



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL**

“Efecto del oxígeno en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES:**

Br. Bocanegra Gahona, Alejandro César (ORCID: 0000-0001-6299-1354)

Br. Cotera Torrealva, Clesi Estefany (ORCID: 0000-0003-3857-1282)

**ASESOR:**

Mg. Villacorta González, Misael Ydilbrando (ORCID: 0000-0002-5346-4824)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y gestión de los residuos

**Trujillo-Perú**

**2020**

## **Dedicatoria**

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A nuestros padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo nos han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.

A nuestros hermanos y demás familiares en general por el apoyo que siempre nos brindaron día a día en el transcurso de cada año de nuestra carrera universitaria.

## **Agradecimiento**

A la Universidad Cesar Vallejo por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.

A nuestros asesores, Dr. Medardo Alberto Quezada Álvarez, Ing. Misael Ydilbrando Villacorta González, por inculcarnos sus conocimientos y apoyarnos para poder desarrollar esta investigación.

A nuestras familias, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

## **Página del jurado**

## **Página del jurado**

## **Declaratoria de Autenticidad**

### **Declaratoria de autenticidad**

Yo: Bocanegra Gahona, Alejandro César, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental, declaramos bajo juramento que toda la documentación que acompañe el trabajo de tesis es veraz y auténtica.

Asimismo, declaramos también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en esta tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido, asumimos la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, 31 de julio del 2020



-----  
Bocanegra Gahona, Alejandro César

DNI: 71449142

### **Declaratoria de autenticidad**

Yo: Cotera Torrealva, Clesi Estefany, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental, declaramos bajo juramento que toda la documentación que acompañe el trabajo de tesis es veraz y auténtica.

Asimismo, declaramos también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en esta tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido, asumimos la responsabilidad que comprende ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aprobada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, 31 de julio del 2020



Cotera Torrealva, Clesi Estefany

DNI: 48935486

## Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento .....	iii
Página del jurado .....	iv
Declaratoria de Autenticidad .....	vi
Índice .....	viii
Índice de tablas .....	ix
Índice de figura.....	x
Resumen .....	xi
Abstract.....	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. MÉTODO.....</b>	<b>11</b>
2.1. Tipo de investigación.....	11
2.2. Método.....	11
2.3. Diseño de investigación .....	11
2.4. Variables, Operacionalización .....	13
2.5. Población, muestra y muestreo .....	13
2.6. Técnica e instrumento de recolección de datos, validez y confiabilidad .....	16
2.7. Métodos de análisis de datos .....	16
2.8. Aspectos éticos .....	16
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
<b>IV. DISCUSIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>23</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>24</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>29</b>
<b>Anexo 1: Instrumentos.....</b>	<b>29</b>
<b>Anexo 2: Valores promedios del voltaje .....</b>	<b>30</b>
<b>Anexo 3: Resultados análisis estadísticos .....</b>	<b>32</b>
<b>Anexo 4: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana a diferente oxígeno.....</b>	<b>36</b>
<b>Anexo 5: Acta de aprobación de originalidad de tesis .....</b>	<b>41</b>
<b>Anexo 6: Pantallazo Turnitin .....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo 7: Formulario de Autorización para la Publicación Electrónica de las Tesis .....</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 8: Autorización de la versión final del Trabajo de Investigación.....</b>	<b>46</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de Variables .....	13
Tabla 2. Valores promedios del voltaje, flujo másico de oxígeno. ....	17
Tabla 3. Relación energía eléctrica producida y turbidez .....	18
Tabla 4. Subconjuntos homogéneos HSD Tukey <sup>a,b</sup> .....	19

## Índice de figura

Figura 1. Etapas de conversión de energía química en eléctrica tomado Bioquímica y Biología Molecular II (2019).....	1
Figura 2. Mecanismo de degradación de la materia orgánica (Glycolysis) tomado Bioquímica y Biología Molecular II (2019) .....	9
Figura 3. Membrana de intercambio de protones, Tomada de: Energía: celdas de combustible microbianas Góngora et al (2017) .....	11
Figura 4. Esquema del diseño Tomado Libro de Ciencia y Tecnología N° 1 (2008) .....	12
Figura 5. Principio de funcionamiento de una MFC Tomada Energía: celdas de combustible microbianas Góngora et al (2017) .....	15
Figura 6. Interacción del flujo de oxígeno y voltaje con la cantidad de energía eléctrica. .	18
Figura 7. Se observa que a medida que se produce electricidad la turbidez disminuye debido a la oxidación materia orgánica hasta CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O.....	19

## Resumen

Actualmente la necesidad de energía en el país es la principal motivación del presente trabajo biotecnológico generación eléctrica alternativa, con (CCM) celda de combustible microbiano. La bioelectrogénesis, es la producción de electricidad mediante microorganismos. CCM, tiene dos compartimientos donde los microorganismos degradaron materia orgánica como glucosa, presente en las aguas residuales del PTAR COVICORTI, liberando electrones y protones convirtiendo la energía química en energía eléctrica. La oxidación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, produce CO<sub>2</sub>, donde el oxígeno lo toma del agua, liberando protones H<sup>+</sup> y electrones e<sup>-</sup>, los protones atraviesan la membrana selectiva hacia la cámara aeróbica donde consume el oxígeno disuelto convirtiéndose en moléculas de agua. En la presente investigación se evaluó el efecto de la oxigenación en la generación de energía eléctrica en CCM con agua residual del PTAR Covicorti, se aplicó como estímulo oxígeno a diferentes flujos máscicos y se evaluó su efecto en la producción de energía eléctrica en CCM. La investigación es de tipo cuantitativa, con una población que está comprendida por el volumen total de agua residual que ingreso a la planta de tratamiento de aguas residuales COVICORTI, se consideró como muestra 10 litros de las aguas residuales de la poza de oxidación Covicorti, Trujillo, los instrumentos estadísticos utilizados fueron, la prueba de normalidad Shapiro Wild, el estadístico ANOVA, Tukey. Se evaluó como variables Independiente Oxigenación, dependiente energía eléctrica, demostrando un efecto favorable en el incremento de energía eléctrica al adicionar oxígeno al cátodo, variando desde 430,42; 566,92; 898,67; 1012,17 mV, para flujos máscicos de 0; 0,699; 1,398 y 2,097 L/min, respectivamente. Concluyendo que CCM con adición de oxígeno aumentan la generación de energía eléctrica, oxidando materia orgánica así mismos a mayor velocidad, paralelamente se logra la depuración y reducción de la turbidez debido a la materia orgánica en suspensión.

**Palabras claves:** agua residual, electricidad, CMM, microorganismos.

## Abstract

Currently the need for energy in the country is the main reason for the present work in biotechnological alternative electricity generation, with (CCM) microbial fuel cell. Bioelectrogenesis is the production of electricity by microorganisms. CCM has two compartments where microorganisms decomposed by organic matter such as glucose, present in the wastewater of the PTAR COVICORTI, releasing electrons and protons, converting chemical energy into electrical energy. The oxidation of organic matter under anaerobic conditions, produces CO<sub>2</sub>, where oxygen takes it from the water, releasing H<sup>+</sup> protons and e<sup>-</sup> electrons, the protons cross the selective membrane into the aerobic chamber where it consumes dissolved oxygen becoming water molecules. In the present investigation, the effect of oxygenation on the generation of electrical energy in CCM with residual water from the PTAR Covicorti was evaluated, oxygen stimulation was applied to different mass flows and its effect on the production of electrical energy in CCM was evaluated. The research is quantitative, with a population that is comprised of the total volume of wastewater that entered the COVICORTI wastewater treatment plant. It was considered as a sample 10 litres of wastewater from the Covicorti oxidation pool, Trujillo, the statistical instruments used were, the Shapiro Wild normality test, the ANOVA statistic, Tukey. It was evaluated as variables Independent Oxygenation, dependent on electrical energy, demonstrating a favorable effect on the increase of electrical energy by adding oxygen to the cathode, varying from 430,42; 566,92; 898,67; 1012,17 mV, for mass flows of 0; 0,699; 1,398 and 2,097 L / min, respectively. Concluding that CCM with the addition of oxygen increases the generation of electrical energy, oxidizing organic matter both at a higher speed, in parallel to the purification and reduction of turbidity due to the suspended organic matter is achieved.

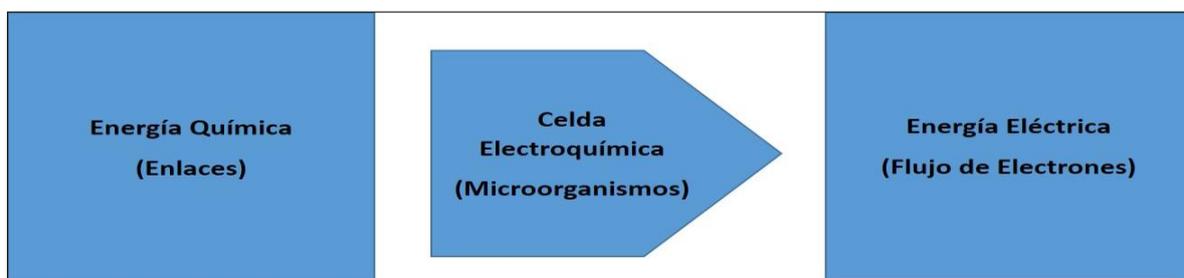
**Keywords:** wastewater, electrical energy, CCM, microorganisms

## I. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes métodos de energías renovables, una opción poco popular y estudiada en nuestro país, son las celdas microbianas para la producción de electricidad, diseños sencillos electroquímicos generan energía eléctrica mediante la transforman de los enlaces moleculares de la energía química, alcanzando una mayor eficiencia energética a los aparatos que generan termoelectricidad. Asimismo, en la fig.1 se muestra cómo se genera la energía eléctrica a través de la conversión de la energía eléctrica (Boudghene, 2002). Experimental, se aplicó como estímulo oxígeno a diferentes flujos másicos y se evaluó su efecto de la producción de energía eléctrica en celdas microbianas con agua de las pozas de oxidación de COVICORTI- Trujillo, las cuales se midieron con un voltímetro. En la figura N° 5 se muestra el diseño y fundamento de la degradación de materia orgánica y la producción de electrones (electricidad).

Actualmente la necesidad de energía en el país se convierte en la principal motivación del presente trabajo presentado como una biotecnología de generación eléctrica alternativa, con (CCM) celda de combustible microbiano. A comparación de las energías renovables no convencionales (ERNC) (energía biomasa, eólica, solar y bioetanol); es una opción poco notable. En mi opinión todavía no se ha estudiado dentro del país, podría permitir el uso de la materia orgánica de las aguas residuales del PTAR Covicorti como fuentes de energía limpia, al utilizar la energía química acumulada en sus enlaces químicos la ruptura realizada por microorganismos.

El dispositivo de celdas de eléctricas microbiológicas aprovecha las sustancias orgánicas para generar energía eléctrica mediante los microorganismos (Du *et al.*, 2007; Franks y Nevin, 2010)



*Figura 1.* Etapas de conversión de energía química en eléctrica *tomado* Bioquímica y Biología Molecular II (2019)

En Perú, solo se ha presupuestado el 30% de la inversión pública para el tratamiento del agua. La contaminación del agua se da por sustancias orgánicas e inorgánicas. Poniendo en peligro la salud de los pobladores, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS). El (INEI) Instituto Nacional de Estadística e Informática según datos, en el 2014, diariamente se generaban 1'202,286 m<sup>3</sup> de aguas residuales en Lima Metropolitana, las cuales 21,2% solo eran tratadas (Collacci, 2018).

En la ciudad de Trujillo, las aguas residuales procedentes de los distritos de El Porvenir, Trujillo Metropolitano, Víctor Larco y parte de la Esperanza son guiadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – Covicorti, estas aguas pasan por una serie de tratamientos, comenzando con las etapas de recepción de las aguas, bombeo, aireación y sedimentación. Es por eso que en esta investigación se utilizara microorganismos para la producción de energía eléctrica, disminuir cantidades de materia orgánica presente en las pozas de oxidación de Covicorti.

Existen trabajos realizados previos al desarrollo de la presente tesis como: (Logan *et al.*, 2006), concluye que la escala de la celda a construir es la principal limitación del trabajo, donde la potencia del sistema puede ser muy pequeña, y dificultar el cálculo de las variables eléctricas, y la adecuada estimación de su trabajo. En los trabajos revisados, relacionados con celdas de combustible microbiológicas, existen experiencias de bacterias oxidantes del hierro regenerando iones Fe<sup>3+</sup> que aceptan electrones reduciendo el (OD) en el recipiente aeróbico, mejorando la reacción en el cátodo (Heijne *et al.*, 2007).

Se encontraron ciertas investigaciones que sugieren operaciones de (bio) lixiviación electro generadora (BEGE) basadas en el aprovechamiento de la energía de la oxidación de sulfuros en la generación de electricidad (Xiao *et al.*, 2007).

Bejarano y Escobar (2015) en su trabajo de investigación sobre la “Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de aguas residual – Colombia”. Cuyo objetivo fue determinar la eficiencia del uso de microorganismos en el tratamiento de aguas residuales domesticas en una PTAR, concluyeron que el pH y la temperatura influyen en el crecimiento y reproducción de las colonias de microorganismos.

La Celdas Combustible Microbianas son una tecnología que promete como alternativa de generación de energía, degradación de materia orgánica y biorremediación; para la aplicación práctica es necesario aumentar la eficiencia de los procesos bioelectroquímicos y

desempeño eléctrico, sugiriendo investigar un diseño con consorcios microbianos, tipo y concentración de sustratos. (Revelo *et al.*, 2015).

El autor Huang *et al.* (2011) Concluyen que además del estudio de biocátodos que tienen la capacidad de utilizar oxígeno existen otros contaminantes como posibles aceptores de electrones, permitiendo la degradación y remoción de nutrientes, en consecuencia, la biorremediación y al mismo tiempo la generación de electricidad.

Para Valencia (2018) en su investigación sobre “Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de Camal”, concluye que la temperatura adecuada para la remoción de la MO (materia orgánica) y de la generación de energía eléctrica en el agua residual de camal Azoguine es de 8, 15 y 25 °C; la de 25 °C alcanzando eficiencias coulombica altas de 28,4%; 35,33% y 70,69% para las demandas químicas de oxígeno de 1980 mg/L, 2400 mg/L y 3200 mg/L proporcionalmente, manifestándose que el proceso de oxidación de materia orgánica en el ánodo, es directamente proporcional a la temperatura, en la producción de energía eléctrica. En la remoción de materia orgánica e inorgánica (DQO), se alcanzó a la temperatura de 25 °C, las eficiencias de remoción más altas de 93,94%; 86,89%; y 86,25% de materia orgánica removida para las mismas demandas químicas de oxígeno. Por lo que la temperatura de 25 °C es la óptima, en eficiencia coulombica y eficiencias de remoción.

Por otra parte, Samayoa (2016) en su trabajo de investigación sobre “Tratamiento de Agua Residual Municipal en una Celda de Combustible Microbiana con Compósitos de Espuma de Poliuretano, Grafito y Polipirrol”, concluyó que la celda de combustible microbiana equipada con un ánodo de PU/Grafito/PPy FeCl<sub>3</sub> removió un máximo de 48,19 % de materia orgánica y produjo una densidad de potencia máxima de 21,3752 (mJ/m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) durante su operación, los resultados obtenidos se debieron a que la biopelícula adherida en el electrodo promovió que se degrade la materia orgánica y la conductividad eléctrica. Por lo tanto, se obtuvo una eficiencia coulombica de 9,37 %.

Asimismo, Medina (2017) en su tesis de Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio, concluyen que la bacteria con mayor velocidad de crecimiento fue la *Escherichia coli* con un valor de 0,725 h<sup>-1</sup>, en comparación con la *Pseudomonas aeruginosa* con una velocidad de 0,517 h<sup>-1</sup>, lo que identifica que la afinidad por el sustrato seleccionado es menor para la *Pseudomonas aeruginosa*. Los parámetros de calidad del agua mostraron

el valor inicial de la (DQO) del sustrato de 23248 mg/L O<sub>2</sub>, al finalizar las pruebas con *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* se obtuvo una reducción de DQO a 20568 mg/L O<sub>2</sub> y 22488 mg/L O<sub>2</sub> proporcionalmente lo cual demuestra la capacidad de la *Escherichia coli* para degradar los nutrientes presentes en el medio.

Buitrón (2011) en su artículo “Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos”. Observaron que la MO (materia orgánica) se degradaba paralelamente durante la generación de energía eléctrica. Se degradó como CO<sub>2</sub>, incluso el 70% del carbono orgánico proveniente de la materia orgánica presente en el agua alimentada. La distancia entre los electrodos no fue muy significativa para la producción de electricidad, la distancia de mayor alejamiento logró obtener 660 mV como máximo en la celda de 120 ml, a comparación de las celdas de 80 mL y 40 lograron obtener 532 mV y 540 mV, proporcionalmente. La celda de mayor separación y volumen entre los electrodos se logró obtener la mejor densidad de potencia de (392 ± 5 mW/m<sup>2</sup>). Se observó a medida que aumenta la separación entre electrodos la potencia volumétrica va disminuyendo, la celda de mayor alejamiento obtuvo 4,5 ± 0,06 W/m<sup>3</sup>. La celda de mayor alejamiento de los electrodos obtuvo la mayor fuerza por hora (77,3 W-h).

Asimismo, Llontop (2018) en su investigación “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”, determinó la influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas. Utilizó agua residual cruda con DBO, 242 mg/L obtuvo la máxima densidad de potencia de 190.021 mW/m<sup>2</sup>. Concluyendo que la demanda química de oxígeno influye en la producción de eléctrica producida en la CCM.

En el artículo de Yizhong y Hongwei (2018) en la investigación “Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment”, mencionan que las celdas de combustible microbiano tienen buen efecto en el tratamiento en la eliminación de DQO o un determinado contaminante. Concluyeron que la máxima eficiencia de eliminación de DQO fue mayor de 90% y el inferior fue 20 mg/L.

Para Xia *et al.*,(2019) realizaron un enfoque de tratamiento sostenible y eficiente para las aguas residuales de fermentación ácida orgánica, construyendo en este estudio dos sistemas de celdas de combustible microbiano (MFC) inoculadas con aguas residuales o comunidad microbiana domesticada. En comparación con el MFC inoculado con la comunidad

microbiana domesticada, el MFC inoculado con aguas residuales no solo mostró una mayor densidad de potencia ( $543,75 \text{ mW m}^{-2}$ ) y eficiencia de Coulomb (22,10%), sino que también mostró mayores tasas de eliminación de la demanda de oxígeno químico (75,59%), nitrógeno total (76,15%), y nitrógeno amoniacal (83,23%), cumpliendo con la demanda del estándar de descarga de aguas residuales de China. El análisis de secuencia reveló que el MFC inoculado con aguas residuales era más rico en la comunidad microbiana, y algunas bacterias como la *Saprospiraceae* y las *caldilineaceas* fueron beneficiosas por su buen desempeño. En contraste, la comunidad microbiana de MFC inoculada con comunidad microbiana domesticada fue relativamente simple. Estos resultados indicaron que los MFC pueden ser un método sostenible para el tratamiento de aguas residuales de fermentación de ácidos orgánicos sin ningún procesamiento previo.

En la investigación de Maia *et al*, (2019) sobre la recuperación de energía de las aguas residuales nos dice que es una importante frontera de la ingeniería y la ciencia ambientales. Asimismo, Jianjun hu, *et al*, (2017) precisan que las celdas de combustible microbiano (MFC) pueden transformar directamente la energía química de las sustancias de alimentación en electricidad mediante vías de aspiración anódica. Las Celdas de Combustibles Microbiológicas no es algo nuevo, como el desarrollo de la electroquímica, en los años 1745 – 1827 Alessandro Volta tenía las primeras observaciones de este fenómeno, incluso en el desarrollo actual de los transbordadores espaciales de la NASA, este sistema eléctrico a bordo va a utilizar la electricidad que es generado por la celda de combustible de hidrógeno.

La celda de combustible microbiano va a consumir  $\text{O}_2$  y liberar  $\text{H}_2$  en estado gaseoso. La fuente de electrón donde al oxidarse sobre una superficie del ánodo liberando protones es el  $\text{H}_2$ , a través de una membrana selectiva van a migrar hacia la superficie catódica, estos van a reaccionar el electrón y el oxígeno derivados del ánodo, que va generar energía eléctrica y vapor de agua como producto final. Actualmente, existen autos, buses e incluso modelos de aeroplano con motores eléctricos sustentados con energía eléctrica de este tipo de celda (US DoE, 2009).

Rago (2017) en su artículo, “Influencias de la concentración de oxígeno disuelto en comunidades microbianas de biocatodos en celdas de combustible microbianas”, menciona que el oxígeno disuelto (OD) en la interfaz catódica es un factor crítico que influye en el rendimiento de las células de combustible microbiano (MFC), En este trabajo, se operaron

tres MFC con cátodo bajo diferentes condiciones de OD: i) respiración de aire (A-MFC); ii) sumergido en agua (W-MFC) y iii) asistido por microorganismos fotosintéticos (P-MFC). Se alcanzó una meseta de corriente máxima a  $1,06 \pm 0,03$  mA,  $1,48 \pm 0,06$  mA y  $1,66 \pm 0,04$  mA, aumentando respectivamente para W-MFC, P-MFC y A-MFC.

Usando enzimas o microorganismo que van a catalizar las reacciones en las celdas microbianas, va a tomar el nombre de celda de combustible microbiana o enzimática. Al usar el microorganismo, se va abrir la posibilidad de investigar nuevos diseños de celdas para aprovechar materia orgánica residual y generar electricidad.

En esta última investigación tecnológica, la materia orgánica residual es una opción de mayor desarrollo, considerando 1m<sup>3</sup> de volumen de reacción que pertenece a la celda piloto, construido en la Universidad de Queensland, Australia, el exponente de mayor importancia (Keller, 2008). El propósito está en utilizar los microorganismos en condiciones anaeróbicas con capacidad de degradar la materia orgánica y transportar el electrón hacia el ánodo, directa o indirectamente. El protón cruza la membrana conductora selectiva y llega al cátodo, con el (OD), se va a combinar y como producto final va a generar agua (Logan *et al.*, 2006). Las celdas de combustible microbiano con frecuencia son alimentadas con materia orgánica, pero no se ha encontrado ser alimentadas con materia inorgánica. Otros diseños de celda de combustible microbiano usan bacterias sulfato reductoras que son alimentadas con sulfato, produciendo en la celda, ácido sulfhídrico. (Rabaey *et al.*, 2005) (Dutta *et al.*, 2008; para acelerar la reacción en el cátodo algunos utilizan iones metálicos, actuando como mediadores en la disminución del (OD). (Oh *et al.*, 2004).

Variedades de diseños de una MFC se han propuesto para su construcción. Numerosas investigaciones, presenta el modelo tradicional de doble cámara (en forma de H), donde las cámaras o compartimentos están unidas a través de un puente de una membrana selectiva (Logan *et al.*, 2006). Al principio, se utilizaba lo que era el puente salino (Min *et al.*, 2004). Son muy poco los que contenían flujos ascendentes de tipo tubular en sus diseños (Rabaey *et al.*, 2005), otros como los diseños de placas planas (Min *et al.*, 2004), un apilado de celda de combustible microbianos (Logan *et al.*, 2006) y tubos en forma de U (Zuo *et al.*, 2008). En la celda de combustible microbiano de sedimentaciones, utilizan agua residual y esto sirve como componente en la liberación de electrones, este electrón pasara al ánodo y luego al cátodo, registrando 55 mW/m<sup>2</sup> de densidad de potencia de sedimento marino, generando la electricidad (Scott *et al.*, 2008).

Se han realizado estudios, en la identificación y aislamiento de bacteria, estas bacterias pueden transferir electrón al electrodo, producto de la degradación de la materia orgánica. Algunas investigaciones indican que el metabolismo más común para transferir electrón es una celda de combustible microbiano (Bond *et al.*, 2002; Bretschger *et al* 2010, Chaudhuri *et al*, 2003) por falta de óxido en la celda MFC, bacterias desasimilatorias de metal (DMRB) pueden transferir electrones a un metal que va actuar como un receptor de electrón (Lovley, 2008). En la celda de combustible microbiano, los metales como el hierro, magnesio van a ser remplazados por el ánodo, entregando electrón al ánodo debido a que la bacteria va a oxidar materia orgánica. Las bacterias desasimilatorias de metal no todas pueden hacer transferencia de electrón al ánodo en una celda de combustible microbiano (Miller y Oremland, 2008). Un proceso cercano similar a lo que pueda ocurrir en una celda de combustible microbiano es la reducción de hierro, sin embargo, en esta investigación para la reducción del hierro usaron cultivos (Lovley, 2008; Bond *et al.*, 2002; Chaudhuri, 2003). Algunos microorganismo como *Shewanella*, *Rhodoferrax*, *Desulfobulbus*, *Clostridium*, *Geobacter* y *Aeromonas*, hacen la reducción desamilaria de que son los metales (hierro) (Bretschger *et al.*, 2010). La transferencia de electrón ocurre de varias maneras (i) Transferir directa atreves del intermedio de la estructura bacteriana llamada bancables, (ii) Transferir indirectamente, usando lanzadera intermedia de electrone, a través de la matriz de ex polisacáridos (EPS), o la mezcla los dispositivos (Logan, 2006; Lovley, 2008).

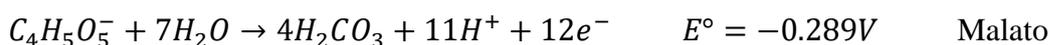
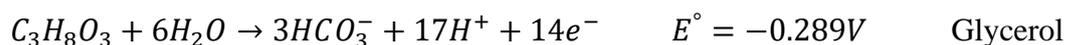
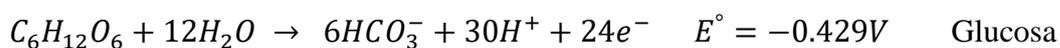
Según en las investigaciones las bacterias como *Shewanella putrefaciens* ciertos citocromos en la membrana celular hacen electroquímicamente activa a la bacteria en condiciones anaerobias (Kim *et al*, 2002). Recientemente investigadores encontraron la *Clostridia*, *Beta proteobacteria*, *Rhizobial* y *Gamma proteobacteria*, en la superficie del ánodo de la celda de combustible microbiano con sustrato orgánico (Lovley, 2008). Usar cultivo mixto en una celda de combustible microbiano va a generar mayor densidad de cultivos esto es debido a que las aguas residuales podemos encontrar variedad de microorganismos, quizás sea en la interacción sinérgica liberando electrón a nuestra celda de combustible microbiano (Jung y Regan, 2007).

Por otra parte Beenish *et al*, (2017) precisan que las células de combustible microbiano (MFC) son dispositivos bioelectroquímicos que permiten la recolección de la electricidad generada durante la respiración anaeróbica de especies bacterianas seleccionadas. Asimismo, Smida *et al*, (2018) como tema en una revista, *Microbial Fuel Cells Wastewater*

Utilization, menciona que los tratamientos de aguas residuales con MFC aún no se ha aplicado a gran escala, se va a necesitar investigación fundamental si los MFC pueden alguna vez competir y reemplazar algunas plantas de tratamiento de agua residuales como una manera más sostenible. Gude (2016) en su artículo Wastewater treatment in microbial fuel cells - an overview concluye que, problemas ambientales asociados con el saneamiento del agua no se limitan solo a los países en desarrollo, sino que son las necesidades humanas y ambientales más básicas de todo el mundo.

Las posibles reacciones bioelectroquímicas en células de combustible microbianas que generan electricidad utilizando aguas residuales como sustrato (donante de electrones) (Gude, 2016).

### Reacciones en el ánodo



### Reacciones en el cátodo



Se ha comprobado la efectividad de microorganismos en la generación de energía alternativa por diferentes técnicas, como la biorremediación y la bioelectrogénesis. La bioelectrogénesis, también nombrada bioelectricidad, es la producción de electricidad que lleva a cabo por los seres vivos y se presenta en la mayoría de los seres vivos (Mohn, 2017), la cual parece ser una alternativa con un gran potencial para generar energía de un modo más eficiente; esta tecnología, es más barata, contamina menos y se produce un proceso metabólico sin la necesidad de trastornar. El proceso requiere un medio favorable para que las bacterias aeróbicas oxide materia orgánica para su metabolismo y al mismo tiempo reducen iones metálicos; eliminando el exceso de electrones generados pues no puede contener cierta cantidad de electrón que se encuentra dentro de su membrana, debido a que procedería en un “enredo eléctrico” que posteriormente inhibiría el proceso metabólico; razón por la cual es necesario que esté presente un aceptor de electrón (iones oxidados los cuales serán reducidos) o algún electrodo encargado de quitar el electrón del microorganismo transferidos al exterior a través del citocromo C. La bioeletrogenesis puede

llevarse en la mayoría de alguno organismo, sin embargo, muy pocos pueden generar una cantidad de energía eléctrica considerable para su aprovechamiento (Mohn, 2017).

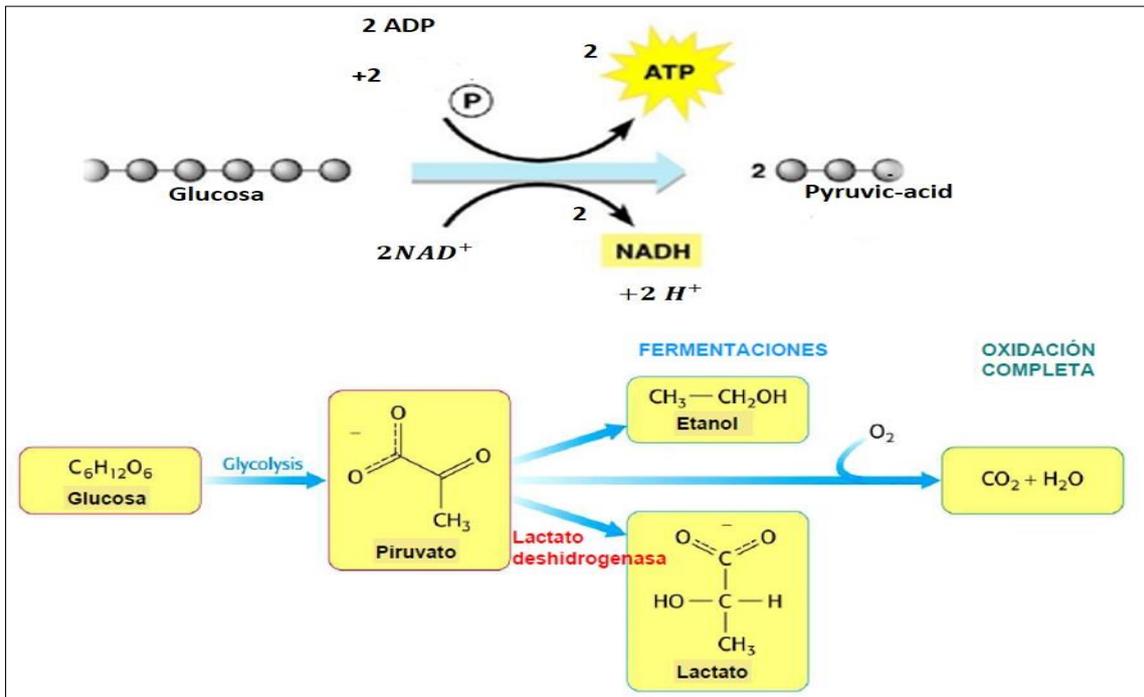


Figura 2. Mecanismo de degradación de la materia orgánica (Glycolysis) tomado Bioquímica y Biología Molecular II (2019)

En la figura 2, se observa que el proceso de oxidación del carbono para convertirse en  $\text{CO}_2$ , requiere de  $\text{O}_2$ , al aumentar el oxígeno en los reactantes desplazara la constante de equilibrio hacia los productos, aumentando la velocidad de la reacción en consecuencia la cantidad de electrones transferidos.

En la presente investigación nos planteamos el siguiente problema, ¿Cuál es efecto de la oxigenación, en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti - Trujillo?

El presente trabajo de investigación se justifica debido al problema que representan las aguas residuales en el país, como una alternativa a esta problemática presentamos esta investigación para generar electricidad y al mismo tiempo reducir la materia orgánica. En los últimos años se ha visto la creación de nuevas tácticas o estrategias para el tratamiento de las aguas contaminadas con el fin de mejorar nuestra calidad de vida, uno de ellos es el desarrollo de microorganismos eficaces (EM®) como un estudio que nos favorece a todos los habitantes de este planeta. Se eligió este tratamiento debido a que es una alternativa al mejoramiento de un sistema capaz de remover y reducir ciertos compuestos contaminantes

orgánicos que favorecen el crecimiento de la contaminación del ambiente poblacional; es por ello que se buscó una solución óptima cuyos resultados son viables para el estudio, que genere bajos costos, en menor tiempo que permitan un trabajo continuo, evaluable y que se constituya en proyecto auto sostenible, de resultados. Es por ello que la aplicación de este nuevo sistema de tratamiento con el uso adecuado de las celdas microbianas requerido se logra reducir la materia orgánica y paralelamente producir energía eléctrica a partir de las aguas residuales que se desechan al medio ambiente.

Las hipótesis planteadas en la presente investigación fueron: H1: La oxigenación tiene efecto en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti – Trujillo y Ho: La oxigenación No tiene efecto en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti - Trujillo.

El objetivo general es evaluar el efecto de la oxigenación en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti – Trujillo y como objetivos específicos: i) Construir una celda microbiana con aguas residuales del PTAR Covicorti, ii) Determinar el voltaje de la energía producida a diferentes flujos másicos de oxígeno, determinación del porcentaje máximo de incremento de energía eléctrica producida y el más alto flujo másico de oxígeno, iii) Determinar la turbidez del agua residual en la celda microbiana.

## II. MÉTODO

### 2.1. Tipo de investigación

Aplicada - Cuantitativa

### 2.2. Método

Deductivo

### 2.3. Diseño de investigación

Experimental, se aplicó como estímulo oxígeno a diferentes flujos másicos y se evaluó su efecto en la producción de energía eléctrica en celdas microbianas con agua de las pozas de oxidación de COVICORTI- Trujillo, las cuales se midieron con un voltímetro. En la figura N° 3 se muestra el diseño y fundamento de la degradación de materia orgánica y la producción de electrones (electricidad).

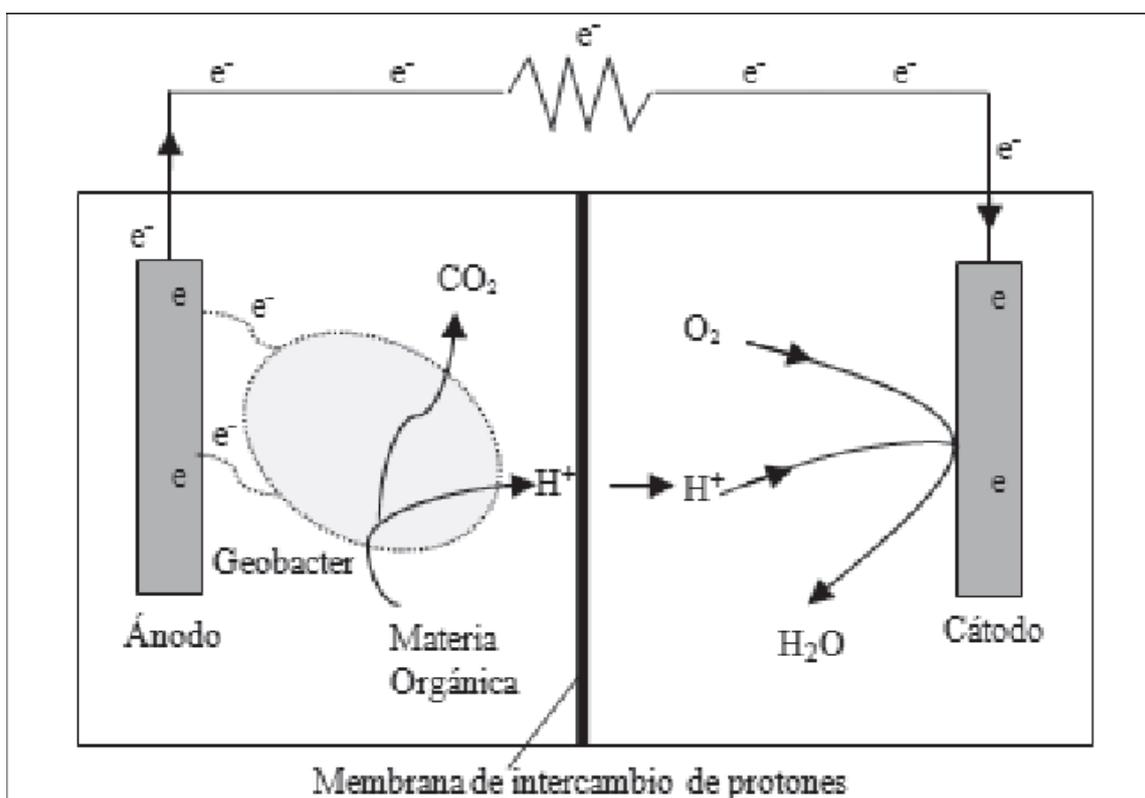


Figura 3. Membrana de intercambio de protones, Tomada de: Energía: celdas de combustible microbianas Góngora et al (2017)

Nuestro diseño fue factorial pues nos permitió la combinación de las variables obtenidas en el experimento, manipulando simultáneamente las variables independientes, las cuales se muestran en el siguiente esquema:

En la figura 4 se muestra la membrana de intercambio de protones como resultado de la reacción de degradación de la materia orgánica de acuerdo a la siguiente reacción:

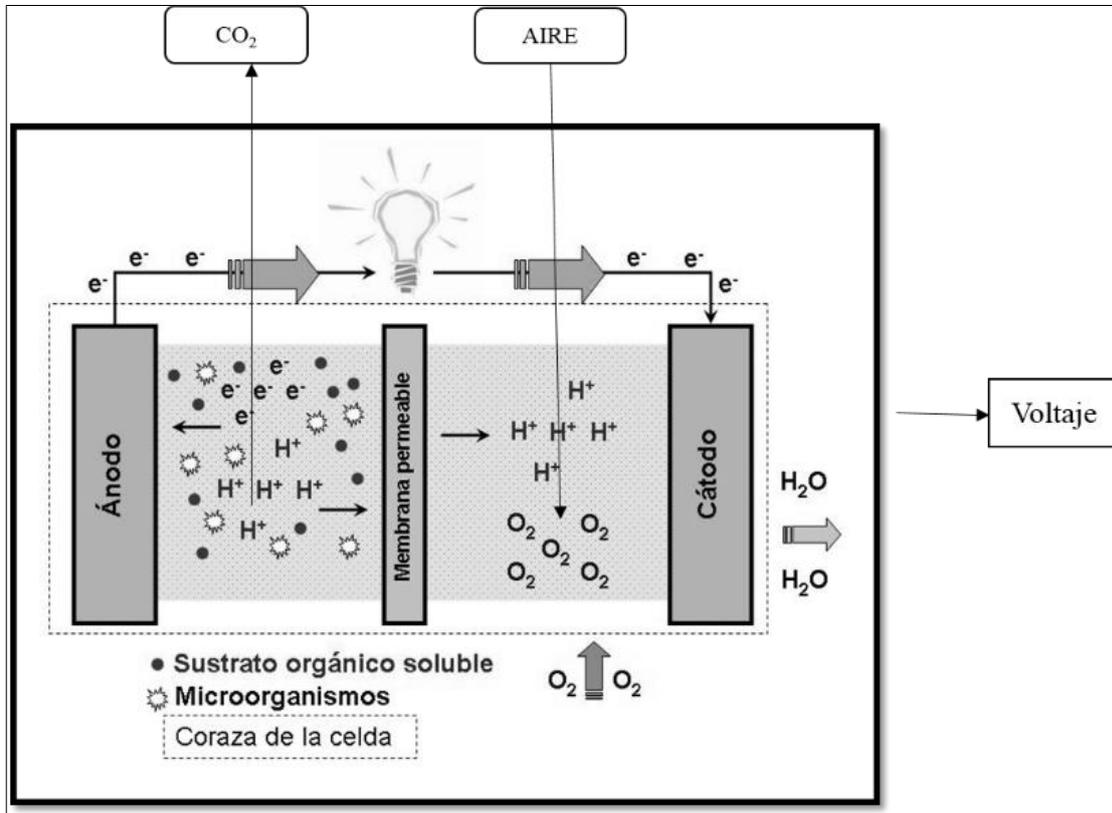
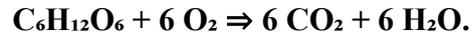


Figura 4. Esquema del diseño Tomado Libro de Ciencia y Tecnología N° 1 (2008)

Donde:

**Celda:** Ánodo con agua residual de la poza de oxidación de COVICORTI- Trujillo y cátodo con agua destilada.

**Oxigenación i:** Diferentes flujos máxicos de aire  $O_0, O_1, O_2, O_3$ .

**i:** variación del voltaje de la celda microbianas;  $V_0, V_1, V_2, V_3$ .

T; Temperatura constante  $20^\circ\text{C}$

pH: 7.9

t: Tiempo de aireación constante, 10 minutos

**Variables:**

**Independiente:** Oxigenación

**Dependiente:** energía eléctrica

## 2.4. Variables, Operacionalización

**Tabla 1.**  
*Operacionalización de Variables*

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Escala de Medición
<b>Independiente:</b> <b>Oxígeno</b>	Elemento químico gaseoso, con símbolo <i>O</i> , masa atómica 15,99 y número atómico 8, está presente en el aire, agua, seres vivos y en la mayor parte de los compuestos orgánicos e inorgánicos; es esencial en la combustión y respiración.	El oxígeno se administrará a la celda del cato mediante una pequeña bomba de oxigenación para peceras.	Flujo másico cc/ seg	Razón
<b>Dependiente:</b> <b>Voltaje de la celda.</b>	Diferencia de potencial eléctrico que genera una Fuerza Electromotriz o flujo de electrones en la celda electroquímica.	Se determinará mediante mediciones con un voltímetro.	MiliVoltios	ordinal

Fuente: Elaboración propia

## 2.5. Población, muestra y muestreo

### 2.5.1. Población

La población estuvo comprendida por el volumen total de agua residual que ingreso a la planta de tratamiento de aguas residuales de COVICORTI – Trujillo en los días de la investigación.

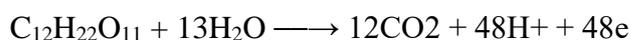
### 2.5.2. Muestra

Se tomó 10 litros de las aguas residuales crudas que llegan a la poza de oxidación Covicorti, antes del tratamiento, Trujillo, las cuales se tomaron de acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la calidad de los recursos Hídricos superficiales R.J. N.º 010-2016-ANA.

### 2.5.3. Procedimiento

Microbial fuel cell fue una celda de dos compartimientos donde los microorganismos degradaron la materia orgánica como glucosa, materia orgánica presente en las aguas

residuales, liberando electrones y protones convirtiendo la energía química de los enlaces mediante la oxidación de los átomos de carbono en energía eléctrica. Microbial fuel cell estuvo constituida por dos cámaras con electrodos, en una cámara estará el ánodo y el cátodo en la otra cámara, separada por la membrana selectiva de protones (Fig.3). En condiciones anaeróbicas la oxidación la materia orgánica va a producir CO<sub>2</sub>, donde el oxígeno lo toma del agua, liberando protones H<sup>+</sup> y electrones e<sup>-</sup>, los protones atraviesan la membrana selectiva hacia la cámara aeróbica donde consume el oxígeno disuelto convirtiéndose en moléculas de agua. Por ello se mantuvo condiciones anaeróbicas en el cátodo para generar electrón:



Los electrones producidos se trasladaron hacia el ánodo donde se mantuvo condiciones aeróbicas mediante la adición de flujo másico de oxígeno. La transferencia, se realizó mediante los citocromos C que se encuentran en la membrana celular externa utilizando mediadores. Los transportadores de electrones compuestos con propiedades de reducirse y oxidarse actuaron como mediadores entre la membrana celular y el ánodo. Estos electrones fueron excretados como producto del metabolismo de los microorganismos. Los electrones fueron transportados hacia el electrodo positivo, el cátodo, allí se encontraron con un aceptor de electrones, el oxígeno. Se produjo una reacción en el cátodo, en donde el oxígeno es reducido, reaccionando con los protones que llegan del compartimiento anódico mediante la membrana semipermeable, formando una molécula de agua.

### **Partes constituyentes de las celdas de combustible microbiano: ánodos, cátodos y membranas**

#### Electrodo positivo - Ánodo

El material del electrodo positivo está constituido por conductores, compatibles con los microorganismos, estables químicamente en el medio donde se encuentran. La estructura metálica utilizada para fijar al ánodo es consistente y no susceptible a la corrosión en el medio de operación. Un claro ejemplo, se podría utilizar un acero inoxidable, grafito, el cobre no es recomendable porque el ion cobre en la solución, resulta tóxicos para los microorganismos. La presencia de cobre, zinc u otros componentes en la celda producen una reacción electroquímica no deseada que enmascara a las reacciones de degradación microbiana que son de nuestro interés en el presente estudio, considerándose como un factor interviniente. Se recomienda usar electrodos de grafito, disponible en el mercado

internacional distribuidas por diferentes empresas, tales como, E\_TEK y Electrosynthesis Co. Inc.(USA), GEE Graphite Limited, Dewsbury (Reino Unido), Morgan, Grimbergen (Bélgica), y Alfa-Aesar (Alemania).

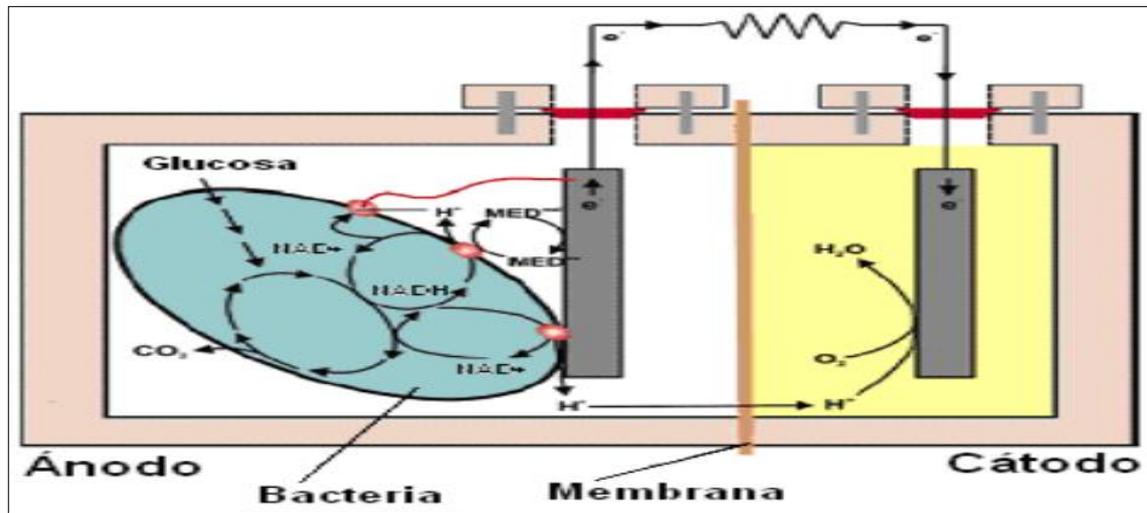


Figura 5. Principio de funcionamiento de una MFC Tomada Energía: celdas de combustible microbianas Góngora et al (2017)

Algunos tipos de materiales utilizados: Electrodo negativo - Cátodo

El O (oxígeno) es el aceptor de electrones más apropiado para una celda de combustible microbiano, la oxidación del O es alto, su disponibilidad, no tiene ningún costo debido que está presente en el aire, son sostenibles y no contaminan como producto final es el agua que se va a formar. Es de suma importancia el material del electrodo negativo de esto depende el rendimiento de la celda. La utilización de carbono en el electrodo negativo presenta la cinética de reducción de oxígeno muy lenta, y se recomienda utilizarlos en sistemas donde la cinética anódica también sea lenta, de tal manera que esta disminución de oxígeno en el cátodo no sea limitante del sistema. Es recomendable utilizar catalizadores de platino para una mejor reducción del oxígeno, Los costos de la celda microbiano disminuye utilizando cátodos de platino del orden de 0,1 mg/cm<sup>2</sup>. Se han propuesto metal noble que utilizan hierro (II) piroclorinas, ftalocianina, pirolizado, porfirinas, peroskitas y espinelas como cátodos alternativos para celdas de combustible microbiano (Rabaey, 2005).

### Membrana de intercambio protónico

Gran fracción de las construcciones de las celdas de combustible microbiano presentan la separación por una membrana de intercambio protónico de Nafion® 115 o 117 (Dupont Co, USA) entre celdas del cátodo y el ánodo, las cuales se encuentran disponibles en el mercado.

La utilización de una membrana de intercambio protónico en una celda de combustible microbiano se debe considerar su permeabilidad a los compuestos químicos que se utilizan, como el *O*, la materia orgánica y iones que es utilizado como sustrato. La eficiencia de la celda combustible microbiana se evaluó por la producción de energía eléctrica. El control se llevó midiendo periódicamente el voltaje generado y el flujo másico de oxígeno añadido en las tres etapas de la investigación. A la celda microbiana en el cátodo se le agregó aire (oxígeno) mediante pequeñas bombas de pecera a tres flujos másicos diferentes de aire a la temperatura ambiente constante de 20°C y tiempo constante de 10 minutos por cada caudal adicionado al seno del líquido. La bomba de aire utilizada fue la AP-200, con un flujo másico de aire de 200 litros por hora. La cantidad de oxígeno disuelto inicial del agua del cátodo fue medida, el cual será considerado como blanco y luego se midieron los flujos másicos de oxígeno al inyectar aire a tres flujos másicos diferentes y por triplicado suministrado durante un tiempo constante de 10 minutos, anotando la variación de los voltajes obtenidos.

## **2.6. Técnica e instrumento de recolección de datos, validez y confiabilidad**

### **2.6.1. Técnica e instrumento de recolección de información**

La técnica será la observación y como instrumento se tendrá una ficha de recolección de datos.

## **2.7. Métodos de análisis de datos**

Los valores obtenidos se analizaron mediante la prueba de normalidad Shapiro Wild, el estadístico ANOVA, Tukey. (Ver anexo 2)

## **2.8. Aspectos éticos**

En el desarrollo de la investigación, se respetó a los autores de las fuentes consultadas, citándolas en las referencias.

La presente investigación se respetó: valores éticos, morales, religiosos y medioambientales.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Variación de voltaje

La presente investigación realizó 4 repeticiones por cada tratamiento, en la tabla 2. Indicando que al aumentar el flujo másico de oxígeno aumenta la generación de energía eléctrica.

La celda microbiana mostró los resultados ocasionados por el efecto de la oxigenación en la celda de combustible microbiano. La composición de la atmósfera terrestre es: nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón (0,9%), el dióxido de carbono (0,03%), distintas proporciones de vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, kriptón y xenón. La oxigenación de la celda microbiana se realizó utilizando bombas de pecera con un Flujo másico: 200 litros por hora (33,3 litros en 10 minutos)

La cantidad de oxígeno proporcionada fue de: Oxígeno (33,3 litros / 10 minutos) x 21% = 0,6993 litros/minuto

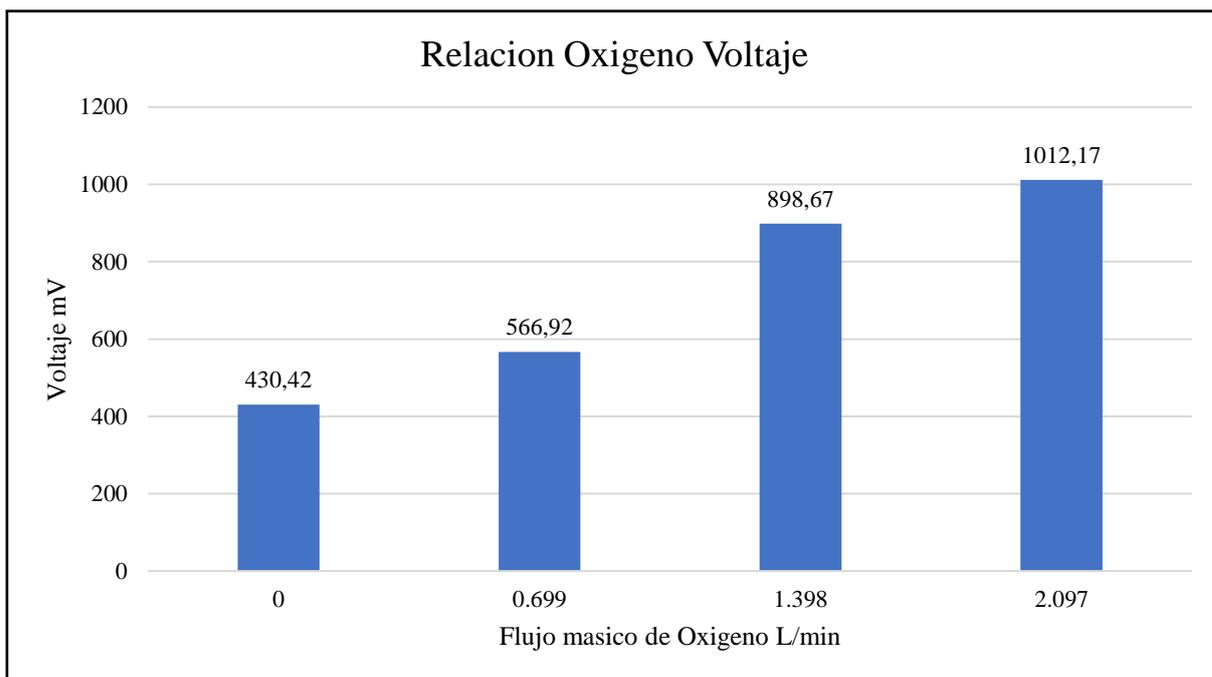
**Tabla 2.**

*Valores promedios del voltaje, flujo másico de oxígeno.*

Flujo Másico L/min	Promedios de repeticiones en celdas mV				Promedio Total	
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	mV	Joule
0	430,33	430,33	430,67	430,33	430,42	4,304
0,699	563,33	564,67	571,67	568,00	566,92	5,669
1,398	898,33	894,33	900,67	901,33	898,67	8,987
2,097	1012,33	1011,67	1013,00	1011,67	1012,17	10,122

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 se puede observar la variación del voltaje de la celda microbiana este voltaje aumenta en forma proporcional al aumento del flujo másico de oxígeno, incrementándose a medida que se adiciona oxígeno variando desde 430,42 mV hasta 1012,22 mV cuando el flujo másico se incrementa hasta 2,097 L/min.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6.** Interacción del flujo de oxígeno y voltaje con la cantidad de energía eléctrica.

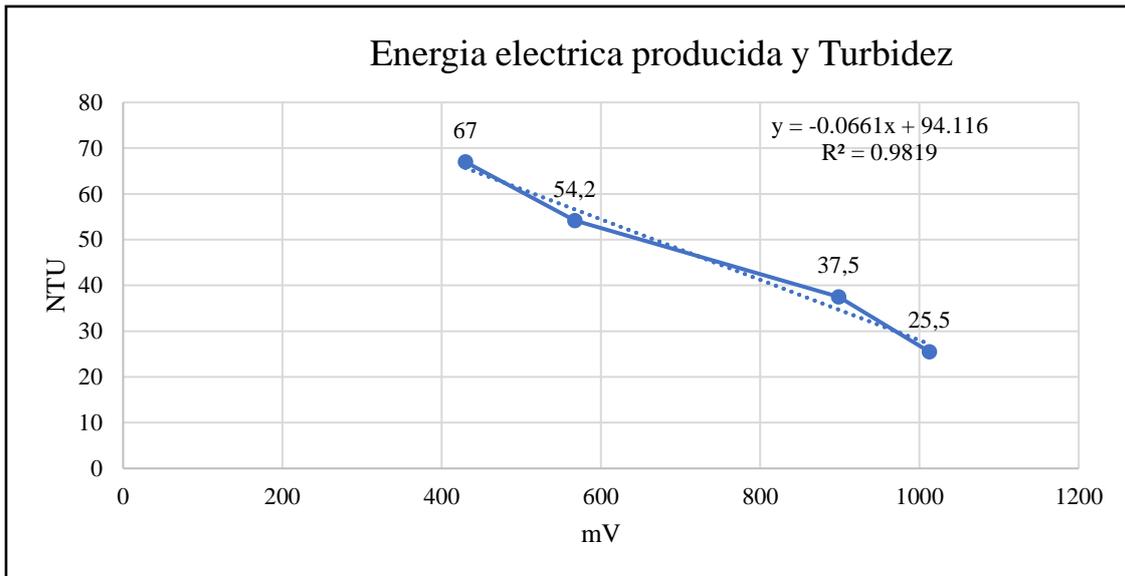
En la figura 6 se observar el efecto de la oxigenación en la generación de electricidad en la celda microbiana.

**Tabla 3.**

*Relación energía eléctrica producida y turbidez*

Flujo Másico L/min	Promedio mV	Turbidez NTU
0	430,42	67,0
0,699	566,92	54,2
1,398	898,67	37,5
2,097	1012,17	25,5

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Se observa que a medida que se produce electricidad la turbidez disminuye debido a la oxidación materia orgánica hasta  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

### 3.2. Análisis del mejor tratamiento

Tabla 4.

Subconjuntos homogéneos HSD Tukey<sup>a,b</sup>

	Flujo de Aire (L/min)	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
			1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a</sup>	0 (L/min)	4	430,42			
	0,699 (L/min)	4		566,92		
	1,398(L/min)	4			898,67	
	2,097 (L/min)	4				1012,17
	Sig.			1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

En la tabla 4, de subconjuntos homogéneos se muestra que los valores de voltaje obtenidos por cada nivel de la variable flujo de aire difieren significativamente; ya que cada uno se encuentra conformando un subconjunto que se diferencia de los demás. A su vez; se encuentran ordenados de menor a mayor; por lo que se sugiere que con el tratamiento con 2,097 (L/min) de flujo de aire suministrado al sistema se consigue el mayor voltaje 1012,17 mV) con un nivel de confianza del 95%.

#### IV. DISCUSIÓN

Se evaluó el efecto de la oxigenación en la generación de energía eléctrica en CCM con aguas residuales del PTAR Covicorti – Trujillo encontrándose que existe un efecto favorable en el incremento de energía eléctrica al adicionar oxígeno al cátodo, así con un flujo másico de 2,097 (L/min) se logra alcanzar un voltaje de 1012,17 mV; esto se demuestra estadísticamente en la Tabla 4, coincidiendo con los resultados de la investigación desarrollada por Llontop (2018), quien determinó que la demanda química de oxígeno influye en la cantidad de energía eléctrica producida en la celda de combustible microbiano, aceptándose de este modo la hipótesis alterna, H1: La oxigenación tiene efecto favorable en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti – Trujillo.

La construcción la celda combustible microbiana con aguas residuales del PTAR Covicorti estuvo constituida por celdas de 500 mL de capacidad cada una separada con fibra de Nafion® 115 (Dupont Co, USA) previamente sumergida en una solución de NaCl al 20% la cual actuó como puente salino, a las celdas se les adiciono agua residual (ánodo) y agua destilada (cátodo) en un volumen de 400 mL respectivamente y los electrodos estuvieron constituidos por placas de acero inoxidable de 10 cm por 10 cm, las cuales estuvieron conectadas a un multímetro para observar el paso de corriente en mV, coincidiendo con Dolly, *et al*, (2013) quienes afirman que las Celdas de Combustible Microbianas son una tecnología que promete como alternativa de generación de energía, degradación de materia orgánica y biorremediación, como se observa en la figura 7.

En la tabla 2 y figura 6. Que existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de energía eléctrica generada y el flujo másico de oxígeno, variando desde 430,42; 566,92; 898,67; 1012,17 mV, para flujos másicos de 0; 0,699; 1,398 y 2,097 L/min, respectivamente; coincidiendo con la investigación de Rago. (2017) en su trabajo, Influencias de la concentración de oxígeno disuelto en comunidades microbianas biocatólicas en celdas de combustible microbianas.

Con la adición de un flujo másico de oxígeno de 2,097 L/min se alcanzó un incremento en la generación de energía eléctrica del 135% respecto a la cantidad generada en condiciones normales por el blanco coincidiendo con las investigaciones de Huang *et al*. (2011), quienes concluyen que las celdas de combustible microbiano tienen la capacidad de utilizar oxígeno,

permitiendo la degradación y remoción de nutrientes, en consecuencia, la biorremediación y al mismo tiempo la generación de electricidad.

Se observó que la energía eléctrica disminuye a medida que la materia orgánica se consume y el agua se va volviendo más clara, disminuyendo su turbidez desde 67,00 hasta 25,5 NTU respectivamente (ver figura 7); coincidiendo con Buitrón y Pérez (2011) en su trabajo Análisis de Degradación del Sustrato en celdas Microbianas quien observó que se obtiene el máximo de voltaje al inicio y después una rápida disminución de materia, pasada esta etapa, la velocidad de remoción de materia orgánica disminuye, al igual que la generación de electricidad; así mismo coincide con Valencia (2018) en su trabajo, La influencia de la concentración de sustratos en aguas residuales del camal Azoguine, en la eficiencia de generación de energía eléctrica en una CCM, donde se determinó que a mayores concentraciones de sustratos, requiere mayor tiempo para que el voltaje se haga constante (17, 18 y 20 días), y por lo tanto esto influye en la generación de corriente y por ende en el rendimiento de la generación de energía eléctrica, obteniéndose como máximo la eficiencia coulombica para la concentraciones en demanda química de oxígeno de: 1980 mg/L, el 18,990%, en 2400 mg/L el 21,053% y 3200 mg/L el 22,066% de eficiencia coulombica. La eficiencia coulombica (Cc).

## V. CONCLUSIONES

La oxigenación tiene efecto la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti – Trujillo, aumentando a medida que aumenta el flujo másico de oxígeno, así lo demuestran los análisis estadísticos, tabla 3.

Las celdas de combustibles microbiano favorecen la generación de una energía “verde” aprovechamiento la degradación de materia orgánica por los microorganismos ambos contenidos en las aguas residuales de los PTAR, paralelamente se logra la depuración y reducción de materia orgánica.

Las celdas de combustible microbiano presentan significativas ventajas funcionales y operativas frente a las tecnologías utilizadas para generar energía y así como reducir la materia orgánica de las aguas residuales.

La generación de energía eléctrica por la degradación de materia orgánica de manera directa en la celda de combustible microbiano funciona de manera eficiente a temperatura ambiente generando un máximo de 1012,50 mV a un flujo másico de 2,097 L/min.

Las celdas de combustible microbiano no tienen valor energético residual los gases producidos mayoritariamente son CO<sub>2</sub> (de origen no fósil).

Esta tecnología de remediación de aguas residuales (digestión anaerobia), utilizando microorganismos producen menos cantidad de lodos reduciendo la cantidad de sedimentos que saturan a la PTAR.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda la utilización de celdas combustible microbiano en el tratamiento de aguas residuales de PTAR, reduciendo de esta manera la materia orgánica y generando electricidad.

Se recomienda continuar con la presente investigación y determinar los microorganismos que tenga citocromo C en el citoplasma externa y puedan ceder electrones al exterior, que presentan mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica.

Se recomienda estudiar el rendimiento de las celdas combustible microbiano utilizando diferentes puentes salinos.

## REFERENCIAS

- BEJARANO, N. y Escobar M. (2015) *Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de aguas residual*. (Tesis de grado). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- BEENISH A. and Zhongtang D. (2017). Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs). *Revista Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volumen 73, Page 75- 84.
- BOND, D.R., Holmes, D.E., Tender, L.M., and Lovley, D.R. (2002). Electrode-Reducing Microorganisms That Harvest Energy from Marine Sediments. *Science* 295, 483 –485.
- BOUDGHENE, A., and Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 295–304.
- BOYANO, M.; Carmena, M; López, P; Menor, C. (2019). Química y Biología Molecular II. Madrid. Universidad de Alcalá.
- BRETSCHEGER, O., J. B.; (2010) Osterstock, W. E.; Pinchak, S. Ishii y K. E. Nelson, Microbial fuel cells and microbial ecology: applications in ruminant health and production research, *Microbial Ecology*: 59 (3), 415-427.
- BUITRÓN G. y Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 14, núm. 1, pp. 5-11
- COLLACCI, Á. (2018). Clima de cambios. Recuperado de: <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/la-situacion-de-las-aguas-residuales-en-lima/>.
- CHAUDHURI, S.K., and Lovley, D.R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nat. Biotechnol.* 21, 1229–1232.
- DU, Z., Li, H., and Gu, T. (2007). A state-of-the-art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances* 25, 464–482.

- DUTTA, P., Rabaey, K., Yuan, Z., and Keller, J. (2008). Spontaneous electrochemical removal of aqueous sulfide. *Water Research* 42, 4965–4975.
- FRANKS, A.E., and Nevin, K.P. (2010). Microbial Fuel Cells, A Current Review. *Energies* 3, 899–919.
- GÓNGORA A. C.; Ochoa, J.; Sosa M. E.; Vázquez E. (2017). Energía: celdas de combustible microbianas. Ingeniería, *Revista Académica de la FI-UADY*, 21-1, pp. 54-62, ISSN 1665-529-X.
- GUDE, G. V. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells an overview. *Journal of cleaner production*. 122.287-307.
- HEIJNE, A., Hamelers, H.V.M., and Buisman, C.J.N. (2007). Microbial Fuel Cell Operation with Continuous Biological Ferrous Iron Oxidation of the Catholyte. *Environ. Sci. Technol.* 41, 4130–4134.
- HUANG L., J. M. Regan y X. Quan (2011), Electron transfer mechanism, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells, *Bioresource Technology*: 102 (1), 316-323.
- JIANJUN HU, Quanguo Zhang, Duu-jong Lee and Huu Hao Ngo (2017). Feasible use of microbial fuel cells for the treatment of contamination.of National Taiwan University of Science and Technology. *Energía Renovable* , Elsevier, vol. 129 (PB), page 824-829.
- JUNG, S., and Regan, J.M. (2007). Comparison of anode bacterial communities and performance in microbial fuel cells with different electron donors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 77, 393–402.
- KELLER, J., and Rabaey, K. (2008). *Experiences from MFC pilot plant operation (Penn State University, USA)*. London. IWA Publishing.
- KIM, H.J., Park, H.S., Hyun, M.S., Chang, I.S., Kim, M., and Kim, B.H. (2002). A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology* 30, 145–152.
- LLONTOP, E. (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 de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- LOGAN, B.E., and Regan, J.M. (2006). Microbial fuel cells--challenges and applications. *Environ. Sci. Technol.* 40, 5172–5180.
  - LOGAN, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstraete, W. and Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology”. *Environmental Science and Technology*, 40, 5181-5192.
  - LOVLEY, D.R. (2008). The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19, 564–571.
  - Maia Tatinclaux a Kyla Gregoire a Aaron Leininger and Justin C. Biffinger b Leonard Tender c, Mark Ramirez d Alba Torrents a Birthe V. Kjellerup.(2018). Electricity generation from wastewater using a floating air cathode microbial fuel cell. of Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, MD, United States b Chemistry Department, University of Dayton, Dayton, OH 45469, United States.
  - MEDINA, S. (2017). *Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio.* (Tesis de grado). Fundación Universidad de America, Bogota.
  - MIN, B., and Logan, B. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.* 38, 5809–5814.
  - MILLER, L.G., and Oremland, R.S. (2008). Electricity generation by anaerobic bacteria and anoxic sediments from hypersaline soda lakes. *Extremophiles* 12, 837–848.
  - MOHN, E. (2017) Bioelectrogenesis (Bioelectricity). Salem Press: Enciclopedia de ciencias.

- OH, S., B. Min, B. E. Logan (2004), Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells, *Environmental Science Technology*: 38 (18), 4900-4904.
- RABAEY, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., and Verstraete, W. (2005). Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 8077–8082.
- RABAEY, K.; Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnology*, 23, 291-298.
- RAGO, L.; Cristiani, P.; Villa F.; Zecchin, S.; Colombo, A.; Cavalca, L. y Schievano, A. (2017). Influencias de la concentración de oxígeno disuelto en comunidades microbianas biocatódicas en celdas de combustible microbianas. *Bioelectroquímica* 116: 39-51
- REVELO, D; Hurtado, N.; Ruiz, J. y López, S. (2015). Uso de Microorganismos Nativos en la Remoción Simultánea de Materia Orgánica y Cr (VI) en una Celda de Combustible Microbiana de Biocátodo (CCM), Universidad de Nariño, Vol. 26(6), 77-88 doi: 10.4067/S0718-07642015000600010
- SAMAYOA, L. (2016). *Tratamiento de Agua Residual Municipal en una Celda de Combustible Microbiana con Compósitos de Espuma de Poliuretano, Grafito y Polipirrol*. (Tesis de grado) Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.
- SCOTT, K., Cotlarciuc, I., Hall, D., Lakeman, J.B., and Browning, D. (2008). Power from marine sediment fuel cells: the influence of anode material. *Journal of Applied Electrochemistry* 38, 1313–1319.
- SMIDA, H.; Flinois, T.; Lebeque, E.; Lagrost, C. and Barriere, F. (2018). Microbial Fuel Cellsd Wastewater Utilization,of University of Rennes 1, of France.
- US DoE (2009). FCT Fuel Cells: Fuel Cells for Transportation.
- VALENCIA M. (2018). *Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de Camal*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Altiplano, Puno.

- XIAO, L., Fang, Z., Qiu, G., and Liu, J. (2007). Electro-generative mechanism for simultaneous leaching of pyrite and MnO<sub>2</sub> in presence of *A. ferrooxidans*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 17, 1373–1378.
- XIA, T., Zhang, x., Wang, H., Zhang, and., Gao, y., bian, C., Wang, X. (2019). Power generation and microbial community analysis in microbial fuel cells: A promising system to treat organic acid fermentation wastewater. *Of Bioresource Technology, of China* 31,570-103.
- YIZHONG C.y Hongwei L. (2018) *Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment*. North China Electric Power University,
- ZUO, Y., Xing, D., Regan, J.M., and Logan, B.E. (2008). Isolation of the exoelectrogenic bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by using a U-tube microbial fuel cell. *Appl. Environ. Microbiol.* 74, 3130–3137.

**ANEXOS**

**Anexo 1: Instrumentos.**

**Tabla A1: Instrumento de recolección de datos.**

<b>Datos generales</b>	<b>Universidad Cesar Vallejo</b>		<b>Ingeniería Ambiental</b>							
Título del proyecto de investigación	“Efecto del oxígeno en la generación de energía eléctrica en celdas microbianas con aguas residuales del PTAR Covicorti”									
<b>Investigadores</b>	Bocanegra Gahona, Alejandro Cesar Cotera Torrealva, Clesi Estefany									
<b>Instrucciones</b>	Llenar en los espacios vacíos los datos correspondientes de acuerdo al ítem.									
	<b>Mediciones</b>		<b>Fecha:</b> 15/11/2019		<b>Lugar:</b> Laboratorio de Química E-403 UCV					
<b>Resultados:</b>	<b>Flujo O<sub>2</sub></b> L/min	<b>Promedio por tratamiento (mV)</b>								<b>Promedio Total (mV)</b>
	0	432	430,33	432	430,33	434	430,67	429	430,33	430,42
		428		430		431		430		
		431		429		427		432		
	0,699	563	563,33	564	564,67	575	571,67	571	568,00	566,92
		565		567		568		569		
		562		563		572		564		
	1,398	901	898,33	889	894,33	903	900,67	899	901,33	898,67
		895		896		901		902		
		899		898		898		903		
2,097	1017	1012,33	1008	1011,67	1017	1013,00	1012	1011,67	1012,17	
	1011		1012		1013		1014			
	1009		1015		1009		1009			
	Observaciones: La energía producida después de unos minutos disminuye, esto se asume se debe al consumo y disminución de materia orgánica									

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 2: Valores promedios del voltaje

**Tabla A2.**

*Valores promedios del voltaje, flujo másico de oxígeno.*

Flujo Másico L/min	Promedios de repeticiones en celdas mV				Promedio Total	
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	mV	Joule
<b>0</b>	430,33	430,33	430,67	430,33	<b>430,42</b>	<b>4,304</b>
<b>0,699</b>	563,33	564,67	571,67	568,00	<b>566,92</b>	<b>5,669</b>
<b>1,398</b>	898,33	894,33	900,67	901,33	<b>898,67</b>	<b>8,987</b>
<b>2,097</b>	1012,33	1011,67	1013,00	1011,67	<b>1012,17</b>	<b>10,122</b>

**Tabla A3.**

*Valores promedios del voltaje, flujo másico de oxígeno, turbidez en NTU.*

Flujo Másico L/min	Promedios de repeticiones en celdas mV					Turbidez
	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Promedio de Total mV	NTU
<b>0</b>	430,33	430,33	430,67	430,33	<b>430,42</b>	<b>67,0</b>
<b>0,699</b>	563,33	564,67	571,67	568,00	<b>566,92</b>	<b>54,2</b>
<b>1,398</b>	898,33	894,33	900,67	901,33	<b>898,67</b>	<b>37,5</b>
<b>2,097</b>	1012,33	1011,67	1013,00	1011,67	<b>1012,17</b>	<b>25,5</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A4.**

**Valores promedios del voltaje, turbidez en NTU.**

<b>Flujo Másico L/min</b>	<b>Promedio mV</b>	<b>Turbidez NTU</b>	
<b>0</b>	<b>430,42</b>	<b>67</b>	<b>67,0</b>
		<b>66</b>	
		<b>68</b>	
		<b>67</b>	
<b>0,699</b>	<b>566,92</b>	<b>53.2</b>	<b>54,2</b>
		<b>55</b>	
		<b>54.4</b>	
		<b>54.2</b>	
<b>1,398</b>	<b>898,67</b>	<b>38</b>	<b>37,5</b>
		<b>37.5</b>	
		<b>38.3</b>	
		<b>36.2</b>	
<b>2,097</b>	<b>1012,17</b>	<b>25.6</b>	<b>25,5</b>
		<b>25.2</b>	
		<b>25.7</b>	
		<b>25.5</b>	

Fuente: Elaboración propia

### Anexo 3: Resultados análisis estadísticos

**Tabla A5.**

***Prueba de normalidad***

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Flujo de Aire (L/min)	0,167	16	0,200*

En la tabla A5 de prueba de normalidad aplicado a los datos de escala o cuantitativos se aprecia que el valor  $p > 0.05$ ; por lo cual se asume el supuesto de que el conjunto de datos sigue una distribución normal.

**Tabla A6.**

***Homogeneidad de varianzas Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error<sup>a</sup>***

Voltage (mV)			
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
7,626	3	12	0,054

En la tabla A6 se observa que el P valor (sig.) resultante de la prueba de Levene fue mayor que el nivel de significancia (0.05), por lo que se asume que los resultados fueron obtenidos sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales.

Cumplidos los pre requisitos para aplicar pruebas paramétricas; se procede a realizar el análisis de varianza (ANOVA).

**Tabla A7.****ANOVA de un factor Voltage (mV)**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	899200,500	3	299733,500	64807,243	0,000
Dentro de grupos	55,500	12	4,625		
Total	899256,000	15			

En la tabla A7 de análisis de varianza se evalúa si las medias de los parámetros evaluados difieren significativamente con un valor de ( $p < 0.05$ ); encontrándose un valor de 0.00; por lo que se asume que en al menos dos de los 4 tratamientos las medias son diferentes. Habiendo encontrado diferencia significativa en la prueba de ANOVA; se procede aplicar las pruebas post hoc a fin de determinar entre que grupos las medias son diferentes.

**Tabla A8.****Comparaciones múltiples de TUKEY**

Variable dependiente: Voltage (mV)

	(I) Flujo de Aire (L/min)	(J) Flujo de Aire (L/min)	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
HSD	0 (L/min)	0,699 (L/min)	-136,5000*	1,52069	,000	-142,0148	-132,9852
Tukey		1,398(L/min)	-468,25000*	1,52069	,000	-473,2648	-464,2352
		2,097 (L/min)	-581,75000*	1,52069	,000	-587,2648	-578,2352
	0,699 (L/min)	0 (L/min)	136,50000*	1,52069	,000	132,9852	142,0148
		1,398(L/min)	-331,75000*	1,52069	,000	-335,7648	-326,7352
		2,097 (L/min)	-445,25000*	1,52069	,000	-449,7648	-440,7352
	1,398(L/min)	0 (L/min)	468,25000*	1,52069	,000	464,2352	473,2648
		0,699 (L/min)	331,75000*	1,52069	,000	326,7352	335,7648
		2,097 (L/min)	-113,50000*	1,52069	,000	-118,5148	-109,4852
	2,097 (L/min)	0 (L/min)	581,75000*	1,52069	,000	578,2352	587,2648
		0,699 (L/min)	445,25000*	1,52069	,000	440,7352	449,7648
		1,398(L/min)	113,50000*	1,52069	,000	109,4852	118,5148

\* La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

La tabla A8 muestra la comparación de un flujo de aire con un respectivo voltaje si van a diferenciarse con otro flujo de aire con su respectivo voltaje, identificando si uno de este flujo difiere mucho de otros flujos de aire. Como se observa que el flujo de aire de 2,097 del voltaje obtenido tiene una diferencia de 581.75 de voltaje a un flujo de aire 0 con un voltaje de 430.42.

## SUBCONJUNTOS HOMOGÉNEOS

**Tabla A9.** *Subconjuntos homogéneos HSD Tukey<sup>a,b</sup>*

		Voltage (mV)				
		Subconjunto para alfa = 0.05				
	Flujo de Aire (L/min)	N	1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a</sup>	0 (L/min)	4	430,42			
	0,699 (L/min)	4		566,92		
	1,398(L/min)	4			898,67	
	2,097 (L/min)	4				1012,17
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

En la tabla A9 de subconjuntos homogéneos se muestra que los valores de voltaje obtenidos por cada nivel de la variable flujo de aire difieren significativamente; ya que cada uno se encuentra conformando un subconjunto que se diferencia de los demás. A su vez; se encuentran ordenados de menor a mayor; por lo que se sugiere que con el tratamiento con 2,097 (L/min) de flujo de aire suministrado al sistema se consigue el mayor voltaje 1012,17 mV) con un nivel de confianza del 95%.

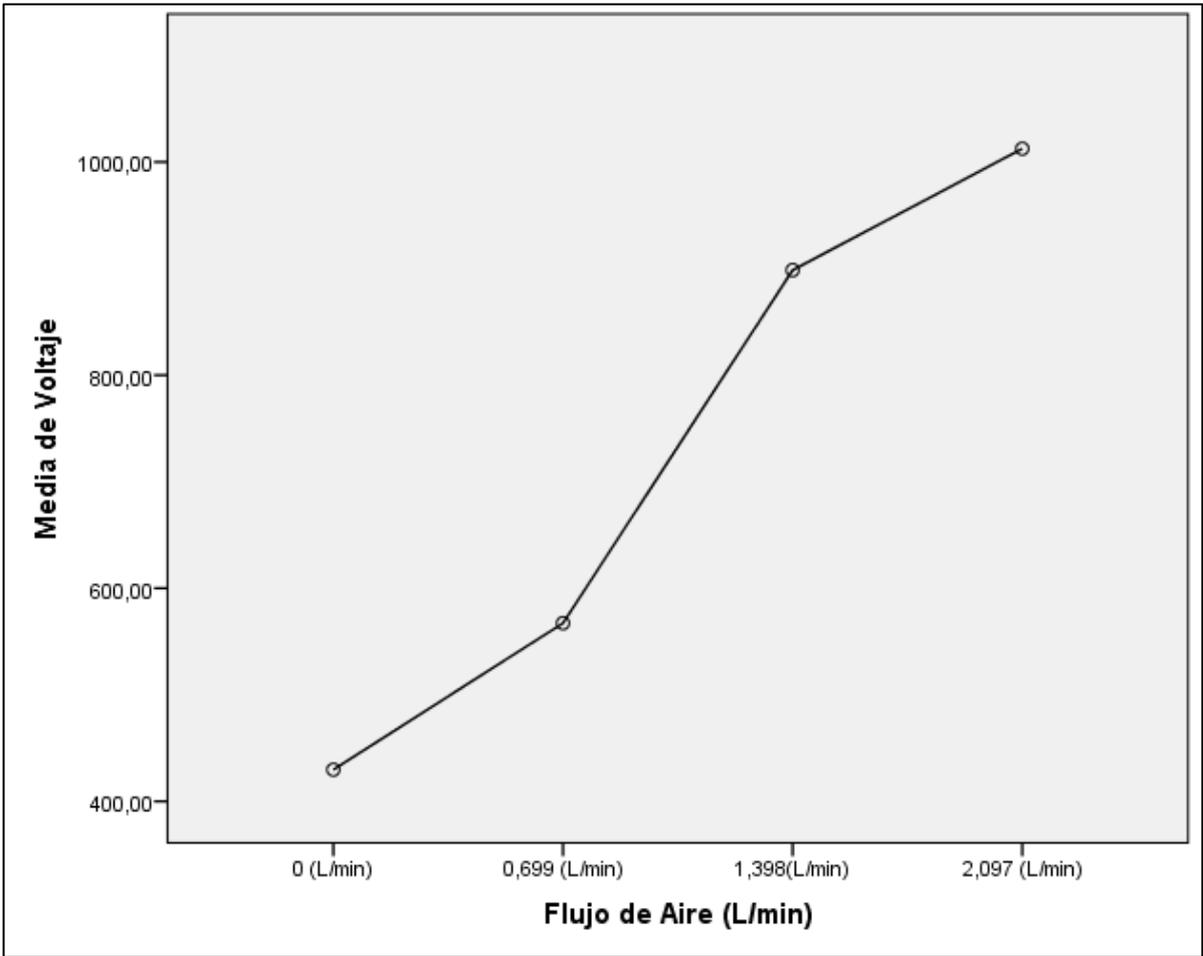


Figura A1. Medias Voltaje vs Flujo de aire

**Anexo 4: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana a diferente oxígeno.**



Figura A2: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana agregando 0 veces el oxígeno.



Figura A3: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana agregando 0,699 (L/min) de oxígeno.

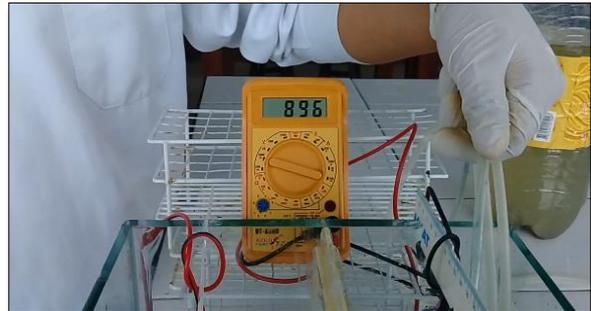
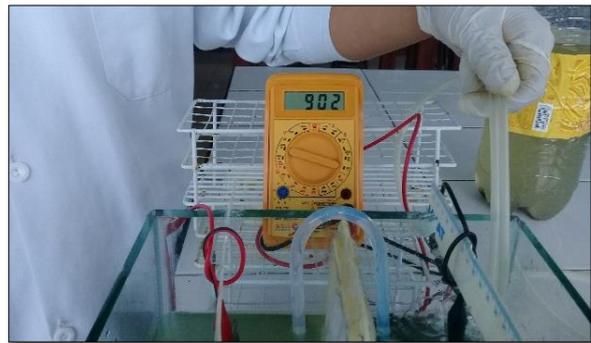


Figura A4: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana agregando 1,398 (L/min) de oxígeno.

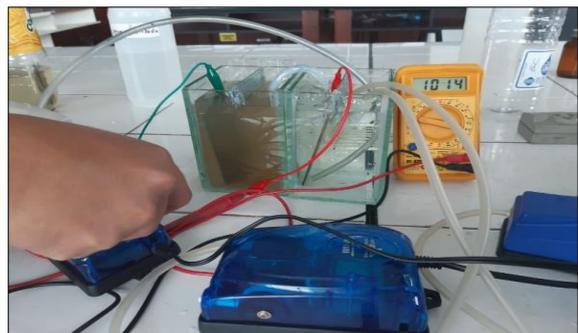
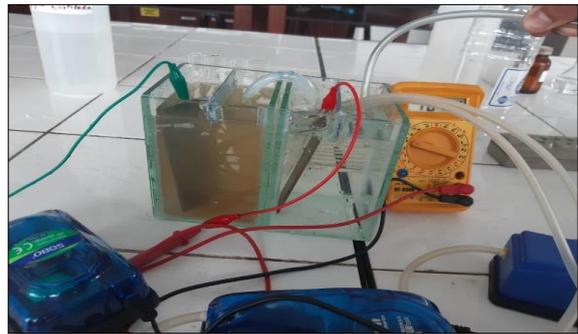


Figura A5: Medición de MiliVoltios en la celda microbiana agregando 2,097 (L/min) de oxígeno.



Figura A6: Medición de la turbidez de la celda microbiana.

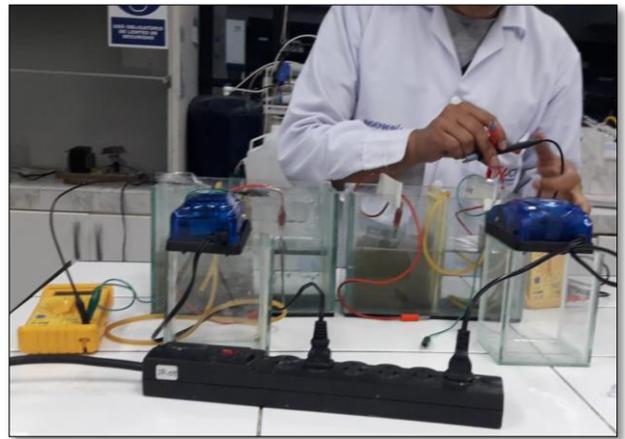


Figura A7: Medición de MiliVoltios en dos celdas microbianas.

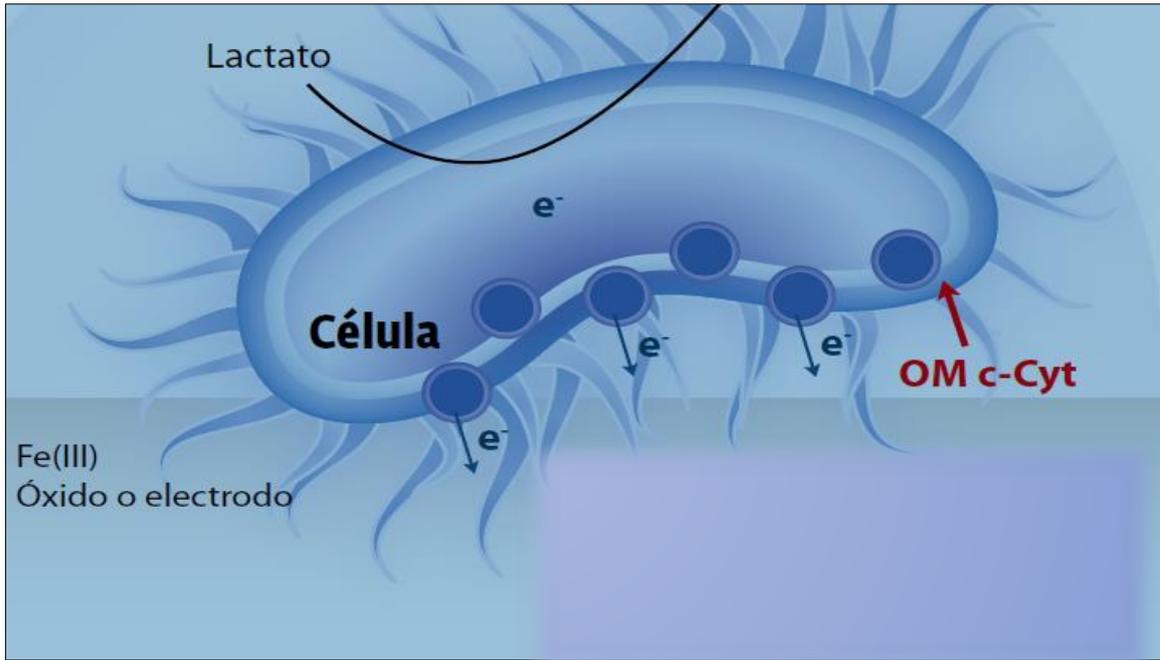


Figura A8: Transferencia de electrones al exterior del microorganismo. Tomado La plurifuncionalidad de las bacterias electrogénicas - Guillermo Andrés Hernández

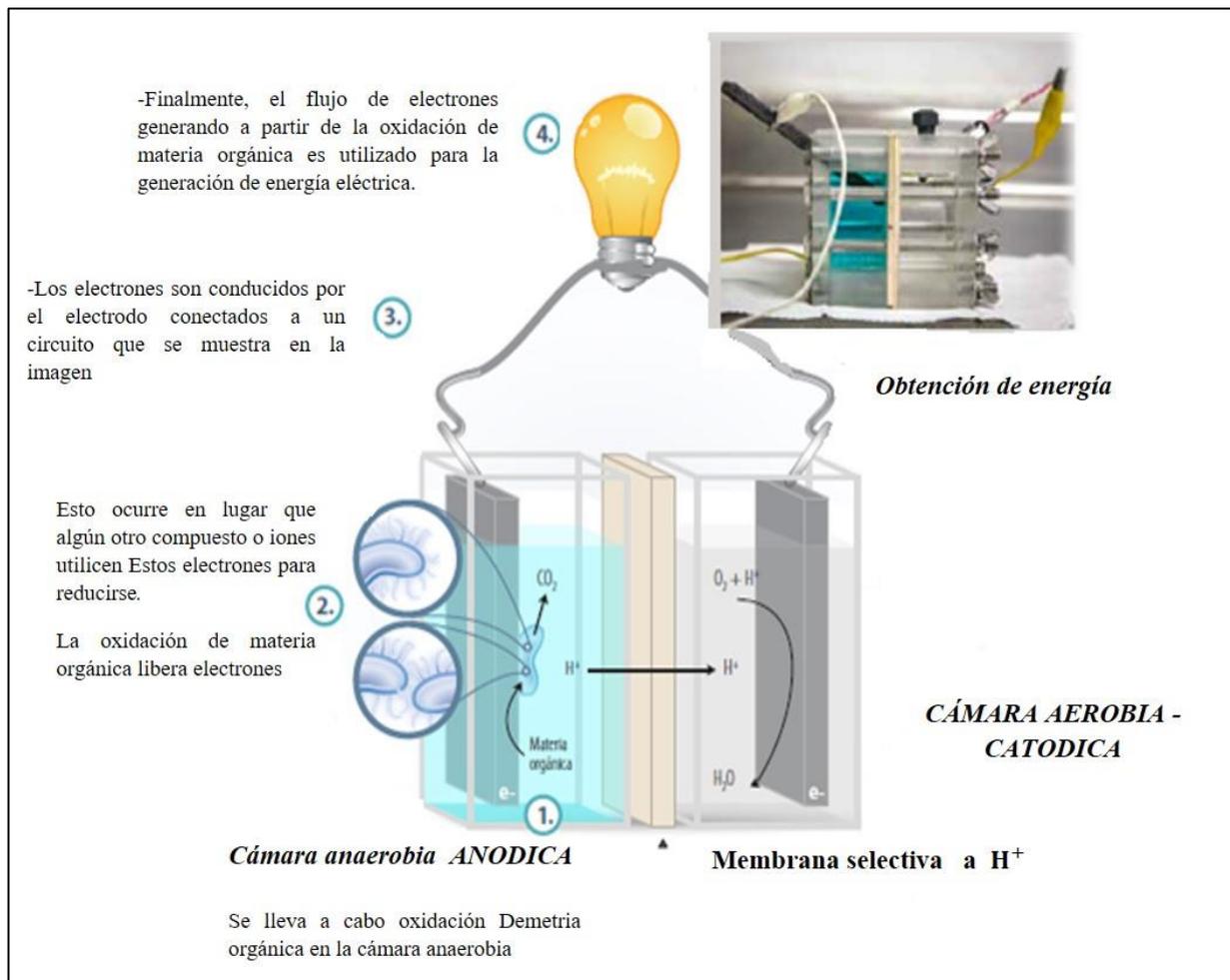


Figura A9: Producción de electricidad por la degradación de materia orgánica por los microorganismos. Tomado. La plurifuncionalidad de las bacterias electro génicas - Guillermo Andrés Hernández Gómez