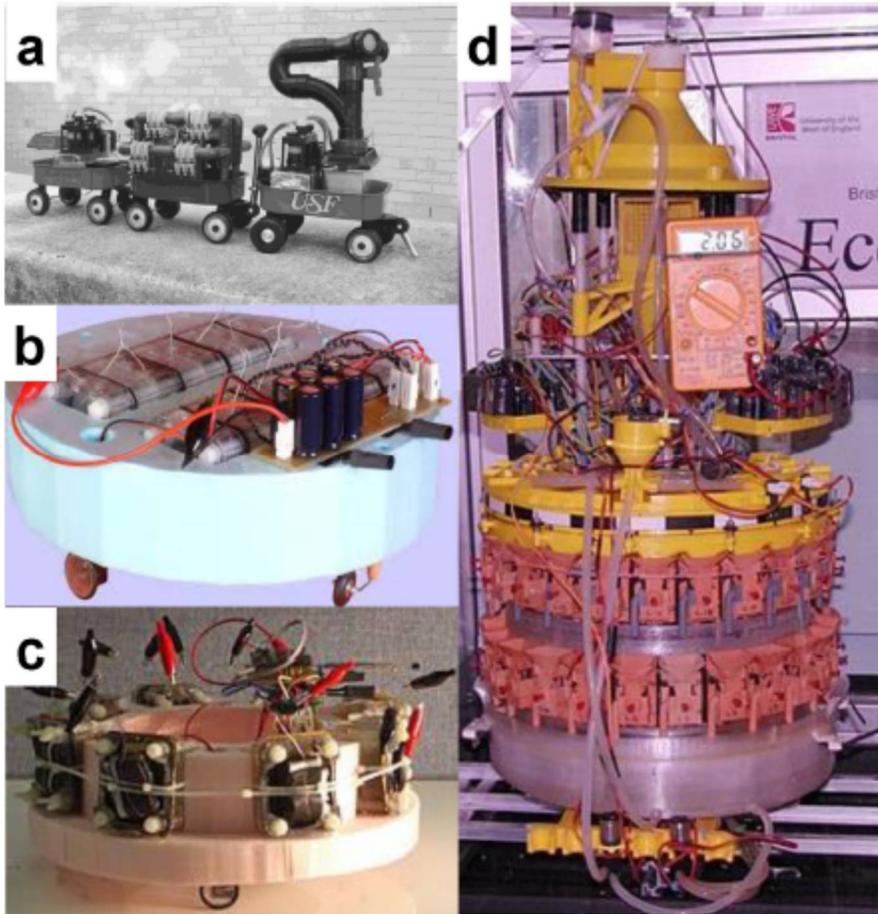


Figura11. Celdas de desalinización microbiana.



*Figura 12.* Fotografía de Gastrobot (a), Ecobot-1 (b), Ecobot-II (c), cada uno de ellos potenciados por 8 celdas de combustible microbiano y Ecobot-III, potenciado con 48 pequeñas celdas de combustible microbianas(d).  
 Nota: tomada de S. Wilkinson, Autonomous Robots.

## *CAPÍTULO II*

## **2.1. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **2.1.1. Tipo de investigación.**

El estudio será de tipo experimental y pura. Es pura porque se diseñará celdas de combustible microbiana a nivel de laboratorio que serán utilizadas para determinar la relación de las variables independientes DBO y pH con la variable dependiente producción de energía eléctrica.

### **2.1.2. Diseño experimental**

Para contrastar la hipótesis que “La demanda bioquímica de oxígeno inicial de las aguas residuales crudas si tenía influencia con la cantidad de electricidad producida en celdas de combustible microbianas (CCM), se utilizó primero un análisis de varianza ANOVA (1 factor con varios niveles); es decir, se usó tres muestras de aguas residuales crudas de diferentes DBO iniciales. Sin embargo, durante el experimento se midió pequeñas variaciones de pH en la cámara anódica a pesar de la presencia del buffer y se verificó si tenía alguna influencia con la cantidad de energía con lo cual se utilizó luego un diseño con dos factores y 3 niveles. Las tres muestras fueron incubadas en CCM distintas durante varias horas, y se les midió cada cierto tiempo los voltajes y el pH. Se identificaron 3 valores de pH similares a las tres celdas y se tomaron como valores para determinar la influencia como se puede observar en la tabla 4. Los valores de voltaje e intensidad eléctrica fueron utilizados para el cálculo de la densidad de potencia,  $P=V*I/A$ . Se tomó en cuenta el efecto que podría tener la variación del pH, la resistencia externa, mediadores de electrones, el área de los electrodos en la producción de la energía eléctrica y se estableció valores constantes durante todo el proceso. En el caso del pH se utilizó un buffer y se midió los ligeros cambios que podía existir en la cámara anódica. Para establecer si había correlación entre la cantidad de energía producida al variar el DBO y las

pequeñas variaciones de pH, se hizo la evaluación estadística de los resultados obtenidos mediante un análisis estadístico de varianza. Se consideró un error de 0.05 y un nivel de confianza del 95% (tabla 4).

### **2.1.3. Población.**

Las lagunas de estabilización ubicadas en el distrito de San José, departamento de Lambayeque. Se encuentra ubicado al nor oeste del centro poblado Ciudad de Dios al margen izquierdo de la carretera al distrito de San José a 10 minutos de la ciudad de Chiclayo y consta de 10 lagunas, 5 anaeróbicas primarias de 165m X 122m, con una profundidad de 3.5 m y 5 lagunas facultativas secundarias de 245X242m y 1.80 m de profundidad. Cuentan al ingreso con medidor Parshall y una estructura de salida de agua con dos compuertas de control. El caudal de tratamiento es de 650 L/s del cual el 50% es para uso agrícola y la diferencia se dirige hacia el mar (Fig. 13).

### **2.1.4. Muestra.**

Se recolectó 6 Litros de agua residuales crudas en el canal de entrada a las lagunas de estabilización de San José, a 1m de profundidad aproximadamente. Según los resultados de calidad de agua, , reporta un DBO promedio de 200 mg/L y el efluente en promedio arroja un DBO5 de 50 mg/L. (Fuente EPSEL S.A)

### **2.1.5. Metodología de la investigación**

#### **2.1.5.1. Recolección de muestras**

Para el proceso de muestreo se utilizó la técnica de muestreo compuesto, de donde se tomaron dos muestras en dos tiempos distintos (2 horas después del haber hecho el primero); siempre en el mismo lugar. Obtenidas las dos muestras se realizó una mezcla

de ambas, para obtener una muestra más confiable y homogénea. A la muestra obtenida,

DBO (mg/L)	Cantidad de electricidad (P) en mW/m <sup>2</sup>		
	pH 1	pH2	pH3
Muestra1 (muestra original)- control	P1	P2	P3
Muestra 2 (dilución 1)	P4	P5	P6
Muestra 3(dilución 2)	P7	P8	P9

se le midió las propiedades fisicoquímicas ((tabla 5).

*Tabla 4.* Diseño experimental

**Fuente:** Creado por el autor

**Tabla 5.** Caracterización inicial del agua residual utilizada

DBO inicial (mg/L)	DQOo inicial (mg/L)	Relacion DBO <sub>5</sub> /DQO	Temperatura (°C)	pH	Conductividad mS/cm	Solidos totales disueltos
242	372	0.65	24.2	7.48	3.96	2.53 g/L
150	231	0.65	24.2	7.48		
50	77	0.65	24.2	7.48		

**Fuente:** Mediciones hechas en Laboratorio de Fisicoquímica, UNPRG.

Nota: El DQO=0.65 \* DBO<sub>5</sub>.

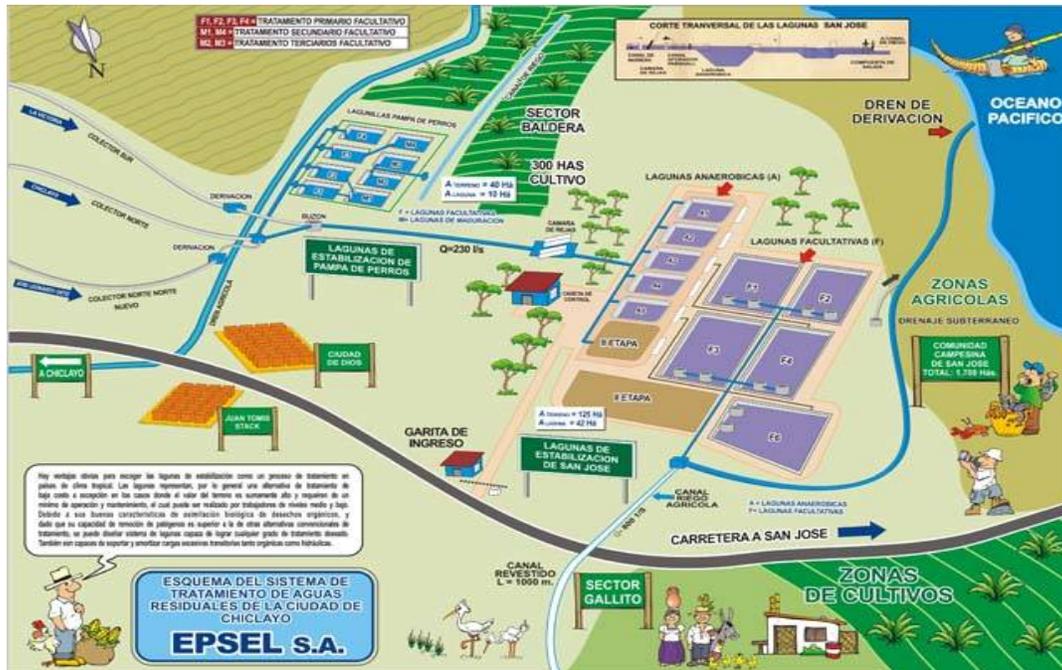


Figura 13. Lagunas de estabilización de San José en Lambayeque (Fuente: Imagen tomada con permiso de EPSEL S.A)

### **2.1.5.2. Demanda bioquímica (DBO) y química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales.**

Para determinar la concentración de DBO inicial en cada una de las tres muestras, se utilizó el método Determinación del oxígeno disuelto por el método de la asida. Para ello se cogió 1 L de cada una de las muestras de diferentes DBO y se dividió en dos porciones de 500 mL cada una. A la primera muestra de 500 mL, se le adicionó 1 mL de solución de sulfato de manganeso seguidos por 1 mL de álcali, yoduro y nitruro bajo la superficie del líquido. Se tapó cuidadosamente para eliminar todas las burbujas de aire, y se mezcló por inmersión por lo menos 15 veces (Fig. 29). Cuando el sedimento dejó una superficie sobrenadante clara sobre los floc de hidróxido de manganeso, se agitó otra vez, y después de por lo menos dos minutos de que haya sedimentado nuevamente y haya quedado por lo menos 100 mL de sobrenadante transparente se burbujea aire durante 5 minutos con la ayuda de aireador para peceras, cuidadosamente se remueve la tapa e inmediatamente se agregó 1 mL de  $H_2SO_4$  concentrado, se dejó correr por el cuello de la botella. Se tapó nuevamente y se mezcló invirtiendo varias veces hasta que la disolución se haya completado. Se distribuyó el yodo uniformemente antes de retirar de la botella la cantidad necesaria para la titulación. (Fig. 30).

Se tomó un volumen de 201 mL en una fiola previamente calibrada a esta medida y se vierte a un matraz Erlenmeyer de 500 mL. (Fig. 31), se tituló con solución de tiosulfato al 0.025 N hasta alcanzar un color amarillo pálido. Se adicionó 1 mL de solución de almidón y se continuó la titulación hasta la primera desaparición del color azul. No se tomó en cuenta las siguientes recoloraciones debido a efectos catalíticos de sustancias

interferentes (Fig. 32). Los otros 500 mL se le agregaron los mismos reactivos y se burbujeo con aire, se dejó por 5 días y se le aplico el ensayo.

La medición de la demanda bioquímica de oxígeno de la muestra original dio como resultado un valor de 242 mg/L (Tabla 4) y su demanda química de oxígeno fue de 372 mg/L, tomado de la referencia que el DBO es aproximadamente el 65% del DQO, para la muestra con DBO 50 mg/L su DQO fue 77 mg/L y la DBO 150 su DQO fue de 231 mg/L. Calculando la relación entre el DQO y el DBO se obtuvo un valor de 1.54 que es menor de 2.5, por lo tanto, es un residuo altamente biodegradable (Ver definición de biodegradabilidad).

#### **2.1.5.3. Obtención de las dos muestras con 150 mg/L y 50 mg/L**

Para la obtención de las 2 muestras con demandas bioquímicas de oxígeno distintas, se utilizó la técnica de diluciones sucesivas.

##### **Preparación del agua residual de 150 mg/L:**

Para la obtención de 400 ml de agua residual de 150 mg/L se utilizó 248 mL de agua residual de 242 mg/L y se diluyó con agua destilada hasta los 400 mL.

##### **Preparación del agua residual de 50 mg/L:**

Para la obtención de 400 mL de agua residual de 50 mg/L se utilizó 83 ml de agua residual de 242 mg/L y se diluyó con agua destilada hasta los 400 mL.

Los cálculos realizados para la obtención de los datos (Anexo 6).

#### **2.1.5.4. Preparación del agua de enriquecimiento.**

Se preparó 1 litro de agua de enriquecimiento utilizado para el enriquecimiento del medio de cultivo.

Para ello se pesó 4 gramos de glucosa, 0.31 gramos de cloruro de potasio grado analítico, 0.13 gramos de cloruro de amonio, 2.75 gramos de fosfato ácido disodico y 4.97

gramos de fosfato diácido sódico y enrasado a 1L en una fiola de 1 (Tabla 6) y posteriormente se le agregó un buffer a pH =7 (Tabla 13)

#### **2.1.5.5. Preparación del consorcio microbiano.**

De cada una de las muestras de agua residual se tomaron 200 mL y se enriquecieron en 200 mL de agua de enriquecimiento (ARS), y se vertieron en una botella de vidrio de 500 mL, y se puso en una jarra de Brewer.

La jarra de Brewer fue puesta en la estufa durante 48 horas a 30° para enriquecer el cultivo en bacterias. El consorcio microbiano es un conjunto de bacterias; sin embargo, la más representativa son las *seudomonas* (Chandra, 2015) y la *Echerichia Coli*. Transcurrido los dos días se retiró la muestra de la jarra y fueron depositados en la cámara anódica de la CCM.

#### **2.1.5.6. Preparación de electrodos de grafito**

Los electrodos estuvieron hechos de grafitos finos (minas de grafito de 1.13 cm de ancho y de 11cm de largo) que se colocaron 3 de ellas en cada compartimiento. Se limpiaron con ácido clorhídrico 3M y lavados con agua destilada. (Fig. 34, Anexo 8)

#### **2.1.5.7. Preparación de cámaras anódica y catódica**

Las cámaras anódica y catódica estuvieron constituidos por frascos de plástico de 500mL de capacidad. Los volúmenes de católicos y anolito fueron de 400 mL y 400mL respectivamente. El anolito estuvo constituido por 400 mL de agua residual enriquecida con el consorcio microbiano., en tanto que el catolitos estuvo constituido sólo por agua destilada. Para mejorar la transferencia de electrones se le agregó 1mL de colorante rojo neutro como mediador de electrones en el anolito.

Para su cierre hermético se utilizaron tampones de jebes. La cámara anódica, presentó tres electrodos de grafito, unidos a su vez a un cable de cobre, el cual se conectó posteriormente al polo negativo del multitester. Este también tuvo una cánula de plástico, por donde salieron los gases que se produjeron y se dirigieron a una botella con 100 mL de solución de NaCl al 20% (P/V).

La cámara catódica, presentó tres electrodos de grafito, unidos también a un cable de cobre, y este posteriormente al polo positivo del multitester. También presentó una cánula por donde se burbujeó aire con la ayuda de un aireador de pecera.

Las dos cámaras estuvieron interconectadas a través de un puente salino, hecho de una unión de plástico de 1" de diámetro y relleno de agar salino. (Fig. 37).

#### **2.1.5.8. Preparación del puente salino**

El puente salino estuvo constituido por una unión de plástico de 1" de diámetro nominal, en donde se depositó agar salino (Mezcla de agar y solución salina). El puente salino fue construido 1 día antes.

Se preparó, disolviendo 10 gramos de sal en 500 mL de agua hirviendo, para ello se utilizó una cocina eléctrica. Fue añadido de manera lenta 4 gramos de agar en polvo, se removió durante 5 minutos y se dejó 5 minutos adicionales para que enfrié. Luego se procedió a llenar las respectivas uniones con el agar. Para ello se recurrió a tapar de manera temporal un extremo de la unión con cinta aislante.

Una vez que el agar se solidificó en la unión, este se dejó almacenado en un recipiente de vidrio para ser utilizado en el experimento. (Fig. 36)

#### **2.1.5.9. Armado de celdas de combustible microbiana**

Para el armado de la CCM se depositaron el anolito y catolito en el interior de las respectivas cámaras, y se añadió 1 mL de solución buffer de fosfato para mantener un pH constante de 7. Para mejorar transporte de electrones en el compartimiento anódico se añadió también 1 mL de colorante rojo neutro como mediador de electrones.

Se conectó el puente salino a las respectivas cámaras para permitir el flujo de iones desde el ánodo al cátodo, a continuación, se insertaron los electrodos, sumergiéndolos en la cámara correspondiente. Una vez armado la CCM se conectó el cableado eléctrico que permitirá el flujo de electrones desde el ánodo al cátodo constituido por cablecillo de cobre. Un multítester se utilizó para el medir el diferencial de voltaje de cada una de las celdas, se utilizó una resistencia externa de  $218 \Omega$  para medir la intensidad de corriente que se producía en la celda (fig. 35)

#### **2.1.5.10. Funcionamiento de la celda de combustible microbiana**

Una vez armada la CCM se monitorearon la cantidad de bioelectricidad producida y el pH en el compartimiento anódico, registrando los valores medidos de voltaje con un multítester, el pH con un pHímetro digital y guardando los datos en la computadora.

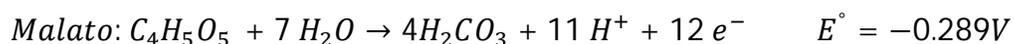
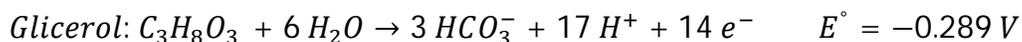
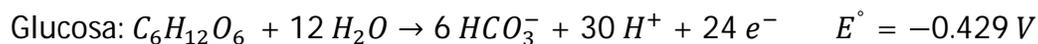
Para realizar las mediciones de voltaje en cada una de las celdas microbianas se utilizó un multímetro de la marca DT830D DIGITAL MULTIMETER.

Este equipo tiene varias secciones: para medir corriente continuo, para corriente alterna, resistencia eléctrica e intensidad eléctrica. Para nuestro caso se utilizó a la sección de corriente continua hasta 2000 m (2 V).

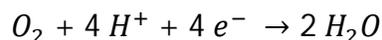
La obtención de estos datos fue esencial para determinar la cantidad de energía eléctrica producida en cada celda en el transcurso del tiempo (Fig. 38). Durante el funcionamiento de las tres celdas microbianas, se llevaron a cabo reacciones químicas

muy complejas dado a que las aguas residuales son mezclas de muchos componentes, por ello se dan algunos de ellos a continuación:

Reacciones de oxidación (Ánodo)



Reacciones de Reducción (Cátodo)



### 2.1.6. Lugar experimental

La parte experimental se llevó a cabo en el laboratorio de fisicoquímica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque. (Fig. 39).

### 2.1.7. Equipos, instrumentos y materiales

#### 2.1.7.1. Equipos

Se utilizaron una cocina eléctrica, una incubadora estufa laboratorio de 150 L, un aireador para peceras y un equipo de titulación.

#### 2.1.7.2. Instrumentos de recolección y procesamiento de datos

Para la recolección y el procesamiento de datos se utilizaron una libreta, laptop personal, multímetro de la marca DT830D DIGITAL MULTIMETER y programas informáticos como Microsoft Works y Microsoft Excel.

#### 2.1.7.3. Materiales

Para la construcción de las celdas se emplearon 6 Botellas de plástico de pvc de 500 mL, 1 resistencia de 218  $\Omega$ , 6 tapas de plástico, 3 uniones de plástico de 1" de diámetro, 18 barras de grafito de 1 cm X 11 cm, 1 bolsa de sal de 1 Kg, Agar agar.

Los insumos químicos que se emplearon para la preparación del agua de enriquecimiento fueron, Cloruro de potasio grado analítico, Glucosa en polvo,  $\text{NaHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (buffer a pH 7),  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (buffer a pH 7)

Para mejorar el transporte de electrones se utilizó una solución preparada de colorante rojo neutro (colorante utilizado en biología para realizar tinción).

### 2.1.8. Proceso operacional.

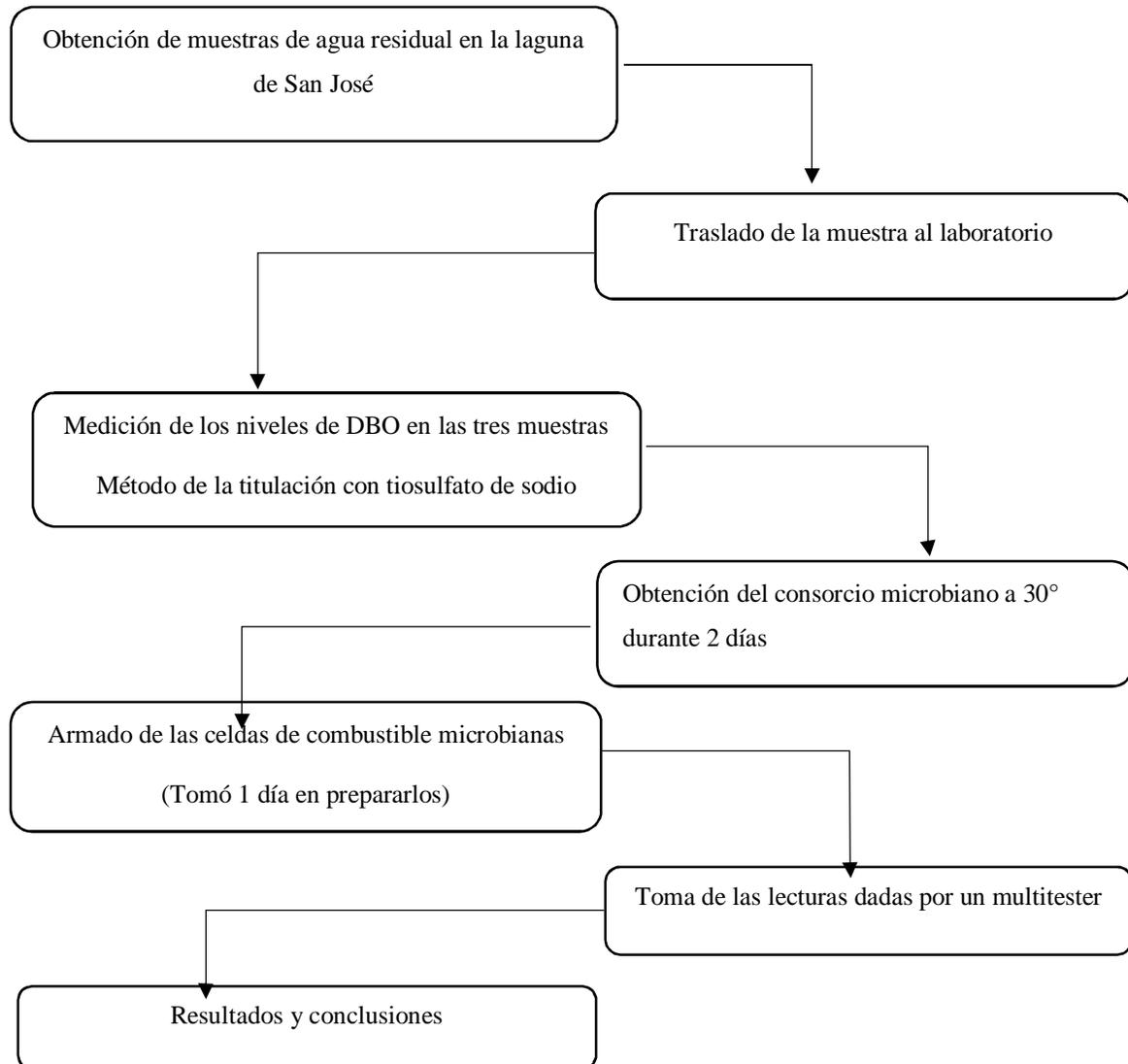
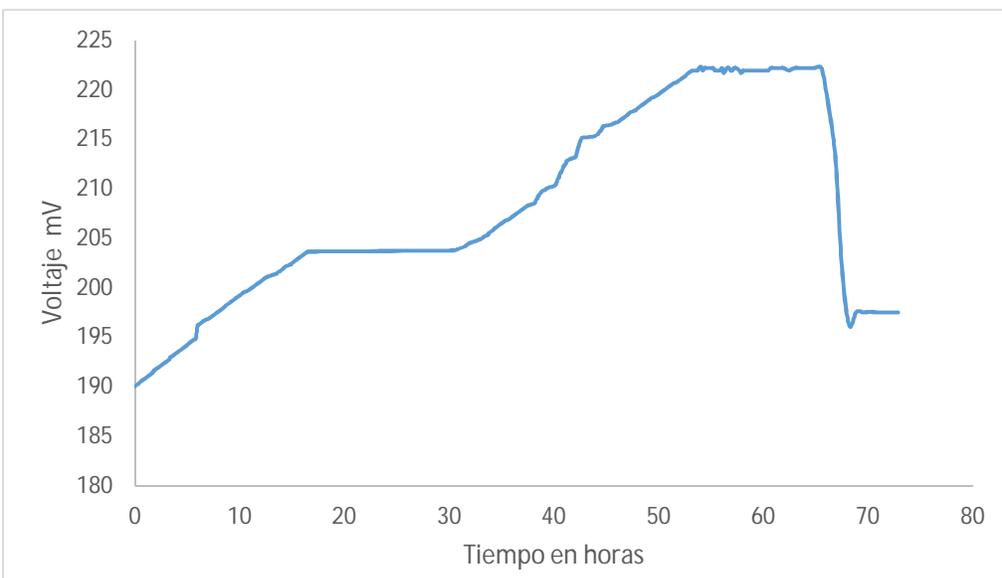


Figura 14. Proceso operacional del trabajo de investigación

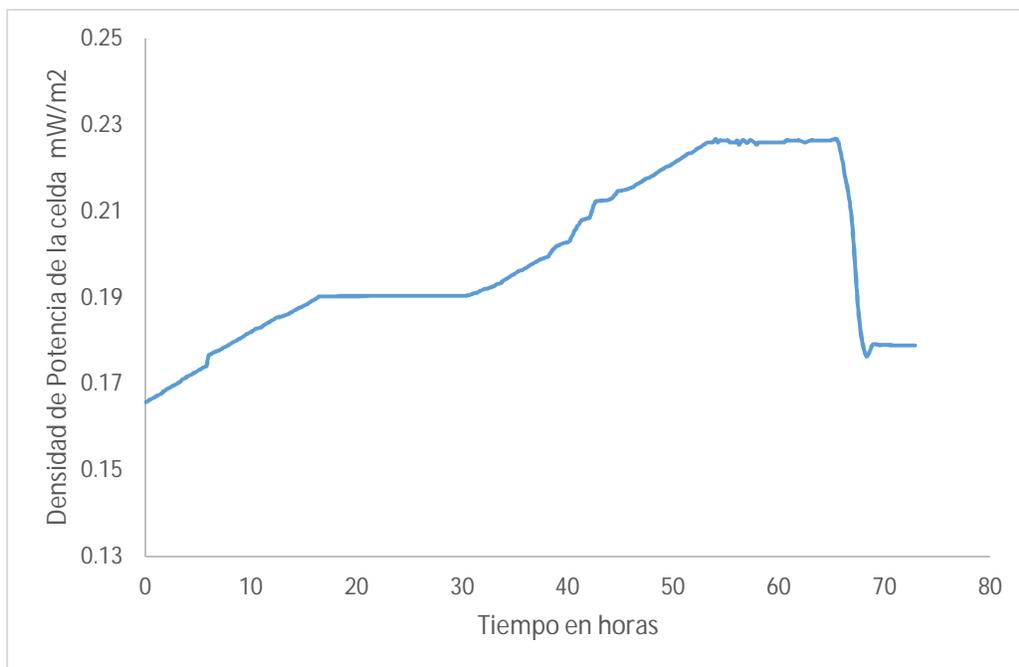
## **CAPÍTULO III**

### ***RESULTADOS***

**3.1. Resultados de la celda con DBO 50 mg/L, DQO 64 mg/L, pH 7, Resistencia externa 218  $\Omega$ . (Tabla 10, anexo 7)**

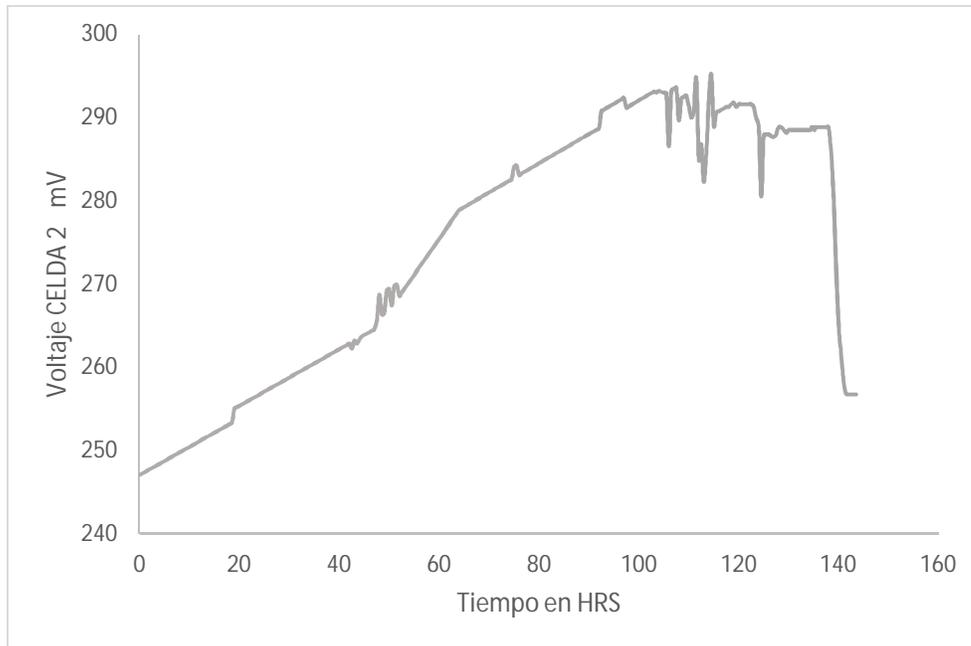


*Gráfica 1A: Voltaje generado en la celda 1 vs Tiempo*

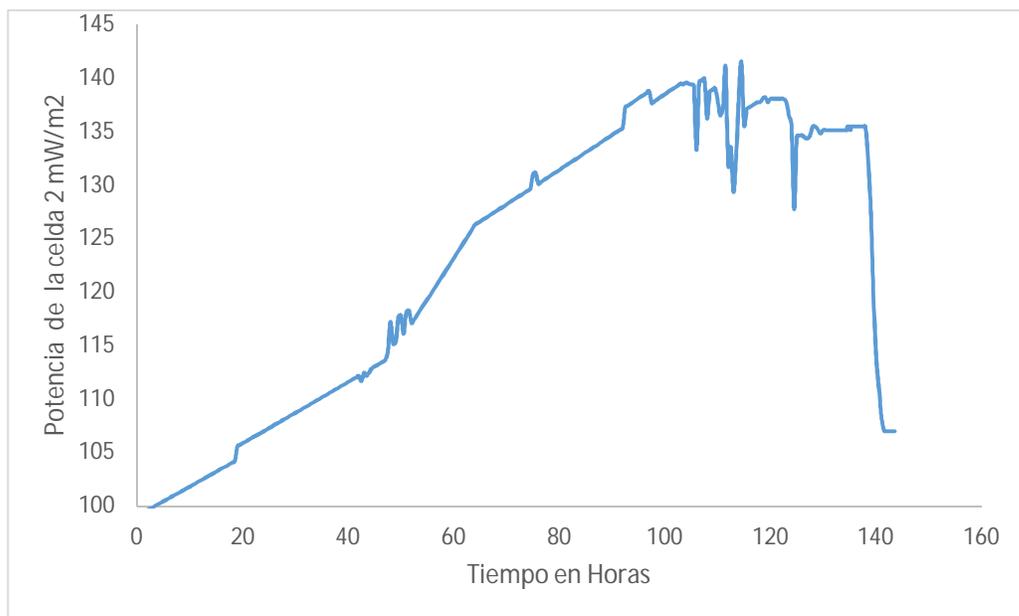


*Gráfica 1B: Potencia eléctrica de la celda 1 vs Tiempo*

**3.2. Resultados de la celda con DBO 150 mg/L, DQO 204 mg/L, pH 7, Resistencia externa 218  $\Omega$  (Tabla 11, anexo 7)**

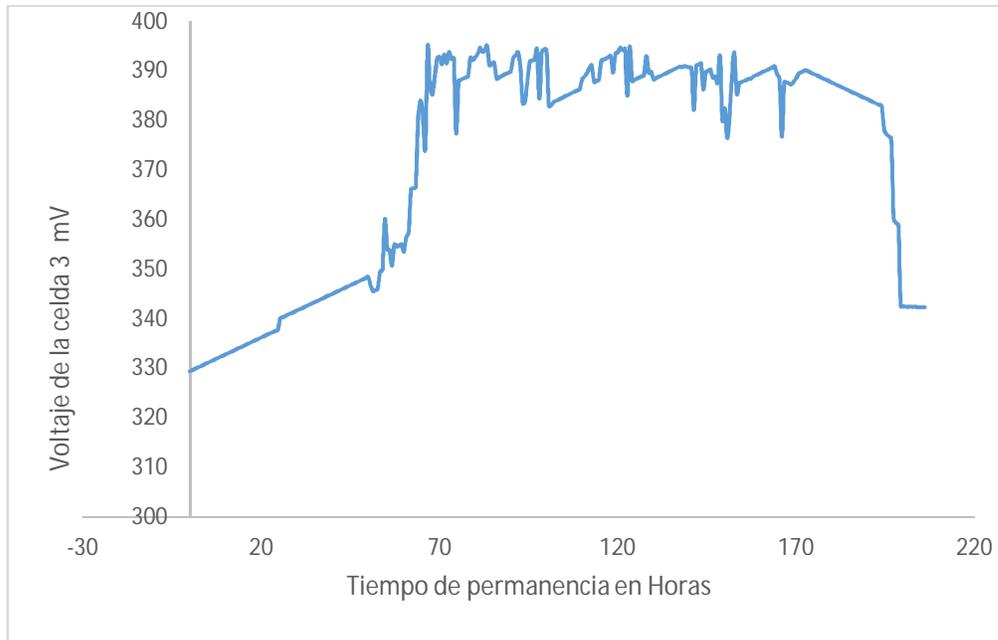


*Gráfica 2A: Voltaje generado en la celda 2 vs Tiempo*

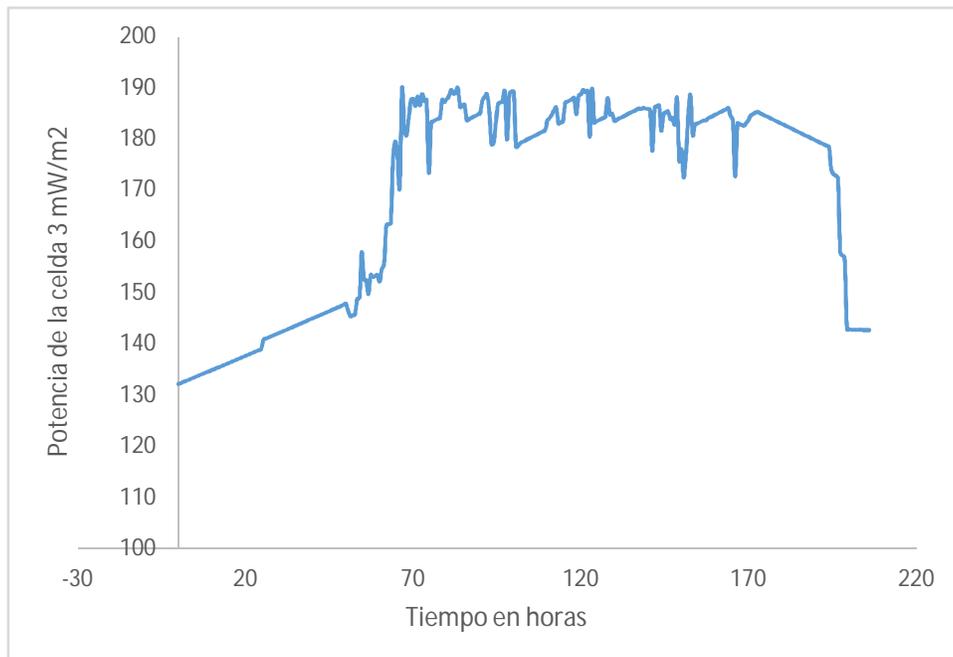


*Gráfica 2B: Potencia eléctrica de la celda 2 vs Tiempo*

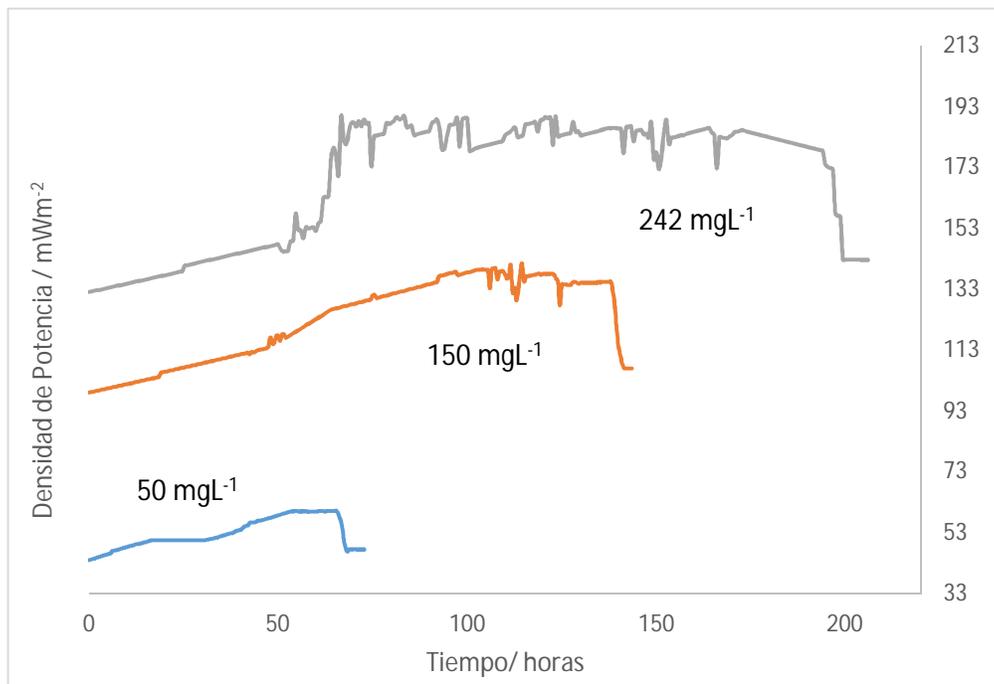
3.3. Resultados de la celda con DBO 242 mg/L, DQO 310 mg/L, pH 7, Resistencia externa 218  $\Omega$ . (Tabla 12, anexo 7)



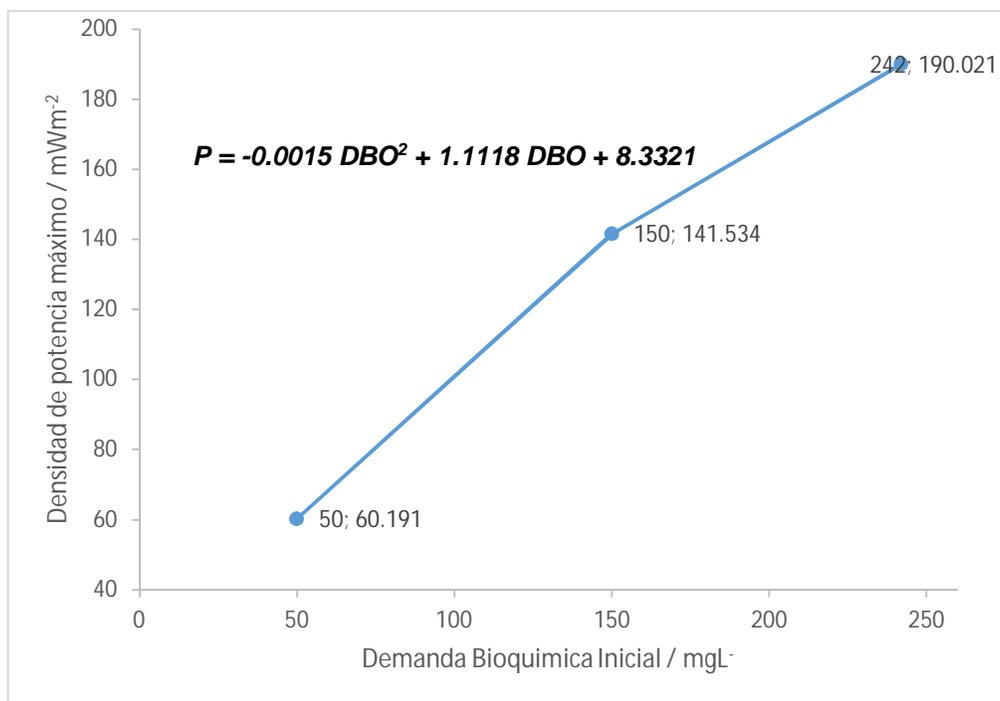
Gráfica 3A: Voltaje generado en la celda 3 vs Tiempo



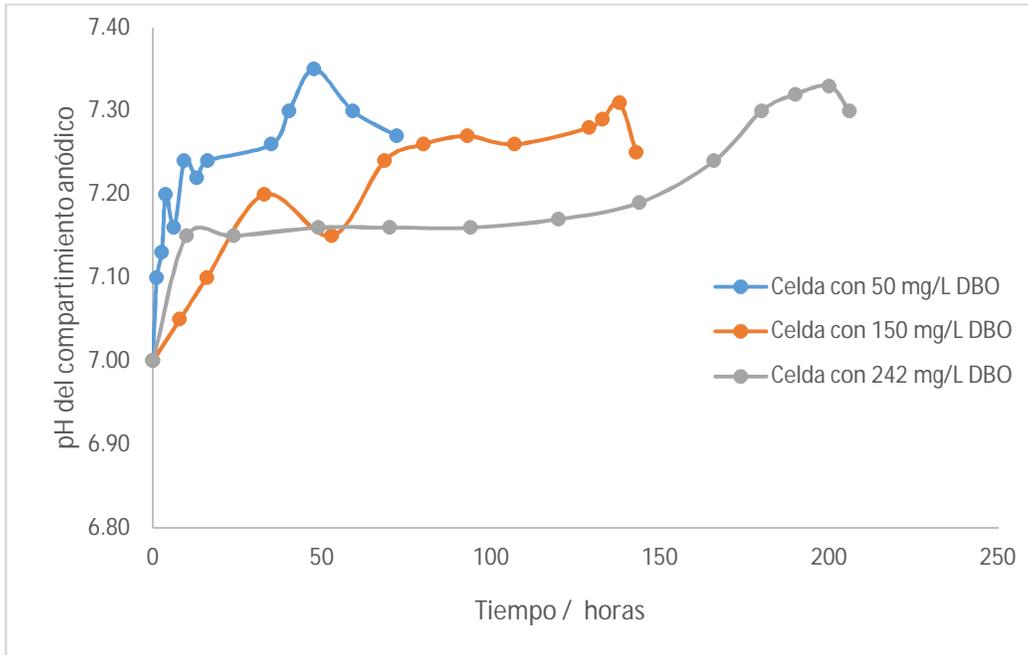
Gráfica 3B: Potencia eléctrica de la celda 3 vs Tiempo



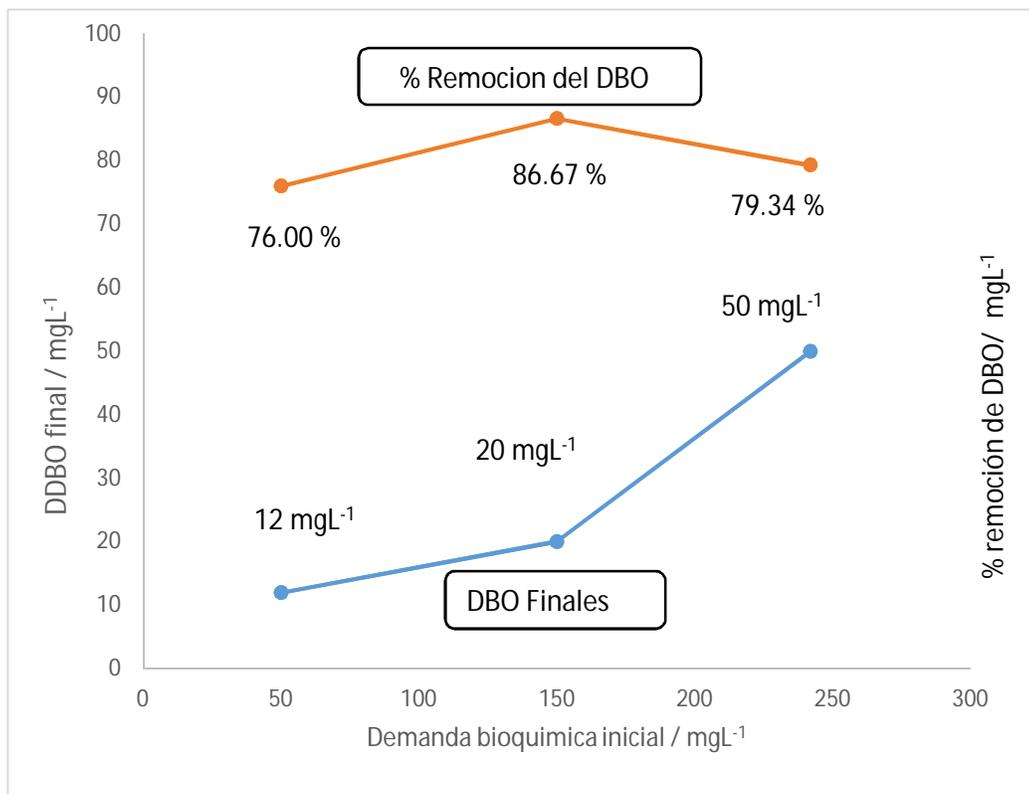
Gráfica 4: Comparación de la densidad de potencia de las celdas vs Tiempo



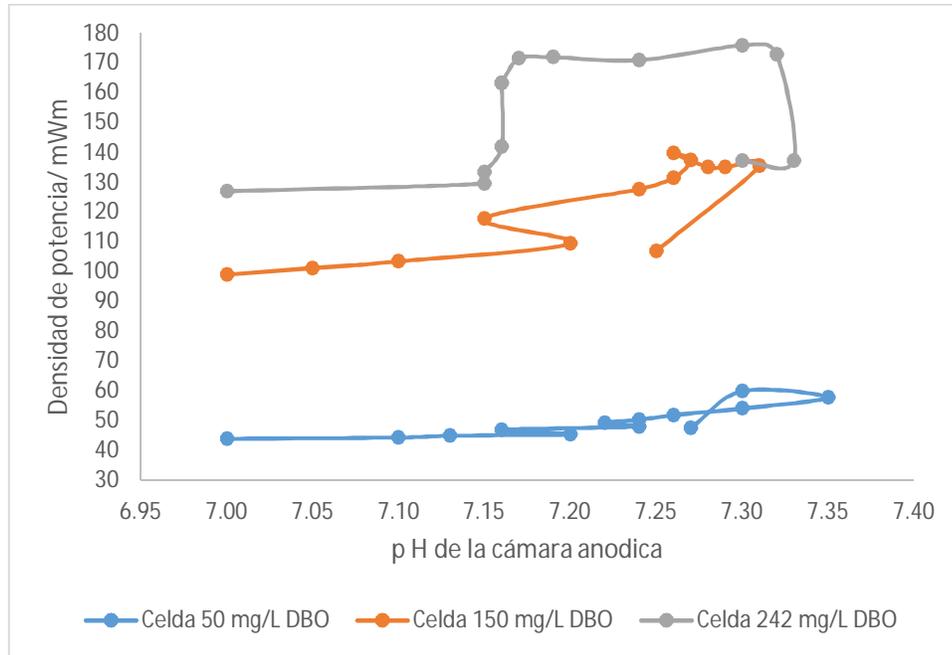
Gráfica 5: Comparación de los potenciales máximo de celda 1,2 y 3 vs Demanda bioquímica de oxígeno inicial



Gráfica 6: Variación del pH con respecto al tiempo de las celdas con 50, 150 y 242 mg/L DBO



Gráfica 7: Demanda bioquímica al final y % de remoción en las celdas con 50, 150 y 242 mg/L DBO.



Gráfica 8. Efecto del pH en rangos donde las densidades de potencia son altas en las celdas con 50, 150 y 242 mg/L<sup>1</sup> DBO.

Tabla 6. Caracterización del agua residual al final del proceso

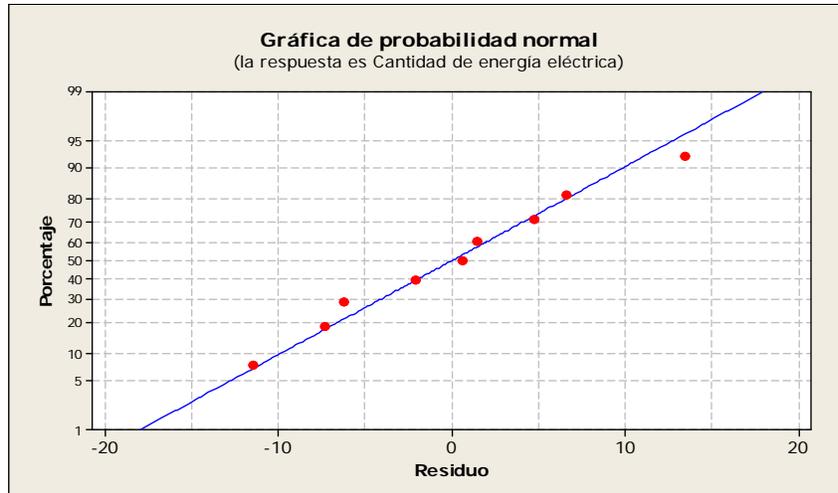
DBO inicial mgL <sup>-1</sup>	DBO final mgL <sup>-1</sup>	% Remoción del DBO	pH inicial	pH final	% variación de pH en el ánodo	Máxima densidad de potencia / mW/m <sup>2</sup>	Tiempo de estabilidad de la densidad de potencia/Horas
242	50	79.34	7.00	7.33	4.71	190.021	126
150	20	86.67	7.00	7.31	4.43	141.534	45.5
50	12	76.00	7.00	7.35	5.00	60.191	12

Nota: La potencia mW/m<sup>2</sup>, el área m<sup>2</sup> se calculó de acuerdo a cálculos del anexo 8 sección 8.7.2 con datos de las tablas 14,15,16 en Anexo 7.

Tabla 7: Diseño experimental con dos factores de influencia: pH y DBO con la densidad de potencia

		PH (2 factor)		
		7 (1 nivel)	7.24 (2 nivel)	7.3 (3 nivel)
DBO mg/L(1 factor)	242 (3 nivel)	127.044 mW/m <sup>2</sup>	171.072 mW/m <sup>2</sup>	175.955 mW/m <sup>2</sup>
	150 (2 nivel)	99.071 mW/m <sup>2</sup>	127.734 mW/m <sup>2</sup>	135.324 mW/m <sup>2</sup>
	50 (1 nivel)	43.976 mW/m <sup>2</sup>	49.2175 mW/m <sup>2</sup>	57.0465 mW/m <sup>2</sup>

Nota: Se escogieron 6 valores de potenciales que fueron obtenidos de las tablas 14,15,16 y coincidieron con los 3 valores de pH mostrados (tabla 18).

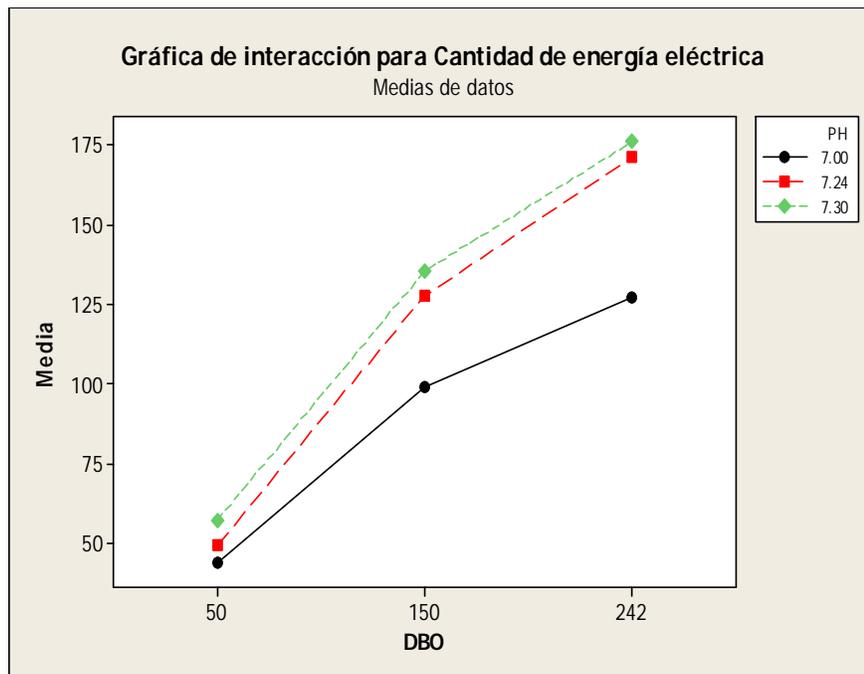
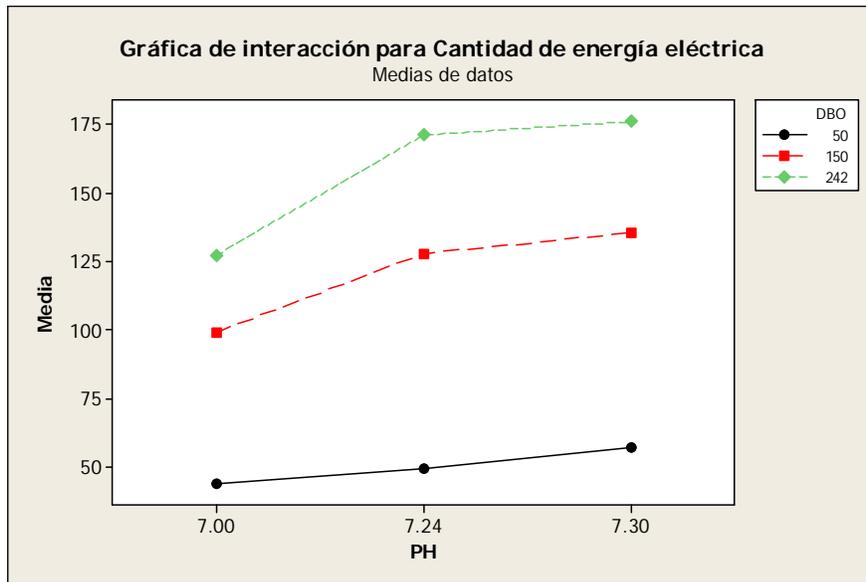


Gráfica 9. Resultados de la prueba de normalidad de los residuos con la variable respuesta cantidad de energía eléctrica.

Tabla08. Resultados del análisis de varianza de los dos factores DBO y pH con respecto a la cantidad de energía eléctrica.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
DBO	2	18032.7	9016.36	75.71	0.001
Ph	2	1792.9	896.43	7.53	0.044
Error	4	476.4	119.09		
Total	8	20301.9			
S=10.91		R-cuad. =97.65%		R-cuad. (ajustado) =95.31 %	

Nota: GL: grados de libertad, SC: suma de cuadrados, S: desviación estándar, p: valor de rechazo de la hipótesis nula si  $p < 0.05$  o aceptación  $p > 0.05$ , R-cuad: R cuadrada. La tabla estadística fue realizada con mucha facilidad gracias al software Minitab. Se calculó que estos datos siguen una probabilidad estadística normal.



Gráfica 10. Gráfica de la interacción de las variables DBO y PH con la cantidad de energía eléctrica.

## *CAPÍTULO IV*

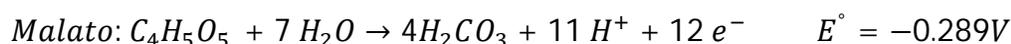
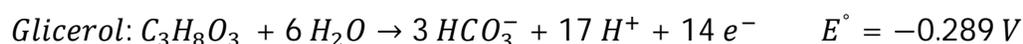
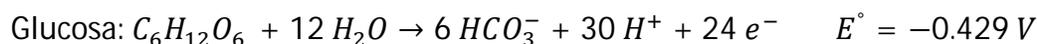
### *DISCUSIONES*

### Reacciones químicas llevadas a cabo en las celdas microbianas

El resultado final del estudio de la influencia de los niveles demanda bioquímica oxígeno (DBO) en las aguas residuales con la cantidad de energía eléctrica producida por cada una de las celdas de combustible microbiana se obtuvieron después de aproximadamente 200 horas de monitoreo. La cantidad de energía eléctrica producida por cada una de las celdas de combustible microbiana fue expresada como la densidad de potencia en  $\text{mW}/\text{m}^2$ , los resultados fueron tabulados en la tabla N° 5, 6 y 7. Las figuras 1A y 1B describen el comportamiento de las variables en cuestión de la celda microbiana con 50 mg/L dbo, las figuras 2A y 2B describen el comportamiento de las variables en cuestión de la celda microbiana con 150 mg/L dbo y las figuras 3A y 3B describen el comportamiento de las variables en cuestión de la celda microbiana con 242 mg/L dbo.

Debido a la complejidad de la composición de las aguas residuales, algunas de las reacciones que se llevaron a cabo en las respectivas cámaras fueron las siguientes (Gude, 2016):

Reacciones de oxidación en el cámara ánoda:



Reaccion de Reducción en la cátoda:



### Densidad de potencia de las celdas vs concentración de DBO

El efecto de la concentración de las residuales crudas sobre la densidad de potencia se llevó a cabo utilizando agua residual con 50 mg/L, 150 mg/L y 242 mg/L.

En la grafica 5 se muestra las máximas densidades de potencia electrica que se obtuvieron de cada una de las celdas microbianas. Para la celda microbiana con 242 mg/L se obtuvo 190.021 mW/m<sup>2</sup>, la celda con 150 mg/L obtuvo 141.534 mW/m<sup>2</sup> y para la celda con 50 mg/L se obtuvo 60. 191 mW/m<sup>2</sup>.

La muestra tomada como control fue la celda con 242 mg/L y apartir de esta se hicieron diluciones (50 y 150 mg/L) y se mostró que conforme se disminuía el dbo también lo hacia la densidad de potencia. Ello se correlaciona con lo afirmado por Marashi & Kariminia (2015): “Durante la generación de corriente eléctrica en una celda de combustible microbiana este se limita a dos factores: la velocidad de oxidación del sustrato por las bacterias y la velocidad de transferencia de electrones a la superficie del electrodo. La velocidad de oxidación del sustrato depende de la concentración del sustrato y que es asumido usualmente como una reacción de primer orden. La transferencia de materia y el espesor de la capa de biopelicula pueden también suprimir la producción de electricidad.

### **Efecto de la resistencia externa sobre la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana.**

Las densidades de potencia que se observaron en las tres celdas de combustible (Gráfica 1B, 2B, 3B), tuvieron un comportamiento incremental al aumentar la concentración de DBO. No obstante, la resistencia externa utilizada fue la misma para las tres celdas, en nuestro caso se utilizó una resistencia externa de 218  $\Omega$ . Según lo reportado por Marashi & Kariminia (2015): “El incremento en la densidad de potencia debido al empleo de aguas residuales mas concentradas en el ánodo, estuvo tambien correlacionado a la resistencia externa. La resistencia externa puede de alguna manera inhibir la transferencia de masa y en la pérdida de activación cuando se usan valores

demasiados bajos o demasiado altos”, en nuestro caso se utilizó un valor intermedio que no inhibió la generación de corriente.

### **Densidad de potencia dependiente del valor de pH**

Para la incubación de las bacterias en las celdas microbianas se utilizó un buffer de fosfato a pH 7.0. No obstante, existió ligeras variaciones del pH (Tabla 18) en el transcurso de la experimentación en las cámaras anódicas. En la celda con 242 mg/L dbp se observó que cuando el pH comenzó a aumentar desde 7.16 hasta 7.19, 7.24, 7.3, 7.32 se obtuvieron las densidades de potencia más altas (175.9 mW/m<sup>2</sup>), no obstante, a pH inferiores a 7.16 la densidad fue baja (129.6 mW/m<sup>2</sup>). En la celda con 150 mg/L se observó que cuando el pH comenzó a aumentar desde 7.15 hasta 7.30, se obtuvieron las densidades de potencia más altas (137.4 mW/m<sup>2</sup>), no obstante, a pH inferiores a 7.15 la densidad fue baja (103.5 mW/m<sup>2</sup>). En la celda con 50 mg/L se observó un ligero aumento de la densidad de potencia al aumentar el pH.

Según los resultados reportados por Marashi & Kariminia: “El pH tiene un efecto significativo sobre la actividad de las bacterias en términos de eficiencia de remoción y producción de energía. Para lo cual se utilizaron valores de pH 5.4, 7.0 y 8.5 y se comparó el efecto que tenían cada uno de ellos sobre la producción de energía eléctrica, demostrando que al aumentar el valor del pH se obtenía una mayor densidad de potencia eléctrica. Un valor de pH cercano a los 5.5, fue la condición óptima para que se desarrollen bacterias acidogénicas, así la producción de hidrógeno podría ser el mecanismo dominante que supera la degradación de contaminantes y una lenta velocidad de remoción es esperada. Debido a la baja velocidad de remoción, pocos electrones son liberados y la producción de energía es disminuida.

A condiciones de pH de 7.0, la producción de gas metano es el mecanismo metabólico dominante. Ello podría conducir a un número menor de electrones liberados que pueden contribuir a la

generación de electricidad y a una baja densidad de potencia. El aumento en la producción de densidad de potencia a pH 8.5 puede deberse a la más baja actividad de bacterias metanogénicas y acidogénicas. Como resultado, el electrón liberado en el proceso de oxidación de los sustratos podría contribuir significativamente en la generación de electricidad”.

En nuestro caso existieron variaciones muy pequeñas de pH de 0.27, 0.25 y 0.3 unidades en las cámaras anódicas con 242, 150 y 50 mg/L de dbp con respecto al pH inicial debido a la presencia del buffer. A pesar de los mínimos cambios de pH si tuvo influencia en los rangos donde las densidades de potencias fueron altas. Según lo afirmado anteriormente, en nuestras condiciones la producción de metano podría haber sido el mecanismo preponderante y por lo tanto no toda la materia orgánica es convertida en energía. Ello demostraría que la máxima potencia obtenida fue de 190.021 mW/m<sup>2</sup> para la celda con 242 mg/L dbp.

### **Porcentaje de remoción vs Demanda bioquímica de oxígeno**

En la gráfica 07, se puede observar que la celda con 150 mg/L de DBO obtuvo el mejor porcentaje de remoción de 86.67% en comparación con las celdas con 50 (76%) y 242 mg/L (79.34%) de DBO. Según los reportes de Prasertsung & Ratanatamskul, la remoción de demanda bioquímica de oxígeno disminuye con el incremento de la carga de materia orgánica.

Ello demostraría que al utilizar concentraciones como 242 mg/L de dbp se reduciría la remoción de materia orgánica. En este caso la celda con 150 mg/L dbp es la mejor opción para remover materia orgánica.

### **Efecto del mediador de electrones en la producción de energía**

En la etapa de funcionamiento de las celdas microbianas se utilizó 1 gota (0.025 mL) de colorante rojo neutro (N8, N8, 3-trimetil-2,8- fenazina diamina, monohidrócloruro, colorante utilizado en

biología para realizar tinciones) como mediador de electrones, dado a su excelente capacidad de transportar electrones. Según Zeikus y Park (2000): “El rojo neutral utilizado como un mediador de electrones en celdas de combustible microbiana para estudiar su eficiencia durante la generación de electricidad y su rol en alterar crecimiento anaeróbico y metabolismo de *Escherichia coli* y *actinobacilus succinogenes*, dió como resultados que el rojo neutral es el mejor transportador de electrones que cualquier otro mediador usados en celdas microbianas y que la producción de lodos puede ser disminuido mientras la electricidad es generada”.

Ello fundamenta la utilización de esta sustancia en el experimento y por la elevada cantidad de electricidad obtenida por las celdas, que permitió el fácil transporte de los electrones desde las bacterias hasta el ánodo.

### **Influencia o no del pH y DBO**

De la tabla08 se puede obtener con un 95% de confianza que los niveles de DBO si tienen influencia con la cantidad de energía eléctrica producida en CCM dado a que posee un valor de  $p: 0.001$  que es mucho menor que el  $\text{error}=0.05$ . Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. De la tabla08 se obtiene con un 95% de confianza que la variación de pH si influye con la cantidad de energía eléctrica producida en CCM dado a que posee un  $p: 0.044$  muy cercano al 0.05 de error. No obstante, su efecto es muy pequeño. El efecto global es que el DBO afecta fuertemente la producción de energía eléctrica y que su variación se siente fuertemente, por el contrario, con el pH sucede que no afectó fuertemente y su efecto fue minúsculo.

## *CAPÍTULO V*

### *CONCLUSIONES*

De acuerdo con los resultados obtenidos, considerando un error del 5% y un nivel de confianza del 95% se demostró que no sólo los niveles de DBO de las aguas residuales crudas si tienen influencia con la cantidad de energía eléctrica, sino que también los ligeros incrementos del pH en las cámaras anódicas, no obstante, esta fue muy pequeña.

La dilución de la muestra original (242 mg/L dbó) tuvo un efecto negativo con la cantidad de energía eléctrica producida por las celdas. La CCM que utilizó agua residual cruda con dbó 242 mg/L obtuvo la máxima densidad de potencia y al diluir la muestra original este disminuyó (150 mg/L y 50 mg/L).

La celda con 242 mg/L produjo la máxima densidad de potencia de 190.021 mW/m<sup>2</sup>; que representó un 215 % superior a la celda 50 mg/L que produjo una máxima densidad de 60.19 mW/m<sup>2</sup>.

Los ligeros incrementos del pH en el compartimiento anódico demostraron menor influencia; pero positiva con la cantidad de energía eléctrica, ya que en los rangos donde se incrementó el pH se observaron los máximos en la densidad de potencia.

Al aumentar la carga de materia (DBO) en las celdas microbianas disminuyó el % de remoción, observándose un pico máximo en la celda con 150 mg/L dbó que tuvo la mayor capacidad de remoción, a partir de la cual con concentraciones superiores (242 mg/L dbó) se observó efecto contrario.

La máxima densidad de potencia de la celda con 242 mg/L fue alcanzado a los 83.3 h, mientras que en celda 150 mg/L fue de 114.5 h y para la celda 50 mg/L fue de 54.4 h.

## *CAPÍTULO VI*

### *RECOMENDACIONES*

Se recomienda a las futuras investigaciones poder llevar a cabo este proyecto a una escala piloto y evaluar su rendimiento en la producción de energía eléctrica utilizando aguas residuales de la Universidad ya que no es lo mismo laboratorio que la vida real.

Se debe investigar más sobre la construcción de superficies con una gran área de contacto cubiertas con grafito para la eficiente conducción de electricidad en celdas microbianas, dado a que la utilización de barras de grafitos puros es cara o no rentable para el proyecto.

Las aguas residuales con que se trabajaron tuvieron concentraciones moderadas de DBO y el tiempo de degradación fueron relativamente bajos, se debe mejorar y encontrar nuevas bacterias que degraden con más facilidad aguas residuales complejas.

El consorcio microbiano que se utilice debe ser siempre aclimatada a las condiciones a las cuales van a trabajar, en este caso trabajo a condiciones ambientales.

## ***CAPÍTULO VII***

### ***REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA***

- [1] Logan. B., Hamelers.B., Rozendal.R., Rabaey.K. (2006).Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*.40.5181-5192.
- [2] Ramnarayanan, R. & Logan.B. (2004).Production of electricity during Wastewater Treatment using a single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environment Science & Technology*.38.2281-2285.
- [3] Gil. G., Chang.I. Jang.J. KIM.H. (2003).Operational parameters affecting the performance of a mediator- less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*.18, 327-334.
- [4] Liu.H. ,Cheng.S & Logan.B. (2005).Production of Electricity from Acetate or Butyrate Using a Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Environment Science & Technology*.39, 658-662
- [5] Min.B. & Logan.B. (2004).Continuous Electricity Generation from Domestic Wastewater and Organic Substrates in a flat Plate Microbial Fuel Cell. *Environment Science & Technology*.38, 5809-5814.
- [6] Park.H.,Kim.B.,KIm.H.,Kim.H.,Chang.H.(2001).A novel Electrochemically Active and Fe(III)- reducing Bacterium Phylogenetically Related to Clostridium Butyricum isolated from a microbial fuel cell.*Anaerobe*.7, 297-306.
- [7] ZEIKUS.J. PARK.D. (2015). Electricity generation in microbial fuel cells using Neutral Red as an Electronophore. *Applied and Environmental Microbiology*.66. 1292-1297.
- [8] Bennetto, H.P., Delaney G.M., Mason J.R., Roller S., Stirling, J.L.,Hurston, C.F. (1985). The sucrose fuel cell: efficient biomass conversion using a microbial catalyst. *Biotechnology*. 7. 699–705
- [9] Dealney, G. M., Bennetto H. P., Mason J. R., Roller, S. B., Stirling J. L.,Thurston C. F. (1984) Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. Performance of fuel cells containing

selected microorganism-mediator-substrate combinations. *Chem. Tech. Biotechnology.* 34B. 13–27.

- [10] Genaro.A.R. (2003).Remington Farmacia. Buenos Aires, Argentina. Editorial Médica Panamericana S.A.
- [11] Pimienta, J. (1980).La captación de aguas subterráneas. Barcelona, España. Editores técnicos asociados.s.a.
- [12] Castillo.A.C., Bermúdez.G.O. (2006). Técnicas de diagnóstico parasitológico. Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- [13] Villada.F.M. (2014). Souvenirs En Fieltro. Buenos Aires, Argentina. Editorial LEA S.A
- [14] Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. (2007). San José, Costa Rica. Editorial IICA.
- [15] Castillo, C. (2002). Revista RECITEIA. Cali, Colombia.
- [16] Sastre.S.J. (2007). Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Editorial Fundación EOI.
- [17] Prats.G. (2007). Microbiología Clínica. Barcelona, España. Editorial Médica Panamericana.
- [18] Illanes.A. (2008).Enzyme Biocatalysis. Chile. Editorial Springer.
- [19] Chapman & Hall. (1993).Biosensors. Saint-Etienne, Francia. Editorial Normandie.
- [20] Iglesias, B.G., Gallardo.M.L., Velasco, A.I., Moltalvo, J.P. Bases de la fisiología. Editorial Tébar.
- [21] Sternhein, M.M. (2007). Física. Barcelona, España: Editorial Reverté.S. A
- [22] Park, D. H.; Zeikus, J. G. (2002). *Appl. Microbiol. Biotechnology.* 59. 58-61.
- [23] Reimers, C. E., Tender, L. M., Ferig, S., Wang, W. (2001).*Environ. Sci. Technol.* 35, 192-195.

- [24] Rosenberger, S., Kru"ger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U., Kraume, (2002). *M. Water Res.* 36, 413-420.
- [25] Basura V. I.; Beattie, P. D.; Holdcroft, S. J. (1998). *Electroanal. Chem.* 458, 1-5
- [26] Apha, Awa, Wpcf. (1992). In *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association: Washington, D.C.
- [27] Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S. , Kim, B. H.(2004). Construction and operation of a novel mediator and membrane less microbial fuel cell. *Proc. Biochemical.* 39(8), 1007-1012.
- [28] Park, D. H.; Zeikus J. G. (2003). *Biotechnol. Bioeng.* 81, 348-355.
- [29] Schroder, U., Nie"en, J., Scholz, F., *Angew. (2013).Chemical.*42, 2880-2883.
- [30] Galardo, G.A., Caisaguano, A.E. (2015). Tesis de grado (Influencia de la demanda bioqu"mica de ox"geno en la producci"n de bioelectricidad dentro de la celda de combustible microbiana). Escuela Superior Politecnica de Chimborazo. Ecuador.
- [31] Cui, M., Ma, A., Qi, H., Zhuang, X., Zhung, G. 2015. Anaerobic oxidation of methane: an "active" microbial process. *Microbiology open.* 4(1). 1-11.
- [32] Gude, G. V. 2016. Wastewater treatment in microbial fuel cells an overview. *Journal of cleaner production.* 122.287-307.
- [33] Karp, G. 2006. *Cell and molecular biology*. Estados Unidos.
- [34] Sousa, Z. D., Pereira, A.M., Stams, M., Magdalena, M., Smidt, H. 2007. Microbial communities involved in anaerobic degradation of unsaturated or saturated long-chain fatty acids. *Applied and environmental microbiology.*73 (4). 1054-1064.

- [35] Jadhav, S., Ghangrekar, M. 2009. Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource technology*. 100(2). 717-723.
- [36] Marashi, F., Kariminia, R. 2015. Performance of a single chamber microbial fuel cell at different organic loads and pH values using purified terephthalic acid wastewater. 13(1). 2-6.
- [37] U.S. Naval Research Laboratory. 2013. Washintong. El inventor de NRL analiza las celdas de combustibles bentónicas, la electricidad de las aguas residuales y el combustible a partir de CO<sub>2</sub>. Recuperado de [https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2013/NRL-researcher-discusses-benthic-fuel-cells-electricity-from-wastewater-and-fuel-from-CO<sub>2</sub>](https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2013/NRL-researcher-discusses-benthic-fuel-cells-electricity-from-wastewater-and-fuel-from-CO2)
- [38] Treehunger. 2010. Pinterest: La celda de combustible microbiana de robot híbrido transforma el agua contaminada en vegetación. Gijón, España. Recuperado de <https://www.treehugger.com/clean-technology/hybrid-robots-microbial-fuel-cell-transforms-polluted-water-into-vegetation.html>.
- [39] Saeed, M. H, Husseini, A. G., Yousef, S., Saif, J., Al-Asheh, S. J., Fara, A. A., Azzam, S., Khawaga, R., Aidan, A. 2015. Microbial desalination cell technology: A review and a case stud. *Desalination*. 359(2). 1-13.
- [40] Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B. 2017. Microbial fuel cell: From fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*. 356. 225-244.
- [41] Gonzales del Campo, A., Cañizares, P., Lobato, J., Rodrigo. M., Morales, J. F. 2014. Effects of external resistance on microbial fuel cell's performance. *The Handbook of environmental Chemistry*. 34. 175-197.

- [42] Rismani, Y. H., Christy, A. D. Carver, S., Yu, Z., Dehority, B. A., Tuovinen, O. H. 2011. Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. *Biosource Technology*. 102(1). 278-283.
- Liu, T., Yu, Y.Y., Li, D., Song, H., Yan, X., Chen, N. W. 2015. The effect of external resistance on biofilm formation and internal resistance in *Shewanella* inoculated microbial fuel cells. *RSC Advances*. 6. 20317-20323.
- [43] Feng, Y., Wang, X., Logan, B., Lee, H. 2008. Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cell. *Environmental Biotechnology*. 78. 873-880.
- [44] Song, Y., An, J., Chae, J. K. 2017. Effect of temperature variation on the performance of microbial fuel cell. *Energy Technology*. 5 (12). 2163-2167.
- [45] Prasertsung, N., Ratanatamskul, Ch. 2013. Effects of organic loading rate and operating temperature on power generation from cassava wastewater by a single- chamber microbial fuel cell. *Desalination and water treatment*. 52. 937-946.
- [46] Sund, C.J., McMasters, S., Crittenden, S.R., Harrell, L.E., Sumner, L.L. 2007. Effect of electron mediators on current generation and fermentation in a microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 76(3). 561-568.
- [47] Taskan, E., Ozkaya, B., Hasar, H. 2014. Effect of different mediator concentrations on power generations in MFCs using Ti-TiO<sub>2</sub> electrode. *International Journal of Energy Science*. 4(1). 9-11.
- [48] Catal, T. 2016. Comparison of various carbohydrates for hydrogen production in microbial electrolysis cell. *Agriculture and Environmental Biotechnology*. 30(1). 75-80.

- [49] Grobber, C., Viridis, B., Nouwens, A., Harnisch, F., Rabaey, K., Bond, P. (2017). Effect of the anode potencial on the physiology and proteome of *Shewanella oneidensis* MR-1. *Bioelectrochemistry*. 119. 172-179.
- [50] Ferrer, J., Carrera, M. 1992. *Iniciacion a la fisica*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- [51] Fermentaciones y metanogénesis. (s.f.). Recuperado de <https://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p4-metanogenesis.pdf>
- [52] Rodriguez, J. A. (s.f.). Recuoerado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- [53] Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., Leropoulos, L. 2017. Microbial fuel cells: from fundamentals to applications. A review. *Journal of Power Sources*. 356.225-244.
- [54] Pinto, D. 2017. Tesis Doctoral (Electronic transfer within a microbial fuel cell. Better understanding of experimental and structural parameter at the interface between electro-active bacteria and carbon-based electrodes). Universite Pierre et Marie Curie. Paris.
- [55] Kim, J. H., Park, S. H., Hyun, S. M., Chang, S. I., Kim, M., Kim, H. B. 2002. A mediador- less Microbial fuel cell using a metal reducing Bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology*. 30(2). 145-152.
- [56] Read, T. S., Dutta, P., Bond, L.P., Keller, J., Rabaey, K. 2010. Initial development and strucutre of biofilms on Microbial fuel cell anodes. *BMC Microbiology*. 10.
- [57] Baranitharan, E., Khan, M. R., Prasad, D.M.R., Teo, W.F., Tan, G. Y., Jose, R. 2014. Effect of biofilm formation on the performance of microbial fuel cell for the treatment of palm oil mill effluent. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 38(1). 15-24.

- [58] Luo, H., Xu, G., Lu, Y., Zhang, R., Li, X., Zheng, X., Yu, M. 2017. Electricity generation in a microbial fuel cell using yogurt wastewater under alkaline conditions. *Royal Society of Chemistry*. 7. 32826-32832.
- [59] Chaturvedi, V., Verma, P. 2016. Microbial fuel cell: a green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity. *Bioresources and Bioprocessing*. 3. 38.

## *CAPÍTULO VIII*

### *ANEXOS*

*Anexo: Seccion imágenes*

**8.1. Anexo 1: Imágenes de equipos y materiales**

**Equipos**



*Figura 15. Cocina Eléctrica*



*Figura 16. Estufa para el enriquecimiento del agua residual*



*Figura 17.* Equipo de titulacion



*Figura 18.* Aireador para peceras

## Materiales



*Figura 19.* botella de PVC de 500 ml y una lata de paneton que fue utilizado como Jarra de Brewer



**Figura 20.** Unión universal de 1"



**Figura 21.** Botella de vidrio para la preparación del consorcio microbiano



**Figura 22.** Probeta Graduada

**(Fuente:** foto tomada por el investigador)

## 8.2. Anexo 2: Imágenes de los reactivos





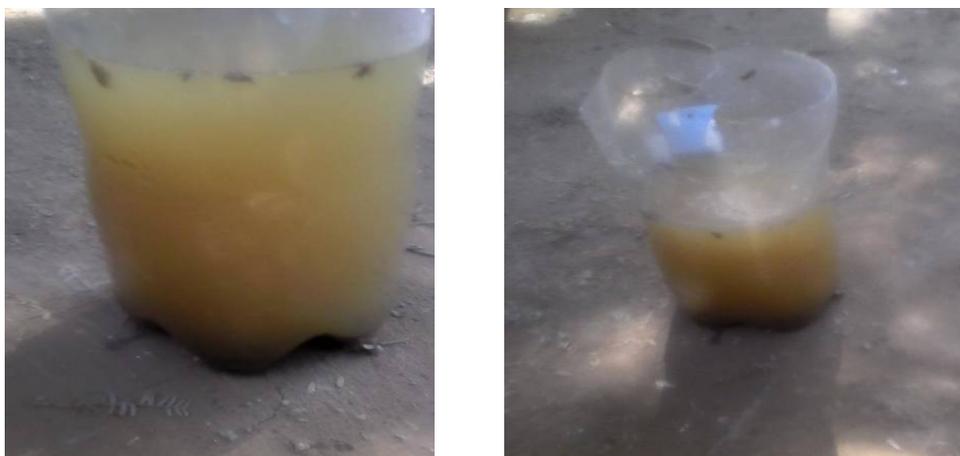
Mediador rojo neutral

*Figura 23.* Reactivos utilizados para la medición del DBO<sub>5</sub>. (**Fuente:** Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

### 8.3. Anexo 3: Imágenes del muestreo, medición y obtención de soluciones de 50 y 150 ppm.



*Figura 24.* Punto de muestreo, Canal de descarga del agua residual a laguna de estabilización. (Fuente: foto tomada por el investigador)



*Figura 25.* Muestra obtenida del agua residual. (Fuente: foto tomada por el investigador)



*Figura 26.* Medición de los parámetros fisicoquímicos de la muestra original. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

#### **Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno**



*Figura 27.* Dilución De La Muestra original. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

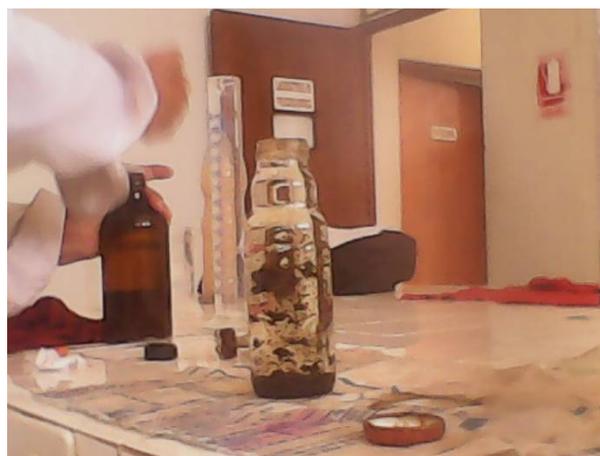




*Figura 28.* Adición De Reactivos. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)



*Figura 29.* Medición de la demanda bioquímica de oxígeno. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)



*Figura 30.* Burbujeo de aire por 5 minutos y adición de ácido sulfúrico. Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG- Lambayeque)



*Figura 31.* Toma de 201 ml de la muestra residual procesada



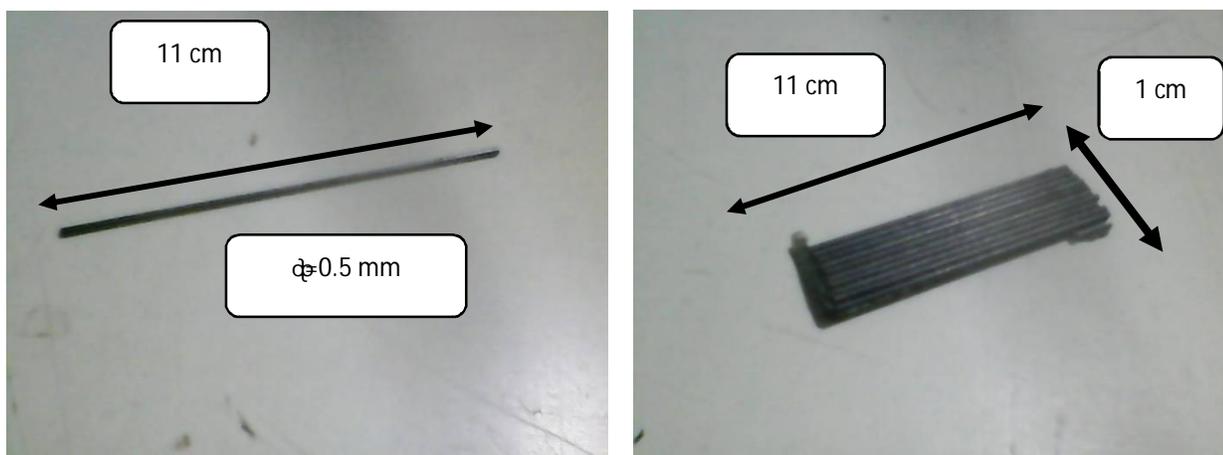


*Figura 32.* Titulación de la muestra con tiosulfato. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

#### 8.4. Anexo 4. Imágenes del proceso de construcción de las celdas microbianas



*Figura 33.* Incubación del agua residual para enriquecimiento del consorcio microbiano. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)



*Figura 34.* electrodos utilizados para las celdas microbianas. (Fuente: Foto tomada con permiso en el laboratorio de fisicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

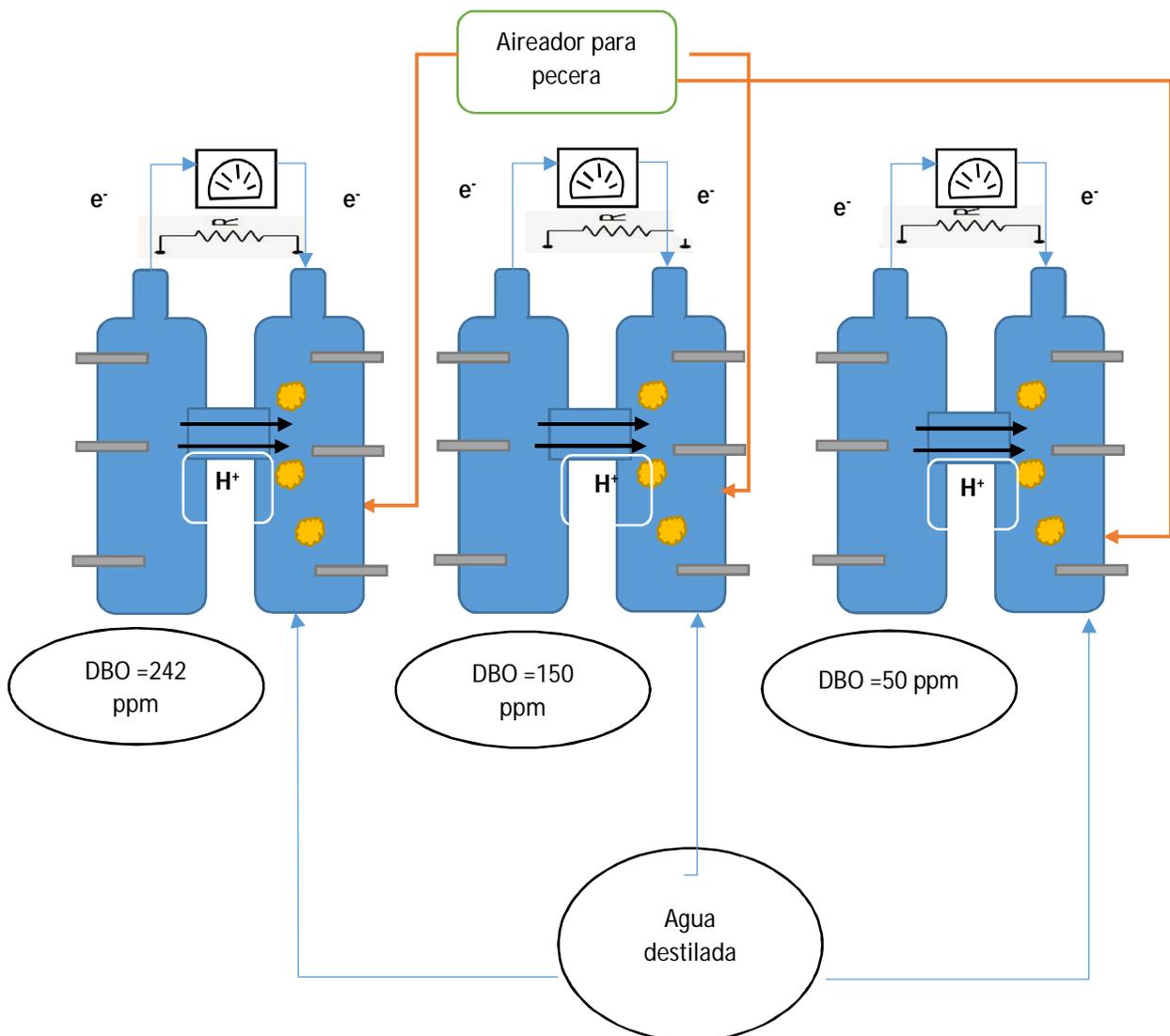


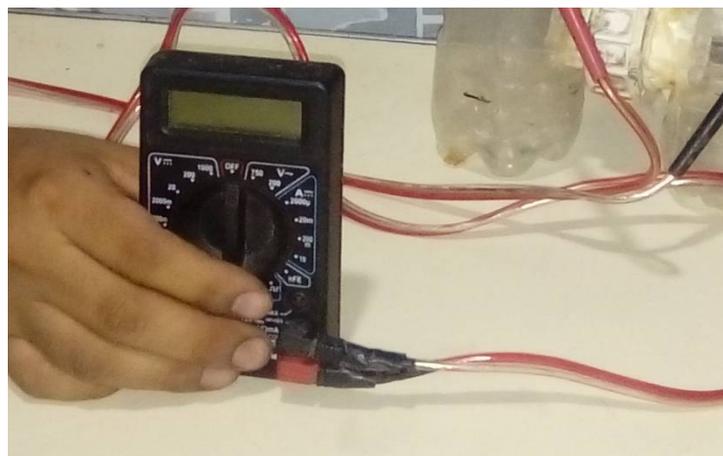
Figura 35. Armado de las celdas microbianas. (Fuente: Foto tomada del autor)



*Figura 36.* Armado del puente salino. (Fuente: Foto tomada por el propio autor)



*Figura 37.* Ensamble Del Cada Uno De Las Celda 1,2 y3



*Figura 38.* Multitester utilizado para medir voltaje (Fuente: Foto tomada por el propio autor).



*Figura 39.* Laboratorio De Físicoquímica de la UNPRG. (**Fuente:** Foto tomada con permiso en el laboratorio de físicoquímica de la UNPRG-Lambayeque)

### 8.5. Anexo 5: Sección tablas

Tabla 10. Tratamiento de acuerdo a la cantidad de DBO y sólidos en suspensión. (Tomada con permiso de Sedalib.S. A)

Proceso de tratamiento	Remoción (%)		Remoción (ciclos log10)	
	DBO	Sólidos en suspensión	Bacterias	Helmintos
Sedimentación primaria	25-30	40-70	0-1	0-1
Lodos activados	70-95	70-95	0-2	0-1
Filtros percolados	50-90	70-90	0-2	0-1
Lagunas aereadas	80-90	(c)	1-2	0-1
Zanja de oxidación	70-95	80-95	1-2	0-1
Lagunas de estabilización	70-85	(c)	1-6	1-4

Nota: (a) precedidos y seguidos de sedimentación, (b) incluye laguna secundaria, (c) Dependiente del tipo de laguna, (d) Seguidas de sedimentación, (e) Dependiente del número de lagunas y otros factores como temperatura, periodo de retención y forma de lagunas.

Tabla 11: Degradación biológica de constituyentes de aguas residuales (Nemerow, 1977)

<b>Sustancia a degradar</b>	<b>Tipo de enzima</b>	<b>Descomposición anaeróbica</b>	<b>Descomposición aeróbica</b>
Proteínas	Proteinasas	Aminoácidos	Amoniacos
		Amoniacos	Nitritos
		Sulfhídrico	Nitratos
		Dióxido de carbono	Ácido sulfúrico
		Hidrogeno	Alcoholes
		Alcoholes	Ácidos orgánicos
		Ácidos orgánicos	Dióxido de carbono
		Fenoles	Agua
Hidratos de carbono	Carboxidasas	Dióxido de carbono	Alcoholes
		Hidrogeno	Alcoholes
		Alcoholes	Agua
			Dióxido de carbono

(Esta tabla ha sido tomada del trabajo: Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con poblaciones menor a 25.000 habitantes en la VII región)

*Tabla 7: Composición del Buffer a pH= 7*

<b>NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(ml)</b>	<b>Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (ml)</b>	<b>Agua destilada (mL)</b>
195	305	500

**Fuente:** Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos11/prepsolu/prepsolu.shtml>

*Tabla 12. Las alícuotas tomadas de acuerdo al % de dilución son:*

<b>Muestra</b>	<b>%dilución</b>	<b>V, alícuota ml</b>	<b>V, dilución ml</b>
Efluente industrial	0.5	3.5	700
Desagüe crudo	2	14	700
Efluente tratado	10	70	700

**Fuente:** Manual de análisis de agua residuales de la UNPRG

*Tabla 13. Composición del agua de enriquecimiento*

<b>Composición</b>	<b>g/L</b>
Glucosa	4.00
KCl	0.31
NH <sub>4</sub> Cl	0.13
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	2.75
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	4.97
Agua destilada	1000 ml

**Fuente:** Alzate et al., 2008

### 8.6. Anexo 6: Datos de la celda 50, celda 150 y celda 242 mg/L.

Tabla 14. Parámetros medidos de la celda microbiana con 50 mg/L DBO

Tiempo (horas)	Intensidad de corriente Ma	Resistencia eléctrica $\Omega$	Voltaje eléctrico mV	Potencia eléctrica mW	Área del electrodo m <sup>2</sup>	Potencia mW/m <sup>2</sup>
0	0.8718	218	190.05	0.1657	0.003768	43.976
0.13	0.8724	218	190.18	0.1659	0.003768	44.029
0.3	0.873	218	190.31	0.1661	0.003768	44.082
0.46	0.8736	218	190.44	0.1664	0.003768	44.161
0.63	0.8742	218	190.57	0.1666	0.003768	44.214
0.8	0.8748	218	190.70	0.1668	0.003768	44.268
0.96	0.8754	218	190.83	0.1671	0.003768	44.347
1.13	0.8760	218	190.96	0.1673	0.003768	44.4
1.3	0.8766	218	191.09	0.1675	0.003768	44.453
1.46	0.8772	218	191.22	0.1677	0.003768	44.506
1.63	0.8778	218	191.36	0.168	0.003768	44.586
1.66	0.8784	218	191.49	0.1682	0.003768	44.639
1.8	0.8790	218	191.62	0.1684	0.003768	44.692
1.96	0.8796	218	191.75	0.1687	0.003768	44.772
2.13	0.8802	218	191.88	0.1689	0.003768	44.825
2.3	0.8808	218	192.01	0.1691	0.003768	44.878
2.46	0.8814	218	192.1452	0.1694	0.003768	44.958
2.63	0.8820	218	192.276	0.1696	0.003768	45.011
2.8	0.8826	218	192.4068	0.1698	0.003768	45.064
2.96	0.8832	218	192.5376	0.17	0.003768	45.117
3.13	0.8838	218	192.6684	0.1703	0.003768	45.196
3.3	0.8844	218	192.7992	0.1705	0.003768	45.249

3.33	0.885	218	192.93	0.1707	0.003768	45.303
3.46	0.8856	218	193.0608	0.171	0.003768	45.382
3.63	0.8862	218	193.1916	0.1712	0.003768	45.435
3.8	0.8868	218	193.3224	0.1714	0.003768	45.488
3.96	0.8874	218	193.4532	0.1717	0.003768	45.568
4.13	0.8880	218	193.584	0.1719	0.003768	45.621
4.3	0.8886	218	193.7148	0.1721	0.003768	45.674
4.46	0.8892	218	193.8456	0.1724	0.003768	45.754
4.63	0.8898	218	193.9764	0.1726	0.003768	45.807
4.8	0.8904	218	194.1072	0.1728	0.003768	45.86
5	0.8910	218	194.238	0.1731	0.003768	45.939
5.13	0.8916	218	194.3688	0.1733	0.003768	45.993
5.3	0.8922	218	194.4996	0.1735	0.003768	46.046
5.46	0.8928	218	194.6304	0.1738	0.003768	46.125
5.63	0.8934	218	194.7612	0.174	0.003768	46.178
5.8	0.8940	218	194.892	0.1742	0.003768	46.231
5.96	0.9000	218	196.2	0.1766	0.003768	46.868
6.13	0.9006	218	196.3308	0.1768	0.003768	46.921
6.3	0.9012	218	196.4616	0.1771	0.003768	47.001
6.46	0.9018	218	196.5924	0.1773	0.003768	47.054
6.63	0.9024	218	196.7232	0.1775	0.003768	47.107
6.96	0.903	218	196.854	0.1778	0.003768	47.187
7.13	0.9036	218	196.9848	0.178	0.003768	47.24
7.3	0.9042	218	197.1156	0.1782	0.003768	47.293
7.46	0.9048	218	197.2464	0.1785	0.003768	47.373
7.63	0.9054	218	197.3772	0.1787	0.003768	47.426
7.8	0.9060	218	197.508	0.1789	0.003768	47.479
7.96	0.9066	218	197.6388	0.1792	0.003768	47.558

8.13	0.9072	218	197.7696	0.1794	0.003768	47.611
8.3	0.9078	218	197.9004	0.1797	0.003768	47.691
8.46	0.9084	218	198.0312	0.1799	0.003768	47.744
8.63	0.909	218	198.162	0.1801	0.003768	47.797
8.8	0.9096	218	198.2928	0.1804	0.003768	47.877
8.96	0.9102	218	198.4236	0.1806	0.003768	47.93
9.13	0.9108	218	198.5544	0.1808	0.003768	47.983
9.3	0.9114	218	198.6852	0.1811	0.003768	48.063
9.46	0.912	218	198.816	0.1813	0.003768	48.116
9.63	0.9126	218	198.9468	0.1816	0.003768	48.195
9.8	0.9132	218	199.0776	0.1818	0.003768	48.248
9.96	0.9138	218	199.2084	0.182	0.003768	48.301
10.13	0.9144	218	199.3392	0.1823	0.003768	48.381
10.3	0.915	218	199.47	0.1825	0.003768	48.434
10.46	0.9156	218	199.6008	0.1828	0.003768	48.514
10.8	0.9162	218	199.7316	0.183	0.003768	48.567
10.96	0.9168	218	199.8624	0.1832	0.003768	48.62
11.13	0.9174	218	199.9932	0.1835	0.003768	48.7
11.3	0.9180	218	200.124	0.1837	0.003768	48.753
11.46	0.9186	218	200.2548	0.184	0.003768	48.832
11.63	0.9192	218	200.3856	0.1842	0.003768	48.885
11.8	0.9198	218	200.5164	0.1844	0.003768	48.938
11.96	0.9204	218	200.6472	0.1847	0.003768	49.018
12.13	0.9210	218	200.778	0.1849	0.003768	49.071
12.3	0.9216	218	200.9088	0.1852	0.003768	49.151
12.46	0.9222	218	201.0396	0.1854	0.003768	49.204
12.8	0.9228	218	201.1704	0.1856	0.003768	49.257
13.13	0.9234	218	201.3012	0.1859	0.003768	49.337

13.46	0.9240	218	201.432	0.1861	0.003768	49.39
13.63	0.9246	218	201.5628	0.1864	0.003768	49.469
13.8	0.9252	218	201.6936	0.1866	0.003768	49.522
13.96	0.9258	218	201.8244	0.1868	0.003768	49.575
14.13	0.9264	218	201.9552	0.1871	0.003768	49.655
14.3	0.927	218	202.086	0.1873	0.003768	49.708
14.46	0.9276	218	202.2168	0.1876	0.003768	49.788
14.8	0.9282	218	202.3476	0.1878	0.003768	49.841
14.96	0.9288	218	202.4784	0.1881	0.003768	49.92
15.13	0.9294	218	202.6092	0.1883	0.003768	49.973
15.3	0.9300	218	202.74	0.1885	0.003768	50.027
15.46	0.9306	218	202.8708	0.1888	0.003768	50.106
15.63	0.9312	218	203.0016	0.189	0.003768	50.159
15.8	0.9318	218	203.1324	0.1893	0.003768	50.239
15.96	0.9324	218	203.2632	0.1895	0.003768	50.292
16.13	0.933	218	203.394	0.1898	0.003768	50.372
16.3	0.9336	218	203.5248	0.19	0.003768	50.425
16.46	0.9342	218	203.6556	0.1903	0.003768	50.504
30.46	0.9348	218	203.7864	0.1905	0.003768	50.557
30.8	0.9354	218	203.9172	0.1907	0.003768	50.61
31.13	0.9360	218	204.048	0.191	0.003768	50.69
31.46	0.9366	218	204.1788	0.1912	0.003768	50.743
31.63	0.9372	218	204.3096	0.1915	0.003768	50.823
31.8	0.9378	218	204.4404	0.1917	0.003768	50.876
32.13	0.9384	218	204.5712	0.192	0.003768	50.955
32.46	0.9390	218	204.702	0.1922	0.003768	51.008
32.8	0.9396	218	204.8328	0.1925	0.003768	51.088
33.03	0.9402	218	204.9636	0.1927	0.003768	51.141

33.2	0.9408	218	205.0944	0.193	0.003768	51.221
33.36	0.9414	218	205.2252	0.1932	0.003768	51.274
33.7	0.9420	218	205.356	0.1934	0.003768	51.327
33.73	0.9426	218	205.4868	0.1937	0.003768	51.407
33.86	0.9432	218	205.6176	0.1939	0.003768	51.46
34.03	0.9438	218	205.7484	0.1942	0.003768	51.539
34.2	0.9444	218	205.8792	0.1944	0.003768	51.592
34.36	0.9450	218	206.01	0.1947	0.003768	51.672
34.53	0.9456	218	206.1408	0.1949	0.003768	51.725
34.7	0.9462	218	206.2716	0.1952	0.003768	51.805
34.8	0.9468	218	206.4024	0.1954	0.003768	51.858
35.0	0.9474	218	206.5332	0.1957	0.003768	51.937
35.2	0.948	218	206.664	0.1959	0.003768	51.99
35.3	0.9486	218	206.7948	0.1962	0.003768	52.07
35.7	0.9492	218	206.9256	0.1964	0.003768	52.123
35.8	0.9498	218	207.0564	0.1967	0.003768	52.203
36.0	0.9504	218	207.1872	0.1969	0.003768	52.256
36.2	0.951	218	207.318	0.1972	0.003768	52.335
36.3	0.9516	218	207.4488	0.1974	0.003768	52.389
36.5	0.9522	218	207.5796	0.1977	0.003768	52.468
36.7	0.9528	218	207.7104	0.1979	0.003768	52.521
36.8	0.9534	218	207.8412	0.1982	0.003768	52.601
37.0	0.9540	218	207.972	0.1984	0.003768	52.654
37.2	0.9546	218	208.1028	0.1987	0.003768	52.734
37.3	0.9552	218	208.2336	0.1989	0.003768	52.787
37.7	0.9558	218	208.3644	0.1992	0.003768	52.866
38.0	0.9564	218	208.4952	0.1994	0.003768	52.919
38.2	0.9570	218	208.626	0.1997	0.003768	52.999

38.2	0.9576	218	208.7568	0.1999	0.003768	53.052
38.3	0.9582	218	208.8876	0.2002	0.003768	53.132
38.36	0.9588	218	209.0184	0.2004	0.003768	53.185
38.43	0.9594	218	209.1492	0.2007	0.003768	53.264
38.53	0.9600	218	209.28	0.2009	0.003768	53.317
38.56	0.9606	218	209.4108	0.2012	0.003768	53.397
38.7	0.9612	218	209.5416	0.2014	0.003768	53.45
38.8	0.9618	218	209.6724	0.2017	0.003768	53.53
38.9	0.9624	218	209.8032	0.2019	0.003768	53.583
39.2	0.9630	218	209.934	0.2022	0.003768	53.662
39.3	0.9636	218	210.0648	0.2024	0.003768	53.715
39.7	0.9642	218	210.1956	0.2027	0.003768	53.795
40.0	0.9648	218	210.3264	0.2029	0.003768	53.848
40.2	0.9654	218	210.4572	0.2032	0.003768	53.928
40.23	0.9660	218	210.588	0.2034	0.003768	53.981
40.26	0.9666	218	210.7188	0.2037	0.003768	54.061
40.3	0.9672	218	210.8496	0.2039	0.003768	54.114
40.36	0.9678	218	210.9804	0.2042	0.003768	54.193
40.43	0.9684	218	211.1112	0.2044	0.003768	54.246
40.5	0.9690	218	211.242	0.2047	0.003768	54.326
40.53	0.9696	218	211.3728	0.2049	0.003768	54.379
40.56	0.9702	218	211.5036	0.2052	0.003768	54.459
40.6	0.9708	218	211.6344	0.2055	0.003768	54.538
40.7	0.9714	218	211.7652	0.2057	0.003768	54.591
40.76	0.9720	218	211.896	0.206	0.003768	54.671
40.83	0.9726	218	212.0268	0.2062	0.003768	54.724
40.86	0.9732	218	212.1576	0.2065	0.003768	54.804
40.9	0.9738	218	212.2884	0.2067	0.003768	54.857

41.03	0.9744	218	212.4192	0.207	0.003768	54.936
41.1	0.9750	218	212.55	0.2072	0.003768	54.989
41.16	0.9756	218	212.6808	0.2075	0.003768	55.069
41.2	0.9762	218	212.8116	0.2077	0.003768	55.122
41.36	0.9768	218	212.9424	0.208	0.003768	55.202
41.7	0.9774	218	213.0732	0.2083	0.003768	55.281
42.03	0.9780	218	213.204	0.2085	0.003768	55.334
42.1	0.9786	218	213.3348	0.2088	0.003768	55.414
42.13	0.9792	218	213.4656	0.209	0.003768	55.467
42.16	0.9798	218	213.5964	0.2093	0.003768	55.547
42.2	0.9804	218	213.7272	0.2095	0.003768	55.6
42.23	0.9810	218	213.858	0.2098	0.003768	55.679
42.26	0.9816	218	213.9888	0.2101	0.003768	55.759
42.3	0.9822	218	214.1196	0.2103	0.003768	55.812
42.33	0.9828	218	214.2504	0.2106	0.003768	55.892
42.36	0.9834	218	214.3812	0.2108	0.003768	55.945
42.4	0.9840	218	214.512	0.2111	0.003768	56.024
42.43	0.9846	218	214.6428	0.2113	0.003768	56.077
42.5	0.9852	218	214.7736	0.2116	0.003768	56.157
42.53	0.9858	218	214.9044	0.2119	0.003768	56.237
42.6	0.9864	218	215.0352	0.2121	0.003768	56.29
42.66	0.9870	218	215.166	0.2124	0.003768	56.369
43.7	0.9876	218	215.2968	0.2126	0.003768	56.423
44.03	0.9882	218	215.4276	0.2129	0.003768	56.502
44.2	0.9888	218	215.5584	0.2131	0.003768	56.555
44.3	0.9894	218	215.6892	0.2134	0.003768	56.635
44.36	0.9900	218	215.82	0.2137	0.003768	56.714
44.5	0.9906	218	215.9508	0.2139	0.003768	56.768

44.56	0.9912	218	216.0816	0.2142	0.003768	56.847
44.63	0.9918	218	216.2124	0.2144	0.003768	56.9
44.7	0.9924	218	216.3432	0.2147	0.003768	56.98
45.36	0.9930	218	216.474	0.215	0.003768	57.059
45.7	0.9936	218	216.6048	0.2152	0.003768	57.113
46.03	0.9942	218	216.7356	0.2155	0.003768	57.192
46.2	0.9948	218	216.8664	0.2157	0.003768	57.245
46.36	0.9954	218	216.9972	0.216	0.003768	57.325
46.53	0.9960	218	217.128	0.2163	0.003768	57.404
46.7	0.9966	218	217.2588	0.2165	0.003768	57.458
46.86	0.9972	218	217.3896	0.2168	0.003768	57.537
47.03	0.9978	218	217.5204	0.217	0.003768	57.59
47.2	0.9984	218	217.6512	0.2173	0.003768	57.67
47.36	0.9990	218	217.782	0.2176	0.003768	57.749
47.7	0.9996	218	217.9128	0.2178	0.003768	57.803
47.86	1.0002	218	218.0436	0.2181	0.003768	57.882
48.03	1.0008	218	218.1744	0.2183	0.003768	57.935
48.2	1.0014	218	218.3052	0.2186	0.003768	58.015
48.36	1.0020	218	218.436	0.2189	0.003768	58.094
48.53	1.0026	218	218.5668	0.2191	0.003768	58.148
48.7	1.0032	218	218.6976	0.2194	0.003768	58.227
48.86	1.0038	218	218.8284	0.2197	0.003768	58.307
49.03	1.0044	218	218.9592	0.2199	0.003768	58.36
49.2	1.0050	218	219.09	0.2202	0.003768	58.439
49.36	1.0056	218	219.2208	0.2204	0.003768	58.493
49.7	1.0062	218	219.3516	0.2207	0.003768	58.572
49.86	1.0068	218	219.4824	0.221	0.003768	58.652
50.03	1.0074	218	219.6132	0.2212	0.003768	58.705

50.2	1.008	218	219.744	0.2215	0.003768	58.785
50.36	1.0086	218	219.8748	0.2218	0.003768	58.864
50.53	1.0092	218	220.0056	0.222	0.003768	58.917
50.7	1.0098	218	220.1364	0.2223	0.003768	58.997
50.86	1.0104	218	220.2672	0.2226	0.003768	59.076
51.03	1.0110	218	220.398	0.2228	0.003768	59.13
51.2	1.0116	218	220.5288	0.2231	0.003768	59.209
51.36	1.0122	218	220.6596	0.2234	0.003768	59.289
51.7	1.0128	218	220.7904	0.2236	0.003768	59.342
51.86	1.0134	218	220.9212	0.2239	0.003768	59.421
52.03	1.014	218	221.052	0.2241	0.003768	59.475
52.2	1.0146	218	221.1828	0.2244	0.003768	59.554
52.36	1.0152	218	221.3136	0.2247	0.003768	59.634
52.53	1.0158	218	221.4444	0.2249	0.003768	59.687
52.7	1.0164	218	221.5752	0.2252	0.003768	59.766
52.86	1.0170	218	221.706	0.2255	0.003768	59.846
53.03	1.0176	218	221.8368	0.2257	0.003768	59.899
53.2	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
53.7	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
53.86	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
54.03	1.02	218	222.36	0.2268	0.003768	60.191
54.2	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
54.36	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
54.53	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
54.7	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
54.86	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
55.03	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
55.2	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111

55.36	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
55.7	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
55.86	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
56.03	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
56.2	1.017	218	221.706	0.2255	0.003768	59.846
56.36	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
56.53	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
56.7	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
56.86	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
57.03	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
57.2	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
57.36	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
57.7	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
57.86	1.017	218	221.706	0.2255	0.003768	59.846
58.03	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
58.2	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
58.36	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
58.53	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
58.7	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
58.86	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
59.03	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
59.2	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
59.36	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
59.7	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
59.86	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
60.03	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
60.2	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
60.45	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979

60.7	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
60.95	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
61.2	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
61.45	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
61.7	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
61.95	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
62.45	1.0182	218	221.9676	0.226	0.003768	59.979
62.95	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
63.45	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
63.7	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
63.95	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
64.2	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
64.86	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
65.53	1.0194	218	222.2292	0.2265	0.003768	60.111
66.2	1.002	218	218.436	0.2189	0.003768	58.094
66.86	0.978	218	213.204	0.2085	0.003768	55.334
67.53	0.924	218	201.432	0.1861	0.003768	49.39
68.2	0.9	218	196.2	0.1766	0.003768	46.868
68.86	0.9063	218	197.5734	0.1791	0.003768	47.532
69.53	0.9061	218	197.53416	0.179	0.003768	47.505
70.2	0.9063	218	197.5734	0.1791	0.003768	47.532
70.86	0.906	218	197.508	0.1789	0.003768	47.479
71.53	0.906	218	197.508	0.1789	0.003768	47.479
72.2	0.906	218	197.508	0.1789	0.003768	47.479
72.86	0.906	218	197.508	0.1789	0.003768	47.479

---

(Fuente: obtenidas por el investigador en el periodo experimental)

Tabla 15. Parámetros medidos de la celda microbiana con 150 mg/L DBO

<b>Tiempo (Horas )</b>	<b>Intensidad De Corriente Ma</b>	<b>Resistencia Eléctrica <math>\Omega</math></b>	<b>Voltaje Eléctrico mV</b>	<b>Potencia Eléctrica Mw</b>	<b>Área Del Electrodo m2</b>	<b>otencia mW/m2</b>
0	1.1333	218	247.06	0.3733	0.003768	99.071
0.5	1.1341	218	247.23	0.3739	0.003768	99.23
1	1.1349	218	247.40	0.3744	0.003768	99.363
1.5	1.1356	218	247.57	0.3749	0.003768	99.496
2	1.1364	218	247.74	0.3754	0.003768	99.628
2.5	1.1372	218	247.91	0.3759	0.003768	99.761
3	1.1380	218	248.08	0.3764	0.003768	99.894
3.5	1.1388	218	248.25	0.377	0.003768	100.053
4	1.1395	218	248.42	0.3775	0.003768	100.186
4.5	1.1403	218	248.59	0.378	0.003768	100.318
5	1.1411	218	248.76	0.3785	0.003768	100.451
5.5	1.1419	218	248.93	0.379	0.003768	100.584
6	1.1427	218	249.10	0.3795	0.003768	100.717
6.5	1.1434	218	249.27	0.3801	0.003768	100.876
7	1.1442	218	249.44	0.3806	0.003768	101.008
7.5	1.1450	218	249.61	0.3811	0.003768	101.141
8	1.1458	218	249.78	0.3816	0.003768	101.274
8.5	1.1466	218	249.95	0.3821	0.003768	101.407
9	1.1473	218	250.12	0.3827	0.003768	101.566
9.5	1.1481	218	250.29	0.3832	0.003768	101.699
10	1.1489	218	250.46	0.3837	0.003768	101.831
10.5	1.1497	218	250.63	0.3842	0.003768	101.964
11	1.1505	218	250.80	0.3847	0.003768	102.097

11.5	1.1512	218	250.97	0.3853	0.003768	102.256
12	1.1520	218	251.149	0.3858	0.003768	102.389
12.5	1.1528	218	251.31	0.3863	0.003768	102.521
13	1.1536	218	251.48	0.3868	0.003768	102.654
13.5	1.1544	218	251.65	0.3874	0.003768	102.813
14	1.1551	218	251.82	0.3879	0.003768	102.946
14.5	1.1559	218	251.99	0.3884	0.003768	103.079
15	1.1567	218	252.16	0.3889	0.003768	103.211
15.5	1.1575	218	252.33	0.3895	0.003768	103.37
16	1.1583	218	252.50	0.39	0.003768	103.503
16.5	1.1590	218	252.67	0.3905	0.003768	103.636
17	1.1598	218	252.84	0.391	0.003768	103.769
17.5	1.1606	218	253.01	0.3916	0.003768	103.928
18	1.1614	218	253.18	0.3921	0.003768	104.061
18.5	1.1622	218	253.35	0.3926	0.003768	104.193
19	1.17	218	255.06	0.3979	0.003768	105.6
19.5	1.1707	218	255.23	0.3984	0.003768	105.732
20	1.1715	218	255.40	0.399	0.003768	105.892
20.5	1.1723	218	255.57	0.3995	0.003768	106.024
21	1.1731	218	255.74	0.4	0.003768	106.157
21.5	1.1739	218	255.91	0.4006	0.003768	106.316
22	1.1746	218	256.08	0.4011	0.003768	106.449
22.5	1.1754	218	256.25	0.4016	0.003768	106.582
23	1.1762	218	256.42	0.4021	0.003768	106.714
23.5	1.1770	218	256.59	0.4027	0.003768	106.874
24	1.1778	218	256.76	0.4032	0.003768	107.006
24.5	1.1785	218	256.93	0.4038	0.003768	107.166
25	1.1793	218	257.10	0.4043	0.003768	107.298

25.5	1.1801	218	257.27	0.4048	0.003768	107.431
26	1.1809	218	257.44	0.4054	0.003768	107.59
26.5	1.1817	218	257.61	0.4059	0.003768	107.723
27	1.1824	218	257.78	0.4064	0.003768	107.856
27.5	1.1832	218	257.95	0.407	0.003768	108.015
28	1.1840	218	258.12	0.4075	0.003768	108.148
28.5	1.1848	218	258.29	0.408	0.003768	108.28
29	1.1856	218	258.46	0.4086	0.003768	108.439
29.5	1.1863	218	258.63	0.4091	0.003768	108.572
30	1.1871	218	258.80	0.4097	0.003768	108.731
30.5	1.1879	218	258.97	0.4102	0.003768	108.864
31	1.1887	218	259.14	0.4107	0.003768	108.997
31.5	1.1895	218	259.31	0.4113	0.003768	109.156
32	1.1902	218	259.48	0.4118	0.003768	109.289
32.5	1.1910	218	259.65	0.4123	0.003768	109.421
33	1.1918	218	259.82	0.4129	0.003768	109.581
33.5	1.1926	218	259.99	0.4134	0.003768	109.713
34	1.1934	218	260.16	0.414	0.003768	109.873
34.5	1.1941	218	260.33	0.4145	0.003768	110.005
35	1.1949	218	260.50	0.4151	0.003768	110.165
35.5	1.1957	218	260.67	0.4156	0.003768	110.297
36	1.1965	218	260.84	0.4161	0.003768	110.43
36.5	1.1973	218	261.01	0.4167	0.003768	110.589
37	1.1980	218	261.18	0.4172	0.003768	110.722
37.5	1.1988	218	261.35	0.4178	0.003768	110.881
38	1.1996	218	261.52	0.4183	0.003768	111.014
38.5	1.2004	218	261.69	0.4189	0.003768	111.173
39	1.2012	218	261.86	0.4194	0.003768	111.306

39.5	1.2019	218	262.03	0.4199	0.003768	111.438
40	1.2027	218	262.20	0.4205	0.003768	111.598
40.5	1.2035	218	262.37	0.421	0.003768	111.73
41	1.2043	218	262.54	0.4216	0.003768	111.89
41.5	1.2051	218	262.71	0.4221	0.003768	112.022
42	1.2058	218	262.88	0.4227	0.003768	112.182
42.5	1.2031	218	262.29	0.4208	0.003768	111.677
43	1.2074	218	263.22	0.4238	0.003768	112.473
43.5	1.2058	218	262.88	0.4227	0.003768	112.182
44	1.2078	218	263.30	0.424	0.003768	112.527
44.5	1.2097	218	263.73	0.4254	0.003768	112.898
45	1.2105	218	263.90	0.426	0.003768	113.057
45.5	1.2113	218	264.07	0.4265	0.003768	113.19
46	1.2121	218	264.24	0.4271	0.003768	113.349
46.5	1.2129	218	264.41	0.4276	0.003768	113.482
47	1.2136	218	264.58	0.4282	0.003768	113.641
47.5	1.2179	218	265.51	0.4312	0.003768	114.437
48	1.2327	218	268.74	0.4417	0.003768	117.224
48.5	1.2218	218	266.36	0.434	0.003768	115.18
49	1.22265	218	266.53	0.4345	0.003768	115.313
49.5	1.2351	218	269.26	0.4434	0.003768	117.675
50	1.2359	218	269.43	0.444	0.003768	117.834
50.5	1.2268	218	267.44	0.4375	0.003768	116.109
51	1.2375	218	269.77	0.4451	0.003768	118.126
51.5	1.2383	218	269.95	0.4457	0.003768	118.286
52	1.2321	218	268.61	0.4413	0.003768	117.118
52.5	1.2340	218	269.01	0.4426	0.003768	117.463
53	1.2359	218	269.44	0.444	0.003768	117.834

53.5	1.2379	218	269.87	0.4454	0.003768	118.206
54	1.2399	218	270.29	0.4469	0.003768	118.604
54.5	1.2418	218	270.72	0.4483	0.003768	118.976
55	1.2438	218	271.15	0.4497	0.003768	119.347
55.5	1.2458	218	271.58	0.4511	0.003768	119.719
56	1.2477	218	272.01	0.4526	0.003768	120.117
56.5	1.2497	218	272.44	0.454	0.003768	120.488
57	1.2517	218	272.87	0.4554	0.003768	120.86
57.5	1.2537	218	273.30	0.4569	0.003768	121.258
58	1.2556	218	273.74	0.4583	0.003768	121.63
58.5	1.2576	218	274.17	0.4598	0.003768	122.028
59	1.259	218	274.60	0.4612	0.003768	122.399
59.5	1.2616	218	275.03	0.4627	0.003768	122.797
60	1.2636	218	275.46	0.4641	0.003768	123.169
60.5	1.2656	218	275.90	0.4656	0.003768	123.567
61	1.2675	218	276.33	0.467	0.003768	123.938
61.5	1.2695	218	276.76	0.4685	0.003768	124.337
62	1.2715	218	277.20	0.47	0.003768	124.735
62.5	1.2735	218	277.63	0.4715	0.003768	125.133
63	1.2755	218	278.07	0.4729	0.003768	125.504
63.5	1.2775	218	278.50	0.4744	0.003768	125.902
64	1.2795	218	278.94	0.4759	0.003768	126.3
64.5	1.2803	218	279.11	0.4765	0.003768	126.46
65	1.2811	218	279.29	0.4771	0.003768	126.619
65.5	1.2819	218	279.46	0.4777	0.003768	126.778
66	1.2827	218	279.64	0.4783	0.003768	126.937
66.5	1.2835	218	279.8	0.4789	0.003768	127.097
67	1.2843	218	279.99	0.4795	0.003768	127.256

67.5	1.2851	218	280.17	0.4801	0.003768	127.415
68	1.2859	218	280.34	0.4807	0.003768	127.574
68.5	1.2867	218	280.52	0.4813	0.003768	127.734
69	1.2876	218	280.69	0.4819	0.003768	127.893
69.5	1.2884	218	280.87	0.4825	0.003768	128.052
70	1.2892	218	281.04	0.4831	0.003768	128.211
70.5	1.2900	218	281.22	0.4837	0.003768	128.37
71	1.2908	218	281.39	0.4843	0.003768	128.53
71.5	1.2916	218	281.57	0.4849	0.003768	128.689
72	1.2924	218	281.749	0.4855	0.003768	128.848
72.5	1.2932	218	281.92	0.4861	0.003768	129.007
73	1.2940	218	282.10	0.4867	0.003768	129.167
73.5	1.2948	218	282.27	0.4873	0.003768	129.326
74	1.2956	218	282.45	0.4879	0.003768	129.485
74.5	1.2964	218	282.62	0.4885	0.003768	129.644
75	1.3033	218	284.11	0.4937	0.003768	131.024
75.5	1.3041	218	284.29	0.4943	0.003768	131.184
76	1.2988	218	283.15	0.4904	0.003768	130.149
76.5	1.2996	218	283.32	0.491	0.003768	130.308
77	1.3004	218	283.50	0.4916	0.003768	130.467
77.5	1.3012	218	283.67	0.4922	0.003768	130.626
78	1.3020	218	283.85	0.4928	0.003768	130.786
78.5	1.3028	218	284.03	0.4934	0.003768	130.945
79	1.3036	218	284.20	0.494	0.003768	131.104
79.5	1.3044	218	284.38	0.4946	0.003768	131.263
80	1.3053	218	284.55	0.4952	0.003768	131.423
80.5	1.3061	218	284.73	0.4959	0.003768	131.608
81	1.3069	218	284.90	0.4965	0.003768	131.768

81.5	1.3077	218	285.08	0.4971	0.003768	131.927
82	1.3085	218	285.25	0.4977	0.003768	132.086
82.5	1.3093	218	285.43	0.4983	0.003768	132.245
83	1.3101	218	285.60	0.4989	0.003768	132.404
83.5	1.3109	218	285.78	0.4995	0.003768	132.564
84	1.3117	218	285.95	0.5001	0.003768	132.723
84.5	1.3125	218	286.13	0.5008	0.003768	132.909
85	1.3133	218	286.31	0.5014	0.003768	133.068
85.5	1.3141	218	286.48	0.502	0.003768	133.227
86	1.3149	218	286.66	0.5026	0.003768	133.386
86.5	1.3157	218	286.83	0.5032	0.003768	133.546
87	1.3165	218	287.01	0.5038	0.003768	133.705
87.5	1.3173	218	287.18	0.5044	0.003768	133.864
88	1.3181	218	287.36	0.5051	0.003768	134.05
88.5	1.3189	218	287.53	0.5057	0.003768	134.209
89	1.3197	218	287.71	0.5063	0.003768	134.368
89.5	1.3205	218	287.88	0.5069	0.003768	134.528
90	1.3213	218	288.06	0.5075	0.003768	134.687
90.5	1.3222	218	288.24	0.5082	0.003768	134.873
91	1.3230	218	288.41	0.5088	0.003768	135.032
91.5	1.3238	218	288.59	0.5094	0.003768	135.191
92	1.3246	218	288.76	0.51	0.003768	135.35
92.5	1.3340	218	290.82	0.5173	0.003768	137.288
93	1.3348	218	291.00	0.5179	0.003768	137.447
93.5	1.3356	218	291.18	0.5186	0.003768	137.633
94	1.3365	218	291.35	0.5192	0.003768	137.792
94.5	1.3373	218	291.53	0.5198	0.003768	137.951
95	1.3381	218	291.71	0.5205	0.003768	138.137

95.5	1.3389	218	291.88	0.5211	0.003768	138.296
96	1.3397	218	292.06	0.5217	0.003768	138.455
96.5	1.3405	218	292.23	0.5223	0.003768	138.615
97	1.3413	218	292.41	0.523	0.003768	138.8
97.5	1.3359	218	291.23	0.5188	0.003768	137.686
98	1.3367	218	291.4142	0.5194	0.003768	137.845
98.5	1.3375	218	291.58	0.52	0.003768	138.004
99	1.3383	218	291.76	0.5207	0.003768	138.19
99.5	1.3391	218	291.94	0.5213	0.003768	138.349
100	1.3399	218	292.11	0.5219	0.003768	138.508
100.5	1.3407	218	292.29	0.5225	0.003768	138.668
101	1.3416	218	292.46	0.5232	0.003768	138.854
101.5	1.3424	218	292.64	0.5238	0.003768	139.013
102	1.3432	218	292.82	0.5244	0.003768	139.172
102.5	1.3440	218	292.99	0.5251	0.003768	139.358
103	1.3448	218	293.17	0.5257	0.003768	139.517
103.5	1.3443	218	293.07	0.5253	0.003768	139.411
104	1.3451	218	293.25	0.526	0.003768	139.597
104.5	1.3447	218	293.15	0.5256	0.003768	139.49
105	1.3442	218	293.05	0.5253	0.003768	139.411
105.5	1.3438	218	292.95	0.5249	0.003768	139.305
106	1.3146	218	286.59	0.5023	0.003768	133.307
106.5	1.3454	218	293.30	0.5262	0.003768	139.65
107	1.3462	218	293.48	0.5268	0.003768	139.809
107.5	1.3470	218	293.65	0.5274	0.003768	139.968
108	1.3289	218	289.71	0.5134	0.003768	136.253
108.5	1.3411	218	292.36	0.5228	0.003768	138.747
109	1.3419	218	292.53	0.5234	0.003768	138.907

109.5	1.3426	218	292.70	0.524	0.003768	139.066
110	1.3371	218	291.50	0.5197	0.003768	137.925
110.5	1.3304	218	290.02	0.5145	0.003768	136.545
111	1.3337	218	290.75	0.517	0.003768	137.208
111.5	1.3522	218	294.78	0.5315	0.003768	141.056
112	1.3074	218	285.03	0.4969	0.003768	131.874
112.5	1.3158	218	286.85	0.5033	0.003768	133.572
113	1.2951	218	282.33	0.4875	0.003768	129.379
113.5	1.3110	218	285.81	0.4996	0.003768	132.59
114	1.3384	218	291.78	0.5207	0.003768	138.19
114.5	1.3544	218	295.27	0.5333	0.003768	141.534
115	1.3261	218	289.09	0.5112	0.003768	135.669
115.5	1.3332	218	290.64	0.5167	0.003768	137.128
116	1.3340	218	290.81	0.5173	0.003768	137.288
116.5	1.3348	218	290.98	0.5179	0.003768	137.447
117	1.3356	218	291.16	0.5185	0.003768	137.606
117.5	1.3363	218	291.33	0.5191	0.003768	137.765
118	1.3363	218	291.33	0.5191	0.003768	137.765
118.5	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
119	1.3387	218	291.84	0.5209	0.003768	138.243
119.5	1.3363	218	291.33	0.5191	0.003768	137.765
120	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
120.5	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
121	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
121.5	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
122	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
122.5	1.3379	218	291.67	0.5203	0.003768	138.084
123	1.3363	218	291.33	0.5191	0.003768	137.765

123.5	1.3300	218	289.94	0.5142	0.003768	136.465
124	1.3262	218	289.11	0.5112	0.003768	135.669
124.5	1.2869	218	280.56	0.4814	0.003768	127.76
125	1.3208	218	287.94	0.5071	0.003768	134.581
125.5	1.3211	218	288.00	0.5073	0.003768	134.634
126	1.3213	218	288.06	0.5075	0.003768	134.687
126.5	1.3201	218	287.78	0.5066	0.003768	134.448
127	1.3198	218	287.72	0.5063	0.003768	134.368
127.5	1.3211	218	288.00	0.5073	0.003768	134.634
128	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
128.5	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
129	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
129.5	1.3221	218	288.21	0.5081	0.003768	134.846
130	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
130.5	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
131	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
131.5	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
132	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
132.5	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
133	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
133.5	1.3236	218	288.557	0.5093	0.003768	135.165
134	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.16	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.25	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.3	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.41	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.5	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
134.58	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483

134.66	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
134.75	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
134.83	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
134.91	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
135	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
135.1667	1.3236	218	288.55	0.5093	0.003768	135.165
135.3333	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
135.5	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
136	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
136.5	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
137	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
137.5	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
138	1.3252	218	288.89	0.5105	0.003768	135.483
138.5	1.3104	218	285.66	0.4991	0.003768	132.458
139	1.287	218	280.56	0.4815	0.003768	127.787
139.5	1.248	218	272.06	0.4527	0.003768	120.143
140	1.2168	218	265.26	0.4304	0.003768	114.225
140.5	1.2012	218	261.86	0.4194	0.003768	111.306
141	1.1856	218	258.46	0.4086	0.003768	108.439
141.5	1.1781	218	256.84	0.4035	0.003768	107.086
142	1.1778	218	256.76	0.4032	0.003768	107.006
142.5	1.1778	218	256.76	0.4032	0.003768	107.006
143	1.1778	218	256.76	0.4032	0.003768	107.006
143.5	1.1778	218	256.76	0.4032	0.003768	107.006

---

(Fuente: obtenidas por el investigador en el periodo experimental)

Tabla 16. Parámetros medidos de la celda microbiana con 242 mg/L DBO

Tiempo (h)	Intensidad De Corriente mA	Resistencia Eléctrica $\Omega$	Voltaje Eléctrico mv	Potencia Eléctrica mW	Área Del Electrodo m <sup>2</sup>	Potencia mW/m <sup>2</sup>
0	1.5111	218	329.42	0.4787	0.003768	127.044
0.66	1.5121	218	329.65	0.4793	0.003768	127.203
1.33	1.5132	218	329.87	0.48	0.003768	127.389
2	1.5142	218	330.10	0.4806	0.003768	127.548
2.66	1.5152	218	330.33	0.4813	0.003768	127.734
3.33	1.5163	218	330.55	0.482	0.003768	127.919
4	1.5173	218	330.78	0.4826	0.003768	128.079
4.66	1.5184	218	331.01	0.4833	0.003768	128.264
5.33	1.5194	218	331.23	0.4839	0.003768	128.424
6	1.5204	218	331.46	0.4846	0.003768	128.609
6.66	1.5215	218	331.69	0.4853	0.003768	128.795
7.33	1.5225	218	331.92	0.4859	0.003768	128.954
8	1.5236	218	332.14	0.4866	0.003768	129.14
8.66	1.5246	218	332.371	0.4873	0.003768	129.326
9.33	1.5256	218	332.60	0.4879	0.003768	129.485
10	1.5267	218	332.82	0.4886	0.003768	129.671
10.66	1.5277	218	333.05	0.4893	0.003768	129.857
11.33	1.5288	218	333.27	0.4899	0.003768	130.016
12	1.5298	218	333.50	0.4906	0.003768	130.202
12.66	1.5308	218	333.73	0.4913	0.003768	130.387
13.33	1.5319	218	333.95	0.4919	0.003768	130.547
14	1.5329	218	334.18	0.4926	0.003768	130.732
14.66	1.534	218	334.41	0.4933	0.003768	130.918

15.33	1.5350	218	334.63	0.4939	0.003768	131.077
16	1.5360	218	334.86	0.4946	0.003768	131.263
16.66	1.5371	218	335.09	0.4953	0.003768	131.449
17.33	1.53816	218	335.31	0.4959	0.003768	131.608
18	1.5392	218	335.54	0.4966	0.003768	131.794
18.66	1.5402	218	335.77	0.4973	0.003768	131.98
19.33	1.5412	218	335.99	0.498	0.003768	132.166
20	1.5423	218	336.22	0.4986	0.003768	132.325
20.66	1.5433	218	336.45	0.4993	0.003768	132.511
21.33	1.5444	218	336.67	0.5	0.003768	132.696
22	1.5454	218	336.90	0.5006	0.003768	132.856
22.66	1.5464	218	337.13	0.5013	0.003768	133.041
23.33	1.5475	218	337.35	0.502	0.003768	133.227
24	1.5485	218	337.58	0.5027	0.003768	133.413
24.66	1.5496	218	337.81	0.5033	0.003768	133.572
25.33	1.56	218	340.08	0.5101	0.003768	135.377
26	1.5610	218	340.30	0.5108	0.003768	135.563
26.66	1.5620	218	340.53	0.5115	0.003768	135.748
27.33	1.5631	218	340.76	0.5122	0.003768	135.934
28	1.5641	218	340.98	0.5128	0.003768	136.093
28.66	1.5652	218	341.21	0.5135	0.003768	136.279
29.33	1.5662	218	341.44	0.5142	0.003768	136.465
30	1.5672	218	341.66	0.5149	0.003768	136.651
30.66	1.5683	218	341.89	0.5156	0.003768	136.837
31.33	1.5693	218	342.12	0.5163	0.003768	137.022
32	1.5704	218	342.34	0.5169	0.003768	137.182
32.66	1.5714	218	342.57	0.5176	0.003768	137.367
33.33	1.5724	218	342.80	0.5183	0.003768	137.553

34	1.5735	218	343.02	0.519	0.003768	137.739
34.66	1.5745	218	343.25	0.5197	0.003768	137.925
35.33	1.5756	218	343.48	0.5204	0.003768	138.11
36	1.5766	218	343.70	0.5211	0.003768	138.296
36.66	1.5776	218	343.93	0.5217	0.003768	138.455
37.33	1.5787	218	344.16	0.5224	0.003768	138.641
38	1.5797	218	344.38	0.5231	0.003768	138.827
38.66	1.5808	218	344.61	0.5238	0.003768	139.013
39.33	1.5818	218	344.84	0.5245	0.003768	139.199
40	1.5828	218	345.06	0.5252	0.003768	139.384
40.66	1.5839	218	345.29	0.5259	0.003768	139.57
41.33	1.5849	218	345.52	0.5266	0.003768	139.756
42	1.586	218	345.74	0.5273	0.003768	139.942
42.66	1.5870	218	345.97	0.528	0.003768	140.127
43.33	1.5880	218	346.20	0.5286	0.003768	140.287
44	1.5891	218	346.42	0.5293	0.003768	140.472
44.66	1.5901	218	346.65	0.53	0.003768	140.658
45.33	1.5912	218	346.88	0.5307	0.003768	140.844
46	1.5922	218	347.10	0.5314	0.003768	141.03
46.66	1.5932	218	347.33	0.5321	0.003768	141.215
47.33	1.5943	218	347.56	0.5328	0.003768	141.401
48	1.5953	218	347.78	0.5335	0.003768	141.587
48.66	1.5964	218	348.01	0.5342	0.003768	141.773
49.33	1.5974	218	348.24	0.5349	0.003768	141.959
50	1.5984	218	348.46	0.5356	0.003768	142.144
50.66	1.5902	218	346.68	0.5332	0.003768	141.507
51.33	1.5851	218	345.56	0.5318	0.003768	141.136
52	1.5862	218	345.79	0.5325	0.003768	141.322

52.66	1.5872	218	346.01	0.5332	0.003768	141.507
53.33	1.6036	218	349.60	0.5391	0.003768	143.073
54	1.6047	218	349.82	0.5398	0.003768	143.259
54.66	1.6520	218	360.15	0.5561	0.003768	147.585
55.33	1.6237	218	353.98	0.5469	0.003768	145.143
56	1.6233	218	353.87	0.5471	0.003768	145.196
56.66	1.6088	218	350.73	0.5426	0.003768	144.002
57.33	1.6284	218	355.01	0.5496	0.003768	145.86
58	1.6264	218	354.56	0.5492	0.003768	145.754
58.66	1.6275	218	354.79	0.5499	0.003768	145.939
59.33	1.6285	218	355.02	0.5506	0.003768	146.125
60	1.6218	218	353.56	0.5487	0.003768	145.621
60.66	1.6353	218	356.49	0.5536	0.003768	146.921
61.33	1.6394	218	357.40	0.5554	0.003768	147.399
62	1.6794	218	366.10	0.5693	0.003768	151.088
62.66	1.6804	218	366.34	0.57	0.003768	151.274
63.33	1.6815	218	366.58	0.5708	0.003768	151.486
64	1.7449	218	380.40	0.5927	0.003768	157.298
64.66	1.7616	218	384.04	0.5987	0.003768	158.891
65.33	1.7472	218	380.88	0.5942	0.003768	157.696
66	1.7171	218	374.32	0.5843	0.003768	155.069
66.66	1.8119	218	394.99	0.617	0.003768	163.747
67.33	1.7740	218	386.73	0.6045	0.003768	160.43
68	1.7673	218	385.27	0.6026	0.003768	159.926
68.66	1.7841	218	388.93	0.6087	0.003768	161.545
69.33	1.8009	218	392.59	0.6148	0.003768	163.163
70	1.8020	218	392.84	0.6156	0.003768	163.376
70.66	1.7953	218	391.38	0.6137	0.003768	162.872

71.33	1.8043	218	393.34	0.6172	0.003768	163.8
72	1.7960	218	391.54	0.6147	0.003768	163.137
72.66	1.8066	218	393.84	0.6187	0.003768	164.199
73.33	1.7999	218	392.38	0.6168	0.003768	163.694
74	1.8010	218	392.63	0.6176	0.003768	163.907
74.66	1.7314	218	377.44	0.5941	0.003768	157.67
75.33	1.7797	218	387.98	0.6111	0.003768	162.182
76	1.7808	218	388.23	0.6119	0.003768	162.394
76.66	1.7820	218	388.47	0.6126	0.003768	162.58
77.33	1.7831	218	388.72	0.6134	0.003768	162.792
78	1.7842	218	388.97	0.6142	0.003768	163.004
78.66	1.8012	218	392.66	0.6204	0.003768	164.65
79.33	1.7991	218	392.22	0.6201	0.003768	164.57
80	1.8018	218	392.81	0.6214	0.003768	164.915
80.66	1.8046	218	393.40	0.6228	0.003768	165.287
81.33	1.8105	218	394.69	0.6252	0.003768	165.924
82	1.8069	218	393.90	0.6243	0.003768	165.685
82.66	1.8080	218	394.15	0.6251	0.003768	165.897
83.33	1.8123	218	395.09	0.627	0.003768	166.401
84	1.7944	218	391.18	0.6212	0.003768	164.862
84.66	1.7955	218	391.43	0.622	0.003768	165.074
85.33	1.7967	218	391.68	0.6228	0.003768	165.287
86	1.7819	218	388.45	0.618	0.003768	164.013
86.66	1.7830	218	388.70	0.6188	0.003768	164.225
87.33	1.7841	218	388.94	0.6196	0.003768	164.437
88	1.7852	218	389.19	0.6204	0.003768	164.65
88.66	1.7864	218	389.43	0.6211	0.003768	164.835
89.33	1.7875	218	389.67	0.6219	0.003768	165.048

90	1.7886	218	389.92	0.6227	0.003768	165.26
90.66	1.8009	218	392.60	0.6274	0.003768	166.507
91.33	1.8036	218	393.20	0.6287	0.003768	166.852
92	1.8064	218	393.79	0.6301	0.003768	167.224
92.66	1.7931	218	390.90	0.6258	0.003768	166.083
93.33	1.7589	218	383.46	0.6143	0.003768	163.031
94	1.7600	218	383.70	0.6151	0.003768	163.243
94.66	1.7804	218	388.13	0.6226	0.003768	165.234
95.33	1.7976	218	391.87	0.629	0.003768	166.932
96	1.7987	218	392.12	0.6297	0.003768	167.118
96.66	1.7998	218	392.36	0.6305	0.003768	167.33
97.33	1.809	218	394.36	0.6341	0.003768	168.286
98	1.7634	218	384.43	0.6186	0.003768	164.172
98.66	1.8064	218	393.79	0.634	0.003768	168.259
99.33	1.8091	218	394.39	0.6354	0.003768	168.631
100	1.8086	218	394.28	0.6356	0.003768	168.684
100.66	1.7565	218	382.92	0.6177	0.003768	163.933
101.33	1.7576	218	383.16	0.6184	0.003768	164.119
102	1.7603	218	383.75	0.6198	0.003768	164.49
102.66	1.7614	218	383.99	0.6205	0.003768	164.676
103.33	1.7625	218	384.23	0.6213	0.003768	164.889
104	1.7636	218	384.46	0.6221	0.003768	165.101
104.66	1.7647	218	384.70	0.6228	0.003768	165.287
105.33	1.7658	218	384.94	0.6236	0.003768	165.499
106	1.7668	218	385.18	0.6244	0.003768	165.711
106.66	1.7679	218	385.41	0.6252	0.003768	165.924
107.33	1.7690	218	385.65	0.6259	0.003768	166.109
108	1.7701	218	385.89	0.6267	0.003768	166.322

108.66	1.7712	218	386.13	0.6275	0.003768	166.534
109.33	1.7723	218	386.37	0.6282	0.003768	166.72
110	1.7815	218	388.38	0.6319	0.003768	167.702
110.66	1.7842	218	388.97	0.6333	0.003768	168.073
111.33	1.7870	218	389.56	0.6346	0.003768	168.418
112	1.7913	218	390.5	0.6365	0.003768	168.923
112.66	1.7941	218	391.11	0.6379	0.003768	169.294
113.33	1.7788	218	387.79	0.6329	0.003768	167.967
114	1.7799	218	388.03	0.6337	0.003768	168.179
114.66	1.7810	218	388.27	0.6344	0.003768	168.365
115.33	1.7985	218	392.07	0.641	0.003768	170.117
116	1.7996	218	392.31	0.6418	0.003768	170.329
116.66	1.8007	218	392.55	0.6426	0.003768	170.541
117.33	1.8018	218	392.79	0.6434	0.003768	170.754
118	1.8029	218	393.03	0.6442	0.003768	170.966
118.66	1.7876	218	389.69	0.6391	0.003768	169.613
119.33	1.8051	218	393.51	0.6458	0.003768	171.391
120	1.8062	218	393.75	0.6465	0.003768	171.576
120.66	1.8105	218	394.70	0.6485	0.003768	172.107
121.33	1.8084	218	394.23	0.6481	0.003768	172.001
122	1.8095	218	394.47	0.6489	0.003768	172.213
122.66	1.7661	218	385.02	0.6337	0.003768	168.179
123.33	1.8117	218	394.95	0.6505	0.003768	172.638
124	1.7798	218	388.00	0.6394	0.003768	169.692
124.66	1.7809	218	388.24	0.6402	0.003768	169.904
125.33	1.782	218	388.47	0.641	0.003768	170.117
126	1.7830	218	388.71	0.6418	0.003768	170.329
126.66	1.7841	218	388.94	0.6425	0.003768	170.515

127.33	1.7852	218	389.18	0.6433	0.003768	170.727
128	1.8028	218	393.02	0.6501	0.003768	172.532
128.66	1.7874	218	389.65	0.6449	0.003768	171.152
129.33	1.7884	218	389.88	0.6457	0.003768	171.364
130	1.7812	218	388.31	0.6434	0.003768	170.754
130.66	1.7823	218	388.55	0.6442	0.003768	170.966
131.33	1.7834	218	388.78	0.645	0.003768	171.178
132	1.7845	218	389.02	0.6458	0.003768	171.391
132.66	1.7855	218	389.25	0.6466	0.003768	171.603
133.33	1.7866	218	389.48	0.6473	0.003768	171.789
134	1.7877	218	389.72	0.6481	0.003768	172.001
134.66	1.7888	218	389.95	0.6489	0.003768	172.213
135.33	1.7898	218	390.19	0.6497	0.003768	172.426
136	1.7909	218	390.42	0.6505	0.003768	172.638
136.66	1.7920	218	390.66	0.6512	0.003768	172.824
137.33	1.7931	218	390.89	0.652	0.003768	173.036
138	1.7925	218	390.76	0.6522	0.003768	173.089
138.66	1.7935	218	391.00	0.653	0.003768	173.301
139.33	1.7929	218	390.87	0.6531	0.003768	173.328
140	1.7923	218	390.73	0.6533	0.003768	173.381
140.66	1.7917	218	390.60	0.6535	0.003768	173.434
141.33	1.7528	218	382.12	0.6397	0.003768	169.772
142	1.7939	218	391.07	0.6551	0.003768	173.859
142.66	1.7949	218	391.30	0.6558	0.003768	174.045
143.33	1.7960	218	391.54	0.6566	0.003768	174.257
144	1.7719	218	386.28	0.6482	0.003768	172.028
144.66	1.7881	218	389.81	0.6545	0.003768	173.7
145.33	1.7892	218	390.04	0.6553	0.003768	173.912

146	1.79026	218	390.27	0.6561	0.003768	174.124
146.66	1.7829	218	388.67	0.6538	0.003768	173.514
147.33	1.7839	218	388.90	0.6545	0.003768	173.7
148	1.7783	218	387.67	0.6528	0.003768	173.248
148.66	1.8029	218	393.04	0.6623	0.003768	175.77
149.33	1.7433	218	380.04	0.6408	0.003768	170.064
150	1.7544	218	382.47	0.6452	0.003768	171.231
150.66	1.7268	218	376.44	0.6354	0.003768	168.631
151.33	1.7481	218	381.08	0.6437	0.003768	170.833
152	1.7846	218	389.05	0.6575	0.003768	174.496
152.66	1.8059	218	393.70	0.6658	0.003768	176.699
153.33	1.7681	218	385.45	0.6522	0.003768	173.089
154	1.7776	218	387.52	0.6561	0.003768	174.124
154.66	1.7787	218	387.75	0.6569	0.003768	174.337
155.33	1.7797	218	387.98	0.6576	0.003768	174.522
156	1.7808	218	388.21	0.6584	0.003768	174.735
156.66	1.78185	218	388.44	0.6592	0.003768	174.947
157.33	1.7818	218	388.44	0.6592	0.003768	174.947
158	1.7839	218	388.90	0.6607	0.003768	175.345
158.66	1.785	218	389.13	0.6615	0.003768	175.557
159.33	1.7860	218	389.35	0.6623	0.003768	175.77
160	1.7871	218	389.58	0.6631	0.003768	175.982
160.66	1.7881	218	389.81	0.6639	0.003768	176.194
161.33	1.7892	218	390.04	0.6646	0.003768	176.38
162	1.7902	218	390.27	0.6654	0.003768	176.592
162.66	1.7913	218	390.50	0.6662	0.003768	176.805
163.33	1.7923	218	390.73	0.667	0.003768	177.017
164	1.7934	218	390.96	0.6678	0.003768	177.229

164.66	1.7859	218	389.32	0.6654	0.003768	176.592
165.33	1.7818	218	388.43	0.6642	0.003768	176.274
166	1.7281	218	376.72	0.6446	0.003768	171.072
166.66	1.7787	218	387.77	0.6639	0.003768	176.194
167.33	1.7780	218	387.62	0.664	0.003768	176.221
168	1.7774	218	387.47	0.6641	0.003768	176.247
168.66	1.7767	218	387.32	0.6643	0.003768	176.3
169.33	1.7794	218	387.92	0.6657	0.003768	176.672
170	1.7822	218	388.52	0.6671	0.003768	177.044
170.66	1.7867	218	389.50	0.6692	0.003768	177.601
171.33	1.7877	218	389.73	0.6699	0.003768	177.787
172	1.7888	218	389.95	0.6707	0.003768	177.999
172.66	1.7898	218	390.18	0.6715	0.003768	178.211
173.33	1.7888	218	389.95	0.6707	0.003768	177.999
174	1.7877	218	389.73	0.6699	0.003768	177.787
174.66	1.7867	218	389.50	0.6692	0.003768	177.601
175.33	1.7856	218	389.27	0.6684	0.003768	177.389
176	1.7846	218	389.05	0.6676	0.003768	177.176
176.66	1.7836	218	388.82	0.6668	0.003768	176.964
177.33	1.7825	218	388.59	0.6661	0.003768	176.778
178	1.7815	218	388.37	0.6653	0.003768	176.566
178.66	1.7804	218	388.14	0.6645	0.003768	176.354
179.33	1.7794	218	387.91	0.6637	0.003768	176.141
180	1.7784	218	387.69	0.663	0.003768	175.955
180.66	1.7773	218	387.46	0.6622	0.003768	175.743
181.33	1.7763	218	387.23	0.6614	0.003768	175.531
182	1.7752	218	387.01	0.6606	0.003768	175.318
182.66	1.7742	218	386.78	0.6599	0.003768	175.133

183.33	1.7732	218	386.55	0.6591	0.003768	174.92
184	1.7721	218	386.33	0.6583	0.003768	174.708
184.66	1.7711	218	386.10	0.6575	0.003768	174.496
185.33	1.7700	218	385.87	0.6568	0.003768	174.31
186	1.7690	218	385.65	0.656	0.003768	174.098
186.66	1.768	218	385.42	0.6552	0.003768	173.885
187.33	1.7669	218	385.19	0.6545	0.003768	173.7
188	1.7659	218	384.97	0.6537	0.003768	173.487
188.66	1.7648	218	384.74	0.6529	0.003768	173.275
189.33	1.7638	218	384.51	0.6521	0.003768	173.063
190	1.7628	218	384.29	0.6514	0.003768	172.877
190.66	1.7617	218	384.06	0.6506	0.003768	172.665
191.33	1.7607	218	383.83	0.6498	0.003768	172.452
192	1.7596	218	383.61	0.6491	0.003768	172.266
192.66	1.7586	218	383.38	0.6483	0.003768	172.054
193.33	1.7576	218	383.15	0.6475	0.003768	171.842
194	1.7565	218	382.93	0.6468	0.003768	171.656
194.66	1.7347	218	378.16	0.6308	0.003768	167.41
195.33	1.7305	218	377.26	0.6278	0.003768	166.614
196	1.7284	218	376.80	0.6263	0.003768	166.215
196.66	1.7264	218	376.35	0.6247	0.003768	165.791
197.33	1.6525	218	360.25	0.5725	0.003768	151.937
198	1.6484	218	359.35	0.5696	0.003768	151.168
198.66	1.6463	218	358.89	0.5681	0.003768	150.77
199.33	1.5712	218	342.52	0.5175	0.003768	137.341
200	1.5712	218	342.52	0.5175	0.003768	137.341
200.66	1.5709	218	342.46	0.5173	0.003768	137.288
201.33	1.5706	218	342.39	0.5171	0.003768	137.235

202	1.5709	218	342.46	0.5173	0.003768	137.288
202.66	1.5706	218	342.39	0.5171	0.003768	137.235
203.33	1.5709	218	342.46	0.5173	0.003768	137.288
204	1.5704	218	342.34	0.5169	0.003768	137.182
204.66	1.5704	218	342.34	0.5169	0.003768	137.182
205.33	1.5704	218	342.34	0.5169	0.003768	137.182
206	1.5704	218	342.34	0.5169	0.003768	137.182

(Fuente: obtenidas por el investigador en el periodo experimental)

*Tabla 17. Datos de la DBO de las aguas crudas al inicio y al final*

Numero de celdas microbiana	Demanda bioquímica inicial de las aguas crudas	Demanda bioquímica final de las aguas crudas	Porcentaje de remoción de demanda bioquímica
<b>1</b>	50	12	76%
<b>2</b>	150	20	86.67%
<b>3</b>	242	50	79.34%

(Fuente: Datos obtenidos por el personal investigador durante el proceso de experimentación)

*Tabla 18. Datos de pH en la cámara anódica al inicio y al final*

Celda con 50 mg/L DBO			Celda con 150 mg/L DBO			Celda con 242 mg/L DBO		
Celda tomada como control								
Tiempo (horas)	pH	Temperatura	Tiempo (horas)	pH	Temperatura	Tiempo (horas)	pH	Temperatura
0	7	25	0	7	25	0	7	25
1.13	7.1	25	8	7.05	25	10	7.15	25
2.63	7.13	25	16	7.1	25	24	7.15	25
3.8	7.2	25	33	7.2	25	49	7.16	25
6.3	7.16	25	53	7.15	25	70	7.16	25
9.3	7.24	25	68.5	7.24	25	94	7.16	25
13	7.22	25	80	7.26	25	120	7.17	25
16.13	7.24	25	93	7.27	25	144	7.19	25
35	7.26	25	107	7.26	25	166	7.24	25
40.3	7.3	25	129	7.28	25	180	7.3	25
47.7	7.35	25	133	7.29	25	190	7.32	25
59.2	7.3	25	138	7.31	25	200	7.33	25
72.2	7.27	25	143	7.25	25	206	7.3	25

## 8.7. Anexo 7: Cálculos

### 8.7.1. Cálculo del DBO de la muestra original y obtención de las dos soluciones de 50 y 150 ppm.

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$DBO5 \frac{mg}{L} = \frac{(Gasto\ inicial - gasto\ final) * f * 100}{\% \text{ dilucion}}$$

F = factor del tiosulfato

La demanda bioquímica de oxígeno obtenida para el agua residual fue de:

$$DBO5 \frac{mg}{L} = \frac{(20 - 7) \text{ mL} * 0.025 \text{ N} * 100}{0.17}$$

La demanda bioquímica en el tiempo cero fue de 20 mL de tiosulfato de sodio a 0.025 N.

La demanda bioquímica en a los 5 días fue de 7 mL de tiosulfato de sodio a 0.025 N. Reemplazando los valores se obtuvo que el agua tenía:

$$DBO5 \frac{mg}{L} = 232$$

Para la obtención de las aguas residuales de demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) de 50 mg/L y 150 mg/L, se utilizó la técnica de la dilución:

$$DBO_1 * V1 = DBO_2 * V2$$

Para la obtención de la segunda dilución, se realizó lo siguiente:

$$DBO_2 * V2 = DBO_3 * V3$$

Para la obtención de la primera agua residual de 150 mg/L, se realizó lo siguiente:

$$DBO_1 * V1 = DBO_2 * V2$$

$$242 \frac{mg}{L} * V1 = 150 \frac{mg}{L} * 400 mL$$

$$V1 = 248 mL$$

Para la obtención de la primera agua residual de 50 mg/L, se realizó lo siguiente:

$$242 \frac{mg}{L} * V1 = 50 \frac{mg}{L} * 400 mL$$

Siendo

$$V1 = 83 mL$$

Por lo tanto, para la obtención de 400 mL de agua residual de 50 mg/L se utilizó 83 mL de agua residual de 242 mg/L. Para la obtención de 400 mL de agua residual de 150 mg/L se utilizó 248 mL de agua residual de 242 mg/L.

### 8.7.2. Cálculo de la potencia eléctrica

La intensidad de corriente se puede calcular a partir del voltaje eléctrico, y de la resistencia óhmica:

$$I = \frac{V}{R}$$

La resistencia externa utilizada fue de 218  $\Omega$ , entonces reemplazando los respectivos datos de las tablas se obtuvieron cada una de las intensidades. Con un voltaje de 329.4 mV

$$I = \frac{329.42}{218}$$

$$I = 1.511 mA$$

La potencia se puede determinar a partir del voltaje y la intensidad de corriente:

$$P(mW) = \frac{V(mV) * I (mA)}{1000}$$

Si se tiene una intensidad de 1.511 mA, la potencia se calcula:

$$P(mW) = \frac{329.4 * 1.511}{1000}$$

$$P(mW) = 0.4787$$

La densidad de potencia se puede determinar a partir de la potencia (mW) y el área de contacto de los electrodos:

$$\text{Densidad de potencia} \left( \frac{mW}{m^2} \right) = \frac{\text{Potencia}(mW)}{\text{Área de los electrodos } m^2}$$

Cada electrodo tenía 1.13 cm de ancho y 11 cm de longitud.

$$A = (d) * L * N$$

$$\text{Área de cada electrodo} = \underline{1.13 \text{ cm}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) * \underline{11 \text{ cm}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)$$

$$\text{Área de cada electrodo} = 11 * 10^{-4} m^2$$

$$\text{Área total de electrodos} = \frac{12.43 * 10^{-4} m^2}{\text{electrodo}} * 3 \text{ electrodos}$$

$$\text{Área total de electrodos} = 0.003768 m^2$$

Si los electrodos tienen un área de 0.003768 m<sup>2</sup>, la densidad de potencia es:

$$\text{Densidad de potencia} \left( \frac{mW}{m^2} \right) = \frac{0.4787 mW}{0.003768 m^2}$$

$$\text{Densidad de potencia} \left( \frac{mW}{m^2} \right) = 127.044 \frac{mW}{m^2}$$

El área de los electrodos se calculó teniendo en cuenta que se usaron 3 electrodos por celda.

### 8.7.3. El porcentaje de remoción:

$$\text{Remoción} = \frac{DBO(\text{Inicio del proceso}) - DBO(\text{Final del proceso})}{DBO(\text{Inicio del proceso})}$$

$$\% \text{ Remoción} = R * 100$$

% Remoción de la celda número 1:

$$R = \left( \frac{50 - 12}{50} \right) * 100 = 76\%$$

% Remoción de la celda número 2:

$$= \left( \frac{150 - 20}{150} \right) * 100 = 86.67\%$$

% Remoción de la celda número 3:

$$= \left( \frac{242 - 50}{242} \right) * 100 = 79.34\%$$

### 8.7.4. Curva de tendencia para los potenciales eléctricos máximos obtenidos por celda.

Para calcular la curva de tendencia de los potenciales eléctricos máximos obtenidos por cada celda vs los tres DBO distintos, se tomó el máximo valor de la celda con 50 mg/L que fue de 60, 17 mW/ m<sup>2</sup>, la celda con 150 mg/L obtuvo 141,35 mW/ m<sup>2</sup> y para la celda 3 un valor de 189,54 mW/ m<sup>2</sup>.

Con la ayuda del programa informático Microsoft Excel se obtuvo una línea de tendencia polinómica de segundo grado:

$$P = -0.0015 * DBO^2 + 1.1118 * DBO + 8.3321$$

### 8.7.5. Biodegradabilidad

Para calcular la biodegradabilidad se debio tener el valor del DBO y el DQO, no obstante, se ha demostrado que el DBO es el 65% del DQO y, por lo tanto:

$$\frac{DBO}{DQO} = 0.65 \longrightarrow \text{Biodegradable}$$

### 8.7.6. Demanda química de oxígeno

$$DQO = \frac{DBO_5}{0.65}$$

$$DQO = \frac{242}{0.65} = 372 \frac{mg}{L}$$

$$DQO = \frac{150}{0.65} = 230.7 \frac{mg}{L}$$

$$DQO = \frac{50}{0.65} = 76.9 \frac{mg}{L}$$

## Anexo 8: Contrastación de la hipótesis y preparación de medios biológicos y reactivos

### 8.8. Contratacion de hipótesis

#### 8.8.1. Contrastación de la hipótesis nula

Se utilizará una hipótesis estadística causal bivariada, que relaciona una variable independiente con varios niveles (los niveles de demanda bioquímica de oxígeno) con respecto a una variable dependiente, la cantidad de energía eléctrica.

Hipótesis nula:

Los niveles de demanda bioquímica de oxígeno inicial de las aguas residuales no tienen influencia con la cantidad de energía eléctrica producida en celdas microbianas.

$$H_0: \delta CMO = \delta CEE$$

Hipótesis alterna.

Los niveles de demanda bioquímica de oxígeno inicial de las aguas residuales si tienen influencia con la cantidad de energía eléctrica producida en celdas microbianas.

$$H_0: \delta CMO \neq \delta CEE$$

El objetivo fue demostrar si la hipótesis alterna era verdadera, y afirmar que si había influencia.

Para ello se utilizó un diseño experimental unifactorial y el programa informático elegido fue el MINITAB para el procesamiento de los datos. Según lo calculado, el valor p computado era menor que el nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , y por lo tanto se debe rechazar la hipótesis nula  $H_0$ , y aceptar la hipótesis alternativa.

El riesgo de rechazar la hipótesis nula  $H_0$  cuando es verdadero es inferior al 0.01%.

## **8.8.2. Preparacion de medios biológicos y reactivos**

### **8.8.2.1. Preparacion de agua de enriquecimiento**

Para preparar agua de enriquecimiento como medio de crecimiento en las celdas de combustible microbianas se utilizó los siguientes productos químicos:

### **8.8.2.2. Preparación de la salmuera**

Para preparar la salmuera se pesó 20 gr de cloruro de sodio y se disolvió en 100 mL de agua destilada.

### **8.8.2.3. Preparación del agar agar**

El agar salino estuvo constituido por agar en un 10% (P/v) y cloruro de sodio en otro 10% (P/v), siendo el medio de disolución agua destilada que le correspondió el 80% restante. La mezcla se preparó con agar agar y se calentó hasta la disolución completa del agar en una cocina eléctrica. La preparación se realizó 24 horas antes de la instalación de la CCM, eso se debió por motivos de tenerlo todo listo.

## **8.9. Reactivos para analisis y procedimiento de DBO**

### **8.9.1. Análisis de demanda bioquímica de oxígeno**

#### **8.9.1.1. Reactivos**

1.1 Agua destilada

1.2 Solución amortiguadora:

- a) 8.5 g de fosfato mono potásico  $\text{KH}_2\text{PO}_4$
- b) 21.75 g de fosfato di potásico  $\text{K}_2\text{HPO}_4$
- c) 33.4 g fosfato disodico heptahidratado  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- d) 1.7 g cloruro de amonio  $\text{NH}_4\text{Cl}$
- e) Disuelto en 500 ml de agua destilada y luego diluir a 1 litro

PH debe 7.2.

1.3 Solución de sulfato de magnesio

- a) 22.5 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Disuelto en 1L de agua destilada.

1.4 Solución de cloruro de calcio

1.5 Solución de cloruro férrico

- a) 0.25 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   
b) Diluir a 1L de agua destilada

1.6 Solución acida y básica

- a) 1N para neutralizar la basicidad y acidez de las aguas residuales.

1.7 Solución de sulfato de manganeso

- a) 480 g de  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada, se filtra y se diluye a 1 L.

1.8 Solución álcali, yoduro

1.9 Ácido sulfúrico concentrado

- a) 1 ml es equivalente a 3mL de solución de álcali yoduro.

1.10 Solución de almidón

- a) Se adiciona una suspensión de 5 g de almidón en agua fría a 800 mL de agua destilada hirviendo con agitación, se diluye a u litro y se deja sedimentar toda la noche. Se usa el sobrenadante y se preserva con unas gotas de tolueno.

1.11 Solución de tiosulfato de sodio 0.025 N

- a) Disolver 6.205 g de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en agua destilada recientemente hervida fría y diluir a litro.  
b) Preservar añadiendo 5 mL de cloroformo.

### **8.9.1.2. Pretratamiento**

Según el pH de las muestras neutralizar a aproximadamente 7 con ácido sulfúrico 1.0 N o NaOH 1.0 N.

### **8.9.1.3. Técnicas de dilución**

Las diluciones que dan lugar a un contenido de oxígeno disuelto residual de al menos 1 mg/L o 2 mg/L después de 5 días de incubación, producen los resultados más fiables. Hacer varias diluciones de la muestra preparada para obtener un contenido de oxígeno disuelto en dicho intervalo.

Un análisis más rápido, tal como la demanda química de oxígeno, DQO, presenta una correlación aproximada con la DBO y sirve como una para seleccionar las diluciones. En ausencia de datos previos, utilizar las siguientes diluciones.

0.1 – 1% para residuos industriales fuertes

1 - 4% para aguas residuales crudas

4 – 20 % para efluentes tratados biológicamente

20 – 100 % para aguas fluviales contaminadas

En una probeta de 1 L añadir agua de dilución hasta la mitad. Añadir la cantidad apropiada de muestra y diluir hasta 700 ml con agua de dilución. Mezclar bien evitando la entrada de aire. Verter rápidamente la solución mezclada en dos frascos de DBO hasta rebosar evitando la formación de burbujas de aire.

Tapar los frascos herméticamente usando sellos de agua y tapas especiales para evitar la evaporación del agua del sellado y se incuba esta muestra por cinco días a 20°C.

#### 8.9.1.4. Determinación del oxígeno disuelto por el método de la asida

Para la medición del oxígeno en uno de los dos frascos, se realizó un blanco de agua de dilución, incubar este por cinco días a 20°C. Se titula con solución de tiosulfato 0.025 N hasta alcanzar un color amarillo pálido. Se adiciona 1 mL de solución de almidón y se continúa la titulación hasta la primera desaparición del color azul. No se toma en cuenta las siguientes re coloraciones debido a efectos catalíticos inferentes.

$$DBO5 \frac{mg}{L} = \frac{(Gasto\ inic - gasto\ final) * f * 100}{\% \text{ dilucion}}$$

f=factor del tiosulfato en el momento de la titulación

#### 8.9.2. Preparación del buffer a pH= 7

La solución de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0,2 M, se preparó disolviendo 27.6 g de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. H<sub>2</sub>O en agua destilada, completando un litro.

La Solución de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0,2 M, se preparó disolviendo 53.65 g de Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. 7 H<sub>2</sub>O en agua destilada, llevando el volumen final a 1 litro.

#### 8.10.3. Preparación de la solución de neutro

Solución 1: disolver 0.5 g de rojo neutro (colorante para tinción en biología con peso molar igual a 288.78 g/mol) en 50 mL de aguas destilada. Solucion 2: disolver 0.45 g de sal en 10 mL de agua destilada. Mezclar ambas soluciones y listo.

En cada una de las celdas se agregó una gota de solución de rojo neutro que fue equivalente a 0.05 mL.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa (g)}}{\frac{\text{Peso molar}}{\text{volumen (L)}}}$$

$$\text{Concentración} = \frac{0.5 \text{ g}}{\frac{288.78 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.060 \text{ L}}}$$

$$\text{Concentración} = 0.0288 \text{ M}$$

## ***NOMENCLATURA***

---

<b><i>MFC</i></b>	Microbial Fuel Cell
<b><i>CCM</i></b>	celdas de combustible microbiano
<b><i>DBO</i></b>	Demanda Bioquímica De Oxígeno
<b><i>PEM</i></b>	Membrana De Intercambio De Protones
<b><i>cm</i></b>	Centímetros
<b><i>A</i></b>	Amperio
<b><math>\Omega</math></b>	Ohmio
<b><i>W</i></b>	Watt
<b><i>mW</i></b>	miliWatt
<b><math>m^2</math></b>	metros cuadrados
<b><i>V</i></b>	Voltio
<b><i>Nafion</i></b>	Polímero Sintético
<b><i>DQO</i></b>	Demanda química de oxígeno
<b><i>UNPRG</i></b>	Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
<b><math>E^{\circ}_{emf}</math></b>	Fuerza electromotriz Estándar
<b><math>Fe^{+2}</math></b>	Catión hierro +2
<b><i>N, P, Ca, Mg, Fe, S</i></b>	Nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, hierro y azufre
<b><i>pH</i></b>	Potencial de hidrogeno
<b><i>mS</i></b>	mili Siemens
<b><math>CO_2</math></b>	Dióxido De Carbono
<b><math>\Pi</math></b>	Cociente de reacción (Constante de equilibrio)

<b>h</b>	Horas
<b>n</b>	Número de electrones por mol de reacción
<b>F</b>	Constante de Faraday (96500 C/mol)
<b>Q</b>	Carga transferida en la reacción, expresada en Coulomb (C)

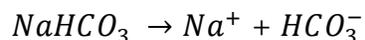
## GLOSARIO

---

### A

#### **Amortiguadores**

Los sistemas amortiguadores son aquellas sustancias que con su presencia atenúan las variaciones de pH causadas por la adición de un ácido o una base a una disolución. Un sistema amortiguador es una mezcla binaria de un ácido débil con su sal de base fuerte o de una base débil con su sal de ácido fuerte. Por ejemplo, el  $\text{NaHCO}_3$ , se disocia con arreglo a la reacción:



#### **Algas**

Las algas son un grupo heterogéneo de organismos eucariotas, fotosintéticos, con amplia variedad de formas, estructura celular, metabolismo, composición química, ciclos de vida y hábitats. Presentan cloroplastos con clorofila, donde se capta la energía luminosa como fuente de energía.

### B

#### **Biocatalizador**

“Las enzimas han sido naturalmente adaptadas para realizar bajo condiciones fisiológicas. Sin embargo, la biocatálisis se refiere al uso de enzimas como catalizadores de proceso bajo condiciones artificiales (in vitro)”. (Prats.G, 2008, p2)

Es decir, son las enzimas nuestros biocatalizadores. Ellas serán las encargadas de acelerar las reacciones químicas; pero en condiciones controladas o artificiales. (In Vitro).

## **Biocombustibles**

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable. Los biocombustibles constituyen la primera fuente de energía que conoció la humanidad. Entre las fuentes de los biocombustibles están la biomasa proveniente de cultivos como caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros, usada para producir etanol, y los aceites provenientes de palma africana, soya, higuera, curcas, colza y otras plantas utilizadas para producir biodiesel (Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura, 2007, p.03).

## **Bioelectricidad**

Es la fuente de energía eléctrica en el interior de las células o la corriente electrolítica debido a los campos eléctricos en el exterior de la célula (Puican, p.01).

## **Biosensores**

En un biosensor, el fenómeno es reconocido por un sistema biológico llamado un bioreceptor, que está en contacto directo con la muestra y forma el componente sensible del biosensor. Los Biosensores están también caracterizados por su especificidad, o su habilidad para reconocer un compuesto único entre otras sustancias en la misma muestra. La selectividad de Biosensores es determinada tanto por el bioreceptor y el método de transducción.

## **C**

### **Colmatación**

El fenómeno comienza por la decantación de las partículas más finas en suspensión, cuando el agua queda estancada. Se produce un lento depósito de cieno arcilloso alrededor de los granos de macizo filtrante, que se endurece progresivamente y disminuye la sección total de paso del agua.

## D

### **Demanda bioquímica de oxígeno**

La materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5) y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO<sub>2</sub>/L).

## E

### **Estufa**

Equipo utilizado en microbiología para el proceso de incubación delicada de organismos, así como para el acondicionamiento de medios que captura la materia orgánica disuelta en el agua a su paso. El oxígeno preciso para el proceso es captado por la biomasa del existente en los huecos que quedan entre el relleno.

## F

### **Fieltro**

El fieltro es lana conglomerada. Es decir, cuando el pelo se enreda, creando así una trama de tela, cordones u objetos con volumen que puede aplicarse en infinidad de usos. (Fuente: Souvenirs en fieltro)

### **Fuerza iónica**

Es una medida de la intensidad del campo eléctrico en una solución y puede expresarse

$$\mu = \frac{1}{2} \sum c_i * z_i^2$$

Donde  $z$  es la valencia del ion  $i$ . Para los electrolitos de cationes y aniones monovalentes (llamados electrolitos monovalentes), la fuerza iónica es equivalente a la molaridad. Para los electrolitos de cationes bivalentes y aniones monovalentes o de cationes monovalentes y aniones bivalentes, la fuerza iónica es 3 veces la molaridad. Para los electrolitos de cationes y aniones bivalentes, la fuerza iónica es cuatro veces la molaridad.

La fuerza iónica de una solución que contiene más de un electrolito es la suma de las fuerzas iónicas de las sales individuales que la componen.

## H

### **Heces fecales**

Las heces constituyen el producto de secreciones del tubo digestivo y normalmente están conformadas por restos de alimentos no digeridos, detritos celulares y bacterias en número considerable. Estos restos alimenticios están aumentados en las alteraciones del tracto digestivo y afecciones acompañadas de diarrea, debido a que este material es eliminado antes que se complete su digestión y absorción. (Fuente: Técnicas de Diagnóstico Parasitológico)

## I

### **Intensidad eléctrica**

La corriente o intensidad eléctrica en un alambre es la tasa con que se mueve las cargas en él. Si una carga neta  $\Delta Q$  atraviesa el área de sección transversal sombreada en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , la corriente o intensidad media es:

**J****Jarra de Brewer**

El control de bacterias que requieren las condiciones de ausencia de oxígeno. La jarra de anaerobiosis es un recipiente ideal para realizar incubaciones en anaerobiosis.

**L****Lodos activados**

Los lodos activados están dirigidos a transformar sustrato orgánico o insoluble, en forma coloidal o suspendida, en sólidos biológicos floculantes, que puedan ser asentados y de este modo separados del agua que contaminan, por medio de los procesos convencionales de sedimentación.

**P****Piocianina**

Es un pigmento azul verdoso difusible y soluble en cloroformo, característicos de *P. aeruginosa*. En el 10% de las cepas de esta especie puede ser negativa. El pigmento de color azul verdoso se solubiliza en cloroformo y vira a rojo al acidificarlo (para confirmar la presencia de Piocianina, poner 1 ml de cloroformo en el tubo con el agar inclinado en el que se ha cultivado la bacteria hasta que tome color azul, lo que indica que ha solubilizado el pigmento, decantar en un tubo de ensayo y añadir una o dos gotas de HCl 1N; tomará color rosado) (Fuente: Microbiología Clín

ica).

**R**

### **Resistencia eléctrica de un conductor**

La resistencia eléctrica de los conductores metálicos se debe a los choques de los electrones con los átomos del metal, lo que dificulta su movimiento. En cada choque, los electrones transforman parte de su energía en forma de calor, con el consiguiente calentamiento del conductor.

### **Respiración aeróbica**

Es un tipo de metabolismo energético en que los seres vivos extraen energía de moléculas orgánicas, como la glucosa, por un proceso complejo en que el carbono es oxidado y en el que el oxígeno procedente del aire es el oxidante empleado. En otras variantes de la respiración, muy raras, el oxidante es distinto del oxígeno. (Respiración anaeróbica)

### **Respiración anaeróbica**

Es un proceso biológico de óxido reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica, a través de una cadena transportadora de electrones análoga a la de la mitocondria en la respiración aeróbica.

## **S**

### **Sedimentación**

Es la acumulación por deposición de todos aquellos materiales alterados y transportados previamente. Siempre tiene lugar cuando disminuye la energía de los agentes de transporte. Los sitios donde se acumulan los sedimentos se llaman medios sedimentarios.