

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE AGUAS  
RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CACAO MEDIANTE CELDAS DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANA**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**ROLANDO REYES HUAMÁN**

**2023**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Tingo María – Perú

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°063-2022-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de agosto de 2022 a horas 11:40 a. m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

**“GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CACAO MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA”**

Presentado por el Bachiller: **REYES HUAMÁN, Rolando**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENO**”

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 01 de diciembre de 2022

Ing. M.Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**  
PRESIDENTE

Dr. **LUIS EDUARDO ORE CIERTO**  
MIEMBRO

Ing. M.Sc. **LAUREANO A. ZAVALA DE LA CRUZ**

MIEMBRO

Ing. M.Sc. **JOSE LUIS PAREDES SALAZAR**  
ASESOR



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL**  
(RIDUNAS)

Correo: [repositorio@unas.edu.pe](mailto:repositorio@unas.edu.pe)



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

**CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 017 - 2023 - CS-RIDUNAS**

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

**CERTIFICA QUE:**

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CACAO MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA	ROLANDO REYES HUAMÁN	<b>12%</b> <b>Doce</b>

Tingo María, 27 de enero de 2023

  
**Mg. Ing. García Villegas, Christian**  
Coordinador del Repositorio Institucional  
Digital (RIDUNAS)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE AGUAS  
RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CACA O MEDIANTE CELDAS DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANA**

Autor : REYES HUAMÁN, Rolando

Asesor de Tesis : Ing. M.Sc. PAREDES SALAZAR, José Luis

Programa de Investigación : Generación y aprovechamiento de energías alternativas

Línea(s) de Investigación : Ciencia y tecnologías ambientales

Eje temático de Investigación : Generación de energía

Lugar de ejecución : Laboratorio de Calidad del Agua – UNAS

Duración : 6 meses

Financiamiento : S/. 3,260.00 ((Tres mil doscientos sesenta soles)

Recursos propios : Si

FEDU : No

Otros : No

Tingo María – Perú. 2022

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme guiado y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante.

A mis dos grandes madres Nocilia y Marcelina, por su comprensión y su apoyo incondicional que siempre me ha ofrecido.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que compartieron sus conocimientos.

A mi tía Sara y a mi hermano Roberto por el apoyo incondicional me ha permitido llegar a cumplir un sueño hecho realidad, gracias el ejemplo de esfuerzo y perseverancia de no temer las adversidades.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la facultad de Recursos Naturales Renovables-Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, que contribuyó en mi formación profesional.

A mi asesor de tesis el Ing. M.Sc. Paredes Salazar, José Luis; docente de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por su orientación profesional, valiosas sugerencias, en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A miembros del jurado de tesis: Ing. M.Sc. Franklin Dionisio Montalvo, Ing. M.Sc. Laureano Zavaleta de la Cruz, Dr. Oré Cierro, Luis Eduardo. Por su apoyo, comprensión y sugerencias.

Al señor gerente general CAICAH Jorge Gonzales Simón Ccollana. Por la facilidad para la extracción de muestras de mucilago de cacao para la ejecución de tesis.

A mis amigos de la universidad por su compañerismo y amistad cultivada a lo largo de estos años y a todo ese momento inolvidable que perduraran siempre en mi memoria.

Por último, a todos mis amigos que de una u otra forma colaboraron en el presente estudio y a las personas que siempre confiaron en mí, por siempre gracias.

## ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Antecedentes Internacionales .....	3
2.2. Antecedentes Nacionales .....	5
2.3. Antecedentes locales .....	8
2.4. Caracterización del agua residual.....	8
2.5. Aspectos generales .....	9
2.5.1. Electroodos .....	9
2.5.2. Cobre.....	13
2.5.3. Placas de zinc .....	13
2.6. Tratamiento de aguas residuales industriales .....	14
2.6.1. Tratamiento biológico de aguas residuales industriales.....	15
2.6.2. Reacciones biológicas .....	15
2.6.3. Microorganismos como fuente de energía.....	17
2.6.4. Crecimiento de bacterias .....	19
2.7. Celda de combustible microbiana .....	21
2.7.1. Tipos de celdas de combustibles biológicos .....	23
2.7.2. Estructura de una celda microbiana.....	24
2.7.3. Puente salino .....	28

2.8. Materiales usados como electrodos en celdas de combustible microbiana.....	29
2.8.1. Sustrato.....	31
2.9. Remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana.....	33
2.10. Residuos líquidos de la industria de cacao (mucílago de cacao) .....	36
2.10.1. Composición química del mucílago del cacao .....	36
2.10.2. Agua residual durante la fermentación del mucilago .....	39
2.11. Propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales industriales .....	39
2.11.1. Temperatura (T°).....	39
2.11.2. Potencial de hidrógeno (pH) .....	39
2.11.3. Sólidos totales disueltos (STD) .....	39
2.11.4. Oxígeno disuelto (OD).....	39
2.11.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	40
2.11.6. Demanda química de oxígeno (DQO) .....	40
2.11.7. Carbono orgánico total (COT).....	40
2.11.8. Materia orgánica .....	40
III. MATERIALES Y METODOS.....	37
3.1. Descripción de área de trabajo.....	37
3.1.1. Lugar de ejecución del proyecto .....	37
3.1.2. Ubicación geográfica .....	37
3.1.3. Características ambientales .....	37

3.2. Materiales y equipos .....	37
3.2.1. Materiales.....	37
3.2.2. Reactivos .....	38
3.2.3. Equipos.....	38
3.2.4. Software.....	38
3.3. Metodología.....	38
3.3.1. Diseño del equipo.....	38
3.4. Análisis estadístico .....	46
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
4.1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de una industria de cacao .....	48
4.2. Cuantificar el oxígeno disuelto necesario para generar energía eléctrica.....	49
4.3. Determinar el potencial eléctrico en función a la tasa de remoción de la materia orgánica. ....	51
4.4. Consumo de oxígeno disuelto en la cámara aeróbica en el tiempo de operación .....	54
V. CONCLUSIONES .....	57
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	57
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	58
VIII. ANEXOS .....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
1. Materiales usados como ánodo y cátodo (CCMs) .....	30
2. Sustratos utilizados en celdas de combustible microbiana .....	32
3. Compasión química del mucilago del cacao .....	38
4. Diluciones recomendadas para valores esperados .....	40
5. Materia orgánica común en agua residual industrial.....	41
6. Parámetros por evaluar relacionados con la celda de combustible .....	40
7. Concentración de oxígeno disuelto en cada uno de los tratamientos.....	45
8. Análisis de variancia (ANVA). .....	46
9. Caracterización del agua residual o sustancia mucilaginosas del cacao y presencia del oxígeno en la celda aeróbica .....	48
10. Energía obtenida en distintos tiempos de operación del sistema bajo condiciones del oxígeno disuelto. ....	50
11. Producción de energía eléctrica a través de la remoción de materia orgánica en distintos tiempos de operación. ....	51
12. Descripción de los resultados .....	55
13. Prueba de tukey para la comparación del potencial eléctrico. ....	56
14. Determinacion de parametros en la generacion de energia electrica .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Reacciones biológicas fundamentales .....	16
2. Reacciones biológicas comunes .....	18
3. Curva de crecimiento bacteriano .....	20
4. Esquema de una celda de combustible. ....	22
5. Celda de combustible microbiano .....	25
6. Vías de transferencia de electrones.....	27
7. Vista de transporte de electrones .....	28
8. Remoción de materia orgánica y carbono orgánico total en función al pH .....	35
9. Diseño experimental en celdas de combustible microbiana.....	39
10. Flujo de operación en dos celdas, o doble cámara. ....	40
11. Estructura de una celda de combustible microbiana .....	43
12. Diagrama de flujo para la operación. ....	45
13. Remoción de la materia orgánica vs el potencial eléctrico .....	52
14. Demanda biológica de oxígeno removida en función a la energía producida .....	53
15. Comportamiento del oxígeno disuelto en la cámara aeróbica en función al tiempo ..	54
16. Sólidos totales disueltos en el tiempo de operación .....	67
17. Temperatura en función al tiempo .....	68
18. Correlación entre los valores observados del potencial eléctrico .....	68
19. Correlación entre los valores observados del oxígeno disuelto .....	68
20. Materiales usados como electrodos .....	69
21. Armado de prototipos para las celdas microbianas.....	69
22. Recolección de muestras de la cooperativa .....	70
23. Evaluación del potencial eléctrico .....	70
24. Evaluación de del potencial eléctrico .....	71
25. Evaluación de parámetros químicos.....	71
26. Evaluación de parámetros químicos.....	72
27. Imagen de las celdas en el laboratorio de calidad del agua .....	72

## RESUMEN

El vertimiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica contamina las fuentes naturales. La industria de cacao, durante su proceso de transformación genera aguas residuales con esta característica, donde gran parte de la materia orgánica proviene del mucílago de cacao. Esta investigación busca encontrar una alternativa de solución a la contaminación ambiental, utilizando esta agua para generar corriente eléctrica mediante celdas de combustible microbiana. Se utilizó el agua residual proveniente de la etapa de desmucilaginado del cacao fue colectada en la Cooperativa Agroindustrial Alto Huallaga. Las muestras tuvieron un contenido de materia orgánica moderada y acida. La celda de combustible microbiana se construyó en el laboratorio utilizando botellas de polietileno de 2,5 L, tubos de PVC de media pulgada, papel filtro, agar-agar, electrodos de cobre y zinc. Para conseguir los objetivos se evaluaron tres tiempos de retención a 24, 48, 72 h. Las muestras se han sometido a un análisis, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con el fin de analizar la materia orgánica en la cámara anaeróbica. Seguidamente se midió el voltaje, así mismo el voltaje resultante en cada tratamiento. Los resultados de esta investigación demostraron el tratamiento uno (T1) se obtuvo mayor potencial eléctrico. Esta investigación demostró que es posible generar energía eléctrica, mediante procesos fotosintéticos en la cámara aeróbica.

**Palabras clave:** pila de combustible microbiana, electrodos, oxígeno disuelto, proceso fotosintético, aguas residuales, remoción biológica, energías renovables

## ABSTRACT

The discharge of wastewater with a high content of organic matter pollutes natural sources. The cocoa industry, during its transformation process, generates wastewater with this characteristic, where a large part of the organic matter comes from the cocoa mucilage. This research seeks to find an alternative solution to environmental pollution, using this water to generate electricity through microbial fuel cells. The residual water from the cocoa demucilage stage was collected at the Alto Huallaga Agroindustrial Cooperative. The samples had a moderate and acidic organic matter content. The microbial fuel cell was built in the laboratory using 2.5 L polyethylene bottles, half-inch PVC tubes, filter paper, agar-agar, copper and zinc electrodes. To achieve the objectives, three retention times were evaluated at 24, 48, and 72 h. The samples have been subjected to an analysis, biochemical oxygen demand (BOD) in order to analyze the organic matter in the anaerobic chamber. The voltage was then measured, as well as the resulting voltage in each treatment. The results of this research showed treatment one (T1) a higher electrical potential was obtained. This research showed that it is possible to generate electrical energy through photosynthetic processes in the aerobic chamber.

Keywords: microbial fuel cell, electrodes, dissolved oxygen, photosynthetic process, wastewater, biological removal, renewable energy

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua, de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Las celdas de combustible microbianas están consideradas dentro del campo de la bioelectricidad y constituye una tecnología alternativa, debido al uso de microorganismos para generar corriente eléctrica utilizando los residuos de aguas residuales o de materia orgánica. En diversas investigaciones realizadas, reportan altos porcentajes de remoción de materia orgánica mediante la obtención de corriente.

Las celdas microbianas son tecnologías que pueden aportar resolviendo los problemas emergentes por los residuos de las diferentes empresas agroindustriales que tienen presencia en gran magnitud de materia orgánica, por ende, las. La celda de combustible microbiana (CCM) es un sistema que utiliza materia orgánica con la inserción de microorganismos que transfieren electrones producidos como consecuencia de su actividad metabólica hacia un electrodo. La relación que guarda entre de remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica están directamente relacionadas en este tipo de sistemas que cumple funciones de remoción de materia orgánica y metales pesados además como fuente de generación de energía alternativa, para este proceso algunos investigadores usaron microorganismos específicos. En la actualidad existen diferentes tipos de tratamientos que permiten la materia orgánica de las aguas residuales que pueden verter en mares o ríos sin problemas medioambientales. Sin embargo, el tratamiento de aguas residuales aun presenta un problema debido a los costos, las tasas de degradación de contaminantes. En este trabajo de investigación se usó agua residual real de la agroindustria alto Huallaga, enfocado al uso de la sustancia mucilaginoso de la industria de cacao y su aprovechamiento como alternativa de biocombustible. Se ha empleado mecanismos remotos para la recolección del mucílago, considerando una fuente de generación de energía alternativa que no genera un costo elevado. Las muestras se extrajeron de la cooperativa agroindustrial alto Huallaga-Tingo María, posteriormente analizados en el laboratorio de calidad del agua para la caracterización de sus parámetros fisicoquímicos. Este trabajo de investigación ha desarrollado el diseño y la selección de materiales para las celdas de combustible microbianas. El mayor reto fue el manejo de oxígeno disuelto mediante procesos fotosintéticos en la cámara aeróbica siendo un eje fundamental para la generación de energía eléctrica.

Como consecuencia de la generación de energía fósil, el mundo experimenta diversos problemas ambientales, dentro de los cuales se podrían citar la contaminación atmosférica, la

contaminación de las cuencas hídricas, del suelo por descargas de aguas residuales y residuos peligrosos, etc.

Las celdas microbianas son tecnologías para generar energía eléctrica, como alternativa a la generación de otras energías renovables. Poseen una gran expectativa a su desarrollo, pues depende de la actividad microbiana y de un sustrato, obtenido de fuentes renovables de vertimientos de industrias que contengan materia orgánica. El oxígeno es indispensable en la cámara aeróbica, pues influye directamente en la obtención de energía. Este sistema se caracteriza por la remoción de materia orgánica en función de la generación de energía eléctrica y facilite alternativas de manejo en la cámara aeróbica oxigenando mediante procesos fotosintéticos. Ante la situación expuesta líneas arriba, se plantea la siguiente incógnita ¿Es posible generar energía eléctrica en una celda de combustible microbiana con agua residual de la industria de cacao, con una celda aeróbica que tiene oxigenación natural mediante los procesos fotosintéticos? Teniendo como hipótesis que, si es posible generar energía eléctrica mediante celdas de combustible microbiana, con una celda aeróbica que tiene oxigenación natural mediante procesos fotosintéticos.

### **1.1. Objetivo general**

Generar energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao con oxigenación natural de la celda aeróbica en una celda de combustible microbiana

#### **Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de una industria de cacao mediante la medición de pH, DBO<sub>5</sub> y OD.
- Cuantificar el oxígeno disuelto necesario para generar energía eléctrica con una celda de combustible microbiana.
- Determinar el potencial eléctrico en función a la tasa de remoción de la materia orgánica a partir de aguas residuales de la industria de cacao.
- Determinar el consumo de oxígeno disuelto en la cámara aeróbica, mediante celdas microbianas en tres periodos de operación.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes Internacionales

Revelo et al. (2013) la investigación realizada sobre una celda de combustible microbiana fue publicada por (Potter, 2010) mediante un trabajo titulado “la desintegración de compuestos orgánicos por presencia y acción de los microorganismos está acompañada por la liberación de energía eléctrica”. La capacidad de producción de electrones no se estudió tampoco se dio importancia el año 1960, aún faltaba la investigación estricta con respecto a los tipos de sistemas. Desde entonces se creó la primera celda de combustible microbiana, sin mostrar resultados favorables, aún estaba en una etapa de investigación, los autores describen algunas combinaciones específicas que indican al desempeño eléctrico en las celdas microbianas, los investigadores estudian la importancia de cada una de las variables que involucran en la generación de energía eléctrica, sin embargo, es muy complejo establecer o predecir las diferentes condiciones para obtener los mejores resultados, el pH es un muy relevante en la celda anaeróbica para el comportamiento metabólico. El nombre de estos dispositivos se usó para representar a ciertos tipos de dispositivos electroquímicos para la obtención de corriente eléctrica a partir del consumo de materia orgánica presente en las aguas residuales, utilizando microorganismos eficientes, empleando cultivos vivos de *Escherichia coli* y *Saccharomyces*, con electrodos de platino y algunas aleaciones con referencia, el estudio realizado fue a nivel de laboratorio, es por esa razón que pasaron desapercibidos para los científicos e investigadores de aquel entonces. En la década de los 80 algunos investigadores descubren que se podía mejorar este dispositivo para generar corriente eléctrica, utilizando mediadores redox solubles. Las celdas microbianas se usaron para producir energía eléctrica de diferentes sustratos, tales como glucosa, acetatos y lactatos.

Alzate et al. (2008), determinaron los procedimientos para la producción de energía eléctrica en una celda microbiana (CCM) con presencia de aguas residuales domésticas e industriales identificando como materia prima a su vez removiendo la materia orgánica presente, redujo la demanda química de oxígeno (DQO). Logrando un resultado óptimo, una potencia máxima de 26mW/m<sup>2</sup> removiendo el 80% de demanda química de oxígeno. El mismo autor en su investigación titulada “Generación de energía a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM” en la Universidad Autónoma de México. La elaboración

de las celdas de combustible a nivel laboratorio para generar corriente eléctrica que consistió en dos celdas como: celda anaeróbica y celda aeróbica además una membrana de intercambio de iones, utilizando electrodos papel carbón y cátodo acuoso. Utilizaron líquido residual sintético (ARS) como sustrato o conocido como el combustible para los microorganismos. Los microorganismos obtenidos fueron de un inóculo mixto anaeróbico de tipo entérico el potencial de hidrógeno están en un rango de 4 a 7,5. Emplearon resistencias de 600 y 1000 $\Omega$ , para el circuito externo obteniendo densidades de corriente de 640 y 336mW/m<sup>2</sup>. La eficiencia de remoción al agua residual sintética fue de 59.8% lo cual se ha demostrado generar energía eléctrica y remover la materia, también se verificó sobre el posible aumento de las áreas de los electrodos los mejoraría la eficacia en la producción de energía en celdas de combustible microbiana.

Racines et al. (2016) realizaron un proyecto titulado: “Tratamiento de aguas residuales y generación simultánea de energía eléctrica mediante celda de combustible microbiana”. En este proyecto de investigación realizaron diferentes prototipos utilizando aguas residuales de tres tipos para evaluar el rendimiento de cada uno. En aquel tiempo utilizaron electrodos de diferentes materiales en los diferentes prototipos utilizados. También usaron aguas residuales industriales de diferente procedencia. El uso de aguas residuales diferentes es para evaluar la flora bacteriana (gallinaza, porquinaza y boñiga). La máxima corriente eléctrica obtenida es de 1.8mA y la efectividad en la remoción de materia orgánica 69.4%.

Los dispositivos conocidos también como celdas de combustible microbiana (CCM) unen diferentes campos en el campo de investigación desde ingeniería, microbiología y electroquímica teniendo en cuenta el área de ingeniería tiene la mayor probabilidad en la investigación con referente este dispositivo. Logan et al. (2006), la presencia de microorganismos específicos con la finalidad de obtener electrones a partir de oxidación del material orgánico, acetato, lactato, glucosa y otros productos agregados por vertimiento de aguas residuales, depende mucho de este parámetro para el rendimiento y funcionamiento de las celdas de combustible microbiana, también indica la velocidad de producción de iones en el ánodo es constante, entonces se deduce que hay eficiencia en el funcionamiento de la celda de combustible microbiana además hay diferencia significativa entre ambas velocidades de flujo continuo y no hay acumulación de electrones en la celda anaeróbica, pero si la velocidad de generación en la cámara anaeróbica supera la velocidad de reacción de la cámara aeróbica

entonces los iones se acumulan en la celda anaeróbica como consecuencia se fermenta y producción de ácidos grasos volátiles (AGVs). Esta tecnología se investigó en tres funciones diferentes, remoción del material orgánico, metales pesados y la obtención de energía.

Buitrón y Perez (2011) menciona sobre la construcción de celdas de una cámara y una membrana de intercambio de iones, además evalúan la distancia entre electrodos en la misma celda colocados más de dos electrodos, esto no generó ningún cambio en la generación de energía eléctrica. La muestra evaluada, (muestra de 120mL) alcanzando un voltaje máximo de 660mV, para la muestra de 40mL resultó de 540 mV y de 80mL logrando generar 532mV, respectivamente. La densidad de corriente obtenida fue de mayor volumen. el investigador concluye la potencia volumétrica no afecta la generación de energía eléctrica, la mayor potencia evaluada es (77.3W), sugiere optimizar la geometría de la celda, además logró remover el 71% de carga contaminante durante las pruebas realizadas, las condiciones de la celda aerobia se mantuvo oxigenado mediante burbujeo con bomba de aire durante el periodo de operación del sistema, este investigador manifiesta hacer mayor investigación en la celda aerobia teniendo en cuenta sobre la equivalencia el uso de energía para oxigenar y generar energía.

Sánchez et al. (2021) realizaron proyecto de investigación “generación de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbiana usando microorganismos eficientes, utilizando sólidos orgánicos. Este dispositivo es una tecnología que ayudaría solucionar a diversos problemas de la contaminación de las aguas residuales, este sistema genera energía y ayuda la purificación de las aguas residuales de contenido de materia orgánica, siendo este contaminante que afecta al ecosistema acuático, los investigadores tienen un reto en la generación de energía mediante este dispositivo porque los materiales es de acceso y a costo para su construcción de este sistema aportaría de gran magnitud de cargas contaminantes que son liberados a los principales ríos y quebradas dañando al ecosistema acuático

## **2.2. Antecedentes Nacionales**

Ccora (2019) analizó las pruebas en 30 días, estos experimentos dividieron en semanas, en la primera semana monitorearon las tres muestras, los resultados obtenidos demuestran el potencial de remoción de demanda química de oxígeno (DQO), se evidenció mayor diferencia la respuesta obtenida en cuatro semanas mientras en la tercera semana monitorearon en tres

celdas con respecto a las evaluaciones de cada una de las semanas, debido a la mayor actividad bacteriana; observando en las semanas 3 y 4 se presentaron mayores diferencias con respecto a la semana 1 y 2 sucede por la cantidad de sustratos presentes en las celdas, se analizó la diferencia de generación de energía es por la cantidad de sustrato presente en cada muestra, arrojando como resultado de la eliminación de la cantidad de demanda química de oxígeno a 44,75% y 39,95% respectivamente.

Valencia (2018) las celdas de combustible microbiana remueven los compuestos biodegradables, la composición del sustrato, son la porción de carbonos, sustratos agua residual con efectividad entre la distancia de los electrodos y complejos presentes en las aguas residuales, etc. el trabajo de investigado lleva el título de obtención de energía en celdas de combustible microbiana utilizando electrodos con efectividad entre distancia.

Jibaja (2018), menciona que, en la cámara anaeróbica ocurre el proceso de reducción química se denomina cátodo y el cual tiene lugar la oxidación se denomina ánodo, además se llevan a cabo en esta cámara por la gran diversidad de microorganismos que liberan electrones luego son transferidos por el material conductor. El potencial eléctrico generado en las celdas microbianas depende de las variables, características de las aguas residuales, como potencial de hidrogeno, temperatura, etc. En las investigaciones se realizaron través de cultivos de bacterias. La bacteria *geobacter sulfurreducens*, usaron los investigadores con la finalidad de aumentar la potencia coulumbica en las celdas microbianas.

Ñacato (2018), menciona en su investigación de las celdas de combustible microbiana en la obtención de corriente eléctrica a partir de la descomposición de materia orgánica de las aguas residuales domesticas usando celdas en modelo Bach. evaluó con presencia de aguas residuales sintéticas y domésticas y aguas residuales industriales aguas residuales sintéticas y aguas residuales reales, con DQO de 500mg/L y 1000mg/L la construcción de celdas de combustible microbianas fueron utilizados materiales reutilizables como: Accesorios de tuberías, papel celofán e imán de neodemo, baldes de plástico, etc. Este prototipo estaba en funcionamiento durante una semana es decir (93 horas). Con esta investigación se demostró la obtención de energía y remoción de la demanda química de oxígeno. Concluye que si es posible generar energía eléctrica a partir de aguas residuales sintética logrando remover el 84.04% de DQO obteniendo 607.67 milivoltios de energía siendo el mayor voltaje.

Pineda (2015) en su investigación demuestra la obtención de corriente eléctrica empleando las celdas de combustibles microbianas, empleando cascara de arroz (*Oryza sativo*) como sustrato y licor rumial bovino como inóculo microbiano, también manifiesta, no solamente para conseguir corriente eléctrica se usa agua residual también otros componentes que contenga materia orgánica es decir aguas residuales sintéticas, esta investigación hizo la comparación del sustrato consumido en función a la energía producida. Las celdas microbianas se desempeñaron en dos celdas cilíndricas concéntricas, modelo Bach, con un puente salino o también llamado membrana de intercambio de iones, este electrolito está compuesto de KCl y los electrodos de acero inoxidable N°301. Se comparó entre la muestra de rumen bovino y la cascara de arroz, en tiempo de operación duró entre 20 y 46 días respectivamente sin agotarse. De los tratamientos evaluados la máxima potencia generada es de 4.94mW/m<sup>2</sup>. Estos efectos demuestran que el salvado de arroz es un sustrato que puede ser disminuido por los microorganismos que se encuentran en el rumen del bovino.

Revelo et al. (2013) publicaron el artículo científico titulado celdas de combustible microbiana como un reto obtención de corriente eléctrica mediante la eliminación de material orgánico, las celdas microbianas son tecnologías promisoras para la generación de energías limpias mediante la remoción del material orgánico a la vez este sistema funciona para la biorremediación de las aguas residuales contaminadas de los mataderos (camal). Se sugiere para los siguientes investigadores tomar en cuenta el mejoramiento del diseño bioelectroquímico, además el uso adecuado de los electrodos en el sistema. Así mismo indica que las celdas microbianas son tecnologías que presentan un mecanismo para lograr un medio ambiente sostenible. Con la implementación mediante tratamientos adecuados en las empresas ya sean físicas, químicas, biológicas, de acuerdo a su naturaleza. El bajo coste son los tratamientos de aguas residuales aprovechando la actividad metabólica de las bacterias para producir electricidad a partir de la oxidación de los compuestos orgánicos y en algunos casos inorgánicos.

Buitrón y Pérez (2011) la remoción del carbono orgánico total hasta un 71% durante el tiempo de operación que de 0.97 días. Para inicio del proyecto fue necesario colonizar las bacterias electrogénicas de acuerdo con el tiempo establecido del agua alimentada. Este trabajo se evaluó una estrategia de arranque para favorecer la colonización de microorganismos en cada de las celdas de combustible microbiana, utilizando como sustrato aguas residuales.

El material orgánico fue degradado en función a la generación de energía, también menciona la obtención de corriente en función a volumen de la muestra, los resultados sugieren mejorar el diseño de la celda y la semicelda aerobia de modo que sea receptor de electrones para evitar la formación de otros compuestos en la celda anaeróbica, depende del receptor para la producción de electrones.

### **2.3. Antecedentes locales**

Estrada et al.(2016) los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se determinó que la disminución de pH en cámara anaeróbica, por la generación de ácidos grasos volátiles y otros productos intermedios generados durante la gestión anaerobia, por otro lado, la variación del pH en la cámara aerobia a la diferencia de velocidad de dirección de protones, electrones y oxígeno y la velocidad de protones en el ánodo. El alto rendimiento del voltaje fueron producto de la actividad metabólica de los microorganismos en la cámara anaeróbica. El estudio determino la tasa de remoción con tres repeticiones resultando remover 65% de materia orgánica, sin embargo la oxigenación de la cámara aeróbica, se realizo mediante el aireador de pecera, con la finalidad de evitar el fermento del componente residual en la cámara anaeróbica, con este prototipo el investigar sugiere la implementación para la aireación de la cámara aeróbica siendo un eje fundamental en el proceso de tratamiento de aguas residuales a su vez generando energía eléctrica mediante la remoción e materia orgánica presente en las aguas residuales.

### **2.4. Caracterización del agua residual**

Sunass (2015), indica el nivel de densidad de contaminantes presente en los residuos vertidos a los principales cuerpos contaminando al cuerpo receptor. La caracterización de las aguas residuales depende de los objetivos del investigador pueden ser parámetros físicos químicos biológicos. Los parámetros evaluados son pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, DBO, etc. Estos parámetros indican la presencia del material orgánico, nutrientes (N y P), sólidos totales suspendidos y otros relacionados a la toxicidad de aguas residuales con las bacterias. Los efluentes de algunas industrias contienen gran cantidad de metales pesados, elementos tensoactivos, cianuros, etc.

Sunass (2015), a nivel mínimo de descontaminación de las aguas residuales de los diferentes niveles son precarias a consecuencias de las normativas son muy flexibles, las

diferentes organizaciones como entes fiscalizadores son muy débiles, es por ello las empresas son muy los diferentes rubros obvian implementar los diferentes tratamientos, lo cual siguen contaminado los principales cuerpos receptores, aun cuando los estudios del cuerpo receptor indiquen que es altamente contaminante, este nadando al ecosistema acuático. Los tratamientos primarios son capaces de remover el material orgánico sedimentable. Los tratamientos secundarios, que es un objetivo adicional alcanzado mediante el tratamiento primario. la caracterización de las aguas residuales está sujetos a los objetivos de cada investigador, que comprende la identificación y cuantificación de sus propiedades físicas químicas biológicas que tienen categorías o rangos bajo diferentes circunstancias y exigencias de las entidades reguladores

## **2.5. Aspectos generales**

### **2.5.1. Electroodos**

López (2013) Los electroodos son componentes claves para la captura de electrones producidos en la celda anaeróbica por la actividad metabólica de los microorganismos. Los electros son indispensables el comportamiento de las celdas de combustibles microbianas. Los electroodos ocasionalmente pueden convertirse ocasionalmente en ambos en ánodo o cátodo dependiendo del potencial eléctrico que se aplique a la celda. También existen electroodos bipolares es un electrodo que funciona como ánodo o cátodo dentro de las celdas de combustible microbiana.

Gretel (2016), menciona sobre la variedad de electroodos que se investigaron en cada tipo de diseño investigado en los diferentes proyectos. El electrodo de grafito es más usado en diferentes prototipos por su alta conductividad, además tiene buena estabilidad química, alta resistencia a la corrosión y soporta estar expuesto a la humedad.

Ambos autores consideran los siguientes componentes de los electroodos:

#### **2.5.1.1. Ánodo**

Chang (2002) indica sobre suministro de electrones hacia el cátodo mediante un conductor externo, el ánodo se encuentra sumergido en la celda anaeróbica que contiene agua residual, en esta celda ocurre la oxidación por acción de los microorganismos luego son liberados los electrones y protones, menciona que estos electrones

son capturados por el ánodo y paralelamente son transportados por un conductor externo. conjuntamente, los iones migran por la membrana hacia la cámara catódica, esto se combina con el oxígeno (inyectado con bomba de aireación de pecera) en esta celda solo hay presencia de agua con alto contenido de oxígeno para captar los electrones de la celda anaeróbica. Los electrones captados en la celda anaeróbica son producto de la cadena respiratoria de los microorganismos, estos materiales usados como ánodo son construidos de elementos biocompatibles y estables químicamente, estos materiales son de alta conductividad, además no son corrosivos. Son estables a grandes dimensiones de alta porosidad, el componente más adecuado para su elaboración por sus costos y capacidad y residencia. El carbón ofrece unos servicios versátiles como, viene en diferentes presentaciones como laminas compactas de grafito, carbón vitrio, barras o gránulos, material fibroso, fibras de espuma y tela o papel. Sin embargo, de las experiencias de los investigadores el cobre y el grafito son de alta conductividad para el transporte de electrones en este tipo de sistemas electroquímicos que son muy eficientes en la obtención de corriente eléctrica, estos electrodos son de alta conductividad sin mediadores o también con mediadores en las investigaciones realizadas. Las investigaciones realizadas con lo materiales de alta conductividad, resultaron ser eficientes con otros materiales, sin embargo al acceso de materiales es dificultoso por el costo elevado y acceso al mercado para la adquisición de estos materiales para funcionamiento del sistema, también llamados celdas de combustible microbiana.

#### **2.5.1.2. Agente oxidante**

Sanchez et al. (2021). Es aquel elemento o compuesto que traspaasa átomos electronegativos a otra sustancia oxidante, los agentes oxidantes tienen la propiedad de sustraer electrones de otra sustancia denominada reductora.

#### **2.5.1.3. Agente reductor**

Es la esencia de la química que se oxida o pierde los electrones según Sanchez et al. (2021).

#### **2.5.1.4. Cátodo**

Jiménez et al. (2018) la recepción de electrones que ocurre en la celda aeróbica, por lo que se necesita receptor, los electrones llegar por un medio conductor hasta la celda catódica por un circuito externo. El oxígeno, es el aceptor más recomendable,

debido a la accesibilidad y el costo. El medio del cual se esparce el aceptor de electrones, estos aun no han sido estudiados en gran magnitud. Los aceptores aun pasan por alto y siguen usando compuestos químicos, la comunidad científica ha utilizado, agua destilada, buffer fosfato, entre otros, sin haber presentado influencias significativas como aceptores en la celda anaeróbica. Además, se utilizaron otros compuestos como:  $C_6FeK_4N_6$ ,  $FeO_3$ ,  $KMnO_4$  dichos aceptores evaluados, resultaron ser grandes conductores de electrones y de gran producción de densidad de potencia. A pesar de ello, el uso de estos aceptores es considerado no sustentable debido al costo, además estos componentes pueden contaminar la solución a través de la transferencia de iones por el medio conductor.

Chang (2002), Es el material que recibe electrones desde el ánodo como consecuencia de la actividad metabólica de los microorganismos, en este proceso usaron diversos materiales porosos para incrementar el potencial eléctrico. Los iones son trasladados por medio de la membrana selectiva. En el idioma griego antiguo *kathodos* significa. “Camino hacia abajo”, pero Faraday la utilizó para referirse a un electrodo con carga negativa del cual fluye la corriente eléctrica.

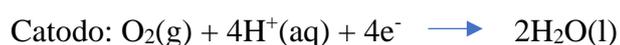
El limitante principal, en el rendimiento de este electrodo, para construir un dispositivo celdas electroquímicas gran magnitud, la obtención del cátodo es un eje fundamental, sin embargo, en las investigaciones realizadas de Buitrón y Pérez (2011) el área y la distancia del cátodo tiene un efecto insignificante en la potencia de salida. La eficiencia de este se puede mejorar usando de materiales gránulos como el grafito. El uso de biocátodos ayuda a superar la catálisis por oxidación, pues estos se han usado para mejorar la producción de electricidad en la celda, ya que algunos microorganismos realizan reacciones catalíticas en el biocátodo. La ventaja en esta celda es no es necesario usar mediadores como aceptores finales como:  $CO_2$ , H, Fe (III), Cr (VI), U (VI) y Mn (IV), como aceptor de electrones y sin la ayuda de un factor exógeno que permeabilización el paso de electrones en la celda de combustible.

#### **2.5.1.5. Cation**

Chang (2002), es una carga positiva que se denominan cationes, es decir, que ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo esto se entiende que hay ganancia de electrones es cuando un átomo neutro pierde uno o más electrones de su dotación original.

### 2.5.1.6. Celda de combustible microbiana

Bermudez y Bernal, (2018), Los dispositivos también llamados celdas de combustible microbiana funcionan en general utilizando agua residual ya sea sintética o de una industria. Estas celdas de combustible son conocido por el uso de una celda de una sola cámara o también celda de doble cámara constituido de dos electrodos ( ánodo y cátodo); la reacción química es de tipo redox, el hidrogeno se encuentra en el ánodo mientras que el oxígeno en la parte del cátodo que sirve como aceptor de electrones que transcurre por el circuito externo desde la cámara anaeróbica, este sistema para cierra el circuito esta unido mediante tubos de PVC, también llamado membrana de intercambio de iones la que separa dos compartimentos de la celda de combustible microbiana. El proceso de oxidación ocurre en la cámara anaeróbica mediante el metabolismo microbiano:



Las celdas microbianas está el hidrogeno se localiza en forma de gas y el oxígeno encontrado en el aire de la celda catódica, el hidrogeno es ionizado por medio de una oxidación, donde permanecen el protón, al llevar a cabo este proceso se libera conjuntamente dirigiéndose hacia la celda anaeróbica, estos protones pasan por el puente salino hacia el cátodo, mientras los electrones son captados por el ánodo y posteriormente son trasferidos por el material conductor

Gongora et al. (2017), las celdas microbianas son disipativos usados para la obtención de corriente eléctrica a través de la actividad metabólica de los microorganismos a partir de la materia orgánica de cualquier agua residual. Durante este proceso los microorganismos transfieren electrones producidos y estos son capturados mediante un electrodo estos son capaces de captar los electrones con mediadores o sin mediadores y son transferidos por el conductor externo, estos electrones necesitan un receptor para el buen funcionamiento del sistema, entonces el oxígeno es utilizado como un receptor natural de los electrones. La celda de combustible microbiana presenta dos celdas separadas, mediante la membrana semipermeable (membrana de intercambio de iones) y el electrodo (ánodo) ambos electrodos son sumergidos en cada una de las celdas. Esta tecnología que permite la generación de energía a través de la sustracción del material orgánico por intermedio de los microorganismos. Este

sistema nos permite generar energía en mínimos voltajes y corriente en el orden de milivoltios y miliamperios, a partir de la digestión metabólica de los microorganismos electrógenos, los electrones producidos son captado por el ánodo y son transferidos por el conductor externo. Este sistema también es denominado como batería que funciona con microorganismos que usan como combustible, según las experiencias no tiene una característica específica para el uso de las aguas, se ha utilizado aguas residuales sintéticas, reales y residuales domesticas e industriales.

#### **2.5.1.7. Combustible**

Costa (2005), indica que la sustancia al combinarse con el oxígeno es capaz de reaccionar desprendiendo calor.

#### **2.5.1.8. Corriente eléctrica**

Costa (2005), denomina un electrón en movimiento, puede ser un desplazamiento una sola dirección o en desorden. Dependiendo del tipo de carga a trasladar las corrientes que puede ser cátodo o ánodos.

#### **2.5.1.9. Densidad de corriente**

Logan et al. (2006), se denomina unidad vectorial análogamente hasta cierto punto, a la cantidad de movimiento. A mayor carga, mayor cantidad de corriente; es decir cuánto más rápido se mueva mayor será la densidad. También existe corriente nula dependiendo la carga o no hay movimiento.

### **2.5.2. Cobre**

Castro (2014), El cobre es uno de los conductores eléctricos o de carga eléctrica, además, es de alta conductividad térmica y eléctrica. En una celda de combustible microbiana cumple la función de ánodo.

### **2.5.3. Placas de zinc**

Morales (2020), indica que, en varios sistemas galvánicos fueron usados, el zinc se usa como ánodo, en particular junto a los metales en distintos dispositivos eléctricos y por su utilidad de este electrodo.

## 2.6. Tratamiento de aguas residuales industriales

Metcalf y Eddy (1995), el tratamiento de aguas residuales industriales son procesos inherentes a las actividades vinculantes. Los factores de tratamiento de aguas residuales se desarrollan en acuerdo con las cualidades físicas, químicas, biológicas y del tipo de actividad industrial. Las industrias generan gran cantidad de aguas residuales, así como: Aceite, amoníaco, sulfuro, fenoles, arsénico, mercurio y algunos ácidos, etc. Sin embargo, estas aguas residuales necesitan tratamientos avanzados para verter al cuerpo receptor o para el reusó de acuerdo con su categoría. Los tratamientos de estas aguas residuales tienen diferentes procesos para cada contaminante. Estas aguas tratadas se podrían dar uso para la agricultura, riego de parques, jardines y lavaderos, etc.

El recurso hídrico es una fuente natural teniendo un valor social ambiental por lo tanto es derecho que todo el usuario tener en cuenta para su cuidado, además los aspectos climáticos y geográficos de nuestro país hacen del agua un reusó abundante en la región amazónica y con escasez en la costa y en épocas en la sierra. Sin embargo, las industrias son responsables a los diferentes tipos de contaminantes que emiten durante los diferentes procesos y no son responsables de sus fuentes contaminantes. Sin embargo, hay tecnologías que se pueden adaptar al tratamiento de sus efluentes que desechan gran cantidad de contaminantes. Para la sustracción de la materia orgánica se estudió en diferentes procesos como es las celdas de combustibles microbianas este sistema es remueve la materia orgánica y a su vez genera energía eléctrica, lo cual sería una alternativa para implementar estos sistemas electroquímicos. Generalmente las aguas residuales un sin n umeros de microorganismo patógenos además de los que son comunes es la síntesis de heces fecales, no siempre estas aguas son daños para el ecosistema también son buenas para el desarrollo de plantas acuáticas. El problema por la contaminación de aguas residuales es serio, complejo, con múltiples causas y varias instituciones involucradas en una solución. en efecto, las causas llevan una situación crítica. Tienen sus orígenes en las empresas de diferente desarrollo económico

Betance (2010), El aumento continuo de la población y la actividad industrial provoca el incremento de las aguas residuales además los malos hábitos de la población aumentan considerablemente a la contaminación de los principales causes que son fuente de recepción. Para la disminución de los contaminantes vertidos a los causes hacer cumplir con las normativas

vigentes a las principales responsables empresas. La diversidad de las aguas residuales industriales no es tratada son vertidos a las fuentes receptoras

### **2.6.1. Tratamiento biológico de aguas residuales industriales**

Carmen et al. (2000) el tratamiento biológico es un sistema para remover materia orgánica presente en las aguas residuales mediante la intervención de microorganismos naturales o inóculos bacterianos durante este proceso para la remoción de contaminantes soluble e insolubles, así como el nitrógeno potasio etc. Mediante estos procesos reutilizan la capacidad de los microorganismos de asimilar el material orgánico y los nutrientes disueltos en el agua residual para su propio desarrollo. Los diversos tratamientos son elegidos bajo estándares requeridos y en cumplimiento de los límites reglamentarios, los diversos tipos de tratamientos de aguas residuales según su procedencia.

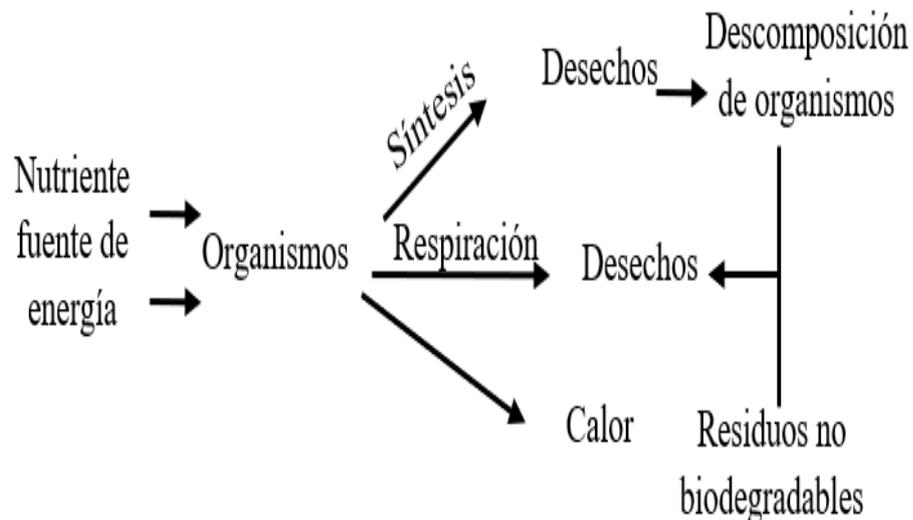
Comision Nacional del Agua (2013) indica, que el tratamiento secundario de aguas residuales consiste en remover la materia orgánica biodegradable, soluble, coloidal también eliminan componentes con presencia de (N, P). Son los tratamientos comunes en las últimas décadas que han desarrollado diversos tipos de tratamientos biológicos por el uso de microorganismos. La mineralización de compuestos contaminantes mediante microorganismos, estos sistemas son empleados por el coste económico y por la facilidad de operación Por su sencillez y su bajo coste económico de operación, la materia orgánica establece la fuente de energía, carbono y condiciones ambientales adecuadas que necesitan los microorganismos para su crecimiento y propagación. Los tratamientos biológicos que son denominados tratamiento secundario son procesos de depuración de materia orgánica biodegradable, es por la por la actividad del microorganismo ya sea anaerobios o aerobios en cada uno de los procesos de tratamientos.

### **2.6.2. Reacciones biológicas**

Betance (2010), en las principales reacciones biológicas como fuente principal es los microorganismos para el proceso de oxidación, si no hay receptor de la oxidación como son los electrones, este será capotado por los mismos microorganismos, pero no en tu totalidad y el resto pasa a un proceso de fermentación. Es por ello se implementa un sistema de receptor de electrones mediante un electrodo, implementado un sistema llamado celdas de combustible microbiana que este sistema es usado la reacción bilógica con la inserción

de materia orgánica de las aguas residuales, este dispositivo aportaría en los tratamientos biológicos.

Fernando et al. (2009), las reacciones biológicas dependen mucho de los factores determinantes como característica de un sustrato, nutrientes. Se ha determinado que los microorganismos necesitan por cada 100g de carbono, 43gramos de nitrógeno, 6g de fosforo y en las aguas residuales necesitan para sobrevivir y en las aguas residuales urbanas necesitan por cada 1000g potasio, 200g de nitrógeno, 16g de fosforo. Las reacciones biológicas ocurren en la cámara anaeróbica mediante la actividad metabólica en las condiciones adecuadas para su desarrollo. También durante su actividad biológica necesitan los macronutrientes y micronutrientes como: el oxígeno, nitrógeno, e hidrogeno compuestos orgánicos e inorgánicos que deben ser transportados a la célula en forma soluble se observa en la figura 1 la corriente proporcionada contiene compuestos orgánicos también como energía radiante de la luz solar, una fracción de la energía es usada para la síntesis de biomasa y el resto se dispone en forma de calor. Los microorganismos también producen desechos que dependen de las especies y condiciones ambientales.



Fuente: Moscoso (2011)

**Figura 1.** Reacciones biológicas fundamentales

### 2.6.3. Microorganismos como fuente de energía

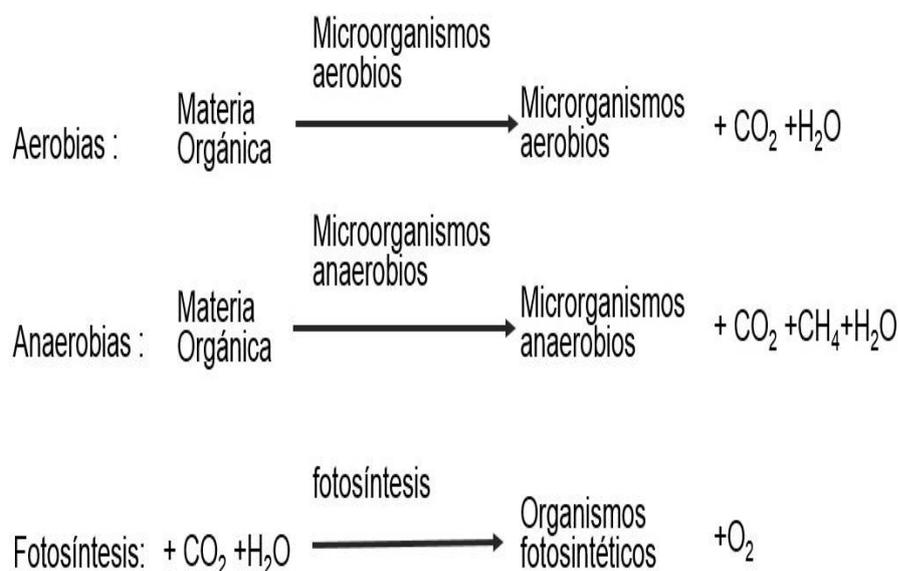
La actividad metabólica es fundamental para la transferencia de electrones en las celdas microbianas de acuerdo con Liu et al. (2004), el comportamiento de algunos microorganismos son como cables eléctricos estas investigación son de gran interés para seguir investigando el comportamiento y tipos de células de los microorganismos. Los científicos observaron, a través del microscopio, la producción de energía ocurre en su interior de los microorganismos, también menciona que los microorganismos electrógenos son como alambres parecidos cadena delimitada de una membrana, indica sobre los tipos de bacterias eléctricas que son cien veces más delgada que un cabello, están formados por número de hilos dentro de ella. Se han utilizado nano herramientas para analizar las propiedades eléctricas de las bacterias, se logrará encontrar respuestas en el futuro cuando los investigadores reportan sus avances y los estudios de microorganismos como fuente de energía.

Diversos factores afectan en la obtención de corriente eléctrica algunos son vías metabólicas que gobiernan en el flujo de electrones y protones en la celda anaeróbica y estos migran a la celda aeróbica mediante el conductor externo, el potencial de hidrogeno es fundamental para el rendimiento de las celdas de combustible microbiana. Para la proliferación de los microorganismos electrógenos en las celdas. Si el potencial de hidrogeno está por debajo de los 4, hay mínima proporción de macroorganismos electrógenos por ende el potencial eléctrico disminuye posiblemente los electrones son captados por otros aceptores alternativos, como sulfato, nitrato entre otros, por lo tanto, ocurrirá la fermentación del agua residual.

Romero (2002), los microorganismos como fuente de energía tienen diferentes mecanismos: Los microorganismos liberan electrones después de su actividad metabólica. Los estudios realizados de la diversidad microbiológica a los microorganismos como fuente de energía evaluaron a los microorganismos electrógenos con cepas puras y poblaciones microbianas determinando la eficiencia coulumbica de los siguientes microorganismos de *Geobacter sulfurreducens* y *Rhodoferax ferrireducens* que genero una eficiencia 98%, en estas pruebas se usaron como combustible la glucosa y acetato. Los microorganismos electrógenos están relacionados con las celdas de combustibles microbianas, en este dispositivo se evalúa la función de los microorganismos como fuente de energía, a su vez un sistema adecuado y completo como son: celda anaeróbica de doble cámara o de una sola cámara, membrana de intercambio de iones, electrodos (ánodo y cátodo), sustratos y evaluación adecuada de los parámetros

Moscoso (2011), las reacciones biológicas de los microorganismos electrógenos o fuente de energía. Para evaluar el potencial de los microorganismos se emplea las celdas microbianas, estos dispositivos se identifican por el uso de microorganismos como fuente de energía a través de las aguas residuales, utilizando al componente microbial para oxidar la materia orgánica y luego transferir los electrones mediante un electrodo que está conectado entre el ánodo y cátodo a través de un conductor.

Existen diversidad de microorganismos como fuente de energía, se evalúa la eficiencia de cada fuente de energía en función a los receptores de los electrones generados en la celda anaeróbica. Fernando et al, (2009), las reacciones biológicas pueden acontecer conjuntamente, en ciertos ambientes como en lagunas es decir en aguas lenticas. Las reacciones fotosintéticas también ceden oxígeno disuelto mediante algas y plantas acuáticas en estos sistemas, así como se muestra en la figura 2.



Fuente: Fernando et al. (2009)

**Figura 2.** Reacciones biológicas comunes

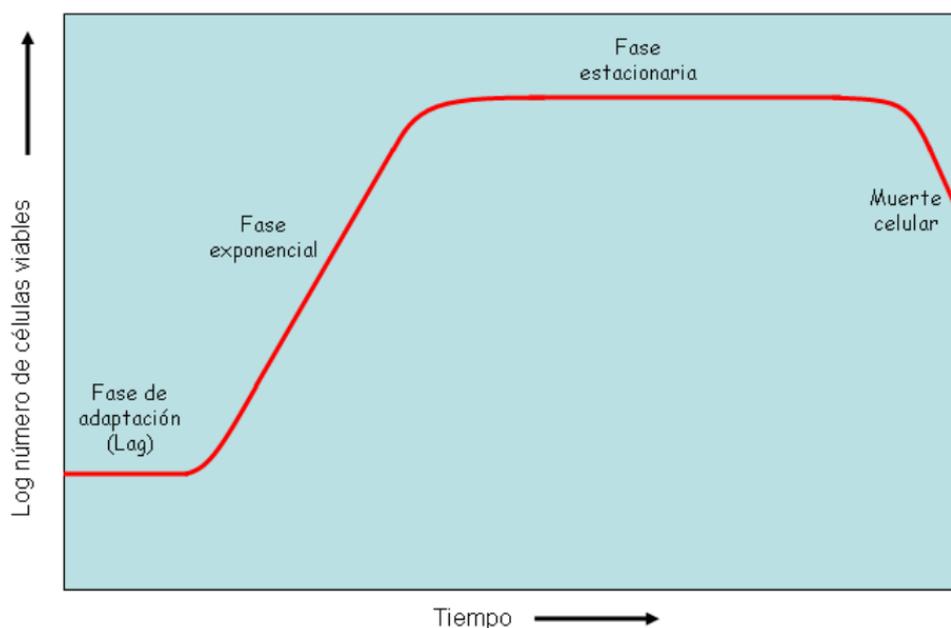
Fernando et al. (2009), Existe gran diversidad de microorganismos coadyuvantes en la generación de corriente eléctrica a través de las celdas microbianas. Los microorganismos más utilizados son los llamados bacterias entéricas como el *Escherichia coli*, *salmonella sp*, *shigella sp*, *yersinia sp*.

#### 2.6.4. Crecimiento de bacterias

Navas et al. (2016), el crecimiento bacteriano se concreta en el crecimiento en la cantidad de células microbianas de una población bajo las condiciones y parámetros adecuados para su desarrollo y crecimiento. El incremento de la población microbiana se estudia analizando la curva de crecimiento mediante cultivos microbianos. El aumento de una población microbiana de cualquier especie depende de las condiciones y algunos parámetros como: Cantidad de nutrientes, temperatura, humedad, pH y sustrato.

Según Benintende et al. (2015) en su investigación determino sobre el crecimiento y duplicación de los microorganismos con el control adecuado de alguno parametros, el incremento microbiano se define como aumento a la cantidad de células de la comunidad microbiana: la rapidez del incremento en número de células o en su masa molecular por unidad de tiempo. Nos indica el crecimiento de los microorganismos en el cultivo(sustrato). La variación de los parámetros fue evidente, dentro de los análisis se determinó por las condiciones ambientales como la temperatura “ejemplo la población de *Escherechia coli* en 35 horas” todos los tratamientos son evaluados en horas.

Para evaluar el crecimiento de los microorganismos es el método grafico a veces lo más conveniente es la expresión matemática como muestra en la figura 3 se presenta gráficamente una curva típica de crecimiento bacteriana. Como se puede observar en la figura, aun cuando permanece en cada uno varía según las condiciones ambientales y parámetros controlados estos pueden variar según familia y especies a la cual pertenece entre otras características físicas, químicas y biológicas. Las bacterias electrogénicas son más específicas desde la incubación, estos requieren de las condiciones adecuadas y parámetros controlados para cumplir los objetivos del investigador.



Fuente. Navas et al. (2016)

**Figura 3.** Curva de crecimiento bacteriano

En las fases del crecimiento de las bacterias, suman diversos factores físicos químicos biológicos, que son fundamentales en su crecimiento y permanencia en las diferentes fases de ciclo de vida. Cada microorganismo tiene una condición mínima, óptima y máxima durante su crecimiento y reproducción en cada fase, según Navas et al. (2016) en manejo de los parámetros es dependiendo cual es el objetivo de estudio para el manejo de los parámetros para la adecuación y funcionalidad de los microorganismos durante el estudio. Los microorganismos ingresan al proceso de latencia inmediatamente después de la inculación de las células, esta población temporalmente, en esta fase los microorganismos su aumento es cero es por la adecuación a los diferentes medios algunos factores son afectados son como: pH, temperatura, La duración de la recuperación de las bacterias depende de muchos factores que intervienen, algunos bacterias sufren daños físicos o shock, el tiempo requerido para su recuperación depende de las especies y condiciones ambientales, en la fase exponencial es un patrón equilibrado de todas las células que se dividen regularmente por fisión binaria y están creciendo en forma de progresión geométrica. Estas células sufren una división constante y esto es dependiendo de la composición de crecimiento y las condiciones adecuadas y parámetros controlados. Luego ingresa a la fase estacionaria, en esta fase los microorganismos que no pueden continuar su desarrollo normal, lo cual influye muchos factores, el crecimiento de la población es limitado por diferentes factores que ocurren. Alguno de ellos son agotamiento de sustratos, acumulación de metabolitos inhibición, productos desechos reducción de espacios,

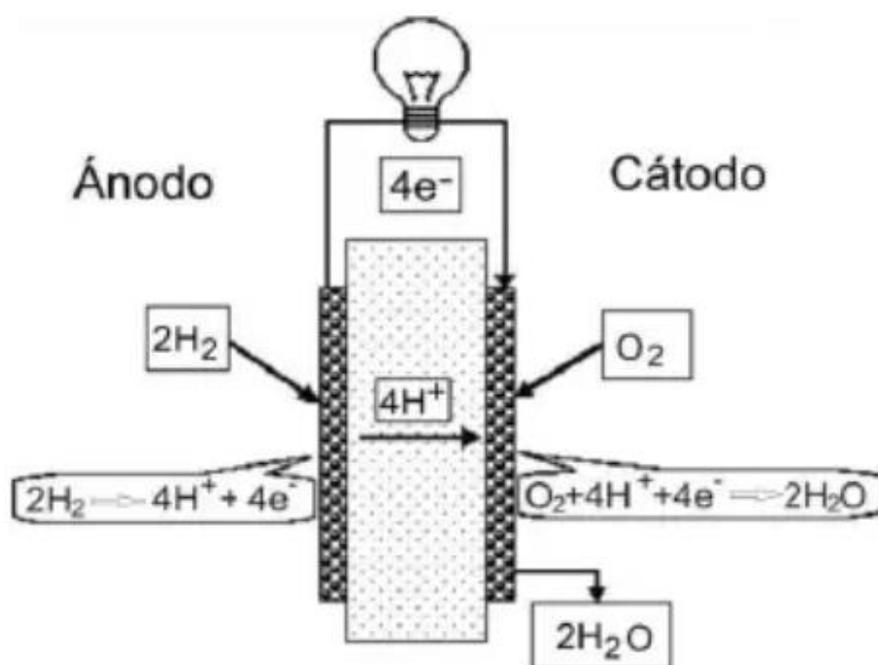
también esta fase es llamado retardo no necesariamente es un periodo de inactividad. Como parte final es la fase de declive o muerte, ocurre por la disminución de las células comienzan a morir a una velocidad constante, literalmente pereciendo en sus propios desechos, lo cual se intoxican. Durante esta fase el número de células viable disminuyen geométricamente es al inverso de la logarítmica.

## **2.7. Celda de combustible microbiana**

Calderon (2017), determina sobre el rendimiento del dispositivo que puede cumplir dos funciones importantes para convertir la energía química a energía eléctrica a través de la actividad metabólica, este dispositivo no necesita un convertidor para la generación de energía eléctrica es a través de actividad metabólica de los microorganismos. La comunidad científica ha demostrado gran interés de estudiar estos dispositivos tomando como principio a las celdas galvánicas y las celdas electrolíticas. De acuerdo con las investigaciones realizadas existen diferentes celdas microbianas con diversas características de diseño y materiales. Estos sistemas han fomentado el interés del crecimiento y desarrollo de las celdas de combustible microbianas, siendo dispositivos que se encuentran clasificados como generadores de energía limpia, en comparación con los procesos de generación de energía fósil que emiten gases tóxicos, los cuales perjudican al ambiente mediante efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC,  $\text{O}_3$ , etc.) Las celdas de combustible microbiana son tecnologías que genera energía de la actividad metabólica de los microorganismos. Para el rendimiento de las celdas microbianas son: materiales electrodos aceptores de electrones membrana de intercambio de iones y parámetros importantes para el crecimiento y continuidad de los microorganismos. En una celda de combustible microbiana los electrones captados por el ánodo luego son transferidos mediante un conductor externo, es decir desde el ánodo hacia el cátodo. Posteriormente por la gran acumulación de electrones son usados en fuente de energía eléctrica, los electrodos generados en la celda anaeróbica son cosechados y convertidos en energías eléctricas.

Morales (2015) Las celdas de combustibles microbianas identifican por ser un dispositivo que convierte la energía química de un combustible y un oxidante en electricidad. Este dispositivo este compuesto por tres elementos: dos electrodos (ánodo y catado) y un electrolito. En el ánodo se produce la reacción de oxidación del combustible generándose así el  $\text{CO}_2$ , electrones y protones esto se puede observar en la ecuación 1, los protones formados migran hacia el cátodo a través del electrolito, mientras que los electrones viajan o son

transportados por el circuito externo. La reducción se lleva a cabo en la celda anaeróbica con el oxígeno del aire, los electrones y protones producidos en el ánodo como se puede observar en la ecuación 2. el electrolito sirve como vehículo para los protones, este electrolito no funcionaría si no hubiera una membrana de intercambio de protones ya que ésta solo permite el paso de los protones, impidiendo así una contaminación entre las dos celdas.



Fuente: Morales (2015)

**Figura 4.** Esquema de una celda de combustible.

Las reacciones generadas en una celda son de tipo oxidación-reducción en presencia de un catalizador además son isotérmicas y continuas. La celda de combustible microbiana está basada en el principio de Carnot, sobre la teoría cinética y la demostración de la irreversibilidad es inherente a la ecuación diferencial, es donde químicamente se determina mediante la cinética de ecuación al consumo de materia orgánica en función a las celdas de combustible microbiana

## **2.7.1. Tipos de celdas de combustibles biológicos**

### **2.7.1.1. Celdas de combustible basadas en biohidrogeno (MFC).**

Catal (2016), en su investigación determinó microorganismos como fuente de generación de hidrogeno molecular estas celdas usan microorganismos para la generación de hidrógeno. Se libera un electrón y posteriormente es utilizado como fuente de energía. Esta energía obtiene a partir de la composición de carbohidratos o biomasa lignocelular usando celdas de combustible en la obtención de hidrogeno. Estas celdas son de doble cámara la producción es a partir de monosacáridos (glucosa, galactosa y celobiosa) se han utilizado un cultivo microbiano mixto enriquecido con cloroetano, sulfonato, y acetato de sodio como fuente de carbono que han resultado un gran desafío en la generación de hidrogeno en los prototipos usados en las celdas de combustibles microbianas.

La configuración para obtención de hidrógeno se puede usar en cuatro configuraciones:

- A. Los microorganismos pueden generar hidrógeno a partir de la electro-síntesis microbiano esto reduce en dióxido de carbono a componentes orgánicos.
- B. En esta configuración los mediadores son usados para el transporte de electrones entre el sistema biocatalítico microbiano y el electrodo, estos componentes agilizan para el transporte de electrones producidos.

### **2.7.1.2. Celdas microbianas no basadas en biohidrogeno**

Catal (2016), en estas celdas producen combustibles diferentes al hidrogeno, son encontrados microorganismos propios de las aguas residuales para la producción directa de energía, no se requieren otras celdas adicionales; A partir de esta misma celda se produce en forma simultánea, la electricidad y mediante remoción de material orgánico del agua residual.

### **2.7.1.3. Celdas de combustible sedimentarias (SMFC)**

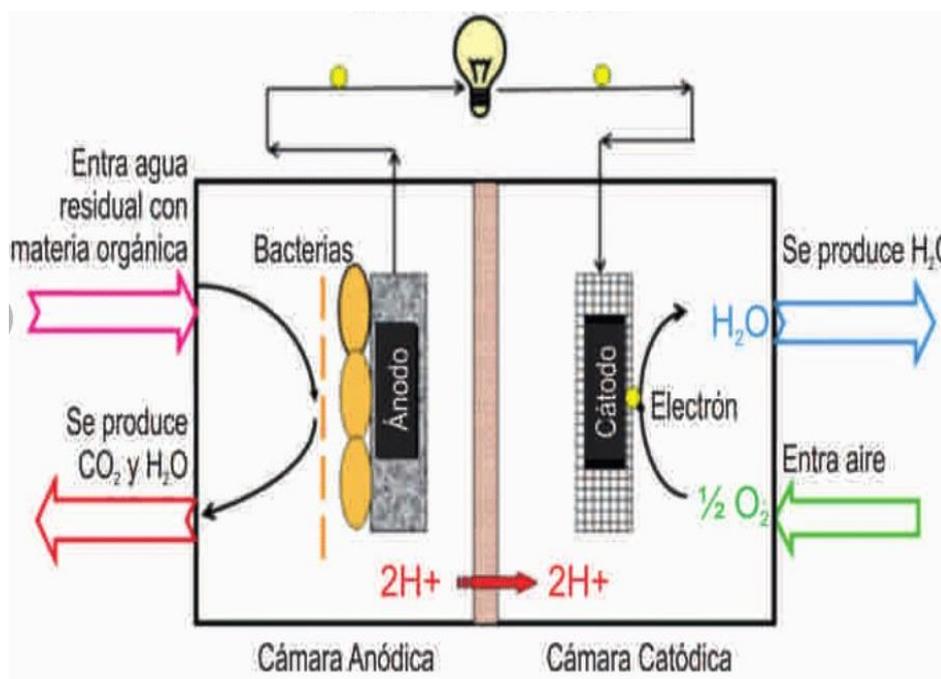
Catal (2016), este dispositivo es usado con bacterias nativas propias de sedimentos o lodos que permiten la producción de energía eléctrica. Estos modelos de celda producen energía en pequeñas cantidades, sin embargo este sistema bioelectroquímico permite conocer el estado metabólico de los microorganismos como: la cantidad de bacterias en el sustrato, por lo que es considerado como excelentes indicadores o biosensores metabólicos.

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

Catal (2016), menciona el uso de este tipo de celdas son caracterizados por el uso de plantas acuáticas en la celda aeróbica, el aceptor final de los electrones es el oxígeno. El funcionamiento es por la capacidad de las plantas acuáticas como las algas y aprovechar sus propios nutrientes. Existen diversidad de microorganismos de esta naturaleza para generar energía a partir del aprovechamiento de nutrientes de las raíces de las plantas luego son convertidos en energía.

#### **2.7.2. Estructura de una celda microbiana**

Revelo et al. (2013), indican de la variedad de diseños de celdas microbianas. Los diseños que poseen una cámara anódica o catódica varían en función al investigador y nivel de investigación, así como de doble cámara forma de H, se muestra en la figura 5, la estructura del diseño de celda de combustible microbiana están compuestos de dos compartimientos como: cámara anaeróbica, aeróbica y un separador también llamado intercambio iónico, según las investigaciones realizadas, los diseños más eficientes en la generación de corriente eléctrica además la fabricación de estructura de celda de combustible microbiana se puede usar materiales de plástico como: policarbonato, polietileno, acrílico, etc. algunas investigaciones realizadas mencionan que el desempeño de una celda microbiana depende de muchos factores: parámetros indispensables como temperatura, pH y especies de los microorganismos. Electrodo para usar, membrana de intercambio de iones. La generación de energía eléctrica en este sistema es óptima, si se logró controlar los parámetros que intervienen en las celdas de combustible microbiana,



Fuente: Revelo et al. (2013)

**Figura 5.** Celda de combustible microbiano

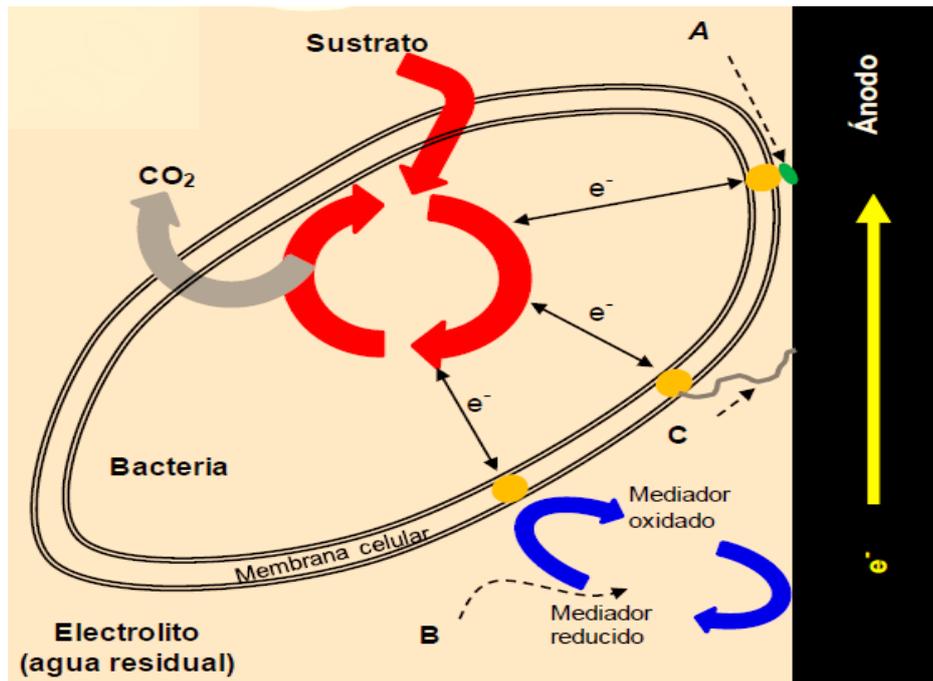
Revelo et al. (2013), las celdas microbianas también llamadas pilas de combustible funcionan adecuadamente de diversos factores empleados como el pH, tipo de sustrato y presencia de oxígeno en la celda aeróbica que es fundamental. El manejo del pH es muy importante para evitar la composición de otros gases. El desempeño de una celda microbiana es estudiado por la adecuación de las actividades de las colonias de microorganismos, como productores de electrones a partir de la oxidación del material orgánico y estos electrones son recuperados mediante electrodos de cobre y luego son transferidos por un conductor externo. Las celdas microbianas han demostrado tener dos aplicaciones como: obtención de corriente eléctrica, también la sustracción del material orgánico y biorremediación de aguas residuales de los diferentes procesos.

### 2.7.2.1. Mecanismos de transferencia de electrones.

González (2015), en su investigación determina sobre la diversidad de materiales usado, ya sea por un electrodo o por mediadores reductores y de oxidación, con la finalidad de capturar todos los electrones posibles de la actividad metabólica Lovley (2008), los electrones son liberados de la actividad metabólica, las técnicas de transferencia de electrones se inicia en la celda anaeróbica, la bacterias eléctricas en alguna ocasiones necesitan mediadores Existen diferentes técnicas para la obtención de electrones y

captado por el electrodo, según se muestra en la figura 6. Algunas técnicas para la obtención de electrones para la transferencia de electrones. Se describen así. a) traslado directo con la participación de citocromos, b) traslado con ayuda de mediadores externos o producto de la actividad metabólica de microorganismos, c) traslado por medio de los nano-cables bacterianos o Pili.

Estrada (2014), los microorganismos electrogénicos son las que liberan los electrones a partir de la oxidación de materia orgánica y una vez liberados son transferidos mediante un conductor. Se ha evidenciado gran variedad de microorganismos, también llamados enófilos. Entre existen gran magnitud y son estudiados entre el género *Geobacter rhodofera*. De acuerdo con las investigaciones realizadas se han evidenciado gran variedad de microorganismos también llamadas anófilos. De acuerdo con los resultados evaluados no necesitan ningún mediador para la liberación y transporte de electrones. Por la presencia de microorganismos eficientes se logra la oxidación del material orgánico, que implica una mejora en la eficiencia energética obtenida, estos microorganismos son de gran utilidad como fuente de energía limpia, en cada estudio realizado se profundiza más sobre el tema. El más estudiado es el género *geobacter sulfurreducen*. Se evidencia por su comportamiento de esta bacteria e incluso se ha modificado genéticamente para la obtención de corriente eléctrica. Los investigadores deducen de las investigaciones realizadas, la simbiosis como un sustento en la transferencia de energía, especulan que estos microorganismos evolucionaron en el transporte de electrones de unos a otros, ya que no eran capaces de usar su energía entre ellos.

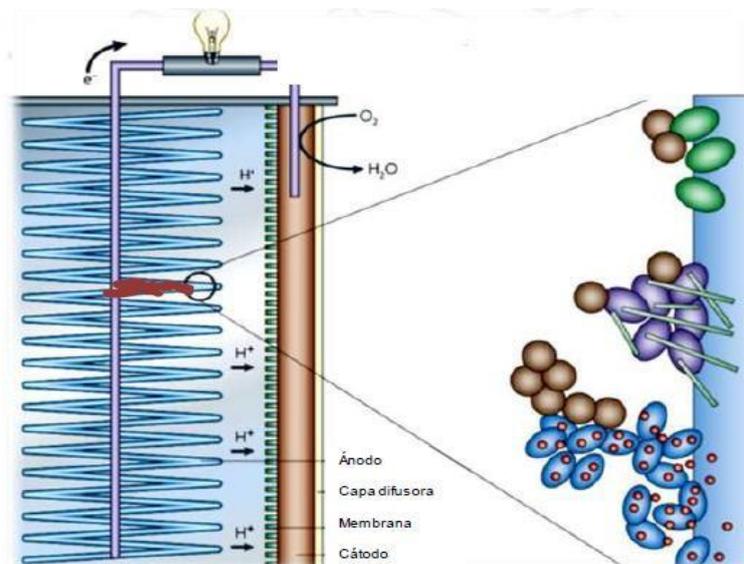


Fuente: Estrada (2014)

**Figura 6.** Vías de transferencia de electrones

La figura 7 se muestra una vista general sobre el transporte de electrones y las modalidades de su captura. En color verde son identificadas de los microorganismos exoelectrogeneras, color morado son microorganismos que tienen componentes de nanohilos (Pili), en color café son representadas los microorganismos no exoelectrogeneras y de los colores azules son mediadores.

El proceso de generación de electrones es propio de los microorganismos estos por su naturaleza necesitan energía, estos electrones viajan a través de los cristales del filamento, pero debe haber una fuente en el agua ya sea dulce o marina que aporta esos electrones. Según los estudios estas bacterias obtienen esos electrones de la oxidación del sustrato o también conocido como materia orgánica, tras ser captados por el electrodo llamado ánodo y posteriormente son transportados por el material conductor por la red eléctrica fibrosa hasta que son captados por el oxígeno.



Fuente: Estrada (2014)

**Figura 7.** Vista de transporte de electrones

Calderon (2017), rendimiento de las celdas microbianas depende de algunos factores y características del consorcio microbiano y la concentración de agua residual. Algunos parámetros vinculados a la operación del sistema, como por ejemplo la gradiente de pH, ocurren el proceso de acidificación en la celda anaeróbica, el potencial de hidrogeno es un indicador clave, esto disminuyendo drásticamente de la actividad microbiana afectando drásticamente a la generación de energía eléctrica. El potencial de hidrogeno es uno de los parámetros relevantes que determina la eficiencia de generación de energía eléctrica. Según resultado obtenidos los microorganismos electrógenos se encuentran en rango de potencial de hidrogeno de 5 a 7. De este modo la disminución del pH en la cámara catódica disminuye de modo relevante la obtención de energía en la CCM. Químicamente se analiza en el comportamiento de pH lo cual puede ocurrir una pérdida potencial en la generación de energía eléctrica, este investigador menciona sobre su importante el uso de soluciones buffers de fosfato.

**2.7.3. Puente salino**

Llantop (2018), también conoce con un nombre común “membrana de intercambio iónico”, cumple la función de transportar la carga iónica desde el ánodo hacia el cátodo esta conexión de la membrana de intercambio de iones cierra el círculo de transporte de electrones, además también evita el paso de oxígeno. a ambos compartimentos

Buitrón y Perez (2011), el puente salino se utiliza en una celda microbiana de doble cámara y es impermeable a los productos químicos utilizados, en componente usado al coste económico y natural es el agar-agar, además esto permite el uso como material los tubos de PVC, sin embargo hay diferentes tipos de compuestos químicos que son utilizados, hay electrolitos de solución ionizada que pueden ser KCL,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ , NaOH, etc. que permite exclusivamente el transporte de los iones de lugar a otro. La ganancia del potencial de salida de la celda de combustible microbiana es directamente afectada a la resistencia interna del puente salino en comparación con una membrana polimérica.

## **2.8. Materiales usados como electrodos en celdas de combustible microbiana**

Ccora (2019), los materiales son muy importantes para cumplir la función de ánodo y cátodo y membrana, estos construyen un desafío tecnológico fundamental tipo de diseño de las celdas microbianas. Algunos trabajos de investigación apuestan a reducir los costos usando materiales con aleaciones de cobre, zinc, grafito, carbón, etc. Para los electrodos. El manejo de las celdas aeróbicas es fundamental, en este proceso de aireación, en muchas investigaciones usaron el método artificial. Los mecanismos de transporte de electrones: transporte directo de electrones vía citocromo de tipo C de la membrana externa, el transporte mediante nano-cables microorganismos y los transportadores solubles. Sus investigaciones con referencia al transporte directa de electrones fueron con microorganismos específicos, estos fueron modificados genéticamente su genoma asociado a la membrana, las bacterias oxidan los azúcares a  $\text{CO}_2$  lo cual permite recuperar el 80% de electrones transportados en corriente eléctrica.

El rendimiento de las celdas microbianas depende de muchos factores y materiales empleados en su construcción. Materiales usados en el proceso constructivo, electrodos usados como platino, grafito y acero inoxidable. Los materiales usados como platino presentan mayor actividad catalítica. Mientras el uso de aleaciones afecta directamente al consorcio microbiano, los costos son muy elevados. A consecuencia de los costos los investigadores utilizaron materiales comunes con acceso al mercado lo cual es relevante, sin embargo, es conocer sobre la funcionalidad del equipo y el control adecuado de los parámetros que están directamente relacionados también es preciso mencionar sobre la intervención de microorganismos electrogénicos. Armas et al. (2014), en los trabajos de investigación se ha

vinculado con tipos de microorganismos con los materiales que conforman el ánodo y cátodo, para construir las celdas de combustible microbianas, tal como se resume en la tabla 1.

**Tabla 1.** Materiales usados como ánodo y cátodo (CCMs)

<b>Microorganismos</b>	<b>Diseño de celdas</b>	<b>Materiales “Ánodo”</b>	<b>Materiales “cátodo”</b>	<b>Resistencia</b>
<i>RH odopseudomonas palustris DX-1</i>	Cátodo aireado	Cepillo de grafito	Tela de carbono	1000
<i>Ochrobactrum anthropi YZ-1</i>	Celda en forma de U	Tela de carbono	Fibra de carbono	1000
<i>Lysinibacillus sphaericus VA5</i>	Dos cámaras	Fieltro de carbono	Fieltro de carbono	100
<i>Citrobacter sp SX-1</i>	Cátodo aireado	Tela de carbono	Tela de carbono	1000
<i>Geoalkalibacter ferrihydriticus</i>	Dos cámaras	Varillas de grafito	Varillas de grafito	0.2
<i>Lysinibacillus sphaericus D-8</i>	Dos cámaras	Fieltro de carbono	Fieltro de carbono	1000
<i>Comamonas denitrificans</i>	Dos cámaras	Cepillo de grafito	Tela de carbono	1000
<i>Citrobacter freundii</i>	Cátodo aireado	Fieltro de carbono	Papel de carbono	1000
<i>Pseudomonas aeruginosa ZH1</i>	Dos cámaras	Grafito	Grafito	10000
<i>Geoalkalibacter subterraneus</i>	Dos cámaras	Varillas de grafito	Varillas de grafito	0.2
<i>Acidiphilum cryptum</i>	Dos cámaras	Fieltro de carbono	Tela de carbono	500
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Dos cámaras	Fieltro de carbono	Fieltro de carbono	100

<i>Ochrobactrum sp</i>	Dos cámaras	Cepillo de carbono	Alambre de titanio	0.18
<i>Corunebacterium sp</i>	Cátodo aireado	Filtro de carbono	Filtro de carbono	1000
<i>Kocuria rhizophila</i>	Cátodo aireado	Malla de carbono	Malla de carbono	1000
<i>Thermincola ferriacetica</i>	Dos cámaras	Varilla de grafito	Varilla de grafito	-0.06
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Dos cámaras	Filtro de carbono	Filtro de carbono	10000

---

Fuente: Armas et al. (2014)

Armas et al. (2014), en la literatura reportada, las celdas microbianas de doble cámara resultaron ser más eficientes para la generación de energía eléctrica alternativas utilizando microorganismos específicos. El manejo del sistema es sencillo, la configuración de materiales y diseños, así como la disposición de tres electrodos y semiceldas, los diseños son variados:

### 2.8.1. Sustrato

Gretel (2016), el sustrato es de gran importancia para cualquier proceso biológico, el sustrato contiene diversos componentes dependiendo de su procedencia de este medio. El sustrato es definido lo cual puede orgánico o mineral que puede ser colocado en un contenedor ya sea pura o mezcla. El material orgánico es considerado los factores más importantes en la implementación de las celdas microbianas, gran variedad de sustratos puede usarse como: compuestos puros, sustratos simples, complejos de acuerdo con la procedencia de las aguas residuales, hay dos formas para seleccionar el sustrato sintético y natural. Estos son considerados por las reacciones enzimáticas que ocurren en las celdas de combustible microbiana. sin embargo, algunos autores han reportado lo contrario inversamente en la densidad de potencia en las concentraciones, el comportamiento de este sistema se puede dar por los siguientes mecanismos: un incremento de la fermentación enzimática y otro el sustrato usado para el incremento de las bacterias no electrógenas, lo cual no suman como fuente de generación de corriente eléctrica.

Revelo et al. (2013), el material orgánico usado en celdas de combustible microbiana, algunos parámetros pueden afectar a la obtención de corriente eléctrica, también algunos favorecen al crecimiento de diferentes colonias microbianas. En la tabla 2 se observa el listado de sustratos utilizados en las celdas de combustibles microbianas para generar energía eléctrica, aunque es difícil comparar los resultados en ellas, debido a las diferentes condiciones de operación, superficie, electrodo y microorganismos involucrados en cada tipo de sistemas usados.

**Tabla 2.** Sustratos utilizados en celdas de combustible microbiana

Sustrato	Tipo de ccm	Pmax (Mw/m <sup>2</sup> )
Glucosa	Doble cámara	283
Suero de queso	Doble cámara	42
Desperdicios de Alimentos Con aceite de palma de acetato de efluentes	Doble cámara	207.2
Lixiviados	Doble cámara	20.9
Basura compuesta de alimentos	Doble cámara	107.89
Farmacéutica Aguas Residuales	Doble cámara	177.36
Colorantes Azo	Doble cámara	
Las heces humanas de Aguas Residuales	Doble cámara	70.8
Las aguas residuales penicilina sintético con glucosa	Doble cámara	101.2
Aguas residuales de papel	Doble cámara	125
Aguas Residuales Lácteos	Cámara simple	25
Aguas Residuales de Cervecería y panadería	Cámara simple	10
Aguas Residuales de destilerías	Cámara simple	245.34
Los lodos de depuradora	Tubular MFC	73
Efluente del clarificador primario	Cámara simple	13
Aguas residuales de destilería de alcohol	Cámara simple	1000
Aguas residuales de agricultura	Cámara simple	13
Aguas residuales domésticas	Cámara simple	42
Aguas residuales de Papel	Cámara simple	8
Aguas residuales de alimentos/de leche	Cámara simple	15
Vino Descompuesto	Cámara simple	3.82

Fuente: Revelo et al. (2013)

## 2.9. Remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana

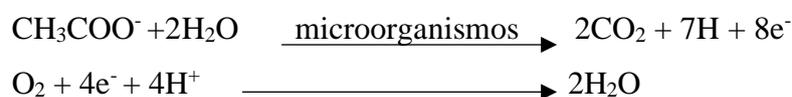
Santamaria (2020) el estudio realizado menciona sobre la presencia de aguas residuales y la cantidad de energía química almacenada en forma de materia orgánica, este componente utilizado para aprovechar la generación de energía. Los investigadores construyeron celda de combustibles microbianas de diferentes procesos electroquímicos, Este material orgánico presente en las aguas residuales se busca como aprovechar como: forma de hidrogeno un proceso que removería la material orgánico de las aguas residuales, en otras investigaciones se implementó las bioceldas que usa agua residual como combustible, existen diversidad de tratamiento primario para el tratamiento de la materia orgánica, sin embargo durante las pruebas de los prototipos lograron remover el material orgánico y a la vez la obtención de corriente eléctrica en celdas de combustible microbiana de las bacterias son capaces de oxidar la materia orgánica y obtener corriente eléctrica. Los investigadores de Bioelectroquímica de departamento de ingeniería química, han conseguido mejorar el rendimiento energético de las celdas de combustible microbiana, los resultados obtenidos a nivel laboratorio son muy prometedores y demuestran que estos sistemas tendrían un nicho de mercado a escala industrial, otros científicos han utilizado aguas reales en reemplazo de agua sintética muy biodegradables, los resultados han sido muy positivos logrando obtener 0.8 voltios estos resultado nos dan la idea de generar aún más energía a partir de la sustracción del material orgánico, este combustible se desperdicia en gran magnitud dañando al ecosistema acuático.

Valencia (2018), la materia orgánica se encuentra en gran magnitud en las aguas residuales de las diferentes procedencias, es una fuente potencial biológica y abundante para la generación de energía renovables, la obtención de corriente eléctrica a partir de la remoción de materia orgánica, esta materia orgánica de aprovecha con la inserción de microorganismos electrógenos con .os parámetros controlados se encuentran variedad de energía química y estos serán convertidos a energía eléctrica en algunas ocasiones sin ningún tipo de mediadores en las celdas microbianas.



La generación de corriente eléctrica está directamente relacionada con la capacidad de las bacterias para oxidar el sustrato y luego transferir estos electrones mediante el

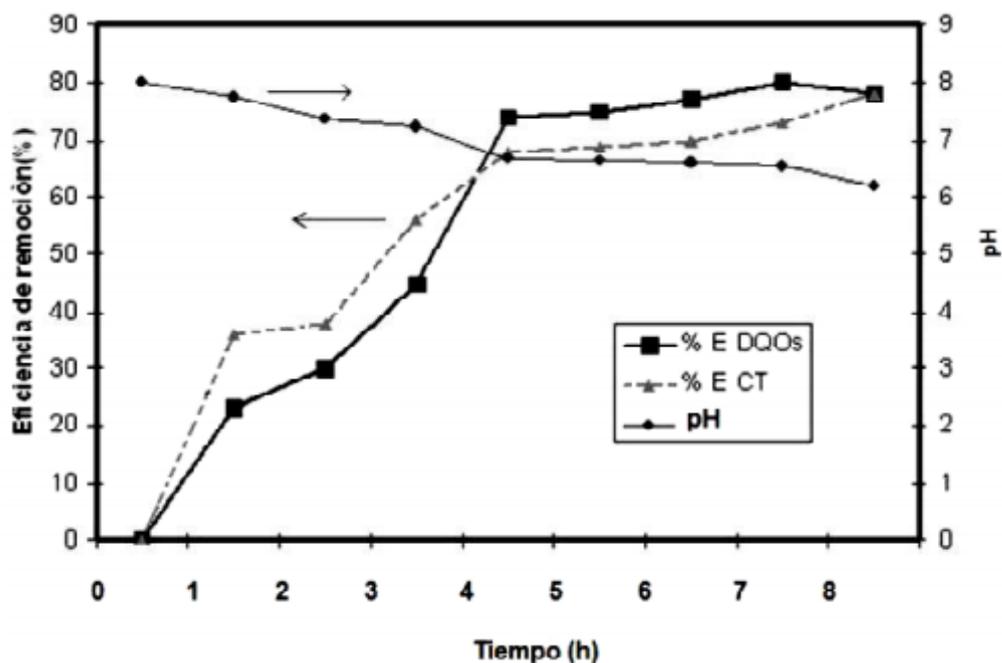
conductor externos. Se encuentra en gran diversidad de materia orgánica en el agua residual, en el siguiente ejemplo se visualiza la reacción anódica y reacción catódica.



Los sustratos son componentes principales para el crecimiento de comunidad bacteriana muy diversa y electroquímica activa, sin embargo, los sustratos se degradan con mayor facilidad, aumentando así la producción de energía eléctrica.

Buitrón y Perez (2011), menciona que las bacterias obtienen la energía, y a la vez captan energía para la supervivencia, la obtención de energía mediante celdas de combustibles microbianas a partir de los microorganismos como fuente de energía, bajo las condiciones adecuadas. Mediante el mecanismo de oxidación-reducción a través de comportamiento microbiano. En una CCM, los electrones son captados por ánodo que han sido liberados por la actividad metabólica de los microorganismos y transferidos por el conductor externo hacia un cátodo. Los electrones obtenidos en la reacción y son “cosechados” y convertidos conjuntamente en corriente eléctrica. Además, los países desarrollados siguen investigando estas tecnologías de generación de energía eléctrica en función a la remoción de la materia orgánica. Este trabajo de investigación es adaptado a las condiciones favorables de la zona. Teniendo en cuenta la gran diversidad de sustratos que intervienen en el proceso y aprovechamiento de distintas rutas metabólicas para transportar electrones y generar electricidad. Los microorganismos son una fuente primordial que podrían contribuir al desarrollo de CCMs, empleando diferentes microorganismos y el manejo minucioso de los parámetros de las bacterias que se encuentran en forma natural y abundante. Además, se puede deducir la construcción de celdas microbianas a mayor escala profundizando sobre la arquitectura. En su investigación realizada sobre cinética de la degradación del sustrato ha sido, medido como carbono orgánico total (COT). El promedio de la degradación del carbono fue de 71%, generando de 532 a 660mV de energía eléctrica.

%. La remoción del carbono orgánico total al potencial eléctrico en función a la variación del potencial de hidrógeno, en cada uno de los tratamientos evaluados siendo buen resultado, como muestra en la figura 8.



Fuente. Buitrón y Perez (2011)

**Figura 8.** Remoción de materia orgánica y carbono orgánico total en función al pH

Huang et al. (2011), menciona sobre algunos modelos matemáticos usado para verificar la degradación de la materia orgánica, sin embargo, la generación de energía mediante la oxidación de la materia orgánica es variable es en función de los diferentes sustratos, procedencia y el control de los parámetros que son muy importantes en el proceso de obtención de energía eléctrica.

Revelo et al. (2013), indica sobre el uso de los microorganismos que son capaces de generar energía eléctrica durante un tratamiento de aguas residuales, comprobando en función a la materia orgánica presente en las aguas residuales, que son componentes muy importantes durante la implementación de celdas de combustible microbianas, que son dispositivos que no necesitan alto coste económico durante la fabricación de estos dispositivos, entonces ya habiéndose experimentado este prototipo indica del uso de microorganismos específicos parámetros y condiciones adecuadas para su rendimiento.

Cardenas et al. (2022) en su investigación menciona sobre las tecnologías implementadas en las celdas de combustible microbianas, recopilando información de los investigadores considera aún falta mucho por investigar de las diferentes magnitudes sobre la

remoción de materia orgánica de las aguas residuales industriales y urbanas que contienen contaminantes, los cuales son componentes biodegradables para la generación de energía eléctrica. En su trabajo de investigación realizó una revisión de las celdas de combustibles microbianas que concluyó los principios de su operación, comportamiento de este dispositivo en función a la generación de energía eléctrica, ya siendo utilizados en diferentes investigaciones resultando eficiente en la eliminación del material orgánico. Se analizaron con respecto al resultado obtenido las ventajas de las celdas de combustibles microbianas como una estrategia eficaz para reducir el porcentaje de materia orgánica en las aguas residuales y reducir la contaminación de las fuentes acuáticas, este sistema es favorable para las empresas que presentan residuos contaminantes como la materia orgánica.

## **2.10. Residuos líquidos de la industria de cacao (mucílago de cacao)**

### **2.10.1. Composición química del mucílago del cacao**

Márquez et al. (2015), el mucílago de cacao es un medio apropiado que contiene las cualidades para el crecimiento de microorganismos, este contiene alrededor de 14 – 15% de azúcares, dentro de los cuales 60% es sacarosa y 39% mezcla de glucosa y fructosa, además contiene alrededor de 80 a 90% de agua, 2 a 3% de pectinas, 1 a 3% de ácidos cítricos y alrededor de 1% de sales minerales.

Abarca (2010), el mucílago de cacao contiene 8,25% de cenizas, 18,51% de proteína cruda 2,38% de grasa cruda 23,15% de fibra cruda y 47,71% de extracto libre de nitrógeno en la testa. Ese residuo es una sustancia blanca, pegajosa y carnosa que rodea los granos del cacao dentro de la vaina. Con este compuesto se va investigando para realizar diferentes productos artesanales como bebidas, licores, etc. además este componente presenta diferentes residuos como azúcares, proteínas, carbohidratos, lípidos, etc. El contenido de potencial de hidrógeno del mucílago del cacao varía de 3,2 a 3,7 por el grado de acidez contaminan a los principales cauces ocasionando daños al ecosistema acuático además la toxicidad es capaz de causar algunas enfermedades a los seres humanos, así mismo los mohos con capacidad de crecer rápidamente y poseen alta carga enzimática, estos degradan los compuestos de contenido alto peso molecular y utilizan como energía para cubrir los requerimientos de su metabolismo, su óptimo crecimiento adecuado en una temperatura de 20 a 25°C, y tienen mucha exigencia en la adecuación del pH.

Villarroel et al. (2020), los estudios realizados muestran que la concentración de demanda química de oxígeno (DQO) se ubica entre 7000 y 12000 mg/L con un pH de 3.8 del mucilago del cacao. La disminución del pH o acidificación del agua pueden tener efectos marcados sobre cada uno de los niveles de organización de la materia viva y provocando desequilibrios ecológicos.

Vera et al. (2014), normalmente se desperdician 120 a 170 l/tn por tonelada aproximadamente de este mucilago. En Perú no existe la industrialización de mucilago del cacao usan como herbicida. El aprovechamiento del agua residual y subproductos cada vez es más relevante, por la oportunidad de impulsar un desarrollo sostenible, no solo evita la contaminación de fuentes hídricas también permite alcanzar en aprovechamiento de este recurso como fuente de ingreso alternativo.

Mantilla et al. (2017), la asamblea general de naciones unidas ratifico el 2017, que, en la agenda a celebrar por el día mundial del agua, debe plantearse los tratamientos. En ese sentido busca concientizar sobre la contaminación de las aguas. Las aguas contaminadas ocasionan daños severos a la salud humana y a los ecosistemas, cada año son vertidas millones de aguas contaminadas de las diferentes industrias urbanas pecuarias son directamente vertidas a la fuente receptora, con esta agenda se busca prevenir la contaminación de los principales causes del cuerpo receptor de las cuencas.

Rojas y Rojas (2017), la caracterización fisicoquímica del mucilago de cacao, que realizó con fines de elaboración de bebida no alcohólica proteínas 0.08%, grasas, 0.028, hidratos 4.95% , pH 3.4 a 3.9 solidos solubles 13.4%, glucosa 2.93 g, energía total 60.37 kcal, esta caracterización de la materia prima es fundamental para conocer los componente presentes de este medio, además este procedimiento es cumple un rol para conocer sus propiedades como contaminantes que puede afectar a los diferentes medios ya que este residuo es liberado a las quebradas o ríos y estos pueden afectar daños al ecosistema por su alto rango de acidez.

Hernandez et al. (2011), el cultivo de caco presenta diversas potencialidades actualmente los agricultores dependen únicamente demanda de las almendras de cacao esto significa que solo el 20% del fruto aprovechado y el resto desecha, del resto el 80% comprende entre mazorca, mucilago y placenta. Estos recursos desaprovechados faltan de orientación y

capacitación de estas potencialidades a los agricultores. Si embargo al no ser aprovechados se convierten en problemas ambientales, generando perturbación y contribuyen al deterioro al ecosistema acuático. En su investigación determina sobre los tipos de usos del mucilago, en la actualidad se va usando de diversas formas como: uso en bebidas, algunos en la misma agricultura como herbicidas.

Santana (2017), en su investigación realizada menciona sobre la formación del mucilago de cacao, la caracterización del mucilago realizo con fines de elaboración de bebida hidratante, estos contienen polisacáridos celulósicos que contiene el mismo número de azúcares en las gomas y pectinas. Diferenciándose, estas gomas son voluminosas cuando entran en contacto con el agua llegan a formarse coloidales, este compuesto es muy ácido por la presencia de ácido cítrico, gracias a ello se puede realizar sus derivados como la jalea, mermeladas, bebidas, etc. El mucilago contiene alrededor de 14 a 15% luego el 60% es de sacarosa y 39% la combinación entre glucosa y fructuosa en mayor proporción encontrada es un 80 a 90 % de agua un pH de 3 a 3,5. En la siguiente tabla se muestra algunos parámetros y componentes:

**Tabla 3. Composición química del mucilago del cacao**

Parámetro	Cantidad
Agua	79,20 – 84,20 (%)
Proteína	0,09 - 0,11 (%)
Hidratos de Carbono (Azúcares	14 - 15 (%)
Pectinas	0,90 - 1,19 (%)
Cenizas	0,40 - 0,50 (%)
Ácido cítrico	0,77 - 1,52 (%)
pH	3 – 3,5
Sodio	161,85 mg/L
Potasio	462,9 mg/L
Calcio	169,21 mg/L

Fuente: Santana (2017)

### **2.10.2. Agua residual durante la fermentación del mucilago**

Abarca (2010), en el proceso de fermentación del mucilago es muy importante para el proceso de exudado, luego de las reacciones químicas y bioquímicas, mediante la presencia de los azúcares se transforman por la acción metabólica como son: Alcohol etílico, ácido acético, entre otras sustancias. Para el fermento afecta múltiples factores. la variación de este ocurre por la diversidad de microorganismos presentes en el mucilago.

## **2.11. Propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales industriales**

### **2.11.1. Temperatura (T°)**

Según Delgadillo et al. (2010), la temperatura media de las aguas residuales, se hallan en el rango entre 10 y 21°C, en tanto los microorganismos aerobios se desarrollan entre los 25 y 35°C.

Revelo et al. (2013), los procesos anaerobios, señalando al interior de los reactores, los microorganismos se desarrollan en el rango de temperatura entre 24 y 37°C, los parámetros cumplen una función muy importante para el desarrollo de las bacterias electrógenas.

### **2.11.2. Potencial de hidrógeno (pH)**

Romero (1998), el potencial de hidrogeno es un parámetro indispensable que verifica el comportamiento de iones hidróxido y oxidrilo del agua, es un parámetro para determinar la calidad del agua, comúnmente el agua tiene un medio básico con valores de pH correspondidos entre 6.5 a 8.5.

### **2.11.3. Sólidos totales disueltos (STD)**

La cantidad de sólidos en suspensión se expresa en mg/L y pueden ser separados por medios mecánicos Seoanez (1999), estudios realizados en aguas residuales municipales por coronel (2016), en sistemas biológicos flotantes de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, muestran una remoción de solidos totales disueltos (STD) equivalente a 95.79% y 78.92% respectivamente.

### **2.11.4. Oxígeno disuelto (OD)**

Moscoso et al. (1996) menciona que el oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua. Los valores normales varían desde 7 a

9mg/L que son adecuados para la mayoría de los peces y otros organismos acuáticos. La temperatura es muy relevante, porque depende de ello es la concentración del oxígeno disuelto.

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

Saavedra (2012), mide la cantidad necesaria para degradar el material orgánico de una muestra acuosa. Es la muestra líquida, disuelta o en suspensión por lo tanto recomienda hacer diluciones previamente preparada de acuerdo la cantidad de materia orgánica como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4.** Diluciones recomendadas para valores esperados

Volumen de la muestra (mL)	Rango de DBO	Volumen de la muestra (mL)	Rango de DBO
0.02	30,000-105,000	2	300-1,050
0.05	12,000-42,000	5	120-420
0.1	6,000-21,000	10	60-210
0.2	3,000-10,500	20	30-105
0.5	1,200-4,200	50	12-42
1	600-2,100	100	6-21

Fuente: Saavedra (2012)

#### 2.11.6. Demanda química de oxígeno (DQO)

Saavedra (2012), el oxígeno equivalente para oxidar la materia orgánica. Normalmente, la DQO debe ser mayor que la DBO ya que hay mayor número de compuestos susceptibles de ser oxidados por vía química frente a la vía biológica.

#### 2.11.7. Carbono orgánico total (COT)

Saavedra (2012), la cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera al oxidarse la materia orgánica en condiciones específicas, además dentro de la materia podemos encontrar sustancias en gran cantidad proteínas y en menor cantidad hidratos de carbono y grasas.

#### 2.11.8. Materia orgánica

Moscoso (2011), está compuesta por miles de componentes partículas macroscópicas, coloidales o macromoléculas disueltas también hay grupos de

sustancias orgánicas presentes en las aguas residuales es 40 a 60% son componentes proteicos, de proteínas, 25 a 50 % de carbohidratos, 10% de grasas, aceites y urea. Tenemos algunas características de materia orgánicas, los componentes es la combinación de hidrogeno, carbono y oxígeno en algunas ocasiones con presencia de nitrógeno. La agroindustria hace uso de demanda de agua en los diferentes procesos productivos la producción agrícola puede aumentar y el contenido de maría orgánica y de nutrientes

### A. Proteína

Las proteínas son principales componentes de origen vegetal y animal que contiene proteínas: son los principales componentes de diferentes orígenes estos están sometidos a la descomposición de proteínas contienen carbono, oxígeno, hidrogeno, además de una proporción bastante elevada y constante de nitrógeno (aireador 16%).

### B. Carbohidratos

Los son biomoléculas que también toman nombre de hidratos de carbono, glucósidos, azucares a su vez están formados por tres elementos fundamentales carbono hidrogeno y oxígeno, también hay presencia de azucares solubles e insolubles presencia de almidón (almidón), estos compuestos azucarados son uno de los elementos importantes en todos los seres vivos.

**Tabla 5.** Materia orgánica común en agua residual industrial

Elemento	Relación con el agua residual
Hidrógeno (pH)	La concentración idónea o indicador clave para la vida acuática en las aguas residuales de contenido adverso de ion de hidrogeno es una concentración adversa inadecuada para tratar por medio biológico
Cloruros	Es un elemento que se puede encontrar en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, proceden de la de composición de suelos y rocas. Esto se evalúa mediante el cloro residual y total en el agua.
Nitrógeno	Es un componente o elemento esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Básico para síntesis de proteínas.
Fósforo	Es un elemento propio del componente algal, que puede ocasionar un problema ambiental generando así la eutrofización

### **III. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1. Descripción de área de trabajo**

##### **3.1.1. Lugar de ejecución del proyecto**

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco.

##### **3.1.2. Ubicación geográfica**

Geográficamente el laboratorio de Calidad del Agua se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas UTM (E: 390701 m. y N: 8970221 m); a una altitud de 648 msnm, dentro del empalme Tingo María hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico del Perú.

##### **3.1.3. Características ambientales**

Holdridge (1982), la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo y el diagrama bioclimático, Tingo María se encuentra en la formación vegetal bosque muy húmedo Premontano Tropical bmh-PT, región de la selva alta o Rupa Rupa. Hidrológicamente pertenece a la cuenca del río Huallaga. El comportamiento climático es variable, con una precipitación anual promedio de 3328.9mm, las mayores precipitaciones se producen de setiembre a abril y alcanza el máximo en el mes de febrero.

#### **3.2. Materiales y equipos**

##### **3.2.1. Materiales**

Los materiales usados durante la ejecución del proyecto de investigación fueron: Papel filtro, tubos de PVC, codos de PVC, vaso de precipitación, matraces, electrodos (placas de zinc y cobre), silicona, cúter, teflón, botellas de plástico con capacidad de 2,5L (botellas de polietileno), embudos de vidrio, balde, jarra, mangueras de suero, cables con pinza cocodrilo, agua destilada, cables de cobre (para unir circuitos de cada celda), mallas, colador de plástico, botellas de vidrio, tarros de vidrios, corta fierro, flexómetro, regla, guantes quirúrgico, guantes de tela, cuaderno de apuntes, bolígrafo de tinta indeleble, taladro, tablas,

serrucho, bisagra, pegamento para madera, clavos, martillo, alicate, plástico de color negro, chinches, cola, laca.

### **3.2.2. Reactivos**

- Hidróxido de sodio
- Agar-agar

### **3.2.3. Equipos**

Incubadora para DBO, oxímetro marca HANNA modelo-HI 9146, medidor multiparámetro- marca HANNA, modelo HI2550, balanza analítica- marca Ohaus 0-200g, termómetro ambiental- marca themos Scientific, Multímetro digital – TRUPER modelo MUT-830.

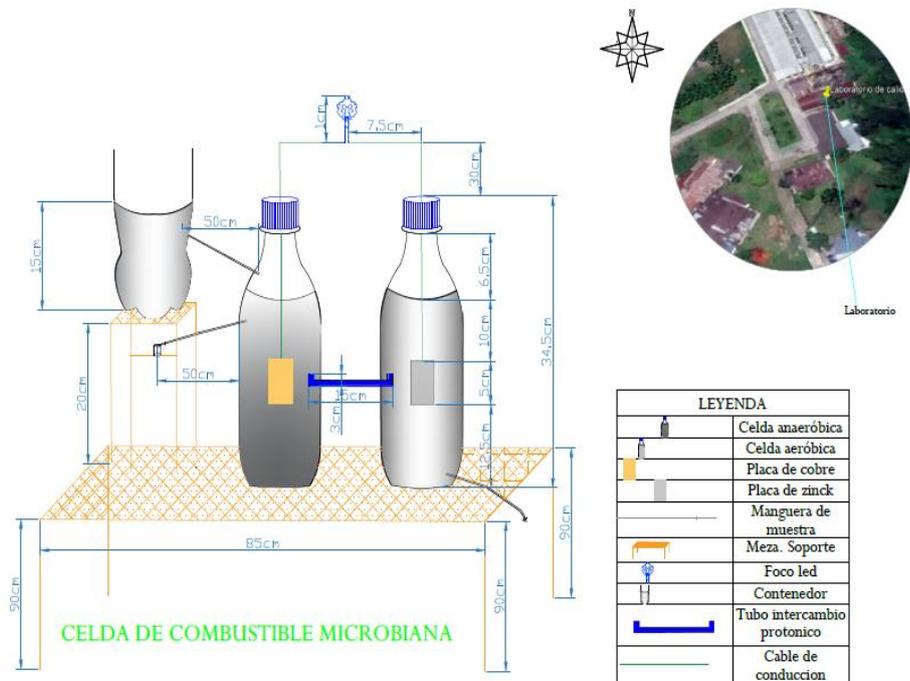
### **3.2.4. Software**

- Microsoft Word v. 2016.
- PowerPoint v. 2016.
- Excel 2016
- Info stat.

## **3.3. Metodología**

### **3.3.1. Diseño del equipo**

En concordancia con Logan et al. (2006) se diseñó con la finalidad de evidenciar el funcionamiento y la obtención de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbiana. Los electrodos conformados de placas de cobre 5cm x 3cm y placas de zinc respectivamente se introdujeron en cada una de las 4 celdas (botellas de polietileno). Las celdas de doble cámara en forma de H, conectadas por medio de un tubo que contiene de una membrana selectiva Agar-agar cada celda de combustible con una capacidad de 2,5L. Luego se realizó las mediciones de los parámetros correspondientes después de un periodo de 24h, en la muestra extraída de los efluentes de la cooperativa agroindustrial alto Huallaga, siguiendo los procedimientos para la propagación de microorganismos, como fuente de energía.

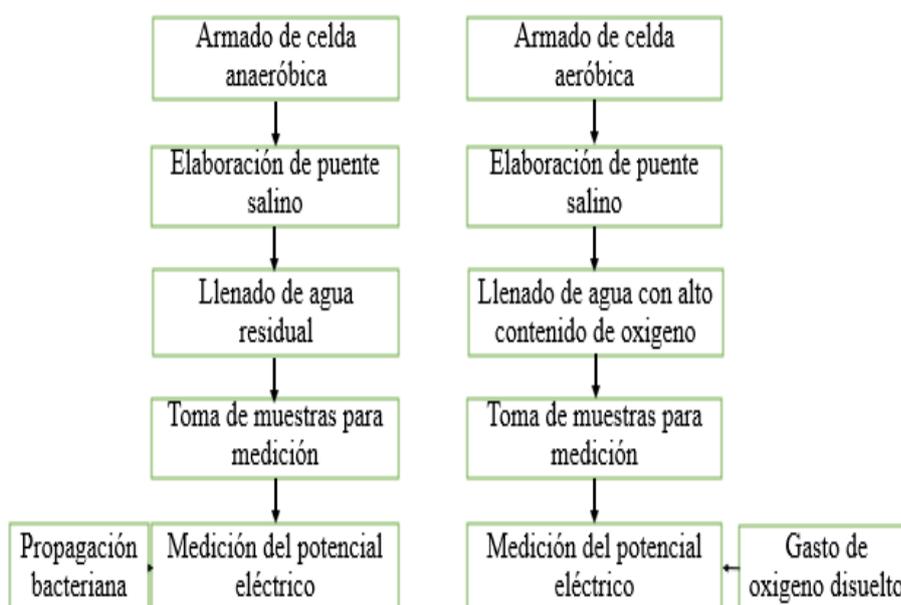


**Figura 9.** Diseño experimental en celdas de combustible microbiana

Además, el puente salino fue diseñado con tubos y codos de PVC que contiene agar agar, papel filtro y la caja hermética es para mantener la temperatura estable, las referidas celdas se instalaron dentro de una caja hermética.

### 3.3.2. Flujograma de operación de las celdas de combustible microbiana en la generación de energía eléctrica

El flujograma de operación se realizó de la siguiente manera: Luego de la construcción de las celdas cada uno con sus respectivos electrodos en las celdas anaeróbicas y aeróbicas y el puente salino, se procedió al llenado de agua residual a la celda anaeróbica mientras en la celda anaeróbica se llenó del componente líquido con alto contenido de oxígeno disuelto y las respectivas mediciones de potencial de hidrogeno, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto y el potencial eléctrico, se realizó la evaluación de los parámetros en 24, 48 y 72 horas durante la duración de la investigación. A mayor detalle se observa en la figura 10.



**Figura 10.** Flujograma de operación en dos celdas, o doble cámara.

### 3.3.2.1. Extracción de la sustancia mucilaginosa del cacao

La muestra extraída fue 20 litros, luego se trasladó al lugar donde se ejecutará el mencionado proyecto al laboratorio de calidad del agua de la Universidad Nacional agraria de la selva luego paso la homogenización por un tiempo 24 horas con la finalidad de lograr la propagación de los microorganismos anaeróbicos. Para el traslado de microorganismos de un lugar a otro necesitan condiciones favorables, si no son tomados en cuenta estos factores, sufren alteraciones, mutaciones y algunos mueren.

### 3.3.2.2. Adecuación de los microorganismos para su propagación

La propagación de los microorganismos electrógenos bajo ciertos parámetros controlados, estas celdas se sellaron herméticamente, regulando el pH de 5 a 7 con el hidróxido de sodio en cada una de las celdas microbianas, este parámetro es fundamental para la propagación de los microorganismos electrógenos permitiendo propagarse y colonizándose entre sí

### 3.3.3. Determinación de parámetros de la sustancia mucilaginosa del cacao

Los parámetros evaluados a 24, 48 y 72 horas en las distintas celdas y las muestras de testigo se evaluaron 17 días, se detalla en la tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros por evaluar relacionados con la celda de combustible

Testigo - T1 - T2 - T3			
Parámetros	E1	E2	E5
Temperatura (°C)			
Potencial de hidrogeno (pH)			
Potencial eléctrico (mv)			
Oxígeno disuelto mg/L			
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)			

Testigo,1,2,3 = Tratamientos; E0, 1...6 = Medición de parámetro respecto a los días; milivoltios (mV)

### 3.3.3.1. Medición del potencial eléctrico (mV)

Este parámetro se ha medido con un multímetro digital marca TRUPER- 830, en milivoltios en cada uno de los tratamientos, la medición se realizó en la unión de los puntos del ánodo y cátodo se midieron cada 24 horas.

### 3.3.3.2. Determinación de temperatura

La medición de la temperatura en grados Celsius (°C), se realizó en el laboratorio de microbiología con el multiparámetro (HANNA HI2550), de acuerdo con la norma estándar: *Methods for the Examination of Water and Wastewater* parte 4500 - OG (APHA, 2005).

### 3.3.3.3. Determinación de pH

La determinación del pH se realizó de acuerdo con el método a la norma *Methods for the Examination of Water and Wastewater* parte 4500-H+ - B, (APHA, 2005). Utilizando el multiparámetro HANNA HI2550.

### 3.3.3.4. Determinación de oxígeno disuelto (OD)

Se realizó por el método electrométrico, utilizando el Oxímetro (OD HANNA HI 8424), siguiendo el estándar *Methods for the Examination of Water and Wastewater* parte HI 9146 APHA-2005).

### 3.3.3.5. Determinación de la demanda biológica de oxígeno

Para determinar la DBO<sub>5</sub> se ha medido tomando como referencia la metodología descrita por Ramalho (1998). La temperatura escogida para determinar el valor de DBO es de 21°C ± 1°C; la ecuación que establece la DBO<sub>5</sub> es:

$$DBO_5 \frac{mg}{l} = OD_m - OD_{wo} * \left(\frac{vb}{vm}\right) + (OD_{wf} - OD_f) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

OD<sub>m</sub>: Concentración de oxígeno disuelto de la muestra inicial

OD<sub>f</sub>: Concentración de oxígeno disuelto final

OD<sub>w</sub>: Concentración de oxígeno disuelto del agua de dilución

Vb: Volumen de la botella de DBO, (500 mL)

Vm: Volumen de muestra inoculada en mL

### 3.3.4. Tasa de remoción de la carga orgánica

Se midió la remoción de la materia orgánica, en cada uno de los tratamientos según la ecuación 2 de Ramalho (1998)

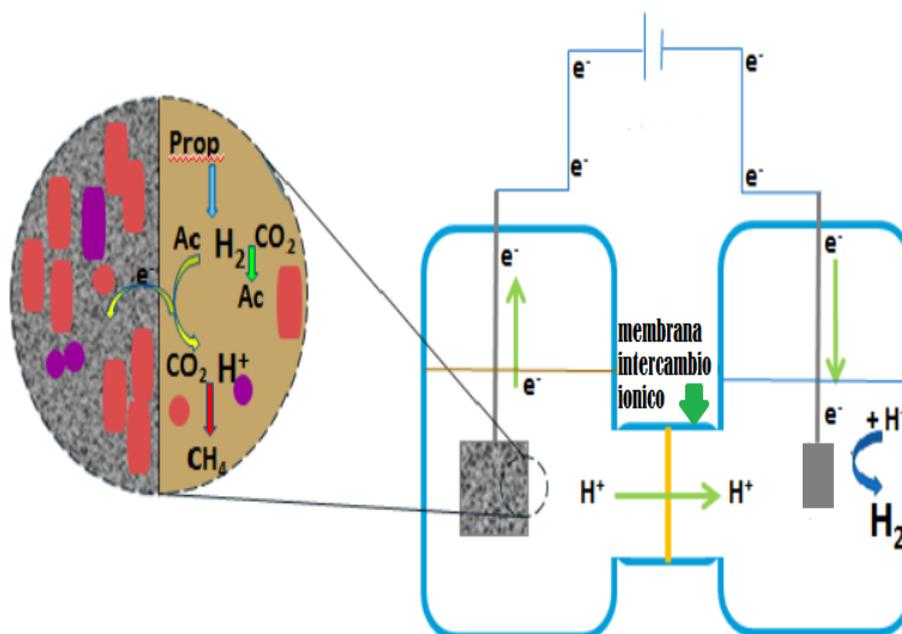
$$\text{Remoción (\%)} = (C_i - C_f) * 100 / C_i \dots\dots\dots (2)$$

C<sub>i</sub>: Concentración inicial de la carga orgánica

C<sub>f</sub>: Concentración final de la carga orgánica

### 3.3.5. Celda anaeróbica

Los electrones fueron producidos por la actividad metabólica dentro de la celda anaeróbica, siendo este un huésped para los microorganismos electrógenos. Estos electrones son captados mediante los electrodos de cobre (placas de cobre 5cm x 3cm y placas de zinc), tomado como referencia a la propuesta por Logan et al. (2006). Adaptada y de doble cámara (en forma de H), que consiste en dos compartimentos, es decir cátodo y ánodo estos están conectados mediante un tubo que contiene una membrana de intercambio iónico. En esta cámara ocurre la depuración de aguas residuales mediante el proceso metabólico de los microorganismos.



Fuente: Logan et al. (2006)

**Figura 11.** Estructura de una celda de combustible microbiana

### 3.3.6. Determinación de oxígeno en cámara aeróbica en función al potencial eléctrico

En la celda anaeróbica se producen electrones y protones. Los iones de hidrogeno migran hacia la cámara catódica a través del separador también membrana de intercambio de iones Liu et al. (2004), menciona la presencia de oxígeno en la celda aeróbica donde se combinan con el oxígeno del aire para producir agua, esta reacción no está catalizada por microorganismos o compuesto químico. En este trabajo siendo una de las prioridades mantener con alto contenido de oxígeno, mediante los procesos fotosintéticos.

Este proceso se evaluó en periodos de 24, 48, 72 h, el llenado del agua con alto contenido de oxígeno disuelto y el testigo, donde en este no se cambió de agua durante el tiempo de operación, este proceso es realizado para contrastar si el oxígeno disuelto es indispensable en el rendimiento del potencial eléctrico. Y posteriormente se realizó el análisis estadístico para cada parámetro.

### 3.3.7. Determinación de efectos en la energía producida

Para la determinación de los efectos de la celda de combustible microbiana en la generación de energía eléctrica, el parámetro medido y evaluado fue el

oxígeno presente en la celda anaeróbica. posteriormente se realizó el análisis estadístico en los tratamientos evaluados.

### **3.3.7.1. Comparación de tratamientos**

Rubina (2017), se realizó la comparación de los tratamientos con respecto a los parámetros evaluados el potencial eléctrico y oxígeno presente en la celda aeróbica través de la prueba de Tukey, este permitió para compararlas medias de los tratamientos luego de haber rechazado la Hipotesis nula, de igualdad de medias en el ANOVA.

### **3.3.7.2. Diseño experimental**

Durante el estudio se estableció un experimento completamente alzar, con tres repeticiones, tres tratamientos y un testigo. Los tratamientos con una capacidad de 2.3L de mucilago de cacao, los cuales se evaluaron en diferentes periodos de tiempo, como 24, 48 y 72h paralelamente al testigo, se evaluaron el potencial eléctrico y la vez la eficiencia de remoción de material orgánico en cada uno de los tratamientos en función al tiempo establecido, en los resultados obtenidos en cada tratamiento en relación con el tiempo, se observaron las fluctuaciones de los parámetros evaluados.

### **3.3.7.3. Diseño completamente al azar**

Con este este diseño se comparó dos o más tratamientos, puesto que solo considera dos fuentes de variabilidad, los tratamientos y el error aleatorio.

Prueba de Hipótesis

Nula ( $H_0$ ): No hay diferencia significativa entre el valor de la energía producida

Alternativa ( $H_a$ ): Si hay diferencia significativa en la energía producida

En la tabla 7, se muestra el diseño experimental para las celdas de combustible microbiana.

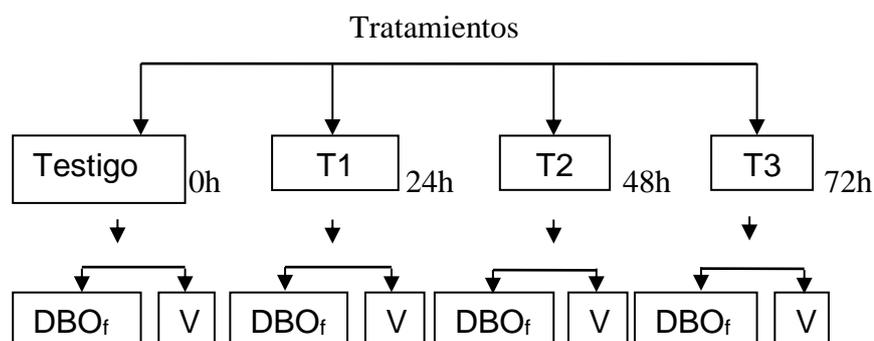
**Tabla 7.** Concentración de oxígeno disuelto en cada uno de los tratamientos

Tratamientos	Concentración de oxígeno disuelto	Repeticiones
Testigo	0(h)	3
24h (T1)	24(h)	3
48h (T2)	48(h)	3
72h (T3)	72(h)	3

\* Tratamiento evaluado en 24 horas (T1, T2, T3)

\*Concentración de oxígeno disuelto evaluado (T1, T2, T3)

Diagrama de flujo durante el proceso de evaluación en cada tratamiento en función al tiempo y de los parámetros



Tratamientos (T1, T2, T3)

Testigo: Agua residual, oxígeno disuelto durante todo el proceso.

T1: Agua residual, oxígeno disuelto en 24h

T2: Agua residual, oxígeno disuelto en 48h.

T3: Agua residual, oxígeno disuelto en 72h.

DBOf: Demanda biológica de oxígeno final en cada uno de los tratamientos.

V: Voltaje evaluado en cada uno de los tratamientos.

**Figura 12.** Diagrama de flujo para la operación.

#### a. Variables independientes

Operatividad de la celda de combustible microbiana con la concentración de oxígeno disuelto en 24, 48 y 72 horas

#### b. Variable dependiente

Generación de energía eléctrica de la sustancia mucilaginosas del cacao

#### c. Variable interviniente

El pH en un rango de 5 a 7.5 donde los microorganismos específicos intervienen en producción de electrones, oxigenación natural mediante procesos fotosintéticos

### 3.3.7.4. Unidades de las variables (SI)

- Temperatura [°C]
- Potencial de hidrogeno [pH]
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) [mg/L]
- SI: Sistema internacional de medida.

## 3.4. Análisis estadístico

Se distribuyeron las variables estadísticas y muestras, con respecto al diseño experimental. Se aplicó el diseño estadístico completamente al azar (DCA), con 3 repeticiones, utilizando el programa estadístico Infostat, a un nivel de confianza del 5%.

**Tabla 8.** Análisis de variancia (ANVA).

<b>F.V.</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fc</b>	<b>signf</b>
Tratamiento	t-1	SC-trat	Sctrat/Glmtrat	Cmtrat/Cm	Fc>Fm
Error	t(r-1)	Scerror/Gl	t		
Total	t.r-1	e			

Los resultados se han analizado mediante prueba estadística de Tukey. De esta manera han quedado los niveles de significancia para un nivel de 5%.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de una industria de cacao

La tabla 9 muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales (mucílago de cacao), pH de 3,8 con una carga orgánica de 220,615 mg/L el oxígeno disuelto 1,84 mg/L, esta carga orgánica será suficiente para producir energía eléctrica en una celda de combustible microbiana. La muestra contenida es de 2,3 litros en cada uno de los tratamientos. La muestra extraída de los efluentes proviene de la cooperativa Agroindustrial Alto Huallaga, arrojando los siguientes datos.

**Tabla 9.** Caracterización del agua residual o sustancia mucilaginosas del cacao y presencia del oxígeno en la celda aeróbica

		ODmg/L	pH	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
Celda anaeróbica	Agua Residual (sustancia mucilaginosa del cacao)	1,84	3,8	220,615
Celda aeróbica	Agua con alto contenido de oxígeno	5,42	6,3	-.*

OD: Oxígeno disuelto

pH: Potencial de hidrogeno

DBO<sub>5</sub>: Demanda biológica de oxígeno

\*No se tomaron en cuenta los valores de temperatura y demanda biológica de oxígeno, esta variable no aporta valor con respecto a los objetivos de la investigación.

#### 4.1.1. Determinación de la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

La tabla 9 muestra el resultado obtenido después de incubar la muestra del agua a una temperatura de 20 °C durante 5 días en la cámara incubadora, obteniendo como resultado de 220, 615 mg/L de la muestra de mucilago de cacao.

#### 4.1.2. Determinación de potencial de hidrogeno(pH)

La tabla 9 muestra el potencial de hidrógeno de 3,8 de la muestra extraída, en comparación con otros estudios realizados dicha variación es mínima, en su investigación Rojas y Rojas (2017) menciona un pH de 3,4 – 3,9 está acides es por diversas fuentes como: ácidos orgánicos débiles tales como el CO<sub>2</sub> disuelto, presencia de ácidos cítricos, estas aguas residuales con su grado de acides, afectan al ecosistema acuático y las principales quebradas y

ríos. El estudio realizado de Logan et al. (2006) determinó el comportamiento del pH en la celda anaeróbica mencionando por reacción iónica las actividades metabólicas de los microorganismos. También indica la velocidad de producción de iones en el ánodo es constante, entonces se deduce que hay diferencia significativa entre ambas velocidades del flujo es continuo y no hay acumulación de estos en la cámara anaeróbica, pero si la velocidad de generación en la cámara anaeróbica supera la velocidad de reacción en la celda aeróbica entonces los iones no se acumulan en la celda anaeróbica tampoco se fermenta y producción de ácidos grasos volátiles (AGVs y otros productos intermediarios. En esta investigación realizada, el pH disminuye paulatinamente (que se reguló aplicando NaOH), el paso de flujo de iones hacia la cámara aeróbica es contante, siendo como indicador la ausencia de fermentación y algunos gases en exceso, el potencial de hidrogeno es manejado en un rango de 6 a 7 en la celda anaeróbica con la finalidad de proliferación de microorganismos electrógenos, Alzate et al (2010), indica que estos microorganismos son denominados (microorganismos entéricos) que estos microorganismos no toleran niveles de pH superior de 7.5 tampoco inferior a 4. Además, por debajo de este ya no son favorables en los sistemas de celdas de combustibles microbianas para generar energía eléctrica. Sin embargo, en las evaluaciones realizadas el pH se evaluó en un rango de 6 a 7. Además, se puede mencionar durante el tiempo de valuación sufre algunas variaciones según las fuentes de información indica es por la naturaleza de la actividad metabólica de los microorganismos.

#### **4.1.3. Oxígeno disuelto (OD) en la celda anaeróbica**

Se observa en la tabla 9 un valor de 1,84 de oxígeno disuelto por mg/L en una muestra de 2,3 litros de mucilago de cacao.

#### **4.1.4. Oxígeno disuelto (OD) en la celda aeróbica**

Se observa así mismo en la tabla 9 un valor de 5,42 mg/L de oxígeno disuelto esta muestra se evaluó en la celda aeróbica.

### **4.2. Cuantificar el oxígeno disuelto necesario para generar energía eléctrica**

En la tabla 10 se observa que es posible generar energía eléctrica a través del agua con alto contenido de oxígeno disuelto (celda aeróbica), los valores obtenidos para la densidad de oxígeno disuelto y el potencial eléctrico obtenido para cada tratamiento varían según el tiempo de exposición en 24, 48 y 72 horas.

**Tabla 10.** Energía obtenida en distintos tiempos de operación del sistema bajo condiciones del oxígeno disuelto.

Tiempo	Celdas	OD mg/L Aeróbica	Energía obtenida (mV)	coeficiente variación de energía	coeficiente variación de oxígeno disuelto celda aeróbica	Coeficiente variación de pH celda anaeróbica
Testigo	Testigo	2.96	262	9.69%	27.18%	1.04%
24 horas	T1	5.36	1 248	50.06%	3.44%	0.45%
48 horas	T2	4.15	765	42.67%	7.60%	0.91%
72 horas	T3	3.43	440	24.43%	17.65%	1.29%

Tiempo de evaluación (24, 48,72horas)

Tratamientos (T1, T2, T3)

OD: Oxígeno Disuelto

mV: Unidad de medida (milivoltios)

pH: Potencial de hidrogeno

Durante la evaluación en el tiempo de exposición de cada tratamiento se observa una relación directa, durante las primeras 24 horas con oxígeno disuelto a un 5,36 OD mg/L genera 1 248 mV, siendo el más eficiente en comparación de los demás tratamientos, en 48 horas con un volumen de 4,15 OD mg/L genera 765 mV y a las 72 horas con un volumen de 3,43 mg/L de oxígeno disuelto genera 440 mV de energía, esto demuestra que cuanto mayor sea el contenido de oxígeno disuelto mayor será la producción de energía (celda aeróbica) y se observa que pasado las 24 horas al disminuir la cantidad de oxígeno también disminuye la producción de energía según las pruebas realizadas a 48 y 72 horas. La generación de energía eléctrica es directamente proporcional al oxígeno disuelto es decir la cantidad de oxígeno presente en la celda anaeróbica influye directamente a la constante producción de energía, en comparación con el trabajo de Buitrón y Pérez (2011) según sus resultados obtenidos fueron 408mV has 660mV Generados, oxigenando la celda anaeróbica con bomba de aire (aireador de pecera) este mecanismos de oxigenación artificial de la cámara aeróbica influye para que los electrones sean liberados y captados. Además, comprobó que a falta de aireación en la cámara aeróbica se produce otros compuestos en la cámara anódica y como consecuencia disminuye el potencial de hidrogeno, en su investigación Jiménez (2018) corrobora sobre el comportamiento del oxígeno como aceptor natural y recomendado debido a la accesibilidad y costo. Sin embargo, se usó componentes oxidantes químicos diferente al oxígeno, por eso siempre será la opción más viable económica debido no requiere el uso de energía es esta celda y no presenta

ninguna toxicidad para la biomasa, es su prototipo usó una celda con los cátodos expuestos al aire y otros en la fase acuosa. Los investigadores evaluaron sobre el uso de energía para la aireación (gasto de energía) se logra alcanzar altas densidades de potencia, usaron diversos aceptores químicos con la finalidad de generar mayor energía como ionferrico permanganato, nitratos, sulfatos, sin embargo se evalúa el costo de adquisición y la toxicidad, concluyen el uso del oxígeno natural para la generación de energía eléctrica incentivan mayor estudio a la celda anaeróbica para la oxigenación.

#### 4.3. Determinar el potencial eléctrico en función a la tasa de remoción de la materia orgánica.

En las tres pruebas evaluadas en diferentes tiempos durante 17 días que duró el proceso, tomando como materia principal el mucilago de cacao en una muestra de 2,3 litros por cada tratamiento, se obtuvieron los siguientes valores en la producción de energía eléctrica:

**Tabla 11.** Producción de energía eléctrica a través de la remoción de materia orgánica en distintos tiempos de operación.

Tiempo de operación	Celdas	DBO <sub>i</sub> (mg/L)	DBO <sub>f</sub> (mg/L)	% Remoción de residuos del mucílago del cacao	Potencial Eléctrico(mV)
Testigo	Testigo	220,615	125,1	43,29	262
24horas	T1	220,615	36,5	83,46	1 248
48horas	T2	220,615	57,4	73,98	765
72horas	T3	220,615	90,48	58,99	440

Tiempo de evaluación de los tratamientos: 24, 48, 72horas

Tratamientos: T1, T2, T3

DBO<sub>i</sub>: Demanda biológica de oxígeno inicial

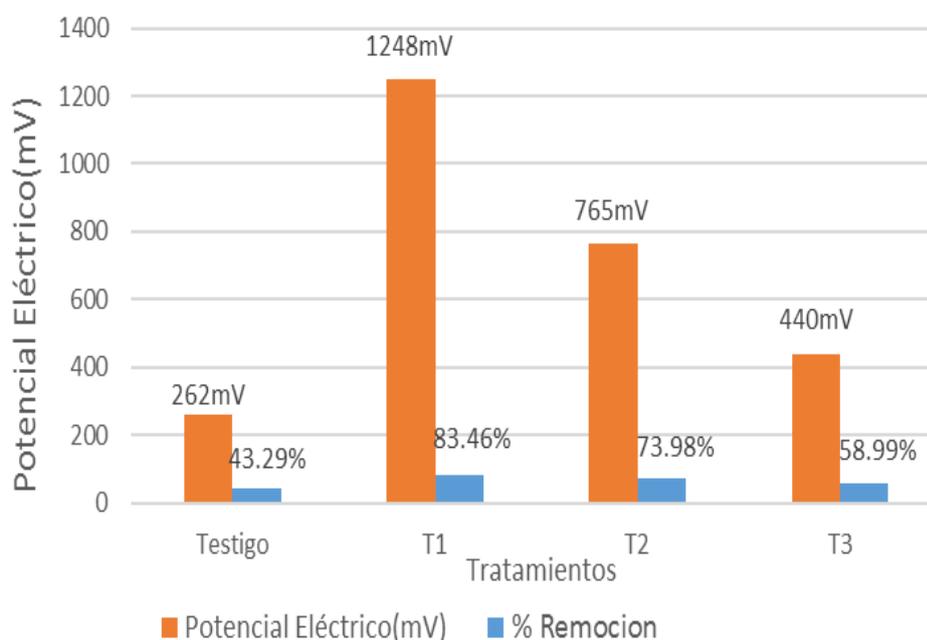
DBO<sub>f</sub>: Demanda biológica de oxígeno final

mV: Milivoltios, unidad de medida

#### A. Remoción de materia orgánica en función al potencial eléctrico en los tratamientos y el testigo.

En la figura 13 muestra la comparación de cada tratamiento. De acuerdo con ello el tratamiento más eficiente corresponde a T1, según el porcentaje de remoción de 83,46% corresponde a la mejor tasa de remoción de materia orgánica, generando un potencial eléctrico de 1 248 mV, en el T2 disminuye a 73,98% generando 765 mV de energía, en el T3

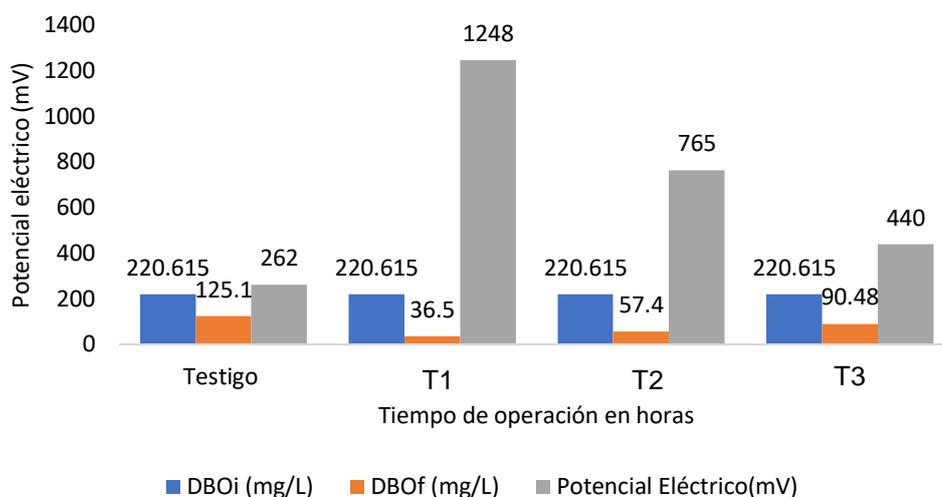
la remoción orgánica es de 58,99% generando 440mv de energía y por último el testigo es de 43,29% produciendo 262 mV de energía eléctrica.



**Figura 13** Remoción de la materia orgánica vs el potencial eléctrico

### B. Demanda biológica de oxígeno inicial y final en los tratamientos.

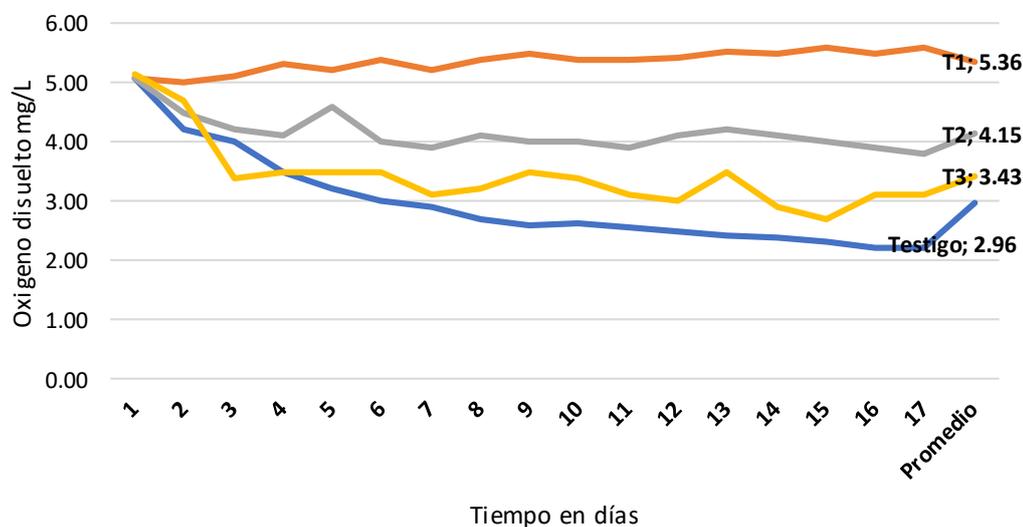
En la figura 14 se muestra la reducción de demanda biológica de oxígeno función de la generación de energía eléctrica. De un total de 220,615 mg/L de demanda biológica de oxígeno, se logró reducir: En el T1, logró reducir 36,5 mg/L de demanda biológica de oxígeno en 24h generando 1 248mV de electricidad siendo el más eficiente, el T2 redujo 57,4 mg/L de demanda biológica de oxígeno, produciendo 765mV, de energía eléctrica y el T3 redujo en 90,48 mg/L de demanda biológica de oxígeno produciendo 440mV de energía.



**Figura 14.** Demanda biológica de oxígeno removida en función a la energía producida

En la figura 14 muestra la remoción del material orgánico, como contaminante inicial, la demanda biológica de oxígeno inicial fue de 220,615 mg/L, en el T1, logró remover 36,5 mg/L de demanda biológica de oxígeno en 24 horas generando 1 248 mV de electricidad siendo el más eficiente, el T2 removió 57,4mg/L de demanda biológica de oxígeno, produciendo 765mV, de energía eléctrica y el T3 removió 90,48 mg/L de demanda biológica de oxígeno produciendo 440mV de energía, Buitrón y Pérez (2011) en su investigación, generaron energía eléctrica con valores entre 408mV has 660mV haciendo prueba de obtención de corriente eléctrica en celdas de combustible microbiana utilizando agua residual, removiendo el 71% de materia orgánica presente en el agua residual. Revelo y Perez (2013), también menciona que el mejor rendimiento adecuado en las celdas de doble cámara doble cámara. Las condiciones ambientales y los parámetros que fueron vitales para su eficiencia, permitieron medir el porcentaje de remoción de materia orgánica, resultando un 70% DBO en cada celda de combustible microbiano si bien es cierto que esta remoción se mide mediante el oxígeno disuelto y trabaja con celda de doble cámara, también prescinde el uso de membrana de intercambio iónico. Los resultados de la remoción de materia orgánica presentan más de un 50%, siendo buenos resultados.

#### 4.4. Consumo de oxígeno disuelto en la cámara aeróbica en el tiempo de operación



**Figura 15.** Comportamiento del oxígeno disuelto en la cámara aeróbica en función al tiempo

En la figura 15 se reporta el comportamiento del oxígeno disuelto de la cámara aeróbica en función del periodo de evaluación para cada tratamiento. Lográndose reportar el mayor potencial eléctrico en el tratamiento T1. Habiéndose reservado el oxígeno disuelto en periodo de 24h. Se evidencia las fluctuaciones luego de la reposición del agua con alto contenido de oxígeno, en el T1 durante las primeras 24 horas se evalúa el contenido de oxígeno disuelto de 5,36 mg/L en los 2,3 litros de agua en la celda aeróbica, en el T2 se observa 4.15mg/L de oxígeno, en el T3 se observa 3.43mg/L de oxígeno respectivamente. Buitrón y Pérez (2011) en su investigación realizada sugiere investigar la demanda y consumo de energía en la celda de combustible de microbiana, proponiendo el estudio de la celda aeróbica para mantener la cantidad de oxígeno necesario para producir energía eléctrica, evitando el usos de mediadores , estos sirven como aceptor de electrones, también menciona “ cuanto mayor sea la diferencia potencial entre el donador y el aceptor, mayor será la ganancia energética y además su tasa de eliminación de materia orgánica”, Calderon (2017), describe su importancia del oxígeno disuelto en la cámara aeróbica de las celdas de combustible microbiana, los electrones liberados son captados atreves del cátodo, así cerrando el circuito del transporte de electrones. Mientras en la celda aeróbica se realiza como una especie de burbujeo para ayudar oxigenar con (aireador de pecera) este investigador sugiere profundizar este estudio para oxigenar este medio acuoso como aceptor final de electrones, el oxígeno en la cámara aeróbica es un eje

fundamental en la generación de energía eléctrica existe diferencia potencial entre el ánodo y cátodo de las celdas de combustible microbiana.

Al comparar los datos obtenidos durante los 3 tratamientos y con sus 3 repeticiones, es necesario analizar las varianzas de los resultados.

En la tabla 12 se muestra el potencial eléctrico evaluado durante un periodo de 17 días en tres repeticiones, donde se evidencia que el análisis es altamente significativo con un p-valor de  $<0.0001$ .

Ho: El oxígeno disuelto no es un potencial eléctrico

Ha: El oxígeno disuelto es un potencial eléctrico

Regla de decisión

SI p valor  $> 5\%$  (0.05) entonces el oxígeno es un potencial eléctrico

**Tabla 12.** Descripción de los resultados

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GI*</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor**</b>
T	2811065.59	3	937021.86	17.59	$<0.0001$
Error	3410003.65	64	53281.31		
Total	6221069.24	67			

\*GI: Grados de libertad; \*\* significancia

Interpretación:

Como p valor ( $<0.001$ ) entonces se acepta que el oxígeno es un potencial eléctrico.

En la tabla 13 se muestra la significancia estadística entre cada tratamiento. Mediante la prueba de Tukey se pudo analizar las medias para los potenciales obtenidos en este trabajo. Se observa que el tratamiento, T1, T2 y T3 son estadísticamente diferentes, pero el T1 tiene una media estadística superior, lo que evidencia que las 24 horas de reposición del oxígeno en la celda aeróbica tiene un impacto positivo en la generación de energía eléctrica.

**Tabla 13.** Prueba de tukey para la comparación del potencial eléctrico.

Tratamientos (mL)	Medias(mV)	n	Error estándar	Grupos Homogéneos
Testigo	251.65	3	55.98	A
72horas= T3	360.12	3	55.98	A
48horas= T2	510.24	3	55.98	B
24horas= T1	792.94	3	55.98	C

DMS (diferencia mínima significativa) = 208.84602. Alfa = 0.05

## V. CONCLUSIONES

1. Si es posible generar energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao con oxigenación natural en la celda aeróbica en una celda de combustible microbiana, teniendo una carga orgánica de 220,615 mg/L.
2. El oxígeno disuelto y el potencial eléctrico son directamente proporcionales a la generación de energía eléctrica.
3. Con la remoción de 83.46% de materia orgánica de aguas residuales, se pudo generar 1248mV, mediante celdas de combustible microbiana.
4. La energía eléctrica producida con la celda de combustible microbiana es directamente proporcional a la concentración de oxígeno disuelto de la celda aeróbica.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Utilizar las aguas residuales para generar energía eléctrica contribuyendo a mejorar el medio ambiente y evitando contaminar las principales fuentes de agua.
2. Incentivar a este tipo de investigaciones para producción de energía limpia, evitando daños a los principales ríos cauces y suelos, y hacer conocer sobre esta investigación a los centros de acopios y agroindustrias.
3. Para el uso de electrodos se debe evitar las aleaciones lo cual perjudicaría el proceso metabólico de los microorganismos en las celdas de combustible microbianas, además las conexiones deben ser con cables de cobre.
4. Se debe implementar este modelo estudiado, por su bajo costo y accesibilidad de materiales para remover la materia orgánica presente en el agua residual y a su vez aprovechar para generar energía
5. Para la reposición de oxígeno en las celdas aeróbicas, se sugiere hacer un sistema continuo utilizando humedales artificiales para el uso de oxígeno

## VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abarca, D. (2010). *Identificación de fibra dietaria en residuos de cacao (Theobroma cacao L.) variedad complejo nacional por trinario* [Universidad Técnica de Loja]. <https://1library.co/document/nzwl21ye-identificacion-dietaria-residuos-theobroma-variedad-complejo-nacional-trinitario.html>
- Alzate, L., Fuentes, C., Alvares, A., Sebastian, P. (2008). Generación de Electricidad a Partir de una Celda de Combustible Microbiana Tipo PEM. *Interciencia*, 33(7), 8.
- Armas, P., & Ramírez, G. (2014). *Generación de electricidad microbiana con diferentes matrices orgánicas mediante celdas de combustible*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Benintende, S., & Sanchez, C. (2015). Crecimiento Microbiano. *Ciencias Agropecuarias*, 1(1), 8. [http://www2.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/microbiologia/unidad\\_3\\_crecimiento\\_bacteriano.pdf](http://www2.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/microbiologia/unidad_3_crecimiento_bacteriano.pdf)
- Bermudez, A., & Bernal, D. (2018). *Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica*.
- Betance, V. (2010). *Sistema mixto de tanques anaerobios y fitoremediación como una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales en centros recreativos* [Centro de investigación en materiales avanzados, departamento de posgrado]. [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2289/1/Tesis\\_M\\_Vicente\\_Betance.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2289/1/Tesis_M_Vicente_Betance.pdf)
- Buitrón, G., Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbiana utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos. *Revista Especializada En Ciencias Químicas - Biológicas*, 14(1), 7. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v14n1/v14n1a1.pdf>
- Calderon, H. (2017). *Generación y acumulación de energía eléctrica utilizando sistemas de celdas de combustible microbiana (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de la (PTAP)* [Universidad Católica de Santa María]. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/6640/42.0154.IB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cardenas, A., Alvarado, C., Pichardo, E., Martinez, J., Rodriguez, M., Camacho, E., Perez, M.,

- & Rico, M. (2022). Celdas de combustible microbiana como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia y Tecnología*, 26, 8.
- Carmen, L., & Man, J. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Tecnología Del Agua*, 1(1), 7.  
[https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Pasar/Tratamiento\\_biologico\\_edar.pdf](https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Pasar/Tratamiento_biologico_edar.pdf)
- Castro, N. (2014). *Diseño y simulacion de un proceso de tratamiento de aguas residuales domesticas para la generacion simultanea de energia eléctrica mediante celdas de combustible microbiana* [Universidad de san buenaventura seccional cartagena].  
[http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2359/1/Diseño\\_y\\_simulación\\_de\\_un\\_Proceso\\_de\\_Tratamiento\\_Natalia\\_Castro\\_González\\_USBCTG\\_2014.pdf](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2359/1/Diseño_y_simulación_de_un_Proceso_de_Tratamiento_Natalia_Castro_González_USBCTG_2014.pdf)
- Catal, T. (2016). Comparación de varios carbohidratos para la producción de hidrógeno en celdas de electrólisis microbiana. *Biotecnología y Equipos Biotecnológicos*, 30(1), 7.  
[file:///C:/Users/Notebook Acer/Downloads/catal 2016.af.es.pdf](file:///C:/Users/Notebook Acer/Downloads/catal%202016.af.es.pdf)
- Ccora, B. (2019). *Generacion de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC)* [Universidad Nacional de Huancavelica]. [https://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2877/TESIS-2019-ING.AMBIENTAL-CCORA REPUELLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2877/TESIS-2019-ING.AMBIENTAL-CCORA%20REPUELLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chang, R. (2002). Fundamentos de Química. In R. Chang & W. College (Eds.), *MC GRAW HILL* (7ma ed., Vol. 6, Issue 1). <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3609>
- Comision Nacional del Agua. (2013). *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/135609/SGAPDS-3-13.pdf>
- Costa, J. (2005). *Diccionario de Química Física* (Dias de Sa). <http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/06380.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L., & Andrade, M. (2010). Depuracion de aguas residuales por medio de humedales artificiales. *Centro de Agua*, 115.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Estrada, Y., Lijarsa, Y., Medina, E., Natorre, G., Quispe, G., Razure, L., Ruiz, K., Rodriguez, J., Santillan, B., Yacha, C., Zelaya, A. (2016). *Remocion de materia organica de efluentes de lavado de cacao usado celdas de combustible microbiana* [Universidad Nacional Agraria de la selva].

- Estrada, E. (2014). *Generacion de energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales por medio de bioceldas* [Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua]. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1377/TC-1314.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernando, G., & Omar, N. (2009). Microbiología de las aguas residuales - Aplicación de Biosólidos en Suelo. *Editorial de La Universidad Tecnologica Nacional*, 1(1), 25. [http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem\\_fi\\_qui\\_micrb\\_09/biosolidos\\_en\\_suelo.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem_fi_qui_micrb_09/biosolidos_en_suelo.pdf)
- Gongora, C., Ochoa, J., Sosa, E., & Vázquez, E. (2017). Celdas de combustible microbianas. *Ingenieria Revista Académica*, 21(1), 10. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46752305005.pdf>
- González, A. (2015). *Valorizacion energetica y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas* [Universidad de Castilla la Mancha]. [https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/6531/TESIS\\_González\\_del\\_Campo\\_García\\_Villarrubia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/6531/TESIS_González_del_Campo_García_Villarrubia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gretel, N. (2016). Análisis técnico - económico de la tecnologia de celdas de combustible microbianas para la produccion de energias alternas. In *Ciencia y tecnologia*. [https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/144/1/Desarrollo\\_de\\_una\\_celda\\_de\\_combustible\\_microbiana\\_%28CCM%29\\_para\\_la\\_aplicación\\_en\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_%28Protegida%29..pdf](https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/144/1/Desarrollo_de_una_celda_de_combustible_microbiana_%28CCM%29_para_la_aplicación_en_el_tratamiento_de_aguas_residuales_%28Protegida%29..pdf)
- Hernandez, B., Reinaldo, M., Rojas, O., & Priscilla, K. (2011). *Estudio del mucilago de cacao(Theobroma cacao L) con fines de aprovechamiento industrial*. Universidad Central de Venezuela.
- Holdridge, L. (1982). *Ecologia basada en zonas de vida* (Matilde de). <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>
- Huang, L., Regan, X., & Quan, X. (2011). Mecanismos de transferencia de electrones, nuevas aplicaciones y rendimiento de las celdas de combustible microbianas de biocátodo. *Science*, 102(1), 8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410010977?via%3Dihub>
- Jibaja, S. (2018). *Produccion de electricidad en celdas de combustible microbiana a partir de tiosulfato utilizando cepas de Acidithiobacillus ferrooxidans* [UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA]. [https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/3965/Produccion\\_JibajaC](https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/3965/Produccion_JibajaC)

- aceres\_Sandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jiménez, M. Garibay, C. B. (2018). Modelo Bioquímicamente Estructurado para la Estimulación de la Eficiencia de una celda de Combustible. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 3–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.13>
- Liu, H., & Logan, E. (2004). *Generación de electricidad utilizando una celda de combustible microbiana de cámara única de cátodo de aire en presencia y ausencia de una membrana de intercambio de protones*. 38(14), 9. <https://pubmed-ncbi-nlm-nih-gov.translate.goog/15298217/>
- Llantop, 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* [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/2130/BC-TES-TMP-1000.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Logan, E., & Regani, M. (2006). Fuel Cells Applications. *Environmental Science & Technology*, 9. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.717.6648&rep=rep1&type=pdf>
- López, I. (2013). *Implementación de una estrategia de control para la puesta en marcha de una celda de combustible microbiana* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6142/1/tesis.pdf>
- Mantilla, G., Sandoval, L., Ramirez, E., Gasca, S., Navarro, J., Hernandez, N., Garcia, J., Esquivel, A., & Calderón, C. (2017). Energía limpia del agua sucia, aprovechamiento de lodos residuales. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 1(1), 90. [file:///C:/Users/Notebook Acer/Downloads/IMTA\\_608.pdf](file:///C:/Users/Notebook Acer/Downloads/IMTA_608.pdf)
- Márquez, J., & Salazar, J. (2015). *Análisis de los niveles de desperdicio del mucílago de cacao y su aprovechamiento como alternativa de biocombustible* [Universidad Estatal de Milagro]. <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/1770/1/Análisis de los niveles de desperdicio del mucílago de cacao y su aprovechamiento como alternativa de biocombustible.pdf>
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. 1, Issue 0). [https://www.academia.edu/35963101/Ingeniería\\_de\\_aguas\\_residuales\\_Volumen\\_1\\_3ra\\_](https://www.academia.edu/35963101/Ingeniería_de_aguas_residuales_Volumen_1_3ra_)

Edición\_METCALF\_and\_EDDY\_FREELIBROS\_ORG\_pdf

- Morales, A. (2020). Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos. *Ciencia Unisalle*, *1*(1), 66. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1603&context=ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1603&context=ing_electrica)
- Morales, J. (2015). *Análisis teórico de una celda de combustible microbiana* [Instituto Tecnológico de Toluca]. [https://www.academia.edu/35941274/celdas\\_microbianas](https://www.academia.edu/35941274/celdas_microbianas)
- Moscoso, J. (2011). Estudio de opciones de tratamiento y reuso de aguas residuales en Lima Metropolitano. *Liwa*, *1*(1), 90. [http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso\\_informe.pdf](http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso_informe.pdf)
- Ñacato, D. (2018). *Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch*.
- Navas, J., & Morales, D. (2016). *Texto de Microbiología Pecuaria*. <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnl70n322.pdf>
- Racines, Y. Santander, M. (2016). *Implementación de una celda de combustible microbiano a partir de agua residual domestica*. UNIVERSIDAD DE LA COSTA.
- Ramalho, R. (1998). *Tratamiento de aguas residuales* (Revesté). [https://dlscrib.com/queue/r-s-ramalho-tratamiento-de-aguas-residuales\\_58ebe881dc0d60a80eda97e9\\_pdf?queue\\_id=623322b5e2b6f5e94665023e](https://dlscrib.com/queue/r-s-ramalho-tratamiento-de-aguas-residuales_58ebe881dc0d60a80eda97e9_pdf?queue_id=623322b5e2b6f5e94665023e)
- Revelo, D. Hurtado, N. Ruiz, J. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Informacion Tecnológica*, *24*(6), 28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rojas, J., & Rojas, E. (2017). *Aprovechamiento de mucilago de cacao (Theobroma cacao) En la formulacion de una bebida no alcoholica* [Univeridad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. [https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/2684/Rojas\\_Sosa\\_Johana\\_Marleny\\_y\\_Rojas\\_Manayay\\_Erick\\_David.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/2684/Rojas_Sosa_Johana_Marleny_y_Rojas_Manayay_Erick_David.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Romero, J. (1998). *Calidad del agua*.
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de las aguas residuales, teoría y principios de diseño* (Escuela Co). [https://www.academia.edu/41246680/Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales\\_Romero\\_Rojas](https://www.academia.edu/41246680/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_Rojas)
- Rubina, E. (2017). *Determinacion de la cantidad de energia eléctrica a partir de electrones libres, productos de la actividad metabólica de los microorganismos, en las plantas de*

- palma aceitera (Elaeis guineensis), cacao (Theobroma cacao) y césped Tororco (Axonopus compressu* [Universidad Nacional de Ucayali].  
[http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4345/UNU\\_AMBIENTAL\\_2020\\_T\\_EDWAR-RUBINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4345/UNU_AMBIENTAL_2020_T_EDWAR-RUBINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Saavedra, I. (2012). Diseño de una celda de combustible microbiológica con uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro. *Ciencia y Tecnología*, 57.
- Sanchez, M. Fernández, L. Espinoza, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Novasinerгия*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>
- Santamaria, A. (2020). *Produccion de energia a partir de aguas residuales industriales* [Univeridad de Alcalá]. [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/44119/TFM\\_Santamaria\\_Garcia\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/44119/TFM_Santamaria_Garcia_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Santana, P. (2017). *Mucilago de cacao (teobroma cacao L.) nacional y trinitario para obtencion de una bebida hidratante*. Universidad Tecnica Estatal de Quevedo.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2015). Diagnostico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ambito de operaciones de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento. *Cooperación Alemana, Implementada Por La GIZ Programa de Modernización y Fortalecimiento Del Sector Agua y Saneamiento (PROAGUA II)*, 1(1), 150. <https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>
- Valencia, M. (2018). *Evaluacion de generacion de electricidad y remocion de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales de camal* [UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO]. [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7944/Valencia\\_Pacho\\_Marleni\\_Yovanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7944/Valencia_Pacho_Marleni_Yovanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vera, J., Vallejo, C., Párraga, D., Morales, W., Macias, J., & Ramos, R. (2014). Atributos fisicoquimicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (Theobroma cacao L.). *Ciencia y Tecnología*, 7(2), 14. [https://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2\\_en\\_construccion.pdf](https://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archivos/C2_en_construccion.pdf)
- Villarroel, J., & Saldarriega, E. (2020). *Determinacion de los Parametros de Bioadsorcion del Mucilago de Cacao (Theobroma cacao l.) como cuagulante floculante natural en muestras del rio congo, canton el empalme* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/51163/1/BINGQ-IQ-20P54.pdf>

## VIII. ANEXOS

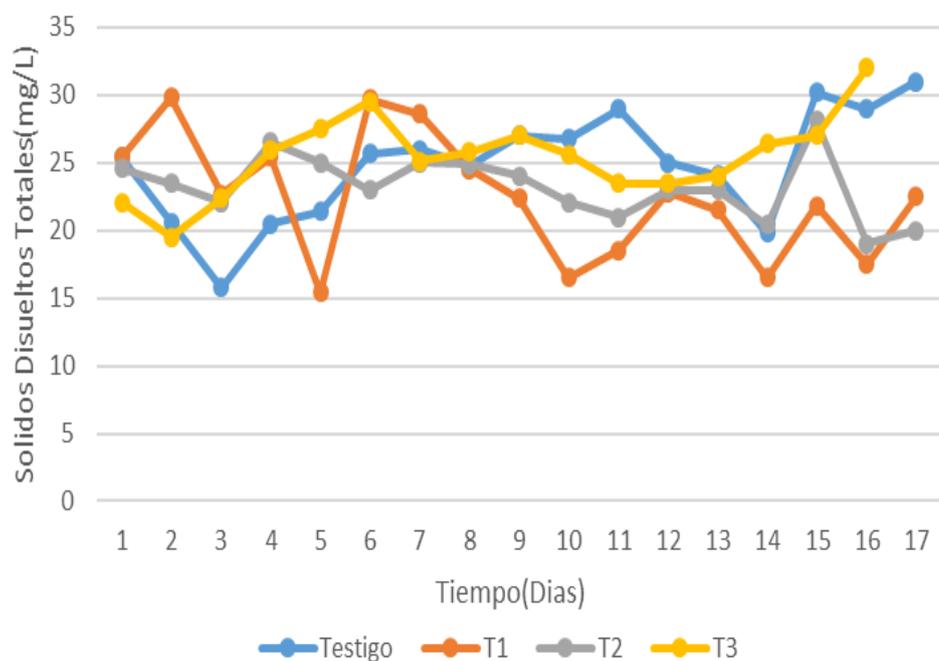
**Tabla 14.** Determinación de parámetros en la generación de energía eléctrica

Muestras	Ánodo					Cátodo	
	OD	STD	pH	T°	mV	OD	pH
T0	1.84	25.4	6.7	25.6	170	5.09	7.5
T1	1.84	25.4	6.8	25.7	188	5.10	7.71
T2	1.83	24.6	6.8	25.7	178	5.10	7.64
T3	1.84	29.5	6.5	25.6	190	5.20	7.6
T0	1.16	20.6	6.7	25.8	215	4.20	7.6
T1	1.2	29.8	6.6	25.9	250	5.0	7.68
T2	1.5	23.5	6.7	25.8	208	4.5	7.72
T3	1.6	22.1	6.6	25.7	225	4.7	7.61
T0	1.14	15.8	6.5	25.7	250	4	7.62
T1	0.99	22.7	6.6	25.8	288	5.1	7.72
T2	1.3	22.1	6.7	25.9	235	4.2	7.62
T3	1.29	19.5	6.5	25.9	223	3.4	7.75
T0	1.27	20.5	6.5	25.8	260	3.5	7.64
T1	0.63	25.4	6.5	25.8	370	5.3	7.68
T2	1.09	26.5	6.5	25.7	275	4.1	7.77
T3	1.4	22.4	6.2	25.8	265	3.5	7.74
T0	1.27	21.4	6.4	25.6	261	3.2	7.54
T1	0.8	15.4	6.4	25.8	433	5.2	7.76
T2	1.2	25	6.3	25.7	338	4.6	7.76
T3	1.4	25.9	6.1	25.9	295	3.5	7.53
T0	2.11	25.7	5.9	25	260	3	7.59
T1	0.9	29.7	6.1	25.1	560	5.4	7.64
T2	1.2	23	6.1	25.4	358	4	7.79

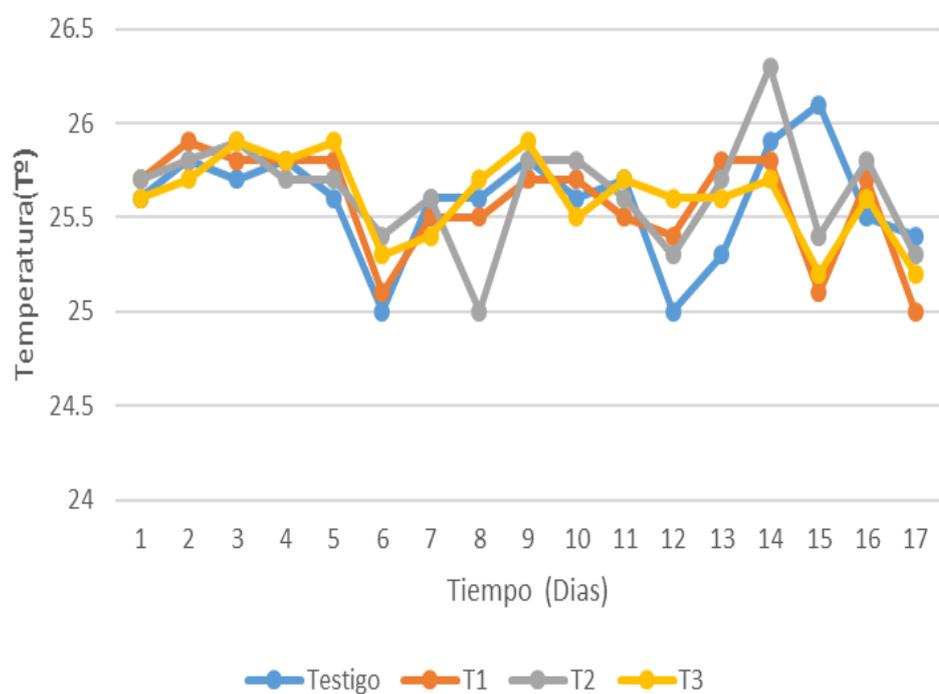
T3	1.5	27.5	5.8	25.3	330	3.5	7.72
T0	1.85	26	6.5	25.6	260	2.9	7.56
T1	1.3	28.6	6.7	25.5	600	5.2	7.67
T2	1.63	25	6.6	25.6	418	3.9	7.61
T3	1.49	29.5	6.8	25.4	353	3.1	7.6
T0	1.87	24.8	6.5	25.6	261	2.7	7.55
T1	1.0	24.5	6.7	25.5	713	5.4	7.7
T2	1.1	24.9	6.5	25	460	4.1	7.65
T3	1.53	25.1	6.7	25.7	380	3.2	7.62
T0	2.1	27	6.4	25.8	260	2.6	7.49
T1	0.85	22.4	6.7	25.7	813	5.5	7.55
T2	1.18	24	6.6	25.8	495	4.0	7.58
T3	1.52	25.8	6.7	25.9	428	3.5	7.55
T0	1.85	26.8	6.5	25.6	260	2.62	7.68
T1	0.94	16.5	6.6	25.7	888	5.39	7.61
T2	1.4	22.1	6.5	25.8	580	4.0	7.57
T3	1.64	27	6.6	25.5	430	3.4	7.58
T0	1.99	29	6.3	25.7	262	2.50	7.64
T1	0.87	18.5	6.5	25.5	998	5.40	7.55
T2	1.4	21	6.5	25.6	660	3.90	7.57
T3	1.55	25.6	6.6	25.7	430	3.10	7.6
T0	1.85	25	6.3	25	260	2.55	7.5
T1	0.98	22.8	6.5	25.4	1213	5.43	7.65
T2	1.4	23	6.4	25.3	698	4.1	7.55
T3	1.62	23.5	6.5	25.6	433	3.0	7.6
T0	2.0	24.1	6.1	25.3	251	2.41	7.65
T1	0.87	21.5	6.1	25.8	1248	5.53	7.55
T2	1.58	23	6.2	25.7	740	4.20	7.58

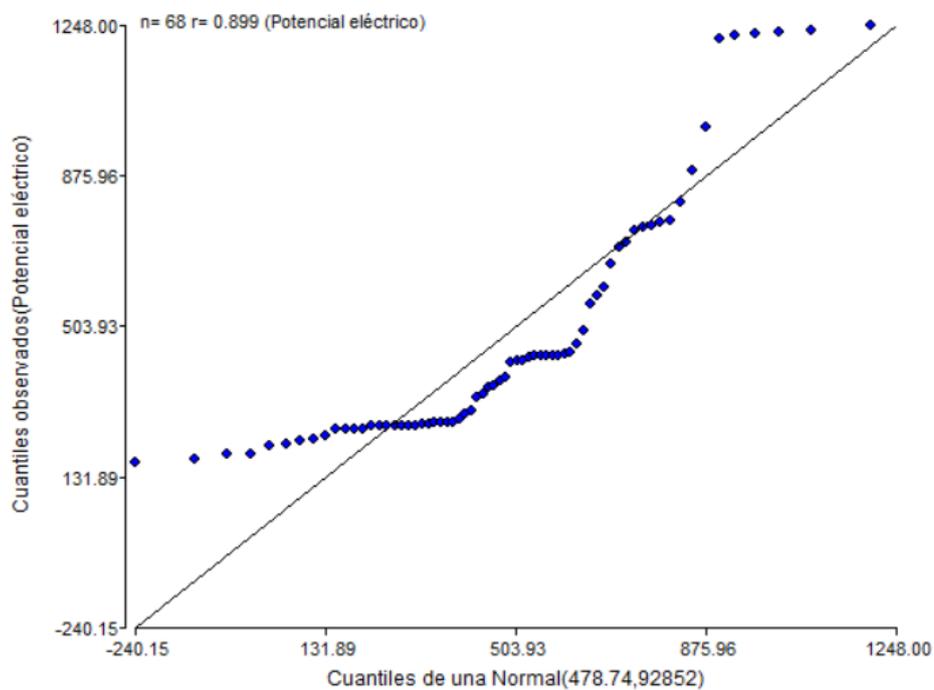
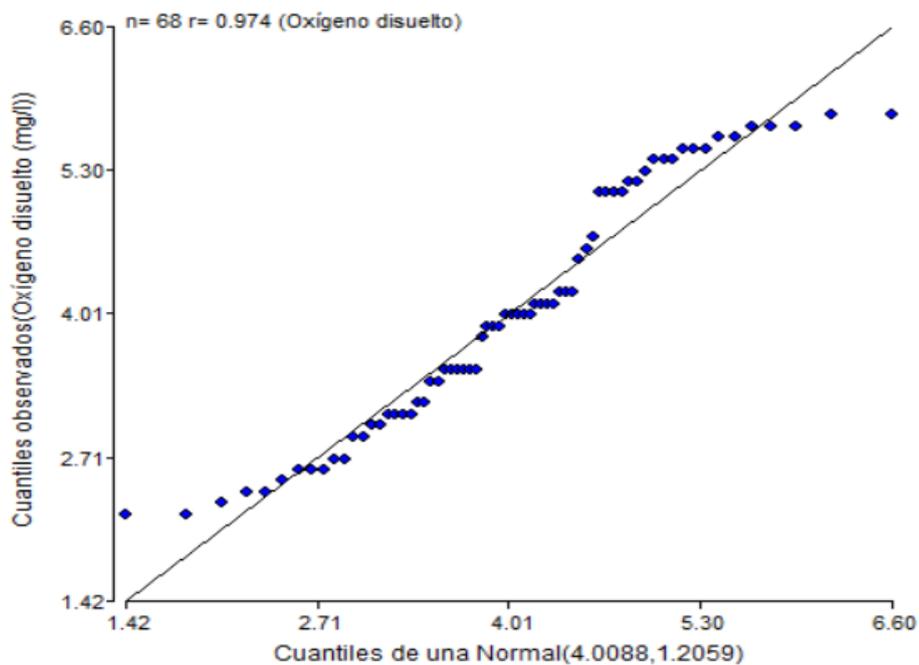
T3	1.7	23.5	6.2	25.6	435	3.50	7.64	
T0	2.01	19.8	5.7	26.8	245	2.40	7.65	
T1	0.89	16.5	5.9	26.7	1230	5.50	7.59	
T2	1.57	20.4	6	26.5	765	4.10	7.55	
T3	1.85	24	5.8	25.7	430	3.10	7.53	
T0	1.89	30.2	6.6	26.1	240	2.31	7.6	
T1	0.85	21.8	6.8	25.1	1228	5.60	7.61	
T2	1.42	28.1	6.5	25.4	750	3.90	7.45	
T3	1.82	26.4	6.7	25.2	415	3.10	7.48	
T0	1.89	29	6.5	25.5	235	2.20	7.59	
T1	0.87	17.5	6.5	25.7	1235	5.50	7.58	
T2	1.39	19	6.7	25.8	763	3.90	7.48	
T3	1.8	27	6.6	25.6	440	3.10	7.44	
T0	1.81	31		25.4	230	2.20	7.4	
T1	0.9	22.5	6.4	25	1225	5.60	7.49	
T2	1.4	20	6.6	25.3	753	3.80	7.51	
T3	1.7	32	6.4	25.2	420	3.10	7.39	
<hr/>								
promedios	T0 $\bar{x}$	1.76	24.83	6.4	25.6	245.88	2.96	7.6
	T1 $\bar{x}$	0.98	22.44	6.6	25.6	792.65	5.36	7.7
	T2 $\bar{x}$	1.39	23.25	6.6	25.6	510.0	4.10	7.7
	T3 $\bar{x}$	1.60	25.66	6.3	25.6	360.0	3.10	7.6
<hr/>								
Desviación estándar	T0 $\sigma$	0.327	4.097	0.19	0.408	23.814	0.805	0.079
	T1 $\sigma$	0.267	4.529	0.105	0.389	396.810	0.184	0.035
	T2 $\sigma$	0.199	2.372	0.141	0.324	217.636	0.315	0.070
	T3 $\sigma$	0.166	3.071	0.218	0.225	87.963	0.618	0.098
<hr/>								
	T0 CV	18.613%	16.500%	3.119%	1.591%	9.685%	27.175%	1.043%
	T1 CV	27.185%	20.180%	1.580%	1.516%	50.061%	3.439%	0.450%

coeficiente de variación	T2 CV	14.317%	10.203%	2.156%	1.264%	42.674%	7.595%	0.914%
	T3 CV	10.373%	11.968%	3.482%	0.878%	24.434%	17.646%	1.287%



**Figura 16.** Solidos totales disueltos en el tiempo de operación



**Figura 17.** Temperatura en función al tiempo**Figura 18.** Correlación entre los valores observados del potencial eléctrico**Figura 19.** Correlación entre los valores observados del oxígeno disuelto



**Figura 20.** Materiales usados como electrodos



**Figura 21.** Armado de prototipos para las celdas microbianas



m

**Figura 22.** Recolección de muestras de la cooperativa



**Figura 23.** Evaluación del potencial eléctrico



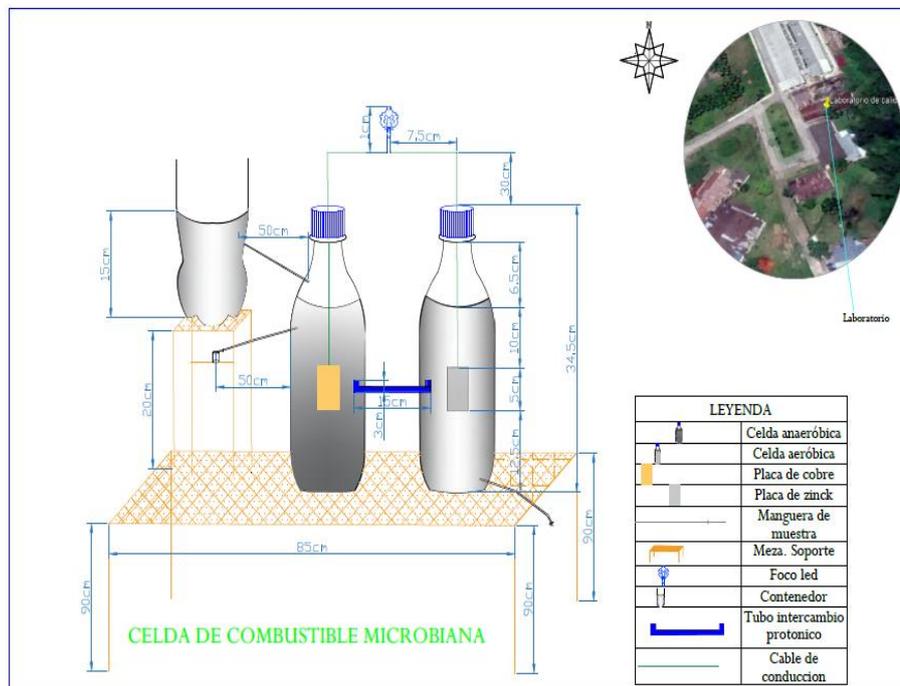
**Figura 24.** Evaluación de del potencial eléctrico



**Figura 25.** Evaluación de parámetros químicos



**Figura 26.** Evaluación de parámetros químicos.



**Figura 27.** Imagen de las celdas en el laboratorio de calidad del agua