

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS  
Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN Y ALIMENTOS

**TESIS PROFESIONAL**

GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD EN CELDAS DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANAS USANDO AGUAS  
RESIDUALES AGROINDUSTRIALES DEL ESTADO DE  
CHIAPAS.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE  
ALIMENTOS**

PRESENTA

**LUIS ARBEY AGUILAR ZEBADÚA**

**ALEJANDRO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

ASESOR

**DRA. MARÍA EMPERATRIZ DOMINGUEZ ESPINOSA**

ASESOR EXTERNO

**DR. ABUMALÉ CRUZ SALOMÓN**

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Octubre 2024





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES  
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACION ESCOLAR



Autorización de Impresión

Lugar y Fecha: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 23 de octubre de 2024

C. Luis Arbey Aguilar Zebadua

Pasante del Programa Educativo de: Ciencia y Tecnología de Alimentos

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbianas usando aguas  
residuales agroindustriales del estado de Chiapas

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dra. Yadira del Rocío Sánchez Oropeza

Mtro. Mario Alberto Morales Ovando

Dra. María Emperatriz Domínguez Espinosa

Firmas



COORDINACIÓN  
DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES  
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACION ESCOLAR



Autorización de Impresión

Lugar y Fecha: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 23 de octubre de 2024

C. Alejandro Rodríguez Hernández

Pasante del Programa Educativo de: Ciencia y Tecnología de Alimentos

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbianas usando aguas

residuales agroindustriales del estado de Chiapas

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dra. Yadira del Rocío Sánchez Oropeza

Mtro. Mario Alberto Morales Ovando

Dra. María Emperatriz Domínguez Espinosa



Firmas

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, le agradezco a Dios por guiarme a lo largo de mi carrera y por permitirme tener tan buena experiencia dentro de mi universidad, gracias a mi universidad por permitir convertirme en un profesional, gracias a cada maestro que hizo parte de este proceso integral de formación.

Le agradezco a mis padres Nicolas Aguilar Jiménez y Florinda Zebadúa Camacho por su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos, por brindarme una excelente educación que hoy en día me forman como profesional.

Le agradezco la confianza, paciencia, apoyo y dedicación de mi directora de tesis, la Dra. María Emperatriz Domínguez Espinoza y mi asesor externo el Dr. Abumalé Cruz Salomón quien con sus conocimientos y sus guías fueron pieza clave para que pudiera resolver cada etapa del desarrollo del trabajo.

**Luis Arbey Aguilar Zebadúa**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Laura Hernández Martínez y Jaime Antonio Rodríguez Cruz por el apoyo que me brindaron en todo momento, por los valores que me han inculcado, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de la vida. Sobre todo, por un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanas Valeria, Tere y Valentina por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral de que me brindaron a lo largo de esta etapa.

A mi sobrina Valery Alexa Gutiérrez Rodríguez por ser la alegría de la casa y de nuestras vidas.

A toda mi familia, por cada uno de ellos que me apoyaron con sus consejos de una forma u otra animándome a que siga adelante.

Además de los Doctores(a), ingeniero(a), y a todos los que hicieron posible que este trabajo se llevara a cabo gracias al apoyo brindado de diferentes maneras.

Le agradezco la confianza, paciencia, apoyo y dedicación de mi directora de tesis, la Dra. María Emperatriz Domínguez Espinoza y mi asesor externo el Dr. Abumalé Cruz Salomón quien con sus conocimientos y sus guías fueron pieza clave para que pudiera resolver cada etapa del desarrollo del trabajo.

**Alejandro Rodríguez Hernández**

# ÍNDICE GENERAL

## Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
JUSTIFICACIÓN	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
OBJETIVOS	10
GENERAL	11
<b>ESPECÍFICOS</b>	11
Antecedentes	11
MARCO TEÓRICO	24
6.1 Agroindustria	24
6.2 Procesos agroindustriales	24
6.2.1 Nixtamalización	24
6.2.2 Beneficiado de café	25
6.2.3 Beneficiado de Garbanzo.	27
6.3 Aguas residuales agroindustriales	29
6.3.1 Nejayote	29
6.3.2 Agua del beneficiado húmedo	31
6.3.3 Aquafaba	33
6.4 Bioenergía	34
6.5 Procesos de producción de bioenergéticos	34
6.5.1 Digestión anaerobia	34
6.5.1.1 Biogás	36
6.5.1.1.1 Biometano	36
6.5.2 Fermentación alcohólica	36
6.5.2.1 Etanol	37
6.5.3 Fermentación oscura	37
6.5.3.1 Biohidrógeno	37

6.6 CCM (Cámaras de combustión microbiana)	38
6.6.1 Tipos de CCM. (Cámaras de combustión microbiana)	39
6.6.2 Configuraciones de CCM (Cámara de combustión microbiana)	40
6.6.3 Proceso de operación CCM (Cámara de combustión microbiana)	41
6.6.4 Tipos de electrodos usados	42
6.6.5 Ventajas de la cámara de combustible microbiana	43
6.6.6 Aspectos negativos de una cámara de combustible microbiana	43
6.7 Bioelectricidad.	44
6.7.1 USOS	45
6.7.2 APLICACIONES	45
HIPÓTESIS	47
METODOLOGÍA	48
8.1 Diseño de investigación	48
8.2 Muestra	48
8.3 Variables dependientes y independientes	49
8.4 Descripción de reactivos y equipos.	50
8.5 Descripción de los procesos.	50
8.5.1 Preparación del electrodo.	50
8.5.2 Inoculación de electrodos anódicos	51
8.5.3 Tratamiento de membrana de intercambio de protones (Nafion)	53
8.5.4 Caracterización electroquímica.	53
8.5.5 Curvas de polarización	54
8.5.6 Información sobre la importancia de realizar las curvas de polarización.	55
8.5.6.1 Optimización de la Potencia Generada.	55
8.5.6.2 Determinación de la Resistencia Interna.	55
8.5.6.3 Mejora del Diseño y la Operación.	56
8.6 Puesta en Marcha de la Celda Microbiana por lotes.	56
8.6.1 Para las pruebas IES.	58
8.7 Equipos a utilizar.	59
8.8 Descripción de las técnicas a utilizar	68
8.8.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA	68
8.8.1.1 pH.	68
8.8.1.2 Conductividad eléctrica.	68

8.8.1.3 Potencial Redox.	68
8.8.1.4 Sólidos Totales.	68
8.8.1.5 Sólidos Totales Volátiles.	68
8.8.1.6 Sólidos Suspendidos.	69
8.8.1.7 Humedad.	69
8.8.1.8 Ceniza.	69
8.8.1.9 Color.	69
8.8.1.10 DQO.	69
8.8.1.11 DBO.	69
8.8.1.12 ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD	70
8.8.1.13 NITRÓGENO.	70
8.8.1.14 FÓSFORO.	70
8.8.1.15 CARBONO ORGÁNICO TOTAL.	70
8.8.1.16 LÍPIDOS.	71
8.8.1.17 ALCALINIDAD.	71
8.8.1.18 ACIDEZ.	71
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
9.1 Caracterización.	72
9.2 Voltamperometría cíclica (CV) de los electrodos de trabajo.	78
9.3 Generación de electricidad.	80
9.4 Conclusión	84
9.5 Trabajos Futuros.	85
CONCLUSIONES	86
REFERENCIAS DOCUMENTALES	86
ANEXOS	94

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Tabla de contenido

<b>Figura 1.</b> Diagrama general de la elaboración del Nejayote (elaboración propia).	29
<b>Figura 2.</b> Diafragma general del procesamiento del café (CRUZ, <i>et al.</i> , 2017).	31
<b>Figura 3.</b> Diagrama general de la elaboración del beneficiado del garbanzo (elaboración propia).	32
<b>Figura 4.</b> Agua de nejayote	35
<b>Figura 5.</b> Agua del beneficio húmedo del café.	37
Figura 7. Digestión anaerobia	39
<b>Figura 8.</b> La cámara de combustión microbiana.	43
<b>Figura 9.</b> Electrodo de carbono	46
<b>Figura 10.</b> Electrodo de platino	47
<b>Figura 11.</b> Voltamperometría Cíclica de los electrodos de carbón.	57
<b>Figura 12.</b> Estructura de una celda de combustible microbiano: a) cámara anódica, b) cámara catódica, c)membrana de intercambio catiónico, d) circuito externo	61
<b>Figura 13.</b> Imagen elaborada por: Felipe Vejarano y Oscar Loaiza de revistaconciencia.com	61
<b>Figura 14</b> Estructura de la celda de combustión microbiana (Modificado de Du et al., 2007).	61
Figura 15. Configuración de 3 electrodos para medir voltamperométricas cíclicas.	62
<b>Figura 16.</b> pH metro digital portátil para la determinación de sólidos totales disueltos, conductivímetro, salinidad, temperatura, potencial redox, pH.	62
<b>Figura 17.</b> Digestor para la determinación de DQO	63
<b>Figura 18.</b> Espectrofotómetro para la lectura de los valores de DQO.	63
<b>FIGURA 19.</b> Turbidímetro para la determinación de turbidez.	64
<b>Figura 20.</b> Digestor micro kjeldahl para la digestión de la proteína.	64
<b>Figura 21.</b> Equipo para la determinación de DBO.	65
Figura 22. Incubadora para la determinación de DBO.	65
<b>Figura 23.</b> Colorímetro.	66
<b>Figura 25.</b> Mufla utilizada para la determinación de cenizas.	66
<b>Figura 26.</b> Horno de secado.	67
<b>Figura 27.</b> Digestor soxhlet para extracción de grasa.	67
<b>Figura 28.</b> Multímetro digital para la medición de voltaje y corriente.	68

Figura 29. Bomba de aire.	68
<b>Figura 30.</b> Potenciostato necesario para las voltamperometría.	69
<b>Figura 31.</b> Electrodo de platino para la conductividad.	69
<b>Figura 32.</b> Electrodo de carbono	70
<b>Figura 33.</b> Membrana de intercambio de protones.	70
Figura 36. CCM	71
<b>Figura 34.</b> Aguas residuales	75
<b>Figura 35.</b> Esquema del proceso de conversión	81
Figura 36. Voltamperograma cíclicos de electrodos de carbono con y sin biofilm bacteriano.	83
Figura 37 Densidad de potencia y corriente generada con la CCM alimentada con el efluente de Café.	84
Figura 38 Densidad de potencia y corriente generada con la CCM alimentada con el efluente de N86	

## ÍNDICE DE TABLAS

### Tabla de contenido

### ÍNDICE DE FIGURAS 6

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	7
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote.	30
<b>Tabla 2.</b> Características fisicoquímicas de las aguas residuales del procesamiento del café	32
<b>Tabla 3.</b> Características fisicoquímicas de la aquafaba	34
Tabla 4. Diseño de variables.	50
Tabla 5. Caracterización Fisicoquímica de las aguas residuales agroalimentarias	73

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales representan una preocupación creciente debido a la introducción de sustancias o compuestos contaminantes por parte del hombre, lo que conlleva alteraciones perjudiciales en su calidad y en su función ecológica. En particular, las aguas residuales agroindustriales se destacan como un desafío significativo en términos de contaminación, requiriendo la búsqueda de procesos alternativos para su aprovechamiento y la mitigación de su impacto ambiental.

En Chiapas y en todo el país, diversas agroindustrias generan una amplia gama de aguas residuales, incluyendo el agua de beneficio húmedo del café, el nejayote y la aquafaba. Estas aguas residuales se descargan sin tratamiento previo, lo que ocasiona impactos ambientales significativos, como la alteración de ecosistemas y elevadas concentraciones de materia orgánica medidas como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), así como valores de nitrógeno y fósforo altos.

El agua del beneficio húmedo del café se genera después de la fermentación del café y el lavado de la cereza, la cantidad de agua que se utiliza es grande y habitualmente no tiene un plan que evite la contaminación por su descarga, está genera la modificación de los ecosistemas, su DBO alcanza hasta los 20,000 mg/L y la DQO puede llegar a ser de hasta 50,000 mg/L, con un pH bajo.

La aquafaba se refiere al agua residual que se genera durante el proceso de cocción de productos alimenticios como las legumbres, especialmente garbanzos. Esta agua residual puede contener compuestos orgánicos y otros residuos asociados con el proceso de producción de los dulces, lo que la convierte en un problema ambiental que requiere tratamiento adecuado para minimizar su impacto en el medio ambiente.

El nejayote es el agua residual obtenida en el proceso de nixtamalización del maíz, en este proceso la cocción del maíz se realiza en una solución de cal (CaO) con una duración de entre 2 a 8 horas. El propósito de la nixtamalización es romper el pericarpio del grano y permitir

la liberación de vitaminas. Es bien sabido que México produce grandes cantidades de esta agua, por la gran variedad de preparaciones que se realizan a partir de maíz nixtamalizado

Por otro lado, la generación de electricidad constituye otro importante problema ambiental, con métodos tradicionales como la combustión de combustibles fósiles en calderas, la quema de carbón y la explotación de mantos acuíferos generando residuos y daños al medio ambiente. Por tal razón, el objetivo de este proyecto es evaluar la eficiencia de la producción de bioelectricidad y depuración simultánea de aguas residuales de la agroindustria (Nejayote, aquafaba, y del beneficio húmedo del café) mediante el uso de celdas de combustible microbianas (CCM) como alternativa sustentable e innovadora

## JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la celda de combustible microbiana (CCM) representa un avance significativo en la generación de electricidad limpia y en la reducción del impacto ambiental asociado con su producción. Estas celdas son una alternativa prometedora que permite la transformación de contaminantes presentes en diversos tipos de agroresiduos. Las CCMs tienen la capacidad única de convertir la energía contenida en las aguas residuales directamente en electricidad, así como en productos químicos útiles como  $H_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $CH_4$ , entre otros.

Al tratar las aguas residuales, las CCMs ofrecen un enfoque sostenible donde la eliminación de contaminantes y la generación de energía se realizan de manera simultánea. Esta tecnología permite abordar eficazmente la problemática de la contaminación mientras se aprovechan los recursos energéticos presentes en los desechos.

La celda de combustible microbiana funciona como un sistema bioelectroquímico, catalizando la conversión de energía química en energía eléctrica a través de la actividad microbiana en un electrodo. Los contaminantes presentes en las aguas residuales, que pueden incluir carbono, nitrógeno, fósforo o metales pesados, son degradados o estabilizados en las CCMs, liberando energía química que se convierte directamente en electricidad.

Comparada con otras técnicas de tratamiento de aguas residuales, como los métodos químicos, aerobios, la digestión anaerobia y la filtración por membrana, entre otros, la CCM destaca como una tecnología prometedora que ofrece el doble beneficio de eliminar contaminantes y recuperar energía de manera eficiente. Además, al ser un proceso biotecnológico, las CCMs son respetuosas con el medio ambiente, ya que producen bioelectricidad sin generar emisiones contaminantes.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión de aguas residuales representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes a nivel global. El vertido indiscriminado de aguas residuales, especialmente aquellas provenientes de la industria alimentaria, no solo contamina los recursos hídricos, sino que también contribuye significativamente al deterioro del medio ambiente y afecta la salud pública.

En el contexto de Chiapas y otras regiones de México, la producción de aguas residuales provenientes de actividades agroindustriales como el beneficiado del café, la nixtamalización del maíz y la elaboración de productos alimenticios a base de garbanzo, ha alcanzado niveles alarmantes. Estas aguas residuales contienen una alta carga de contaminantes orgánicos, nutrientes y compuestos químicos que pueden causar daños irreparables a los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Además, la generación de electricidad a través de métodos convencionales, como la quema de carbón o el uso de hidrocarburos de origen fósil en calderas, sigue siendo una de las principales fuentes de contaminación atmosférica y emisión de gases de efecto invernadero. Esta situación subraya la urgente necesidad de adoptar tecnologías más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía.

En este contexto, la celda de combustible microbiana (CCM) emerge como una solución prometedora que aborda simultáneamente dos problemas críticos: el tratamiento de aguas residuales y la generación de electricidad limpia. Las CCMs tienen la capacidad única de convertir la energía química presente en las aguas residuales en electricidad, mientras que al mismo tiempo eliminan contaminantes y estabilizan los desechos orgánicos.

Sin embargo, a pesar del potencial de las CCMs para proporcionar una solución integral a estos desafíos, su implementación a nivel práctico aún enfrenta diversos obstáculos, que van desde limitaciones tecnológicas hasta barreras económicas y de infraestructura. Por lo tanto, es imperativo investigar y desarrollar estrategias efectivas para superar estas dificultades y promover la adopción generalizada de las CCMs como una herramienta clave en la gestión sostenible de aguas residuales y la transición hacia una matriz energética más limpia y renovable.

# OBJETIVOS

## GENERAL

Evaluar la eficiencia de la producción de bioelectricidad y el proceso de depuración simultánea de aguas residuales de la industria alimentaria (Nejayote, aquafaba, y del beneficio húmedo del café) mediante la implementación y análisis uso de celdas de combustible microbianas (CCM).

## ESPECÍFICOS

- Analizar la composición fisicoquímica del nejayote, aquafaba y del agua del beneficio húmedo del café (ABHC) para determinar su viabilidad como materia prima en las CCM.
- Identificar la viabilidad del inóculo colonizador del electrodo (ánodo) mediante microscopía electrónica de barrido
- Cuantificar la bioelectricidad generada en las CCM mediante la medición de la resistencia, curva de polaridad y diferencias de voltaje
- Evaluar la eficiencia de las CCM en la generación de bioelectricidad y el tratamiento de las aguas residuales a través su análisis fisicoquímico

## Antecedentes

1. Rincón-Catalan (2022) Valorización de residuos de banano en energía mediante celda de combustible microbiana junto con digestión anaeróbica. Resumen: El banano es la planta frutal más cultivada en el mundo. Se produce en América Latina, Asia y África. India y China son los mayores productores de banano del mundo, con casi el 41% de la producción mundial. Esta fruta alcanza una producción mundial total de 158,3 millones de toneladas al año. Sin embargo, durante su ciclo productivo, la agroindustria bananera produce grandes volúmenes de residuos sólidos derivados de la sobremaduración de la fruta. Contribuye entre el 8 y el 20 por ciento de los desechos (alrededor de 100 kg de desechos de banano por cada tonelada de banano producida). Por lo tanto, el uso de desechos de banano demasiado maduro representa una gran oportunidad para la producción de bioenergía. Este trabajo demuestra que los desechos de banano se pueden utilizar para la generación de energía utilizando una celda de combustible microbiana (MFC) junto con la digestión anaeróbica (AD). Las muestras de banano fueron recolectadas en el mercado ubicado en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México (latitud 16°44'39"N y longitud 93°06'18"W). Plátanos en su última fase de maduración (nivel 7 en la escala de Von Loesecke). Primero, la producción máxima de metano (MMP), La tasa de producción de metano (MPR) y el potencial bioquímico de metano (BMP) se midieron utilizando un biorreactor anaeróbico por lotes durante 64 días de seguimiento. Finalmente, el digestato generado a partir de AD se utilizó en el MFC para determinar la curva de polarización, voltaje máximo, densidad de potencia máxima (MPD), resistencia y corriente. Como resultado, el AD generó una MMP de 320,3 mL, BMP de 373,3 mLCH<sub>4</sub>/gVS y TPM de 18,6 mLCH<sub>4</sub>/lb·día. El MFC generó 286 mV (voltaje máximo), 41,3 mW/mdos(MPD), 580.99Ω (resistencia) y 0,0002867 A (corriente). Ambos procesos juntos produjeron una bioenergía total de 13,38 kJ/gVS. Este sistema combinado mostró un uso adecuado y prometedor de los desechos de banano para la generación de bioenergía ecológica. Por lo tanto, esta materia prima podría ser aprovechada para generar procesos sostenibles y desarrollar una economía circular en la agroindustria bananera.

2. Rincón-Catalan (2022) Generación de energía a partir del tratamiento de suero de queso por digestión anaeróbica y celda de combustible microbiana. Resumen: Un contaminante importante producido por la industria láctea durante el proceso de elaboración del queso es el suero de

queso (CW), que es un subproducto líquido con alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, con una producción mundial estimada de 200 millones de toneladas por año y debido a su alta carga orgánica, CW representa una gran oportunidad para la producción de bioenergía mediante bioprocesos. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue determinar la generación de energía a partir del tratamiento de CW utilizando dos bioprocesos acoplados, digestión anaeróbica (AD) y celda de combustible microbiana (MFC). El CW utilizado en esta investigación se obtuvo de una planta procesadora de queso ubicada en Villaflores, Chiapas, México (latitud 16° 13'59.96"N y longitud 93° 16' 9.3"W). Las muestras fueron colectadas, filtradas y almacenadas por siete días en bolsas de polietileno con 20 mL de muestra a 4 °C hasta su uso. Las características de la CW como pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (TS), sólidos volátiles totales (TVS) se analizaron de acuerdo con los Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales. El contenido de humedad y cenizas se determinó de acuerdo con la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales. El porcentaje de materia orgánica se estimó mediante la relación TVS/TS. En el primer proceso, se midió la producción máxima de metano (MMP), la tasa de producción de metano (MPR) y el potencial bioquímico de metano (BMP) utilizando un biorreactor anaeróbico por lotes durante 110 días de seguimiento. Finalmente, el digestato generado a partir de AD de CW se utilizó en el segundo proceso para determinar la curva de polarización, voltaje, densidad de potencia, resistencia y corriente. En la AD, la MMP, MPR y BMP fueron 813,26 mL, 46,2 mLCH<sub>4</sub>/Lbiorreactordía y 338,9 mLCH<sub>4</sub>/gCOD, respectivamente. Asimismo, el MFC generó una tensión máxima de 344 mV, densidad de potencia de 59,6 mW/m<sup>2</sup>, resistencia de 486.72 Ω y corriente de 0.0003443 A. La integración de ambos procesos produjo una energía total de 12.275 kJ/gDQO con una remoción total de DQO, TS y TVS de 88.6%, 56.6% y 80.4, respectivamente. Estos resultados muestran el gran potencial del suero de queso como materia prima para la producción de bioenergía, desarrollando así una economía circular.

3. Castro Leal (2022) Evaluación del potencial energético de subproductos del beneficio del cacao para la obtención de bioelectricidad en celdas de combustión microbianas. Resumen: Las celdas de combustión microbianas (CCM) constituyen una tecnología emergente para la generación de bioelectricidad, que además brinda soluciones asociadas a la estabilización de residuos orgánicos. El procesamiento de cacao genera una variada cantidad de subproductos, tales como Lixiviados y Mucílago, los cuales, pueden ser potencialmente empleados como

sustrato en una CCM. En el presente estudio se evaluó el desempeño de un prototipo de CCM de cámara doble, utilizando lixiviado de cacao (LC), mucílago de cacao (MC) y un sistema mixto (LC + MC), a fin de estimar el potencial de estos subproductos para la obtención de bioelectricidad. Las CCM fueron operadas a una concentración de 20% y 60% de sustrato, evaluando su desempeño durante 10 días a temperatura ambiente. Las celdas fueron inoculadas con lodo anaerobio pre tratado térmicamente, verificando la generación de energía eléctrica en intervalos de una hora. Asimismo, se determinó la concentración de materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO). La mayor generación de bioelectricidad fue evidenciada en el sistema mixto, con valores de hasta 29,3 mV y una remoción de DQO de 57,9%. Se concluye que es posible generar valores significativos de bioelectricidad empleando subproductos de cacao en un sistema mixto, con simultánea remoción de materia orgánica. El presente trabajo constituye un aporte para la optimización de sistemas de aprovechamiento de subproductos agroindustriales como fuente de energía renovable.

4. Vidal Morales (2021). Desempeño de un sistema de celdas de combustible microbiano para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de efluentes de una industria de curtiembre ubicada en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca. Resumen: Las celdas de combustible microbiano (CCM) son dispositivos que transforman sustratos biodegradables en electricidad. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un sistema de CCM para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de efluentes de una industria de curtiembre ubicada en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca. Inicialmente, se realizó la colecta y caracterización fisicoquímica de efluentes de pelambre (ARP) y curtido (ARC). Posteriormente, se diseñaron seis prototipos de CCM de cámara única, operando tres celdas (CCM1-CCM3) con ARP, y las restantes (CCM4-CCM6), usando ARC como sustrato, el cual fue diluido en proporciones 1:0, 1:1 y 1:2. Las CCM fueron operadas por 23 días a temperatura ambiente, verificando la generación de energía eléctrica en intervalos de 10 minutos. Asimismo, se determinó el porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5). Los resultados evidenciaron que las celdas CCM3 y CCM6 presentaron la mayor eficiencia, tanto en la generación de energía eléctrica, obteniendo valores máximos de voltaje-corriente de 100,278 mV–10,050 mA para CCM3, y de 99,264 mV–9,948 mA para CCM6; como, en remoción de DQO (67,3 %-CCM3 y 69,8 %-CCM6) y DBO5 (55,9 %-CCM3 y 60,6 %-CCM6). Se concluye que es posible generar valores significativos de energía eléctrica, con simultánea remoción de materia orgánica usando como sustrato efluentes de

curtiembre en una CCM. El presente trabajo constituye un aporte para la optimización de sistemas de tratamiento de ARC, y su potencial aprovechamiento como fuente de energía renovable.

5. De la Cruz M. (2021). Use of waste from the sugar industry for the production of bioelectricity [Uso de los desechos de la industria azucarera para la producción de bioelectricidad]. Resumen: Las celdas de combustible microbiana están dando grandes oportunidades para la generación de electricidad a través del uso de desechos orgánicos. Este trabajo de investigación da una solución medioambientalista al usar desechos de melaza para la generación de bioelectricidad a través de celdas de combustible microbiana de una sola cámara utilizando electrodos de Zinc y Cobre; fabricados de bajo costo. El voltaje máximo generado fue de  $0.953 \pm 0.142$  mV y la corriente fue de  $1.73 \pm 0.13$  mA, todas las celdas mostraron un pH ligeramente ácido durante los 30 días de monitoreo. Los valores de conductividad aumentaron hasta el día 22 ( $111.156 \pm 8.45$  mS/cm) y los valores de los grados Brix disminuyeron desde  $20.07 \pm 0.57$  ° Brix hasta  $11.33 \pm 2.18$  ° Brix. La densidad de potencia máxima hallada fue de  $5.45 \pm 0.31$  W/cm<sup>2</sup> con una densidad de corriente de 308.06 mA/cm<sup>2</sup>.

6. Rojas Flores (2021). Generation of bioelectricity through grape waste [Generación de bioelectricidad mediante desechos de uvas] Resumen: Los residuos de uva causan grandes pérdidas comerciales y medioambientales debido a las pérdidas económicas y malos olores que emiten al descomponerse, debido a esto este trabajo da una forma innovadora de generar electricidad para el beneficio de la sociedad. Las celdas de combustible microbiana fueron utilizadas como tecnología para la generación de electricidad, las cuales se fabricaron de bajo costo utilizando electrodos de grafito y zinc; mientras que un frasco de 500 mL se utilizó como cámara recolectora de sustrato (residuos de uva). Se logró generar valores de máximos de  $0.87 \pm 0.064$  V y  $2.1 \pm 0.45$  mA, mientras que los valores de pH aumentaron desde el primer 3.6 hasta  $5.25 \pm 0.32$ . Mientras que los grados Brix disminuyeron lentamente desde el primer día. El valor de la densidad de potencia máxima fue de  $3.08 \pm 0.0345$  W/cm<sup>2</sup> en una densidad de corriente de 274.17 mA/cm<sup>2</sup> en un voltaje máximo de  $0.81 \pm 0.13$  V. Finalmente las micrografías del electrodo anódico muestra la modificación de una superficie lisa (en su estado inicial) a superficie rugosa (el último día de monitoreo). Esta investigación da una nueva forma de la utilización de los residuos de uva para la generación de bioelectricidad.

7. Rojas Flores (2023). Generación de energía eléctrica a través de desechos de lácteos en celdas de combustible microbianas. Resumen: El aumento de la población humana a generado que el consumo de diferentes tipos de lácteos aumente también, debido a que es uno de los principales alimentos en la dieta en la vida temprana de cada ser humano. Esto a generado que los desechos de este tipo de alimento aumenten de la misma forma, motivo por el cual se ha buscado una forma de utilizarlo eco amigablemente, encontrado en las celdas de combustible microbiana una forma de generar energía eléctrica de manera sostenible. En esta investigación se utilizó desechos de leche como combustible en celdas de combustible microbiana a escala de laboratorio, logrando generar picos de corriente eléctrica y voltaje de  $4.125 \pm 0.347$  mA y  $1.104 \pm 0.101$  V con pH óptimo de operación de  $7.46 \pm 0.35$  cuya conductividad eléctrica del sustrato fue de  $119.373 \pm 4.59$  mS/cm, todo esto en el día 21. Así mismo se calculó la densidad de potencia máxima en  $443.765 \pm 26.738$  mW/cm<sup>2</sup> con una densidad de corriente de  $5.257$  A/cm<sup>2</sup> y mostrando un voltaje de  $1005.78 \pm 13.54$  mV, todo esto operando con una resistencia interna de  $61.795 \pm 8.691$   $\Omega$  . Por ultimo las tres celdas de combustible microbiana se conectaron en serie, logrando generar  $2.66$  V lo suficiente para encender un foco LED de color rojo. De esta forma se da una novedosa forma de generar corriente eléctrica a pequeña escala, dando grandes esperanzas a las empresas ganaderas para reutilizar sus residuos en forma beneficiosas para ellas mismas.

8. Reyes Huamán (2023). Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao mediante celdas de combustible microbiana. Resumen: El estudio, busca encontrar una alternativa para 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, para el estudio se utilizó el agua mucilaginoso de la Cooperativa Agroindustrial Alto Huallaga con una muestra de 2,3L con recambio de oxígeno cada 24h obteniendo como resultado 1248mV de energía eléctrica en todo el proceso de evaluación, además se logró remover el 83.46% de materia orgánica de una muestra inicial 220.615mg/l de contaminante como materia orgánica. Siendo posible generar energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao bajo las condiciones experimentadas, siendo los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de la industria de cacao con un pH, DBO5 y OD que se encontraron en la muestra DBO5 de 220 615 mg/L, STDmg/L 27,9; ODmg/L 1,84; pH 3,8; T°(°c) 24,93 por lo que el agua residual de la industria de cacao contiene una carga orgánica moderada y ácida,

esto proyecta un potencial eléctrico en función a la tasa de remoción de la materia orgánica a partir de aguas residuales de la industria de cacao, en el Testigo 1 (T1) se demostró la eficiencia de remoción de la materia orgánica mediante celdas de combustible microbiano un 83.46%, demostrando que el potencial eléctrico evaluado durante el proceso de operación del sistema es directamente proporcional al oxígeno disuelto.

9. Gabriel Rios (2020). Evaluación del potencial energético de residuos de Theobroma cacao por medio de celdas de combustible microbiano. Resumen: Se evaluó el potencial energético de los residuos de cacao (mazorca y mucílago) para determinar su uso como fuente de energía directa en campo. Se realizaron tres diluciones por sustrato: a) mazorca molida, en diluciones de 1:25, 1:50 y 1:100 (1.2, 0.6 y 0.3 g, respectivamente); y b) mucílago, en diluciones de 1:4, 1:8 y 1:16 (25, 12.5 y 6.25%, respectivamente). La evaluación fue realizada en celdas de combustible microbiano, en 3 períodos: a) aclimatación (1 período) y b) desempeño eléctrico (2 períodos). Durante el tercer período, se observó el mayor desempeño eléctrico en las diluciones de mazorca 1.2 g (voltaje: 726 mV, densidad de potencia: 11.75 mW/m<sup>2</sup> y eficiencia coulombica: 0.33%) y mucílago 12.5% (voltaje: 474 mV, densidad de potencia: 6.52 mW/m<sup>2</sup> y eficiencia coulombica: 0.006%). Nuestros resultados muestran que las diluciones de mazorca 1.2 g y mucílago 12.5% presentaron el mayor potencial energético a lo largo del estudio.

10. Rojas Flores (2020). Bioelectricity through microbial fuel cells from decomposed fruits using lead and copper electrodes. [Bioelectricidad mediante Celdas de Combustible Microbiana a partir de frutas descompuestas usando electrodos de plomo y cobre.]. Resumen: Las celdas de combustible microbiana (CCM) es una tecnología que genera energía eléctrica utilizando la materia orgánica como combustible, convirtiéndose en una nueva forma de generación de electricidad amigable con el medio ambiente. En este trabajo de investigación se utilizó celdas de combustible microbianas (CCMs) con electrodos de plomo y cobre, y como combustible los desechos de aguaymanto, camu-camu, cocona, granadilla, tomate y tuna. Las CCMs se monitorearon durante 22 días los parámetros de voltaje, corriente y pH; así como también se muestra los valores de densidad de corriente(DC) y potencia (DP). La CCM con sustrato de cocona género mayor voltaje durante todo el periodo de monitoreo, desde 0.52 a 0.36 V. Mientras que el camu-camu género mayor corriente de 6.1 a 5.6 mA, desde el primer al último día. Todas las celdas muestran pH ligeramente ácidos, del mismo modo que también se observó pérdidas de volumen, siendo la CCM con granadilla la que mostró mayor pérdida. Las CCMs

con sustratos de camu-camu, aguaymanto, cocona, tomate, granadilla y tuna mostraron 7.15, 5.23, 4.14, 4.13, 3.25 y 3.72 W/cm<sup>2</sup> de DP<sub>max</sub>. en 0.54, 0.42, 0.75, 0.29, 0.45 y 0.56 A/cm<sup>2</sup> de DC. Finalmente se logró generar bioelectricidad exitosamente, dando una solución a las empresas importadoras y exportadoras de este tipo de frutas vegetales para su propio beneficio.

11. Castro Silgado (2023). Implementación de celdas de combustible microbianas para el aprovechamiento energético de la biomasa residual obtenida de la poscosecha del cultivo de plátano. Resumen: El aumento de la población a nivel mundial conlleva un aumento en el consumo de energía eléctrica, por lo que actualmente se hace necesario buscar fuentes de energía que contribuyan a suplir la demanda energética con el menor impacto ambiental. Teniendo en cuenta que los residuos más abundantes a la hora de la poscosecha del cultivo de plátano es el pseudotallo se utilizó este como sustrato. Se evaluó el efecto de la variación de parámetros como la concentración de biomasa el cual fue de 5,2 g/L y 10 g/L, y el electrolito en el puente salino los cuales fueron NaCl y KCl en la generación de potencia. La energía total generada y la potencia máxima alcanzada por las configuraciones 5,2 g/L NaCl fue de 8,66 kJ/kg y 1,33 W - 5 W, para 10 g/L NaCl fue 3,96 kJ/kg y 9,02 W - 6 W, para 5,2 g/L KCl fue de 2,06 kJ/kg y 1,08 W - 5 W, y para la configuración 10 g/L KCl fueron de 3,98 kJ/kg y un máximo de potencia de 1,15 W - 5 W. Se obtuvo que la configuración más óptima bajo estas condiciones fue la de 5,2 g/L NaCl debido a que esta produjo una mayor cantidad de energía, así como la mayor potencia. Esto indica que a bajas concentraciones de biomasa el NaCl produce más energía durante el tiempo de generación, mientras que para concentraciones bajas el KCl produce más energía que el NaCl. Se determinó mediante un análisis ANOVA que la concentración de biomasa, electrolito utilizado en el puente salino y la interacción entre estos dos factores afectan significativamente a la variable respuesta, energía total generada por unidad de masa en cada celda de combustible microbiana.

12. Fitriana Fitriana (2023). Bioelectricidad de residuos de mazorcas de cacao como sustrato en una pila de combustible microbiana de doble cámara. Resumen: Actualmente, el aprovechamiento de la mazorca de cacao no se ha maximizado, lo que genera desperdicios y malos olores que perturban el medio ambiente. Sin embargo, la mazorca de cacao contiene una cantidad relativamente alta de compuestos de celulosa que sirven como fuente de energía o nutrición para que las bacterias lleven a cabo actividades metabólicas, por lo que tienen potencial para usarse como sustrato en celdas de combustible microbianas (MFC). Con base en esto, el

objetivo de esta investigación es investigar la bioelectricidad generada por un MFC utilizando cáscara de mazorca de cacao como sustrato, incluyendo voltaje, corriente y densidad de potencia, con el fin de determinar el potencial de los residuos de cascarilla de cacao como energía eléctrica. fuente. En este estudio, un MFC de doble cámara consta de una cámara anódica con electrodos de cobre y una cámara catódica con electrodos de zinc, separadas por un puente salino. Las bacterias utilizadas fueron *Saccharomyces cerevisiae* y el sustrato se elaboró a partir de residuos de cáscara de mazorca de cacao. Las pruebas de bioelectricidad implicaron medir el voltaje, la corriente y la densidad de potencia producida por el MFC durante varios minutos. Los resultados de las mediciones para el voltaje máximo, la corriente máxima generada y la potencia eléctrica máxima (a los 6 días) del reactor fueron los siguientes: 36,0 mV, 0,19 mA y 456 mW/m<sup>2</sup>, respectivamente.

13. Rojas Flores (2022). Bioelectricidad mediante pilas de combustible microbianas a partir de residuos de aguacate. Resumen: El vertido de residuos orgánicos en las zonas aledañas a los centros de suministro de alimentos y el uso excesivo de combustibles fósiles para la generación de energía han generado importantes problemas de contaminación a nivel mundial. Una de las soluciones novedosas es el uso de residuos orgánicos para la generación de electricidad mediante el uso de tecnología de pilas de combustible microbianas. En esta investigación, se fabricaron celdas de combustible microbianas de doble cámara, de bajo costo y a escala de laboratorio, utilizando zinc y cobre como electrodos y desechos de aguacate como combustible. Al séptimo día se alcanzaron valores de corriente y voltaje de  $3,7326 \pm 0,05568$  mA y  $0,74 \pm 0,02121$  V, con un pH óptimo de funcionamiento de  $5,98 \pm 0,16$  y una conductividad eléctrica máxima de  $94,46 \pm 5,12$  mS/cm. Las celdas mostraron una resistencia operativa muy baja de  $71.480\Omega$ , indicando la buena conductividad eléctrica de los electrodos. Asimismo, se generó una densidad de potencia de  $566,80 \pm 13,48$  mW/cm<sup>2</sup> a una densidad de corriente de  $5,165$  A/cm<sup>2</sup>. Esta investigación brinda una solución ecológica a agricultores y empresas dedicadas a la exportación e importación de este fruto porque muestra los beneficios de utilizar sus propios residuos para la generación de electricidad, reduciendo costos.

14. Rojas Flores (2021). Uso potencial de residuos de papaya como combustible para generación de bioelectricidad. Resumen: Los residuos de papaya (Carica papaya) causan importantes daños comerciales y ambientales, principalmente por las pérdidas económicas y los malos olores que

emiten al descomponerse. Por lo que este trabajo proporciona una forma innovadora de generar electricidad en beneficio de la sociedad y las empresas dedicadas a la importación y exportación de esta fruta. Las pilas de combustible microbianas son una tecnología que permite la generación de electricidad. Estas celdas fueron producidas con materiales de bajo costo utilizando electrodos de zinc y cobre; mientras que como cámara de recolección de sustrato (residuos de papaya) se utilizó un tubo de polimetilmetacrilato de 150 mL. Se generaron valores máximos de  $0,736 \pm 0,204$  V y  $5,57 \pm 0,45$  mA, mientras que los valores de pH aumentaron de 3,848 a  $8,227 \pm 0,35$  y los Brix disminuyeron lentamente desde el primer día. El valor máximo de densidad de potencia fue de  $878,38$  mW/cm<sup>2</sup> con una densidad de corriente de  $7,245$  A/cm<sup>2</sup> y un voltaje máximo de  $1072,77$  mV. Las bacterias se identificaron con un porcentaje de identidad del 99,32% para las especies de *Achromobacter xylosoxidans*, del 99,93% para *Acinetobacter bereziniae* y del 100,00% para *Stenotrophomonas maltophilia*. Esta investigación ofrece una nueva forma de utilizar residuos de papaya para la generación de bioelectricidad.

15. Gámez Hernández (2020). Obtención de energía eléctrica por celdas de combustión microbiana con plantas, en un sistema de una sola cámara sin el uso de membranas. Resumen: Las celdas de combustión microbiana son dispositivos que aprovechan la biodegradación de la materia orgánica para transformarla en electricidad. Las plantas sintetizan materia orgánica a través de la fotosíntesis, y la degradan con ayuda de los microorganismos que se encuentran en la rizosfera (raíces de las plantas). La estructura básica del mecanismo consiste en dos cámaras que difieren en las condiciones de oxigenación, separadas por una membrana. Sin embargo, estas membranas son de alto valor, que al usarlas incrementan el costo principal de esta tecnología. Se evaluó la producción de energía eléctrica midiendo la diferencia de potencial generada en un sistema de una sola cámara sin membrana, que emplea 4 individuos del género *Brachiaria* como fuente de micorrizas, minas de grafito como electrodos y enriquecimiento microbiano del ánodo con bacterias provenientes aguas estancadas para la optimización del dispositivo. El voltaje varió a lo largo del experimento y se obtuvo  $160,4$  mV como valor máximo.

16. Peñaloza Casanova (2018). Utilización de la *Spirulina platensis* (*Arthrospira*) para la producción de energía mediante celdas de combustión con aguas residuales domésticas como sustrato. Resumen: La demanda de servicios energéticos está aumentando de forma considerable, siendo los combustibles fósiles e hidroeléctricos las fuentes más utilizadas y las que genera mayores impactos ambientales, por ello como alternativa de sostenibilidad en este

proyecto se plantea la utilización de *Spirulina platensis* para la producción de energía mediante una celda de combustión con aguas residuales domésticas como su sustrato. Los usos reportados de *Spirulina platensis* actualmente están en el área de medicina y nutrición, sin embargo, para éste proyecto se utilizó como fuente de energía renovable, ya que, al realizar la fotosíntesis y degradación de la materia orgánica, se genera electrones, los cuales serán aprovechados para generar energía. Se realizó el cultivo de la cianobacteria de forma exitosa en medio de cultivo Zarrouk, se realizó la adaptación de la cianobacteria en el agua residual que provenía de la quebrada la Iglesia obtenido los mejores resultados en el reactor que contenía 90% de agua residual y 10% de inóculo de la cianobacterias. Se realizó un modelo de celda de combustión microbiana, teniendo en cuenta las reacciones de oxidación y reducción que posiblemente pueden llegar a ocurrir y conducción de electrones en el sistema. En la puesta en marcha de la celda de combustión microbiana se medirá la energía producida en términos de resistencia interna, densidad de potencia y eficiencia coulombica y la cantidad de biogás emitida.

17. De La Cruz-Noriega, M. (2022). Generación de bioelectricidad a través de levadura *Galactomyces* sp. Resumen: En la búsqueda de nuevos combustibles capaces de generar energía eléctrica de forma sostenible y amigable con el medio ambiente, esta investigación utilizó la levadura *Galactomyces* sp en celdas de combustible microbiana a escala de laboratorio y bajo costo, para dar una nueva solución innovadora. Las celdas de combustible microbiana se fabricaron de polietileno con electrodos de zinc y cobre como ánodo y cátodo, respectivamente. Logrando generar valores picos de corriente y voltaje en circuito abierto de  $4.23033 \pm 0.3102$  mA y  $0.7522 \pm 0.03573$  V, con un pH óptimo de  $7.84772 \pm 0.21744$  y conductividad eléctrica pico del sustrato de  $58.89078 \pm 2.51661$  mS/cm. De la misma forma, la densidad de potencia mostrada fue  $4.749 \pm 0.294$  W/cm<sup>2</sup> con densidad de corriente de 351.086 mA/cm<sup>2</sup>. Por último, las celdas de combustible microbiana se conectaron en serie, generando 2.60 V y logrando encender un foco led verde. Dando de esta forma una nueva y un prometedor uso de esta levadura para generar electricidad.

18. Añilema Buñay, Luis Miguel.(2019). Modelado y simulación del proceso de generación de bio-electricidad en una celda microbiana (MFC) con los sustratos: glucosa y lixiviados. Resumen: En el presente trabajo, el objetivo fue simular modelos termodinámicos y electroquímicos usando COMSOL Multiphysics que describen el funcionamiento de una celda de combustible microbiana, empleando los sustratos glucosa y acetato, así como su validación mediante la

variación de amperaje y temperatura, esto con el fin de determinar parámetros que son necesarios para el modelo y establecer un algoritmo computacional (script) para futuras investigaciones. Estos modelos se diseñaron desde 2 perspectivas, la primera enmarcada en fenómenos de transporte además de la física distribución de corriente secundaria, la cual se incluye el modelado en la herramienta computacional COMSOL Multiphysics, la segunda consiste en la presentación del algoritmo computacional desarrollada en Matlab, empleando ecuaciones electroquímicas y termodinámicas, con el fin de mostrar la importancia de los fenómenos que suceden dentro de la MFCs, esto con la ayuda de la descripción matemática de las celdas de combustible microbianas, obteniéndose así la generación de voltaje, teniendo así una generación teórica con el sustrato glucosa de 1.15 V, con la ecuación de Monod modificada y en el caso del sustrato acetato tiene una generación teórica de 1.1 V con la ecuación antes mencionada. Finalizando con la recomendación del uso de equipos apropiados para la simulación debido que cuando se ejecuten la simulación este no se tarde mucho tiempo.

19. Benites Santiago M.(2020). Bioelectricity from *Saccharomyces cerevisiae* yeast through low-cost microbial fuel cells [Bioelectricidad a partir de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* a través de celdas de combustible microbiana de bajo costo]. Resumen: En esta investigación se utilizó a la levadura *Saccharomyces cerevisiae* como combustible en celdas de combustible microbiana utilizando electrodos de Zn-Zn y Zn-Cu, con la finalidad de evaluar en cuál de estos dos sistemas se producía mayor bioelectricidad. La levadura fue identificada al 86% como *Saccharomyces cerevisiae* mediante el sistema API 20 C AUX. En cuanto a la producción de bioelectricidad, se observó que en la celda de combustible microbiana con electrodos de Zn-Cu se logró generar mayor voltaje que en las celdas con electrodos de Zn-Zn, siendo el pico máximo de generación de voltaje de 0.761 y 0.0089 V respectivamente. Ambas celdas mostraron pH ligeramente ácido y neutro durante el monitoreo. Los valores máximos de densidad de potencia y densidad de corriente mostrado por la celda de Zn-Cu fue de 8.196 mW/cm<sup>2</sup> en 8.383 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente, por otro lado, la celda de Zn-Zn logró generar 0.5684 mW/cm<sup>2</sup> en 0.238 mA/cm<sup>2</sup> de densidad de potencia. y densidad de corriente. Este trabajo de investigación brinda una nueva forma de producción de bioelectricidad utilizando celdas de combustible microbiana construidas a bajo costo, utilizando como combustible una levadura muy utilizada en la industria cervecera.

# MARCO TEÓRICO

## 6.1 Agroindustria

La agroindustria se define como una serie de actividades para elaborar u obtener materias primas y productos intermedios dentro del sector agrícola, incluyendo las actividades forestales y de pesca. (VASQUEZ *et al.*, 2021) Es una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para generar alimentos o materias primas semi-elaboradas destinadas al mercado. También constituye una parte del sector industrial que se dedica a producir y/o transformar, almacenar y comercializar productos provenientes del campo. Entre los productos que se industrializan están: frutas, verduras, raíces, semillas, hojas, tubérculos y vainas; algunos se comercializan en fresco y otros son transformados en néctares, jugos, mermeladas, ensaladas, harinas, aceites, vinos, concentrados en polvo y conservas, por mencionar algunos.

## 6.2 Procesos agroindustriales

### 6.2.1 Nixtamalización

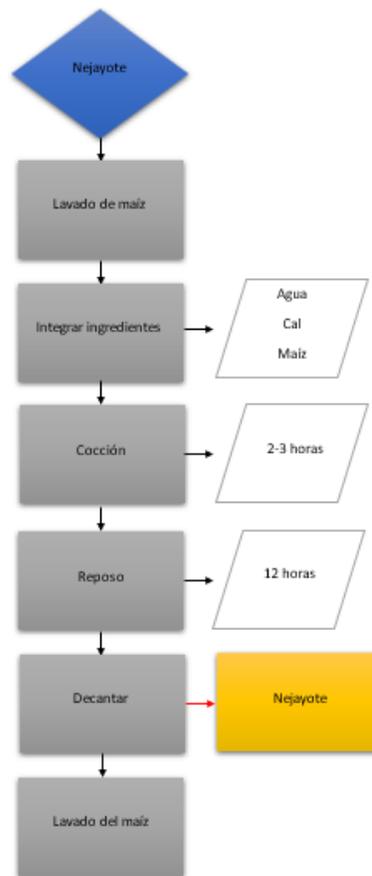
La nixtamalización es un proceso térmico-alkalino autóctono de México y América central ya que fue desarrollada por la civilización maya y azteca en Mesoamérica y a su vez este proceso fue desarrollaron el proceso de nixtamalizado, además de la utilización del proceso en el norte de Estados Unidos y parte de Europa y Asia. Este proceso mejora las características nutricionales y además sensoriales del maíz, permitiendo la remoción parcial del pericarpio.(LOPEZ-PACHECO, *et al.*, 2019)

Las condiciones a las que se somete el maíz durante la nixtamalización son de gran importancia, ya que la temperatura y la agitación tienen un efecto significativo en la remoción de las capas superficiales, así como en la adsorción del agua y el calcio. En dicho proceso, la acción del hidróxido de calcio genera dos productos: el nixtamal, que es el grano suave disponible para la elaboración de masa o productos derivados, y el nejayote, que es el agua de cocimiento y cuyas propiedades físicoquímicas resultan de los componentes presentes en el maíz.(MEZAR SUAREZ,*et al.*,2016)

Ciertas propiedades biológicas (actividad antioxidante) del nejayote se atribuyen a la presencia de compuestos bioactivos, tales como arabinosilanos (AX) y polifenoles. Los primeros son polímeros de xilosa sustituidos por un arabinofuranosil, los cuales están presentes en cereales y

gramíneas sin celulosa.. Los segundos funge como vínculo estructural entre el pericarpio y el endospermo del grano.(SAMIL ARGUN M., EMIR ARGUN M. 2017)

El nejayote suele desecharse en la red de alcantarillado urbano arrastrando cantidades significativas de materia orgánica (partes del grano de maíz como el pericarpio, el germen y el endospermo) y materia inorgánica (exceso de calcio y magnesio proveniente de la cal utilizada en el proceso). Para la elaboración del nejayote es necesario agua, cal, y maíz. Ya en un recipiente se le agrega agua junto con el maíz previamente lavado, cal para después integrar todo para posterior llevar a ebullición por aproximadamente de 2 a 3 horas para que el pericarpio libere las proteínas, para después retirar los granos de maíz para así obtener por una parte los granos de maíz (nixtamal) y además el nejayote.



**Figura 1.** Diagrama general de la elaboración del Nejayote (elaboración propia).

### 6.2.2 Beneficiado de café

La producción de café es una de las actividades agroindustriales que tienen mayor atención en el mercado mundial y de las más importantes en tamaño y en demanda por parte de los

consumidores, por lo que abundan fábricas en cualquier parte del planeta, encargadas de realizar el remojo del café con diferentes volúmenes dependiendo de la necesidad de la región, el mayor problema de la industria cafetera es la tira del agua residual cuando se utiliza el procesamiento húmedo para la fermentación del café.

Específicamente el café, que pertenece al género *Café* de la familia Rubiaceae, es una de las bebidas más preferidas que se consumen en todo el mundo. Hablando de México, ocupa el noveno lugar en el mundo que más produce con 889 mil toneladas al año. Predominan dos variedades de café, el café Arábica y robusta (*Coffea canephora*). El estado de Chiapas es una de las regiones productoras de café más grandes y famosas de México con su aporte a la producción nacional de 41%. En esta región tiene varias industrias de procesamiento de café a pequeña escala ubicadas a lo largo de las orillas de los ríos y/o arroyos para reducir los costos de producción en cuanto a el acceso de agua. (CRUZ, *et al.*, 2017)

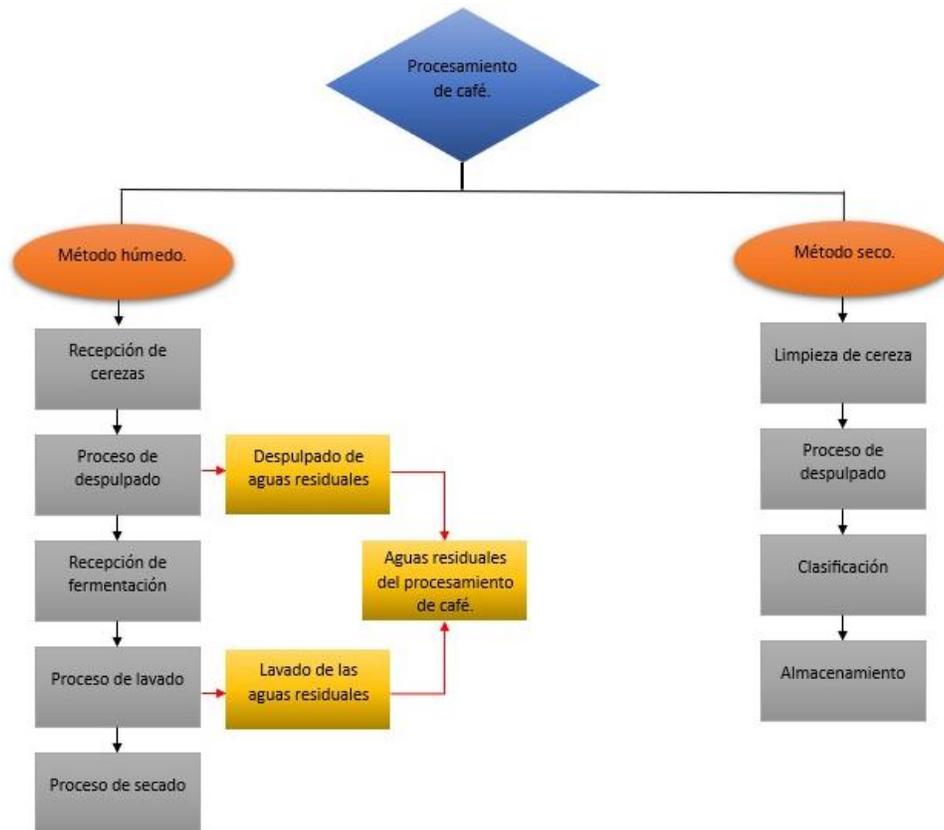
Para obtener el producto del café, se pasa por diferentes procesos, dos específicamente, la primera por el método seco en el cual las cerezas de café son dejadas al sol por 2-3 semanas con la finalidad de eliminar las capas externas de la cereza del café. El segundo método y que más cantidad de residuos sólidos y líquidos producen es por el proceso húmedo, en el que los residuos son muy contaminantes.

La industria del procesamiento húmedo del café utiliza un gran volumen de agua y produce grandes cantidades de efluentes que tienen el potencial de dañar el medio ambiente. Utiliza hasta 15 L de agua por kilogramo de café verde durante las distintas etapas de la producción poscosecha. (ADDI, *et al.*, 2019)

En el proceso húmedo (Figura 2) inicia llevando las cerezas del café a un reservorio. A partir de aquí las cerezas de café son llevadas por la gravedad a las despulpadoras. En Chiapas, el transporte a las despulpadoras es por agua y gravedad. Ya en las despulpadoras las cerezas como su nombre lo dice se despulpa (proceso la cual se eliminan la pulpa y la piel externa) para después seleccionarlas en función a su tamaño. Después de este proceso, queda una capa viscosa alrededor del café despulpado, que posteriormente se eliminará en la fermentación.

Para el proceso de fermentación, los granos de café se mantienen entre 12 y 36 horas, dependiendo de la temperatura, la altitud, el espesor de la capa de mucílago (capa viscosa alrededor del café) y la concentración de enzimas. La capa de mucílago se fermenta mediante

una combinación de actividad microbiana. El proceso se da por finalizado después de lavar los granos para eliminar los últimos restos de mucílago descompuestos. Posteriormente, los granos en estado pergamino se secan.



**Figura 2.** Diafragma general del procesamiento del café (CRUZ, *et al.*, 2017).

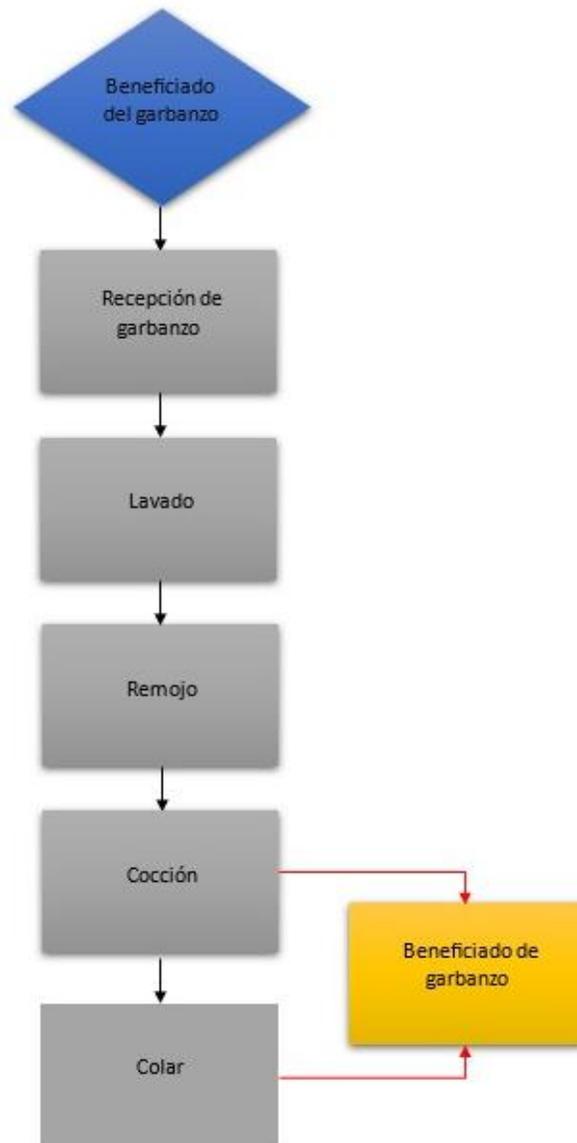
### 6.2.3 Beneficiado de Garbanzo.

Los Garbanzos (*Cicer arietinum L.*) son una leguminosa anual de la familia fabaceae, típicamente cultivada en la India y el Medio Oriente. Además son ricos en proteínas, carbohidratos (principalmente almidón y fibras), minerales y vitaminas. La palabra aquafaba, está compuesta formada por aguafaba (Latín para agua y frijoles, respectivamente).

La aquafaba no sé compone únicamente del garbanzo si no que engloba a varias legumbres., La soja negra (*Glycine max*), soja amarilla (*Glycine max*), y frijoles negros pequeños (*Phaseolus vulgaris L.*). Estas legumbres han sido parte importante en la medicina tradicional oriental ya que tienen múltiples efectos terapéuticos potenciales sobre el cáncer, la diabetes, enfermedades cardiovasculares, cerebrales y neurodegenerativas.

- Proceso

Consiste en llegar a temperatura de ebullición los garbanzos sumergidos en agua, previamente remojados en esta por un periodo de 10 a 12 horas. El proceso de cocción (Figura 3) se realiza para eliminar los antinutrientes (inhibidores de tripsina) (Thomas, *et al.*, 2019). Este proceso se puede realizar en una olla normal o a presión, el periodo de ebullición para el garbanzo hidratado oscila entre 30 y 90 minutos en una olla normal, en cambio, en una olla a presión el tiempo puede llegar a ser de 25 a 45 minutos (THOMAS, *et al.*, 2019; MEJÍA, Nora, *et al.*, 2022)



**Figura 3.** Diagrama general de la elaboración del beneficiado de garbanzo (elaboración propia).

## 6.3 Aguas residuales agroindustriales

### 6.3.1 Nejayote

Se ha estimado que una planta procesadora de maíz (figura 1), productora de nixtamal, con capacidad de 600 t-día, llega a generar entre 1,500 y 2,000 m<sup>3</sup> de nejayote por día, (Mustafa, Argun and Mehmet Argún, 2017) y hablando de números gigantescos y preocupes se estima que alrededor de 1,2 millones de m<sup>3</sup> se generan cada mes, solo en México. Preocupantes porque este efluente es considerado contaminante debido a su pH alto (12 a 14) y su elevada carga de materia orgánica (2,540 mg·L<sup>-1</sup>). Recientemente, el nejayote industrial se vierte en cuerpos de agua (ríos o lagos), en suelos o en el alcantarillado público, y pocas veces se le aplica algún tratamiento previo.

Dependiendo del sistema de cultivo utilizado y de las técnicas de gestión del agua, durante el cultivo del maíz se pueden producir diferentes cantidades de aguas residuales. La cantidad de agua de riego utilizada, las precipitaciones y la frecuencia de riego son variables que pueden afectar el volumen.

Las características de las aguas residuales de maíz pueden diferir en cuanto a su composición dependiendo de una serie de variables, incluido el uso de fertilizantes y pesticidas, la presencia de residuos vegetales y el manejo de desechos orgánicos. Estas aguas contienen frecuentemente nitratos, fosfatos, materia orgánica, sedimentos, pesticidas y otros químicos utilizados en la agricultura.

Es importante recordar que es necesario un manejo adecuado de las aguas residuales del maíz para detener la contaminación del agua y salvaguardar el medio ambiente. Esto podría implicar poner en práctica estrategias de gestión del agua, como aprender a utilizar menos agua, sistemas de riego eficientes y tratamiento de aguas residuales antes de liberarlas al medio ambiente. En la **tabla 1** se mencionan sus características del nejayote.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote.

Propiedades	Parámetros
Contenido total de sólidos (g/L)	11.68
Azúcares reductores totales (mg/L)	149

Sólidos solubles totales (°Brix)	1.53
Carbón orgánico total (mg/L)	2,984.10
Demanda química de oxígeno (mg/L)	25,000 – 30,000
Polifenoles totales (mg ácido gálico/L)	1,190
pH	12 – 14
Densidad (kg·m <sup>-3</sup> )	1,003.54
Viscosidad (Pa·s)	0.002301
Nitrógeno libre (ppm)	200 – 300
Calcio (mg/L)	1,526.21
Humedad (%)	97.72
Cenizas (%)	0.767
Cenizas sólidos %	17.41-19.09
Almidón	6.4–32.0
Proteína cruda (%)	7.42
Grasa cruda (%)	1.48
Fibra cruda (%)	19.3
Carbohidratos (%)	0.862

Fuente: (MUSTAFA, Argun *and* MEHMET Argün, 2017)



**Figura 4.** Agua de nejayote

### 6.3.2 Agua del beneficiado húmedo

El agua de beneficio húmedo del café se caracteriza por su color (marrón oscuro), alta materia orgánica, acidez, nutrientes y presencia de fenol (tabla 2) Estos componentes hacen que las aguas residuales se consideren de alta resistencia. La materia orgánica como proteínas, pectina y azúcar de la pulpa y el mucílago hace que el agua efluente tenga una alta viscosidad.

**Tabla 2.** Características fisicoquímicas de las aguas residuales del procesamiento del café

<b>Propiedades</b>	<b>Parámetros</b>
Color (Pt-Co)	17966.7
Acidez	3360
Densidad	1,1075
Total de sólidos disueltos (mg/L)	1002–3933
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	2390–2820
Sólidos Totales (mg/L)	3520–4200
TVS (mg/L)	8208
Turbidez (NTU)	1481.7

pH	3.57–4.21
CE (Ds/m)	0.96–1.20
DO (mg/L)	2.0–2.6
DBO (mg/L)	3700–5861
DQO (mg/L)	8480–45955
DBO: DQO	0.56–0.59
TN (mg/L)	125.8–700
P (mg/L)	4.4–36.43
TOC (mg/L)	11,400
K (mg/L)	20.4–45.8
Ca (mg/L)	67.8–92.0
mg (mg/L)	42.5–62.1
Cl–(mg/L)	25.2–46.8
Na (mg/L)	7.8–13.8

Fuente: (ADDI alemayehu, *et al.* 2019)

A Continuación en la figura 5 se presenta como se visualiza el agua proveniente del proceso húmedo que se le da al café.



**Figura 5.** Agua del beneficio húmedo del café.

### 6.3.3 Aquafaba

La información científica sobre las propiedades fisicoquímicas y la composición de la aquafaba son muy escasas, pero fueron recabadas las anteriores.

**Tabla 3.** Características fisicoquímicas de la aquafaba

Propiedades	Parámetros
pH	7.43
Densidad	1.01-0.01
Proteína	1.5 g/100 g
Cenizas	0.5 g/100 g
Emulsificación	64

Fuente: (RANA Mustaf, *et al.* 2018)

El agua de aquafaba es de color amarillenta a naranja ya que se desprende del garbanzo (figura 6).



**Figura 6.** Aquafaba.

#### 6.4 Bioenergía

La bioenergía es la energía que se obtiene de la biomasa. La biomasa es el material orgánico que más ha sido utilizado como combustible a lo largo de toda la historia de la humanidad. Es producida por organismos fotosintéticos al fijar luz, agua y dióxido de carbono. La bioenergía o energía que viene de los recursos biológicos es renovable y neutra en carbono (Toledo L. *et al.*, 2019).

Este tipo de energía renovable es utilizada especialmente para cocinar y los usos más modernos incluyen la generación de calor y electricidad combinados (Martinez H. *et al.*, 2020). Se puede generar a partir diferentes formas de biomasa, incluidos los residuos ganaderos, agrícolas, madereros, cultivos energéticos, los componentes orgánicos de los residuos sólidos municipales y otras corrientes de desechos orgánicos (Siegmeier T. *et al.*, 2019).

#### 6.5 Procesos de producción de bioenergéticos

##### 6.5.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una tecnología de tratamiento agua residuales agrícolas común y eficiente, así como de aguas negras; este proceso implica la desintegración de la materia orgánica presente por medio de microorganismos y da como resultado la producción del biogás, que es una fuente de energía renovable las ventajas de este proceso incluyen el uso de menos energía, la capacidad de reutilizar el biogas como fuente de energía para su propia producción, tiene un menor costo de tratamiento y no produce ningún otro tipo de contaminante como subproducto. (Rahman, W. *et al.*, 2020)

La digestión anaerobia se divide en cuatro pasos:

1. Hidrólisis: Los microorganismos hidrolíticos a través de enzimas transforman las macromoléculas de los nutrientes (carbohidratos, lípidos, proteínas) en sus monómeros (monosacáridos, ácidos grasos, aminoácidos y polipéptidos).
2. Acidogénesis: Las bacterias acidogénicas degradan los monómeros obtenidos previamente en combustibles solubles como los ácidos grasos volátiles, los cuáles son ácidos de cadena corta que tienen un solo grupo carboxílico y entre uno y seis carbonos saturados.
3. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas transforman los ácidos grasos volátiles en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.
4. Metanogénesis: Las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono, además de convertir el dióxido de carbono y el hidrógeno en metano y agua.

Para mayor comprensión a continuación se deja un esquema de los pasos de la digestión anaeróbica (Figura 7).

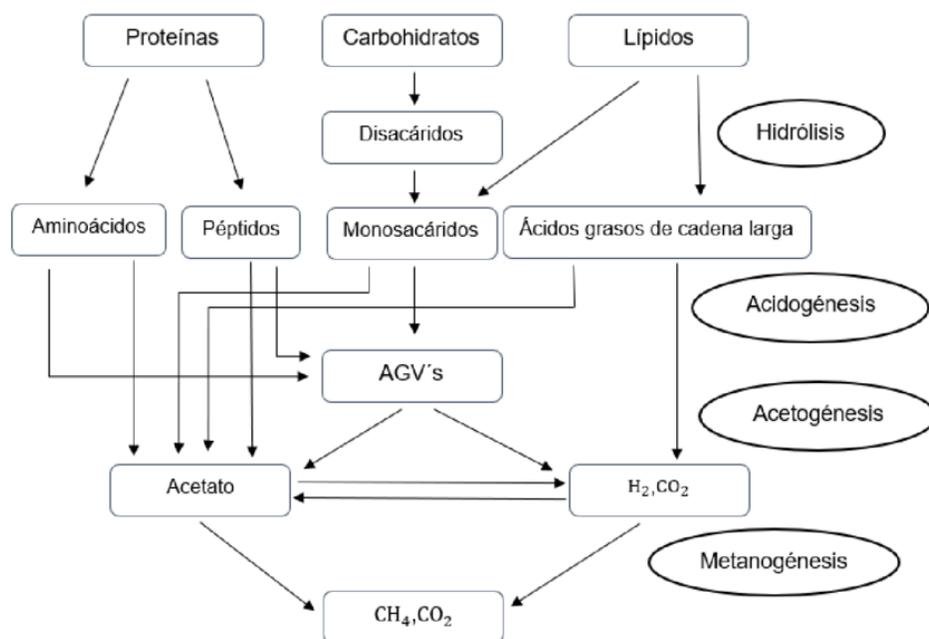


Figura 7. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una aplicación muy relevante actualmente para el aprovechamiento de los microorganismos y la generación de energías limpias.

### 6.5.1.1 Biogás

“El biogás es una fuente de energía ambientalmente ventajosa derivada de la digestión anaeróbica de sustratos orgánicos, como estiércol, desperdicios de alimentos, lodos de depurado y residuos de cultivos. Dependiendo del tipo de materia prima, se compone de metano combustible (60-70%), dióxido de carbono (30-40%), y trazas de otros gases” (Lemma B. *et al.*, 2020).

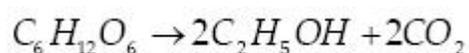
El biogás se produce por medio de la digestión anaerobia, donde las aguas residuales agrícolas se transforman biológicamente gracias a ciertos microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y otros compuestos orgánicos ricos en energía como productos finales, denominados digestatos, estos son ricos en fósforo, nitrógeno, calcio, los cuáles funcionan muy bien como fertilizantes para cultivos.

#### 6.5.1.1.1 Biometano

El metano es un gas incoloro e inodoro. Se trata de un producto final de la putrefacción de organismos vivos como animales y plantas, es decir, de la descomposición de moléculas más complejas. Su densidad en estado líquido es menor que la del agua. Es prácticamente insoluble en este, pero soluble en líquidos orgánicos como la gasolina, éteres, etc. En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso debido a que su temperatura de ebullición es de  $-161.5^{\circ}\text{C}$ . La reacción de combustión del metano es muy exotérmica liberando gran cantidad de energía en forma de calor que le confiere al biogás excelentes aplicaciones en la obtención de energía.

### 6.5.2 Fermentación alcohólica

La fermentación es el más simple de los tres procesos desde el punto de vista mecánico, y puede definirse como un proceso metabólico generador de energía en el cual tanto los donadores como los aceptores de electrones son compuestos orgánicos. En la fermentación, el sustrato da lugar a una mezcla de productos finales, unos más oxidados que él y otros más reducidos. Los sustratos fermentables no pueden ser ni muy oxidados ni muy reducidos. Los carbohidratos son por esta razón muy buenos sustratos para los procesos fermentativos, aún cuando las bacterias pueden también fermentar ácidos orgánicos, aminoácidos, piridinas y pirimidinas.



### 6.5.2.1 Etanol

La producción de etanol es básicamente similar en las etapas de desarrollo del inóculo a la producción de levadura - pienso, pero el producto final depende de que opere o no el mecanismo de control metabólico conocido como "efecto Pasteur". Así, el piruvato se decarboxila oxidativamente dando acetilcoenzima A y entrando en el ciclo de Krebs, si existe aireación en condiciones de crecimiento óptimo de la levadura y se decarboxila no oxidativamente a acetaldehído, que se reduce a continuación a etanol, en condiciones de anaerobiosis y altas concentraciones iniciales de azúcar (10 - 19 % p/v) y fosfato.

### 6.5.3 Fermentación oscura

La fermentación oscura es un tipo de proceso metabólico de baja ganancia energética en el cual los compuestos orgánicos son degradados en ausencia de receptores de electrones externos, formándose una mezcla de productos oxidados y reducidos (Sikora A. *et al.*, 2013). Es un fenómeno ubicuo que se da sólo en condiciones anóxicas y durante la fase acidogénica de la digestión anaerobia de materia orgánica. (Singh S. *et al.*, 2015)

La producción de hidrógeno fermentativo de residuos se refiere a la obtención de este gas a través de microorganismos los cuales son capaces de convertir la materia orgánica a ácidos y alcoholes con una liberación simultánea de hidrógeno molecular.

#### 6.5.3.1 Biohidrógeno

La generación de biohidrógeno a través de la fermentación oscura se logra principalmente por bacterias estrictamente anaerobias o anaerobias facultativas bajo condiciones anaerobias. En general son especies del género *Clostridium* formadoras de esporas, facultativas *Enterobacter* sp y *Bacillus* sp, algunas bacterias termofílicas y acidogénicas anaerobias provenientes de lodos.

Los monosacáridos son la principal fuente de carbono donde se destaca particularmente la glucosa seguido de la xilosa, el almidón, la celulosa y otras fuentes que pueden ser generadas a partir de la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos, por esta razón la reacción de biotransformación de la glucosa a ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, es la ecuación ampliamente aceptada como referencia para la estimación de la producción teórica del hidrógeno fermentativo.

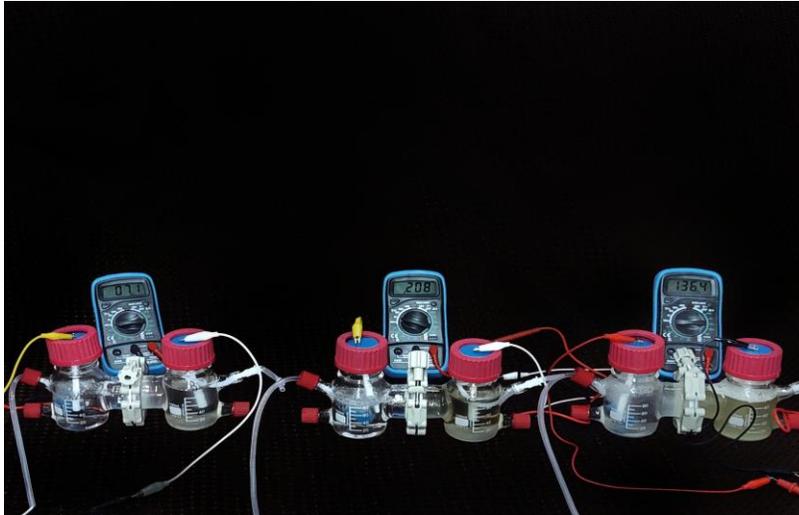


## 6.6 CCM (Cámaras de combustión microbiana)

Las cámaras de combustión microbianas representan una tecnología emergente en la conversión de energía y el tratamiento de residuos. Estas cámaras utilizan microorganismos para convertir materia orgánica en electricidad y biogás a través de procesos biológicos y han resaltado sus principios operativos, avances tecnológicos, aplicaciones, beneficios, desafíos y perspectivas que se pueda tener a futuro.

Las cámaras de combustión microbiana funcionan con microorganismos que descomponen sustratos orgánicos en un ambiente anaeróbico. El proceso se basa en la oxidación de compuestos orgánicos en el ánodo de la cámara, que producen electrones y protones. Los electrones se transfieren al cátodo a través de un circuito externo, generando una corriente eléctrica. Los protones pasan a través de una membrana de intercambio iónico hasta el cátodo, donde se combinan con el oxígeno para formar agua, completando el ciclo de reacción. (González *et al.*, 2022)

La pila de combustible microbiana es un aparato que utiliza microorganismos para transformar la energía química de un sustrato en energía eléctrica. Algunos microorganismos pueden transferir los electrones que producen durante su metabolismo a un electrodo en lugar de elementos naturales como el oxígeno, lo que permite este proceso. De acuerdo con Ortiz, Moreno y Jiménez (2014): Una celda de combustible microbiana consta de dos cámaras separadas por una membrana semipermeable: una contiene un electrodo (ánodo) sumergido en una solución química, y la otra contiene un segundo electrodo (cátodo) también sumergido en la solución química. Primero ocurre la oxidación de combustible, y luego se reduce un aceptor de electrones en la solución. En la figura 8 se muestra una celda microbiana donde los electrones viajan del ánodo al cátodo a través de un circuito externo conectado por dos electrodos.



**Figura 8.** La cámara de combustión microbiana.

#### 6.6.1 Tipos de CCM. (Cámaras de combustión microbiana)

Los reactores de lecho fijo representan una tecnología clave para la construcción y operación de pilas de combustible microbianas (MCC). Estas células utilizan microorganismos para convertir la materia orgánica en electricidad mediante procesos microbianos. Esta es una revisión exhaustiva de los reactores de lecho fijo utilizados en cámaras de combustión microbiana (Chen *et al.*, 2019).

Los biodigestores anaeróbicos se han convertido en una solución eficaz para la gestión de residuos orgánicos, la producción de biogás y el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas se basan en la descomposición de la materia orgánica por parte de microorganismos en ausencia de oxígeno. Se proporciona una descripción general completa del funcionamiento y optimización de los biodigestores anaeróbicos en cámaras de combustión microbiana, destacando su potencial para su aplicación en la gestión sostenible de residuos y la producción de energía renovable. (Mendoza *et al.*, 2019)

Los reactores de membrana de intercambio de protones (PEM) son una tecnología emergente en pilas de combustible y electroquímica destinada a mejorar la eficiencia de conversión de energía de los procesos biológicos. En el contexto de las cámaras de combustión microbianas, los PEM desempeñan un papel fundamental a la hora de facilitar el transporte de protones y mejorar la producción de energía por la cual proporcionó un análisis detallado del uso de PEM en relación con las cámaras de combustión microbianas, abordando los principios de operación y los desafíos y oportunidades en esta área. (García *et al.*, 2020)

Los biodigestores de lodos activados son una tecnología ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Estos sistemas reducen eficazmente los sólidos y mejoran la calidad del agua. Proporcionando una descripción general completa de la integración de plantas de biogás de lodos activados con quemadores microbianos, abordando tanto la eficiencia de conversión de residuos como la producción de energía. (Ramírez *et al.*, 2020)

Las pilas de combustible microbianas (MCC) son dispositivos innovadores que convierten la energía química de sustratos orgánicos en energía eléctrica mediante procesos microbiológicos. La incorporación de cámaras de lecho fluidizado a estas celdas ha llamado la atención por su capacidad para mejorar la eficiencia y estabilidad del proceso de generación de energía de la aplicación de cámaras de lecho fluidizado en CCM, abordando tanto los avances tecnológicos como los desafíos asociados. (Martínez *et al.*, 2022)

#### 6.6.2 Configuraciones de CCM (Cámara de combustión microbiana)

En un reactor de lecho fijo de este diseño, los microorganismos de una cámara de combustión se adhieren a un soporte sólido, como gránulos o espuma. Los microorganismos consumen el combustible después de inyectarlo en la cámara de combustión, generando calor y productos de combustión. Para respaldar la actividad microbiana, es fundamental mantener una distribución uniforme del combustible y un suministro de oxígeno. (Chen *et al.*, 2019).

Los microorganismos se suspenden en un medio líquido y se alimentan continuamente con combustible en un reactor de lecho fluido. Para garantizar que haya oxígeno disponible y que los microorganismos se distribuyen uniformemente por todo el medio líquido, éste se mantiene en constante movimiento. Para aplicaciones que involucran combustible líquido, este diseño es especialmente adecuado.

Reactor de membrana: en esta configuración, los microorganismos se mantienen separados del combustible y los productos de la combustión se transfieren a través de una membrana semipermeable. Esto ayuda a evitar que se acumulen microorganismos en la cámara de combustión y facilita la limpieza y circulación del medio de cultivo. Este diseño se emplea frecuentemente en sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microorganismos. (García *et al.*, 2020)

Reactor anaeróbico: en esta configuración, la cámara de combustión se convierte en un ambiente anaeróbico para estimular la actividad de microorganismos que no requieren oxígeno. La eliminación de oxígeno mediante reacciones químicas o la inyección de gas inerte son dos métodos utilizados para mantener un ambiente libre de oxígeno. Este diseño se utiliza frecuentemente en aplicaciones donde es necesaria la producción de metano a partir de residuos orgánicos. (Mendoza *et al.*, 2019)

### 6.6.3 Proceso de operación CCM (Cámara de combustión microbiana)

La cámara de combustión microbiana es un dispositivo que utiliza calor y microorganismos para deshacerse de los residuos orgánicos. Los pasos que se enumeran a continuación son parte del proceso de operación de la cámara de combustión microbiana:

La cámara de combustión microbiana debe limpiarse y mantenerse en buenas condiciones antes de su puesta en servicio.

Alimentación de desechos orgánicos: La cámara de combustión microbiana se llena con desechos orgánicos, como desechos de alimentos, lodos de depuradora o desechos agrícolas. Los microorganismos utilizan estos desechos como fuente de alimento.

Examinar las circunstancias operativas: es fundamental evaluar las circunstancias de la cámara de combustión microbiana. Consisten en presión, humedad y temperatura. Por lo tanto, para que los microorganismos crezcan, estas condiciones deben ser ideales.

Activación de microorganismos: para comenzar a descomponer los desechos orgánicos, es necesario activar los microorganismos en la cámara de combustión microbiana. Esto se puede lograr agregando microorganismos específicos o configurando el entorno de crecimiento adecuado.

Control de las emisiones de gases potencialmente productores de gases de efecto invernadero que puedan surgir de la descomposición de materias primas.

Monitoreo y mantenimiento: Durante todo el proceso de combustión microbiana se observa el grado de actividad microbiana, las condiciones de operación y las emisiones generadas. El mantenimiento y la limpieza periódicos también son necesarios para garantizar un rendimiento óptimo.

#### 6.6.4 Tipos de electrodos usados

Electrodos de carbono: la aplicación más típica de estos electrodos es en cámaras de combustible microbianas. Para fabricarlos se pueden utilizar fibra de carbono, grafito o carbono vítreo. Debido a que el carbono es conductor, los electrones pueden pasar de los microorganismos al electrodo para producir electricidad.



**Figura 9.** Electrodo de carbono

Electrodos de óxido metálico: también se pueden utilizar estos electrodos, que tienen cualidades conductoras y pueden mejorar su capacidad para interactuar con microorganismos. Los ejemplos incluyen óxido de estaño y óxido de indio y estaño.



### Figura 10. Electrodo de platino

Estos microorganismos pueden transferir electrones desde su metabolismo directamente al electrodo sin el uso de intermediarios químicos, lo que los convierte en electrodos biológicos.

Es importante recordar que la elección del tipo de electrodo depende de las diversas propiedades de la cámara de combustible microbiana y de los microorganismos que se desean aplicar.

#### 6.6.5 Ventajas de la cámara de combustible microbiana

**Eficiencia energética:** la CBM permite convertir de forma más eficaz la energía presente en los sustratos orgánicos en electricidad. La capacidad de los microorganismos de la cámara para funcionar en entornos anaeróbicos aumenta la eficacia de la conversión de energía.

La opción tiene un menor impacto en el medio ambiente porque utiliza microorganismos naturales para producir energía. Además, no se producen emisiones peligrosas ni subproductos tóxicos.

En conclusión, la cámara de combustible microbiana tiene potencial para una amplia gama de aplicaciones y ofrece una serie de beneficios que incluyen alta eficiencia energética, bajo impacto ambiental, amplia disponibilidad de sustrato, bajos costos de inversión y mantenimiento, y potencial para una amplia aplicación. Estas características hacen de CBM una tecnología prometedora para la bioeconomía y la producción de energía renovable.

#### 6.6.6 Aspectos negativos de una cámara de combustible microbiana

Los siguientes son algunos inconvenientes del uso de la cámara de combustible microbiana.

**Costos iniciales:** la instalación y puesta en marcha de una cámara de combustible microbiana puede resultar costosa debido a la necesidad de comprar herramientas y materiales especializados.

**Mantenimiento:** estas cámaras deben mantenerse a un cierto nivel, por ejemplo: B. mantenimiento regular y calibración de los sensores utilizados para medir los parámetros importantes. Debido a que las cámaras de combustible microbianas suelen ser pequeñas, la cantidad de biomasa que se puede cultivar y, en consecuencia, la cantidad de energía producida

es limitada. Configuración experimental compleja: el diseño y la configuración de una cámara de combustible microbiana pueden requerir experiencia y un enfoque experimental riguroso para garantizar la reproducibilidad y la interpretación de los resultados obtenidos.

Competencia con otras tecnologías: aunque las cámaras de combustible microbianas tienen el potencial de ser una fuente de energía renovable, pueden competir con tecnologías más establecidas y menos costosas como la energía solar o eólica en términos de costo y eficiencia. (Bose *et al.*, 2019)

### 6.7 Bioelectricidad.

La electricidad se define como el movimiento de electrones que se trasladan por un conductor eléctrico durante un periodo determinado, la fuerza física o presión que induce dicho movimiento se le denomina voltaje, y su unidad de medida es el voltio (v). Las energías renovables son el flujo de energía que se produce de forma natural y continua, al igual que la bioelectricidad, la inversión en energías renovables ayuda a reducir la dependencia del petróleo al generar energía limpia. La bioelectricidad es la energía generada a partir de fuentes renovables usando recursos como es el agua, sol, aire, así mismo es compatible con el medio ambiente porque no emite contaminantes (Elshobary *et al.*, 2020).

La electricidad puede ser producida por las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), las cual consiste en un dispositivo que emplea microorganismos existentes en el sustrato para la transformar energía química en energía eléctrica, ciertos microorganismos trasladan electrones generados en su actividad metabólica a un Ánodo (celda sin contenido de oxígeno). Este método ayuda a descomponer la materia orgánica representada como sustrato y ha sido estudiado ampliamente en CCM de cátodo (pila eléctrica que contiene oxígeno) para la generación de energía eléctrica a pequeña escala.

Además, Valencia (2018) menciona que la tecnología CCM, puede producir electricidad a partir de la oxidación de compuestos orgánicos o inorgánicos presentes en ARD, de esta manera las CCM presentan un tratamiento sostenible y efectivo obteniendo una potencia de 42 mA/m<sup>2</sup> (miliamperios/ metro cuadrado).

### 6.7.1 USOS

1. Estimulación nerviosa: La bioelectricidad se utiliza en terapias de estimulación nerviosa para tratar determinadas enfermedades neurológicas, como la enfermedad de Parkinson, el dolor crónico o los trastornos del movimiento.
2. Electrocardiografía: La bioelectricidad se utiliza en la realización de electrocardiogramas para medir la actividad eléctrica del corazón y detectar posibles problemas cardíacos.
3. Electroencefalografía: La bioelectricidad se utiliza en la realización de electroencefalogramas para medir la actividad eléctrica del cerebro y diagnosticar trastornos neurológicos, como la epilepsia o los trastornos del sueño.
4. Implantes médicos: La bioelectricidad se utiliza en la fabricación de dispositivos médicos implantables, como marcapasos, desfibriladores o neuroestimuladores, que ayudan a controlar la actividad eléctrica de determinados órganos o tejidos.
5. Bioenergía: La bioelectricidad se utiliza en terapias alternativas, como la acupuntura o la electroterapia, para estimular determinados puntos del cuerpo y mejorar la salud y el bienestar de las personas.
6. Investigación científica: La bioelectricidad se utiliza en la investigación científica para estudiar los procesos biológicos que involucran la generación y propagación de señales eléctricas en los organismos vivos.

### 6.7.2 APLICACIONES

La bioelectricidad tiene diversas aplicaciones en el ámbito de la medicina, la investigación científica y la tecnología. Algunas de las aplicaciones más destacadas son:

1. Electrocardiograma (ECG): La bioelectricidad se utiliza para medir la actividad eléctrica del corazón a través de electrodos colocados en la piel. Esto permite detectar y diagnosticar problemas cardíacos como arritmias, infartos, insuficiencia cardíaca, entre otros.

2. Electroencefalograma (EEG): La bioelectricidad se utiliza para medir la actividad eléctrica del cerebro a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. Esto permite estudiar la actividad cerebral, diagnosticar trastornos neurológicos como epilepsia, tumor cerebral, trastornos del sueño, entre otros.

3. Estimulación cerebral profunda: Se utiliza la bioelectricidad para enviar pulsos eléctricos a áreas específicas del cerebro para tratar trastornos neurológicos como el Parkinson, el temblor esencial, la depresión resistente al tratamiento, entre otros.

4. Prótesis y dispositivos médicos controlados por bioelectrónica: Se utilizan dispositivos implantables controlados por señales bioeléctricas del cuerpo para restaurar funciones perdidas o mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades físicas.

5. Bioelectrónica en la investigación científica: Se utiliza la bioelectricidad para estudiar la comunicación celular, la bioquímica de las células y los tejidos, la regeneración de tejidos, entre otros procesos biológicos.

6. Bioelectrónica en la producción de energía: Se investiga la posibilidad de utilizar la bioelectricidad generada por organismos vivos, como bacterias, algas o plantas, para producir energía de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones de la bioelectricidad en distintos campos, demostrando su importancia en el avance de la medicina, la ciencia y la tecnología.

## HIPÓTESIS

La cámara de combustión microbiana permite generar bioelectricidad superior a 200 mV/min, al mismo tiempo que remueven más del 60% de la materia orgánica presente en las aguas residuales agroindustriales del estado de Chiapas.

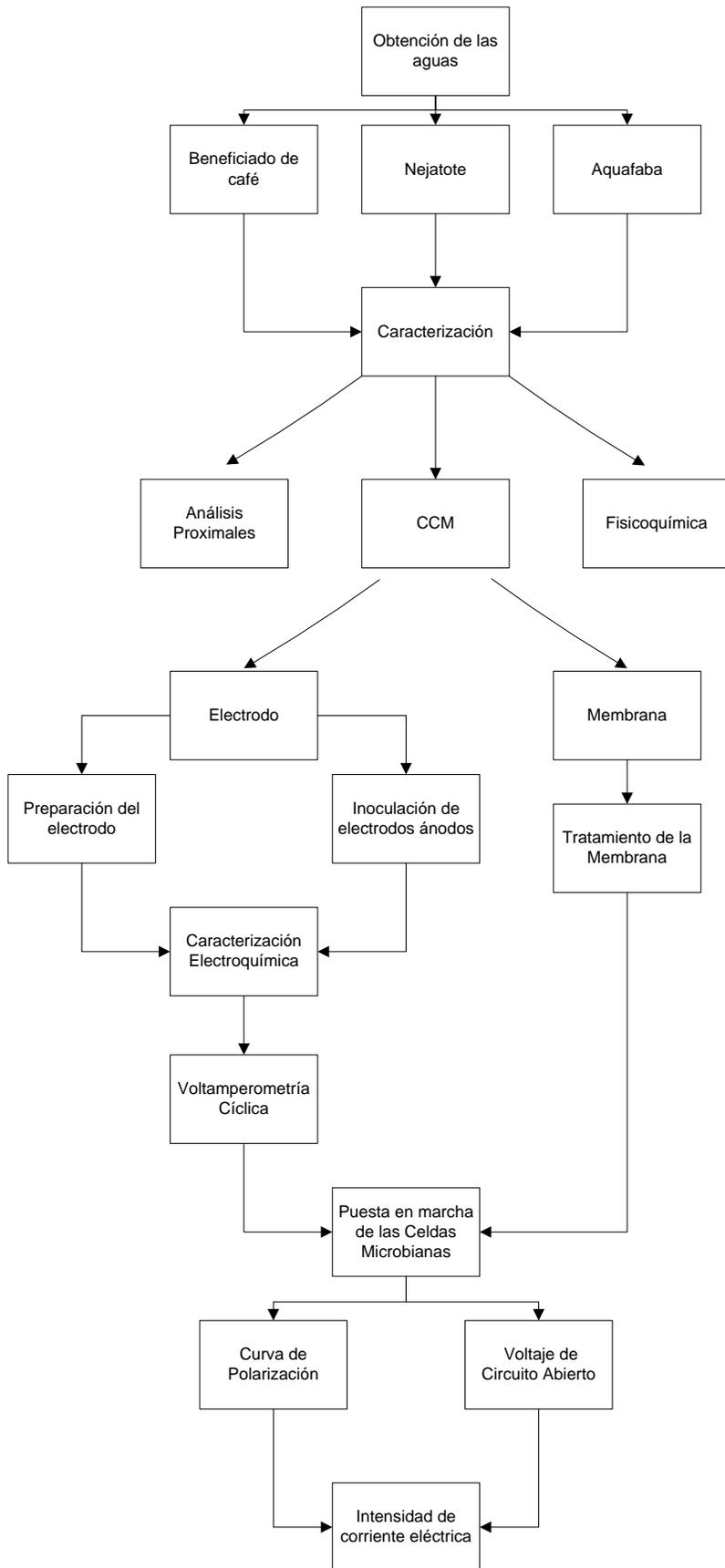
## METODOLOGÍA

### 8.1 Diseño de investigación

- **Tipo de estudio.**

El presente trabajo de investigación es de tipo experimental, ya que para llevar a cabo la evaluación de la producción de bioelectricidad a partir de las aguas residuales (Nejayote, Aquafaba y beneficiado húmedo del café) fueron utilizadas Cámaras de Combustión Microbiana, adicionalmente se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales, así como la medición de su depuración y los valores de voltaje y resistencia.

La investigación es de tipo cuantitativo y longitudinal, por los valores recopilados y la evaluación de la viabilidad de la producción de bioelectricidad, además fue realizado el análisis de los datos obtenidos durante el periodo en el que se realizó la investigación.



## 8.2 Muestra

Las muestras de Nejayote y Aquafaba fueron obtenidas de una empresa de producción de dulces artesanales ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas durante el mes de abril del 2024.

Las muestras de agua de beneficio húmedo de café fueron obtenidas de la zona cafetalera del municipio de Chicomuselo, Chiapas.

Estas fueron almacenadas a 4°C hasta su utilización, de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-003, en la que se establecen los lineamientos generales y recomendaciones para muestreo y conservación de las aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas.

- **Diseño experimental**

### **Sitio experimental**

Los experimentos se llevaron a cabo en los Laboratorios de Análisis de Alimentos I y II de la Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos y en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental de Facultad de Ingeniería, ubicados en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; además del Laboratorio de Investigación de la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chiapas ubicado en la ciudad de Ocozocoautla de Espinosa.

## 8.3 Variables dependientes y independientes

En la **Tabla 4**, se presentan las variables dependientes e independientes que se evaluaron en el proyecto, las dependientes representan las mediciones que se realizarán en la producción de bioelectricidad en la cámara de combustión microbiana y las independientes estas asociadas a los tres tipos de agua (Nejayote, Aquafaba y beneficiado húmedo del café).

Tabla 4. Diseño de variables.

Dependientes	Independientes
Bioelectricidad <ul style="list-style-type: none"><li>- Resistencia</li><li>- Voltaje</li><li>- Curva de polaridad</li><li>- Eficiencia de remoción</li></ul>	Tipos de agua <ul style="list-style-type: none"><li>- Nejayote</li><li>- Aquafaba</li><li>- Beneficiado de cafe</li></ul>

#### 8.4 Descripción de reactivos y equipos.

##### **Materiales y reactivos.**

- Electrodo de grafito
- Electrodo de referencia Ag/AgCl 3 M KOH
- Equipo de electroquímica (potenciostato)
- Celda electroquímica
- Lija fina
- Caimanes
- Multímetro
- Celda de 3 electrodos y de 2 electrodos.
- Acetato de sodio ( $C^2H^3NaO^2$ )
- Tampón de carbonato
- $NH^4Cl$
- $NaHCO^3$
- $Na^2CO^3$
- $K^2HPO^4$
- Soluciones de vitaminas y de soluciones minerales
- Potenciómetro (Resistencias multivaribale)
- Alambre de cobre
- Pinza para cortar alambres
- Cinta teflón
- Peroxido de hidrogeno al 3%
- 6 matraz aforados de 100 mL
- Ácido sulfúrico al 0.5 M
- Parafilm
- 5 cajas Petri

#### 8.5 Descripción de los procesos.

##### 8.5.1 Preparación del electrodo.

Para mejorar la adhesión de bacterias y la formación de biopelículas en electrodos de grafito, se ha implementado un proceso de lijado de la superficie del electrodo. Se utilizan electrodos de grafito de alta pureza, que son lijados con papel de lija de grano fino (Colocar características de la lija que se compre), para aumentar la rugosidad superficial. Durante el proceso, se realizan movimientos uniformes y circulares para asegurar una superficie homogénea. Posteriormente, el electrodo se enjuaga con agua destilada para eliminar los residuos de polvo de grafito y se seca con aire comprimido o en un horno a baja temperatura.

### 8.5.2 Inoculación de electrodos anódicos

Antes de la formación de la biopelícula, el electrodo de carbón fue sometido a un tratamiento especial para facilitar la colonización de bacterias en su superficie. Este proceso incluyó la aplicación de un potencial eléctrico entre dos electrodos sumergidos en una solución conductora. Este pretratamiento es esencial porque mejora la adherencia de las bacterias al electrodo, lo que es crucial para desarrollar una biopelícula robusta y eficiente. En la celda de electrólisis, se coloca un electrodo de platino como cátodo y el electrodo de grafito previamente lijado como ánodo. Se aplica un potencial de 1.35 V utilizando 80 mL de una solución de 21 mM de acetato de sodio ( $C_2H_3NaO_2$ ) y un tampón de carbonato de 12 mM. La solución se mantiene a una temperatura constante de 38°C durante 36 horas como reporta Mejía (M. Mejía-López, 2017).

Se utilizó una celda electroquímica sellada de 100 mL con tres electrodos para la formación de la biopelícula en el electrodo de trabajo. El electrodo de grafito, previamente tratado, se empleó como electrodo de trabajo, mientras que se utilizó un electrodo de referencia de Ag/AgCl 3M KOH y un electrodo de platino como contraelectrodo. Se aplicó un potencial de -0.42 V respecto al electrodo de referencia durante 5 horas a 37 °C. El medio consistió en 70 mL de aguas residuales sintéticas (SWW), con una composición de 1 g/L de  $NH_4Cl$ , 1 g/L de  $NaHCO_3$ , 1 g/L de  $Na_2CO_3$ , 0.2 g/L de  $K_2HPO_4$ , además de 10  $\mu L$  de soluciones de vitaminas y 10  $\mu L$  de soluciones minerales. La fuente de carbono utilizada fue una solución de 21 mM de  $NaCH_3COO$ , y el inóculo bacteriano consistió en 20 mL de lodo anaeróbico previamente estabilizado como reporto Mejía et al (M. Mejía-López O. L.-R.-P., 2023). Este lodo anaeróbico se obtuvo de una planta de tratamiento de aguas residuales de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, habiendo sido cultivado en condiciones anaeróbicas a 30 °C, con agitación continua y alimentado con soluciones específicas para el crecimiento de bacterias.

Este método se basa en la aplicación de un potencial eléctrico específico en una celda electroquímica sellada para promover la formación selectiva de biopelículas de bacterias exoelectrogénicas en el electrodo de trabajo. En un enfoque tradicional, al sumergir el electrodo en lodo durante un período prolongado, se permite que una amplia variedad de bacterias se adhieran al electrodo debido a la disponibilidad de nutrientes y las condiciones ambientales favorables. Esto puede resultar en una biopelícula compuesta por una mezcla heterogénea de bacterias, no necesariamente las exoelectrogénicas, que son las que tienen la capacidad de transferir electrones de forma eficiente y, por lo tanto, son las más valiosas para aplicaciones electroquímicas. Al aplicar el potencial eléctrico, se crea un ambiente que selectivamente promueve la proliferación de bacterias exoelectrogénicas mientras reduce o inhibe el crecimiento de otras bacterias que no tienen la capacidad para realizar transferencia de electrones de manera eficiente. Esto reduce la competencia de microorganismos no deseados y aumenta la pureza de la biopelícula formada.

### 8.5.3 Tratamiento de membrana de intercambio de protones (Nafion)

Se utilizó Nafion como membrana intercambiadora de protones para este estudio. Para asegurar su efectividad, fue necesario activar las membranas mediante un proceso de limpieza e hidratación. La activación se llevó a cabo en varias etapas: Primero, se purificaron las membranas sumergiéndolas en una solución de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al 3% durante 30 minutos a 85 °C para eliminar las impurezas orgánicas. A continuación, las membranas se lavaron con agua desionizada a 100 °C durante 30 minutos para disolver cualquier residuo restante y proporcionar un tratamiento de hidratación adicional. Posteriormente, se sometieron a un tratamiento con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 0.5 M a 85 °C durante 1 hora, lo que permitió remover contaminantes de iones metálicos y protonar las membranas. Luego, las membranas fueron dejadas en reposo durante 48 horas en una solución de  $H_2SO_4$  al 1 M. Finalmente, las membranas activadas se almacenaron en agua desionizada hasta su uso.

#### 8.5.4 Caracterización electroquímica.

Los electrodos, tanto antes como después de la formación de la biopelícula, fueron caracterizados electroquímicamente mediante voltametría cíclica (CV). Las mediciones se realizaron con un potenciostato Biologic VSP 300 en una celda de tres electrodos, utilizando un electrodo de referencia Ag/AgCl 3M KOH, un contraelectrodo de platino y se utilizó el electrodo con la biopelícula como el electrodo de trabajo. Las curvas de voltametría cíclica se registraron en un rango de potencial de  $-0.7$  a  $0.7$  V y una velocidad de barrido de  $1$  mV/s para evaluar la actividad electroquímica de los electrodos.

Condiciones de medición:

Voltamperometría cíclica del electrodo de carbón:

Como electrolito se usó acetato de sodio 100 Mm buffer de carbonato pH 9 en una relación equimolar 1:1 en un rango de potencial de  $-0.7$  a  $0.7$  V contra un electrodo de Ag/AgCl un contraelectrodo de Platino y como electrodo de trabajo el electrodo de Carbón.



**Figura 11.** Voltamperometría Cíclica de los electrodos de carbón.

#### 8.5.5 Curvas de polarización

Las curvas de polarización son una herramienta fundamental para el análisis y la caracterización de celdas de combustible microbianas (CCM). Estas curvas permiten determinar los puntos de máxima potencia (PCCM en mW) y voltaje (ECCM en V) en función de la corriente (ICCM en mA). Para construir una curva de polarización, se ajusta la resistencia externa ( $R_{ext}$ ) en diferentes valores, incrementándola o disminuyéndola.

Con fines de obtener información acerca de la resistencia interna de la CCM, y del máximo voltaje a generar, se realizó un escaneo del voltaje generado de una celda de combustible aplicando diferentes resistencias, de esta manera se puede establecer el valor de la resistencia con la cual la CCM genera mayor voltaje. Para tal fin se prepararon las CCM con los respectivos sustratos a emplear.

Primero es necesario operar la celda de combustible microbiana (CCM) sin conectar una resistencia externa ( $R_{ext}$ ) y analizar su comportamiento en relación con el voltaje en circuito abierto (ECCMCA).

Una vez que el voltaje en circuito abierto muestre un comportamiento estable. La celda de combustible microbiana (CCM) se conecta a una resistencia externa multivariable ( $R_{ext}$ ), la cual se ajusta gradualmente hasta obtener una curva que permita identificar el punto máximo de potencia y voltaje de la CCM, para ello primero se coloca el inóculo en la cámara anódica posteriormente para iniciar la generación de la curva de polarización, la CCM se operó en circuito abierto una vez que el voltaje en circuito abierto alcanzó un estado estable, se varió la resistencia externa ( $R_{ext}$ ) desde un valor de 1 k $\Omega$  hasta 1000 k $\Omega$  y viceversa para ello se usó un potenciómetro.

Después de completar la variación del voltaje en función de la  $R_{ext}$ , se volvió a operar la CCM en circuito abierto para confirmar el estado estacionario del sistema y asegurar que las condiciones durante la obtención de la curva de polarización fueran adecuadas. Al final se obtuvo una curva de densidad de potencia utilizando diferentes resistencias externas ( $R_{ext}$ ) y se midió el voltaje de la celda.

#### 8.5.6 Información sobre la importancia de realizar las curvas de polarización.

La prueba de potencial electroquímico es fundamental para determinar la resistencia interna de un sistema electroquímico, como una celda microbiana. Este procedimiento se basa en el análisis

de cómo varía la potencia generada por la celda cuando se aplican diferentes resistencias externas. La importancia de esta prueba radica en varios aspectos clave:

#### 8.5.6.1 Optimización de la Potencia Generada.

Al variar la resistencia externa y medir la potencia generada, se puede identificar el valor de resistencia que maximiza la potencia de la celda. La resistencia externa que proporciona la mayor potencia es aproximadamente igual a la resistencia interna del sistema. Esto permite ajustar la resistencia externa para obtener el máximo rendimiento energético del sistema.

#### 8.5.6.2 Determinación de la Resistencia Interna.

La resistencia interna de una celda es una medida crucial que afecta directamente la eficiencia y el voltaje que puede generar. La prueba de potencial electroquímico permite estimar esta resistencia interna al observar el punto en el que la potencia es máxima en la curva de polarización. Conocer la resistencia interna ayuda a evaluar el estado y la performance del sistema electroquímico.

#### 8.5.6.3 Mejora del Diseño y la Operación.

Entender la resistencia interna permite optimizar el diseño de la celda y sus condiciones operativas. Por ejemplo, si la resistencia interna es alta, podría ser necesario mejorar los materiales o el diseño para reducir las pérdidas de energía. También ayuda a seleccionar la resistencia externa adecuada para operar la celda en condiciones óptimas.

La curva de polarización obtenida durante la prueba proporciona una visión integral del rendimiento de la celda. Permite evaluar cómo el sistema responde a diferentes cargas y condiciones, ofreciendo información sobre la eficiencia energética y la capacidad de generación de potencia bajo diversas resistencias externas.

### 8.6 Puesta en Marcha de la Celda Microbiana por lotes.

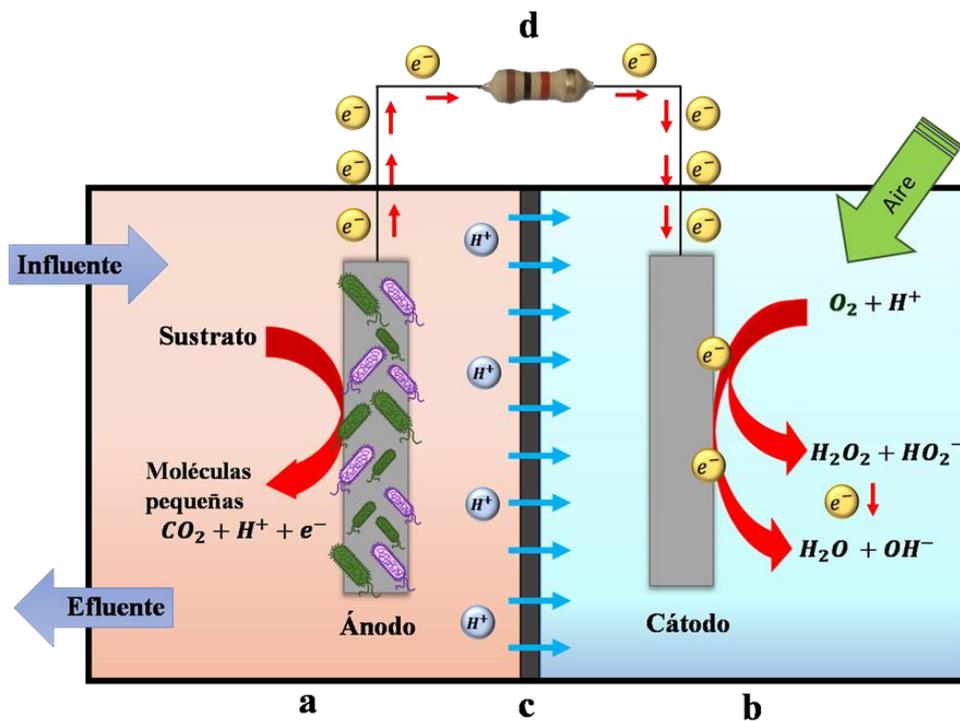
La celda de combustible microbiana (CCM) consistió una caja de Celda de Combustible Microbiana estándar Hoop Tipo II de 250ml. En un extremo del reactor, se colocó un ánodo plano hecho de grafito previamente inoculado. En el otro extremo, se instaló un cátodo compuesto por un electrodo de platino. Entre los electrodos se colocó una membrana de intercambio protónico Nafion, que había sido activada previamente. El agua residual se colocó

en la cámara anódica, donde los microorganismos en el ánodo degradaron la materia orgánica, generando electrones que viajaron hacia el cátodo a través del circuito externo.

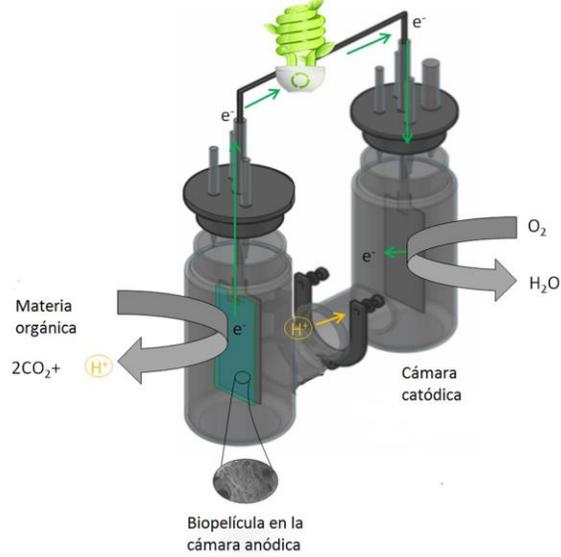
En la cámara catódica, generalmente se utiliza una solución de electrolito, como una solución de fosfato buffer, para facilitar la reacción de reducción del oxígeno. (La solución electrolítica puede ser KCl (50 mM)).

La resistencia que se usará será la que haya generado la máxima potencia en los barridos de resistencias, para poder determinar la resistencia interna. La configuración de la resistencia en el sistema se realiza de la siguiente manera: se conecta la celda al multímetro de manera convencional a través del ánodo y el cátodo. Sin embargo, entre el ánodo y el multímetro se coloca una resistencia de carga que varía, y esta resistencia, a su vez, se conecta al multímetro para calcular la corriente generada en el sistema.

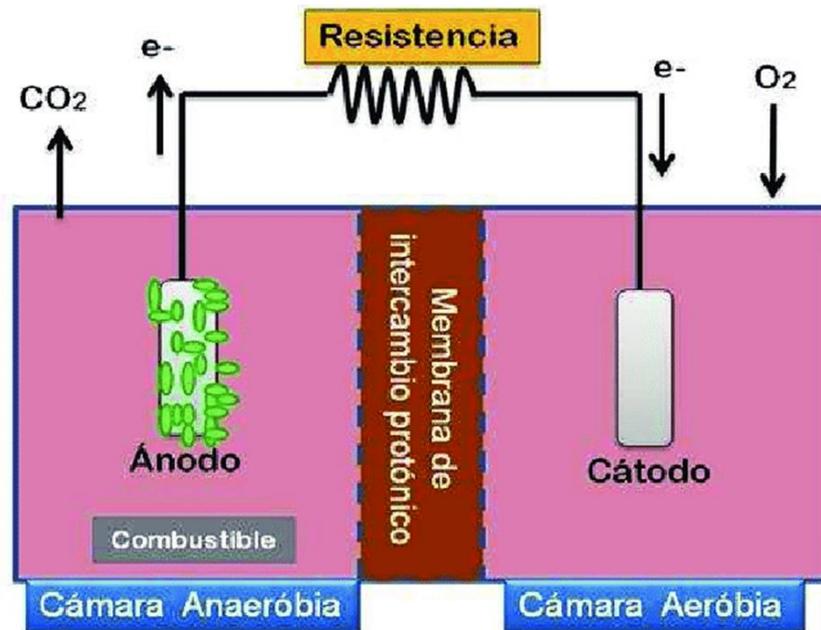
Se realizaron mediciones de voltaje utilizando un multímetro. Las mediciones de voltaje se realizarán a intervalos de 15 minutos, y los días de monitoreo se determinarán hasta observar la estabilización del voltaje, indicando que las bacterias han oxidado la mayor cantidad posible de materia orgánica.



**Figura 12.** Estructura de una celda de combustible microbiano: a) cámara anódica, b) cámara catódica, c) membrana de intercambio catiónico. d) circuito externo



**Figura 13.** Imagen elaborada por: Felipe Vejarano y Oscar Loaiza de revistaconciencia.com



**Figura 14** Estructura de la celda de combustión microbiana (Modificado de Du et al., 2007).

8.6.1 Para las pruebas IES.

El análisis EIS se realizó con corriente alterna y amplitud de voltaje de 50 mV en el rango de frecuencia de 100 kHz a 10 mHz. La resistencia óhmica, la resistencia de transferencia de carga y la impedancia de Warburg se determinaron mediante diagramas de Nyquist.

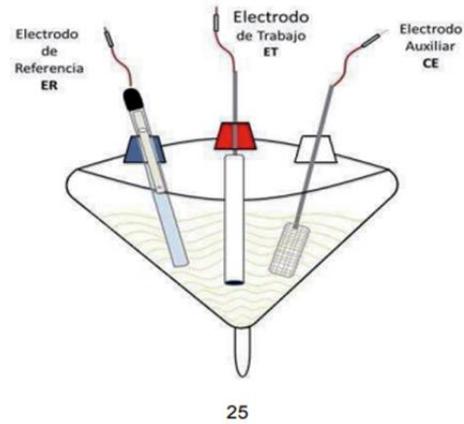


Figura 15. Configuración de 3 electrodos para medir voltamperométricas cíclicas.

### 8.7 Equipos a utilizar.

Los equipos utilizados para la caracterización son:

- pH metro digital portátil (ver **Figura 16**) requerido para la medición de sólidos totales disueltos, conductividad, salinidad, temperatura, potencial redox, pH.



Figura 16. pH metro digital portátil para la determinación de sólidos totales disueltos, conductivímetro, salinidad, temperatura, potencial redox, pH.

- Digestor para la determinación de DQO, modelo DR 200 de HACH (ver **Figura 17**).



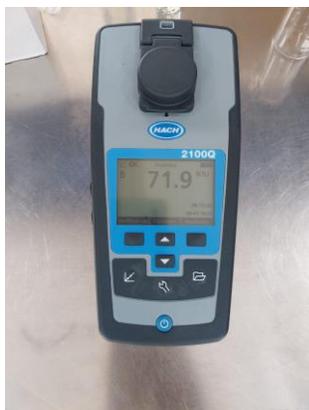
**Figura 17.** Digestor para la determinación de DQO

- Espectrofotómetro para la lectura de los valores de DQO , modelo DR 6000 de HACH (ver **Figura 18**).



**Figura 18.** Espectrofotómetro para la lectura de los valores de DQO.

- Turbidímetro para la determinación de turbidez, modelo 2100Q de HACH ( ver **Figura 19**).



**FIGURA 19.** Turbidímetro para la determinación de turbidez.

- Digestor micro kjeldahl para la digestión de la proteína cruda de NOVATECH (ver **Figura 20**)



**Figura 20.** Digestor micro kjeldahl para la digestión de la proteína.

- Equipo de DBO para la determinación de DBO, modelo BODTrak II de la marca HACH (ver **Figura 21**).



**Figura 21.** Equipo para la determinación de DBO.

- Incubadora para la determinación de DBO, modelo 205 de la marca HACH (ver **Figura 22**).



**Figura 22.** Incubadora para la determinación de DBO.

- Colorímetro, modelo DR 900 de la marca HACH (ver **Figura 23**).



**Figura 23.** Colorímetro.

- Mufla utilizada para la determinación de cenizas, arsa modelo AR -340 (ver **Figura 24**).



**Figura 25.** Mufla utilizada para la determinación de cenizas.

- Horno de secado, modelo TE-FH45DM de la marca TERLAB (ver **Figura 26**).



**Figura 26.** Horno de secado.

- Digestor soxhlet para extracción de grasa, de la marca NOVATECH (ver **Figura 27**).



**Figura 27.** Digestor soxhlet para extracción de grasa.

- Multímetro Herramientas Lcd Digital Profesional XL830L, para la medición de Voltaje y Corriente de la Celda de Combustión Microbiana (ver **Figura 28**).



**Figura 28.** Multímetro digital para la medición de voltaje y corriente.

- **Figura 29.** Bomba de aire de la marca AQUAPURA, para la oxigenación de la Celda.



**Figura 29.** Bomba de aire.

- Potenciostato de la marca Biologic science instrument, requerida para la realización de las voltamperometría Cíclica (Figura 28).



**Figura 30.** Potenciostato necesario para las voltamperometría.



**Figura 31.** Electrodo de platino para la conductividad.

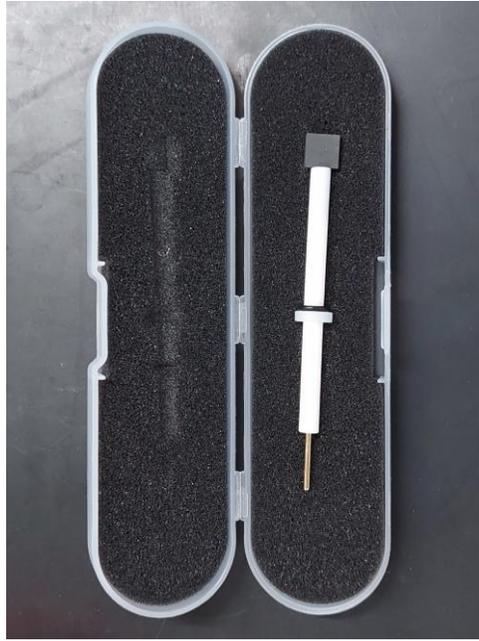


Figura 32. Electrodo de carbono



Figura 33. Membrana de intercambio de protones.

- Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno). Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica contenida en las aguas residuales.



Figura 36. CCM

Fuente: elaboración propia

## 8.8 Descripción de las técnicas a utilizar

### 8.8.1 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA

#### 8.8.1.1 pH.

La determinación del potencial de hidrógeno se realizó con base en la NMX-AA-008-SCFI-2016. Para llevar a cabo esta determinación se utilizó un potenciómetro marca eScience Med que fue previamente calibrado, las mediciones se realizaron por triplicado.

#### 8.8.1.2 Conductividad eléctrica.

La determinación de la conductividad eléctrica se realizó con un conductivímetro, Fueron colocados 100 ml de las muestras en un vaso de precipitado de 100 ml, el electrodo del equipo fue introducido para realizar la lectura, se agita un poco el equipo y se espera unos minutos para que se establezca la lectura, después de tener la lectura lavar la parte inferior del conductímetro con agua destilada y secarlo con una toallas de papel para proseguir con las demás muestras de aguas realizando el mismo procedimiento. Los resultados los expresa el equipo en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 8.8.1.3 Potencial Redox.

Se utilizó el conductímetro poniendo las muestras de agua en vasos de precipitados de 100 ml poniendo una muestra de 40 ml para después colocar el conductímetro en la muestra agitando por unos segundos hasta que se estabilice la lectura, posterior a eso lavar la parte del equipo donde estuvo en contacto con la muestra con agua destilada y secarlo con toallas de papel, para después continuar con otra muestra con el mismo procedimiento.

#### 8.8.1.4 Sólidos Totales.

La determinación de sólidos totales se realizó de acuerdo a las especificaciones escritas en la NMX-AA-034-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA. Las pruebas se realizaron por triplicado.

#### 8.8.1.5 Sólidos Totales Volátiles.

De acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS -MÉTODO DE PRUEBA se realizó la determinación por triplicado.

#### 8.8.1.6 Sólidos Suspendidos.

La determinación se realizó con base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA. Las pruebas se realizaron por triplicado.

#### 8.8.1.7 Humedad.

Se realizó por el método de la "association of official analytical chemist" (AOAC) (método 925.09; AOAC 2005), empleando un horno de secado (TE-FH45DM de la marca TERLAB). El porcentaje de humedad se determinó de acuerdo a la (AOAC, 2005), por diferencia de peso empleando una balanza analítica (Velab modelo VE-204).

#### 8.8.1.8 Ceniza.

Se pesaron aproximadamente 5g de muestra en cápsulas de porcelana a peso constante, para posteriormente pre-calcinar la muestra en un mechero y llevarla a una calcinación total en la muela (arsa modelo AR -340) a 550°C durante 5-12h. Una vez frías las muestras se pesaron para determinar el porcentaje de cenizas conforme a la (AOAC,2005, 2016).

#### 8.8.1.9 Color.

Para la determinación de color se utilizó el colorímetro DR 900, para esto se tuvo que hacer una dilución de 2-50, 2 ml del agua de muestra (nejayote, aquafaba o beneficiado de café) por 50 ml de agua tridestilada, cada muestra de agua por triplicado. Para la utilización del equipo se fue al menú principal a la opción de color 420 nm, se puso a calibrar el equipo con una muestra de agua tridestilada para después empezar con las lecturas de las muestras, colocando 10 ml en los tubos que trae el equipo después de cada lectura lavar los tubos con chorros de agua destilada para después colocar otra muestra repitiendo el procedimiento, entre cada muestra de las aguas calibrar con la muestra de agua tridestilada.

#### 8.8.1.10 DQO.

Para la determinación de la demanda química de oxígeno se realizaron de acuerdo a la norma NMX-AA-030-SCFI-2012. La determinación se realizó por duplicado.

#### 8.8.1.11 DBO.

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-028-SCFI-2001. La determinación se realizó por duplicado.

#### 8.8.1.12 ÍNDICE DE BIODEGRADABILIDAD

Índice de biodegradabilidad =  $(\text{DBO} / \text{DQO}) \times 100$

DQO: Demanda Química de Oxígeno, es la cantidad total de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica presente en una muestra de agua.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno, es la cantidad de oxígeno consumida por bacterias aeróbicas en el proceso de oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua.

El resultado de esta fórmula nos dará un valor entre 0% y 100%, que indica la proporción de la materia orgánica que puede ser degradada en un proceso aeróbico. Un mayor índice de biodegradabilidad indica que una mayor proporción de la materia orgánica presente en la muestra de agua puede ser degradada por microorganismos aerobios.

#### 8.8.1.13 NITRÓGENO.

Es el componente principal de las proteínas y es un nutriente esencial para las algas y bacterias que intervienen en la depuración del agua residual. Puede presentarse en forma de nitrógeno orgánico (presente en las proteínas), nitrógeno amoniacal (producto de la descomposición de nitrógeno orgánico) y formas oxidadas como nitritos y nitratos.

#### 8.8.1.14 FÓSFORO.

Es junto con el nitrógeno, un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos. No obstante, valores elevados pueden causar problemas de hipereutrofización en los cuerpos de agua (lagos, embalses, lagunas).

#### 8.8.1.15 CARBONO ORGÁNICO TOTAL.

El carbono orgánico total (COT) en aguas residuales se refiere a la cantidad total de carbono orgánico presente en las aguas residuales, incluidos compuestos como carbohidratos, proteínas, grasas y otros compuestos orgánicos de origen biológico. El TOC es un parámetro importante para evaluar la calidad de las aguas residuales. Esto se debe a que representa la contaminación orgánica del agua y su potencial de contaminar el medio ambiente si no se trata adecuadamente. Las mediciones de TOC generalmente se realizan en el laboratorio mediante técnicas de análisis químico y los resultados se utilizan para diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales que eliminen eficazmente la materia orgánica antes de que se liberen al medio ambiente.

#### 8.8.1.16 LÍPIDOS.

La prueba se realizó conforme a la (AOAC, 2005; NMX-F-089-S-1978), utilizando el método de extracción de grasa (Buchi, B-811, Suiza). El resultado se expresó en porcentaje.

#### 8.8.1.17 ALCALINIDAD.

Para la determinación de la alcalinidad se realizó de acuerdo a la norma NMX- AA-036-SCFI-2001, DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS- MÉTODO DE PRUEBA. realizandolo por triplicado

#### 8.8.1.18 ACIDEZ.

Para la determinación de acidez se llevó a cabo de acuerdo a la norma NMX-AA-O36-SCFI-2001, DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS- MÉTODO DE PRUEBA.

### INÓCULO

Fue obtenido a partir de una muestra de un biodigestor anaerobio UASB de una empresa refresquera de Chiapa de Corzo.

## PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1 Caracterización.

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización realizada a las aguas residuales utilizadas.



- a) Nejayote b) Aquafaba c) Agua de beneficio

**Figura 34.** Aguas residuales

Tabla 5. Caracterización Fisicoquímica de las aguas residuales agroalimentarias

Parámetro	Aquafaba	Nejayote	ABHC
Color	2216.6 ± 1141.3	6308.3 ± 475.2	6500 ± 2635.8
Turbidez	213.4 ± 2.02	2250.8 ± 176.4	4358.3 ± 816.3
pH	6.4 ± 0.01	11.6 ± 0.01	3.6 ± 0.04
Conductividad	3940 ± 20	3470 ± 10	2296.7 ± 5.7
Potencial Redox (mV)	55.7 ± 3	-51.7 ± 1.5	88.7 ± 42.3
Humedad (%)	97.7 ± 0.01	98.4 ± 0.01	96.9 ± 0.01
Sólidos Totales (mg/L)	31.9 ± 2.45	32.1 ± 3.8	31.9 ± 2.57
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	1966.7 ± 11.5	1733.3 ± 5.7	1146.7 ± 5.7
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1.4 ± 0.11	1.3 ± 0.07	1.5 ± 0.17

Solidos Sedimentables (mL/L)	$34.3 \pm 0.57$	$18.3 \pm 2.5$	$0 \pm 0$
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	$15400 \pm 424$	$6450 \pm 212$	$34600 \pm 848$
DQO (mg/L)	$28550 \pm 510$	$11328 \pm 315$	$54350 \pm 985$
Grasa Cruda (%)	$0.16 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.01$	$3.58 \pm 0.2$
Proteína	$24.46 \pm 3.0566$	$7 \pm 0.0005$	$22.27 \pm 0.6658$

Las aguas residuales agroalimentarias representan un reto ambiental significativo, especialmente cuando no se gestionan adecuadamente antes de su disposición en cuerpos de agua o su posible reutilización en aplicaciones industriales. Los resultados de la caracterización fisicoquímica (**Tabla 1**) de tres tipos de aguas residuales (aquafaba, nejayote y ABHC) revela variaciones notables en sus propiedades que reflejan no solo su procedencia, sino también el impacto potencial que podrían tener en el ambiente acuático y en sistemas de tratamiento de aguas, incluyendo su posible aprovechamiento en cámaras de combustión microbiana para la generación de energía.

Uno de los aspectos más evidentes es el color y la turbidez de estas aguas, con valores especialmente altos en el caso del ABHC. Estos indicadores reflejan una alta carga de compuestos orgánicos y partículas suspendidas, que si se vierten sin tratamiento, limitarían la penetración de luz en cuerpos de agua naturales. Esta limitación afecta la capacidad fotosintética de las plantas acuáticas y altera la estructura de las cadenas alimenticias en los ecosistemas acuáticos, provocando un desequilibrio ecológico que se traduce en la disminución de la biodiversidad. Además, los altos niveles de turbidez pueden favorecer la sedimentación de partículas en el lecho del cuerpo receptor, afectando el flujo y la calidad del agua en general. La

presencia de este tipo de partículas, por otro lado, tiene aplicaciones potenciales en sistemas de combustión microbiana, donde los sólidos suspendidos y disueltos actúan como sustrato adicional para las bacterias electrogénicas que se utilizan en estos sistemas, incrementando la generación de energía. Sin embargo, una carga excesiva podría obstruir el sistema y reducir su eficiencia, por lo que sería necesario establecer límites operacionales adecuados.

El pH de estas aguas varía desde condiciones ácidas en el ABHC hasta alcalinas en el nejayote. Esta variabilidad presenta un desafío, ya que las condiciones extremas de pH pueden ser altamente tóxicas para organismos acuáticos y afectar procesos como la reproducción y la supervivencia de especies sensibles, generando un cambio en la estructura de las comunidades acuáticas y promoviendo la proliferación de organismos más resistentes, como algunas algas o bacterias no deseadas. Para la aplicación en cámaras de combustión microbiana, es esencial un ajuste previo del pH, dado que las bacterias electrogénicas, encargadas de generar energía a partir de residuos orgánicos, suelen operar en un rango de pH neutro a ligeramente ácido. Un pH fuera de estos límites podría inhibir la actividad microbiana y reducir la eficiencia del sistema de combustión.

Otro aspecto relevante es la conductividad, que indica la cantidad de sales disueltas en el agua. Los valores elevados en estas aguas residuales agroindustriales sugieren una alta carga salina, lo cual puede tener efectos negativos si se vierten en cuerpos de agua dulce o se utilizan para riego sin tratamiento previo, pues se puede alterar la estructura del suelo y afectar negativamente la fertilidad agrícola. Desde el punto de vista de combustión microbiana, la alta conductividad podría inhibir el crecimiento de algunas bacterias sensibles a los iones de sales; sin embargo, algunos sistemas podrían aprovechar la presencia de sales específicas como cofactores en el proceso bioelectroquímico, mejorando la conductividad eléctrica y, por ende, la generación de energía.

El potencial redox es otra variable que varía considerablemente entre las muestras analizadas. Las condiciones reductoras observadas en el nejayote, en comparación con las condiciones más oxidantes en aquafaba y ABHC, sugieren que en los cuerpos de agua receptores, estas aguas podrían alterar la dinámica de los procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos, afectando así el ciclo de nutrientes y la disponibilidad de oxígeno. En sistemas de combustión microbiana, un ambiente redox adecuado es fundamental, pues la actividad de las bacterias electrogénicas

depende de la disponibilidad de electrones y el potencial de transferencia en el medio, influyendo directamente en la eficiencia y estabilidad de la generación de electricidad.

Las concentraciones de sólidos totales, disueltos y suspendidos en estas aguas son altas y representan otro desafío para el tratamiento. Los sólidos disueltos pueden obstruir sistemas de filtración y tratamiento convencional y afectar la calidad del agua en cuerpos receptores al aumentar la turbidez y favorecer la sedimentación. Sin embargo, estos sólidos también son un recurso importante en sistemas de combustión microbiana, ya que incrementan la densidad de sustrato, permitiendo a las bacterias utilizar estos compuestos orgánicos en la generación de energía eléctrica. La clave para un uso efectivo en este tipo de sistemas está en balancear la carga de sólidos para maximizar la eficiencia sin comprometer el flujo y mantenimiento del sistema.

Los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) son de especial interés debido a los valores sumamente elevados registrados en estas muestras, en particular en el ABHC, que muestra un DQO de 54350 mg/L. Estos valores reflejan una alta carga de materia orgánica fácilmente biodegradable y, por tanto, un riesgo de agotamiento de oxígeno en los cuerpos de agua donde podrían ser vertidos. Sin un tratamiento adecuado, estas aguas causarían la formación de zonas muertas, donde el oxígeno disuelto es insuficiente para sostener la vida acuática. No obstante, este alto contenido orgánico las convierte en un excelente recurso para su aprovechamiento en cámaras de combustión microbiana. En estos sistemas, la materia orgánica se convierte en fuente de energía para microorganismos capaces de generar electricidad a partir de su oxidación. La elevada DBO y DQO implica una disponibilidad de sustrato que, correctamente gestionada, podría potenciar el rendimiento energético del sistema microbiano.

Finalmente, el contenido de grasa cruda es bajo en aquafaba y nejayote, pero significativamente más alto en el ABHC. La presencia de grasas plantea problemas en los sistemas de tratamiento convencionales, donde pueden formar una capa que inhibe la transferencia de oxígeno y reducir la eficiencia de los tratamientos biológicos. En sistemas de combustión microbiana, las grasas pueden ser un desafío, ya que solo ciertos microorganismos están adaptados para su degradación eficiente. No obstante, una pretratamiento adecuada podría permitir el uso de estas aguas con alto contenido graso en sistemas especializados, maximizando la recuperación de energía sin perjudicar el funcionamiento del sistema.

En conclusión, las aguas residuales agroalimentarias presentan una alta carga contaminante que, sin tratamiento, podría tener graves repercusiones en el ambiente, afectando la biodiversidad, la calidad del agua y el suelo. Sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas las hacen adecuadas para aplicaciones en tecnologías de combustión microbiana, donde pueden ser aprovechadas para la generación de electricidad a partir de residuos orgánicos. Para su implementación eficiente, sería necesario optimizar parámetros como el pH y la carga de sólidos, además de realizar una pretratamiento para reducir el impacto negativo de componentes como grasas y sales. Con un manejo adecuado, estas aguas residuales no solo pueden ser tratadas de manera sostenible, sino también convertirse en una fuente de energía limpia y renovable.

Se logra estabilizar el biofilm en la región del ánodo de los electrodos después de su preparación, tal como se indica en la imagen siguiente:

del proceso de

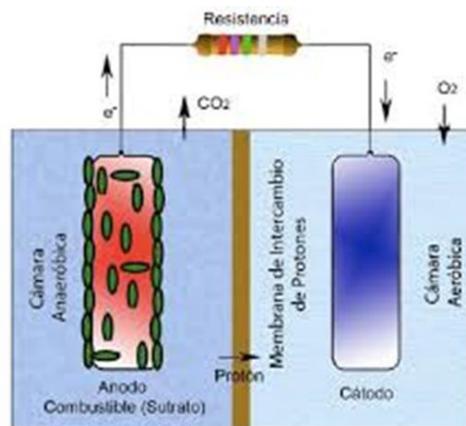
En un bioánodo, en previamente tratado, electroquímicamente (Chang et al., 2006) que transfieren directamente al ánodo

membrana como los citocromos tipo  $c$ , o de conductos proteicos denominados pili que sirven como nanoconductores.

Los microorganismos en las CCMs juegan un papel importante en la transferencia de electrones, un proceso que ocurre en la célula misma, de la célula hacia el electrodo y del electrodo a la célula. En promedio fueron obtenidos  $0,25 \text{ mW/m}^2$  en las CCM al tratar a las aguas residuales.

## 9.2 Voltamperometría cíclica (CV) de los electrodos de trabajo.

Este método se utiliza para comprender mejor el comportamiento electroquímico de un sistema y las interacciones entre un electrodo y una biopelícula. Para realizar esta medición se utilizó una celda de electrólisis, un potencióstato y los electrodos que conforman una configuración experimental típica de voltamperometría cíclica.



**Figura 35.** Esquema de conversión

Fuente: Rovelo, 2013

este caso, de carbono existen bacterias activas (Chang et al., los electrones a través de proteínas de

Se montó un electrodo de carbono desnudo de 1 cm x 1 cm también se midieron los electrodos de carbono formado por biopelículas, como electrodos de referencia se usó de Ag/AgCl en 3 M KCl, y como contraelectrodo un electrodo de platino. se realizó el VC antes y después de la formación de la biopelícula.

Para asegurarse de que el sistema estuviera listo para la voltametría cíclica (VC) del electrodo de trabajo, primero se registró un voltamograma típico de una solución de ferrocianuro al 0.75 M en una solución buffer carbonada y NaSO<sub>4</sub> como electrolito soporte.

Posteriormente se realizó el análisis del comportamiento electroquímico de tres electrodos de carbono (E1, E2 y E3) que fueron previamente sumergidos en un lodo que contenía bacterias, promoviendo así la adhesión de biofilms bacterianos a su superficie. Estos resultados se comparan con un electrodo de carbono desnudo (EC), utilizado como control.

En la **Figura 36** se muestra el voltamperograma cíclico obtenido para los cuatro electrodos, en el cual es posible observar diferencias significativas en las corrientes de oxidación y reducción entre los electrodos recubiertos con biofilm (E1, E2 y E3) y el electrodo desnudo (EC). Los electrodos con biofilm exhiben picos de corriente de mayor intensidad tanto en las fases de oxidación como de reducción, lo cual sugiere una mayor actividad redox en comparación con el electrodo de referencia sin biofilm (Basnayaka, 2024). Este comportamiento es característico de la presencia de materiales electroquímicamente activos o de compuestos bioelectroquímicamente activos que facilitan la transferencia de electrones entre las bacterias adheridas y el electrodo.

La presencia de picos de corriente más pronunciados en los electrodos E1, E2 y E3 podría estar relacionada con la actividad metabólica de las bacterias que forman el biofilm, las cuales actúan como mediadores en las reacciones de transferencia de electrones. Este aumento en la corriente es indicativo de una interacción activa entre el biofilm bacteriano y el electrodo, donde los organismos presentes son capaces de donar y recibir electrones, promoviendo así la transferencia de carga en el sistema. Por el contrario, el electrodo desnudo (EC), al no tener biofilm bacteriano, presenta una actividad redox menor, lo cual sugiere la ausencia de mediadores biológicos o electroquímicos que favorezcan dicha transferencia.

Estos resultados evidencian la influencia que tiene la colonización bacteriana en la superficie del electrodo sobre su actividad electroquímica. La presencia de biofilms en los electrodos sumergidos en el lodo mejora la capacidad del sistema para llevar a cabo transferencias de

electrones, lo cual es relevante para aplicaciones en celdas de combustible microbianas, donde la actividad electroquímica de los biofilms contribuye de manera significativa a la generación de corriente eléctrica. La comparación con el electrodo desnudo resalta el papel de los microorganismos en la facilitación de procesos redox, indicando que la biopelícula no solo aumenta la actividad electroquímica, sino que también mejora la eficiencia del electrodo en sistemas de conversión de energía.

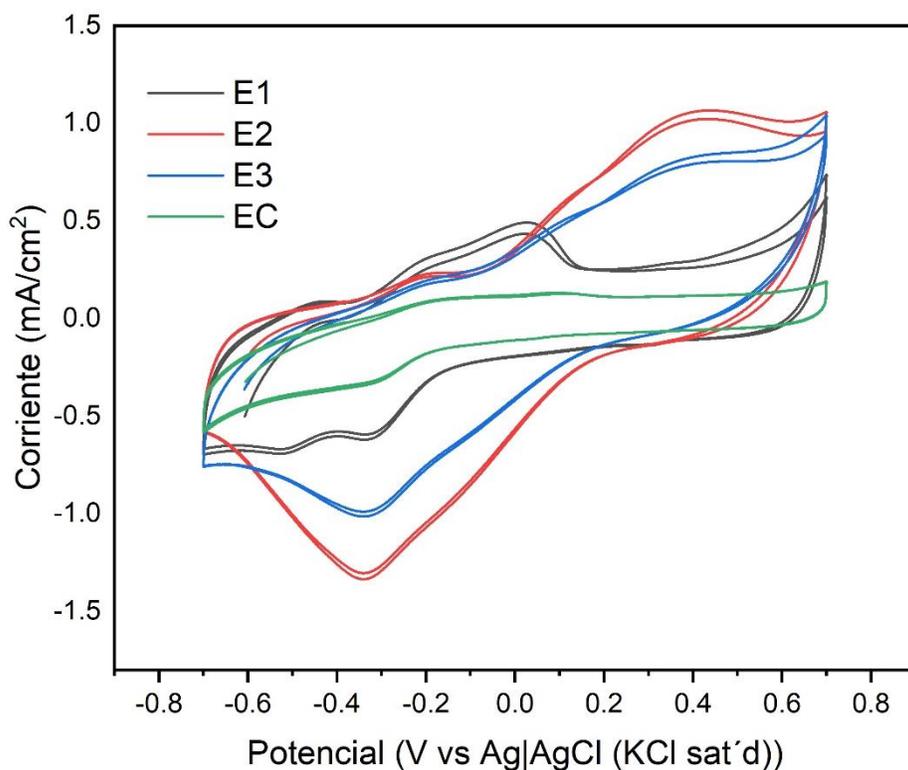


Figura 36. Voltamperograma cíclicos de electrodos de carbono con y sin biofilm bacteriano.

### 9.3 Generación de electricidad.

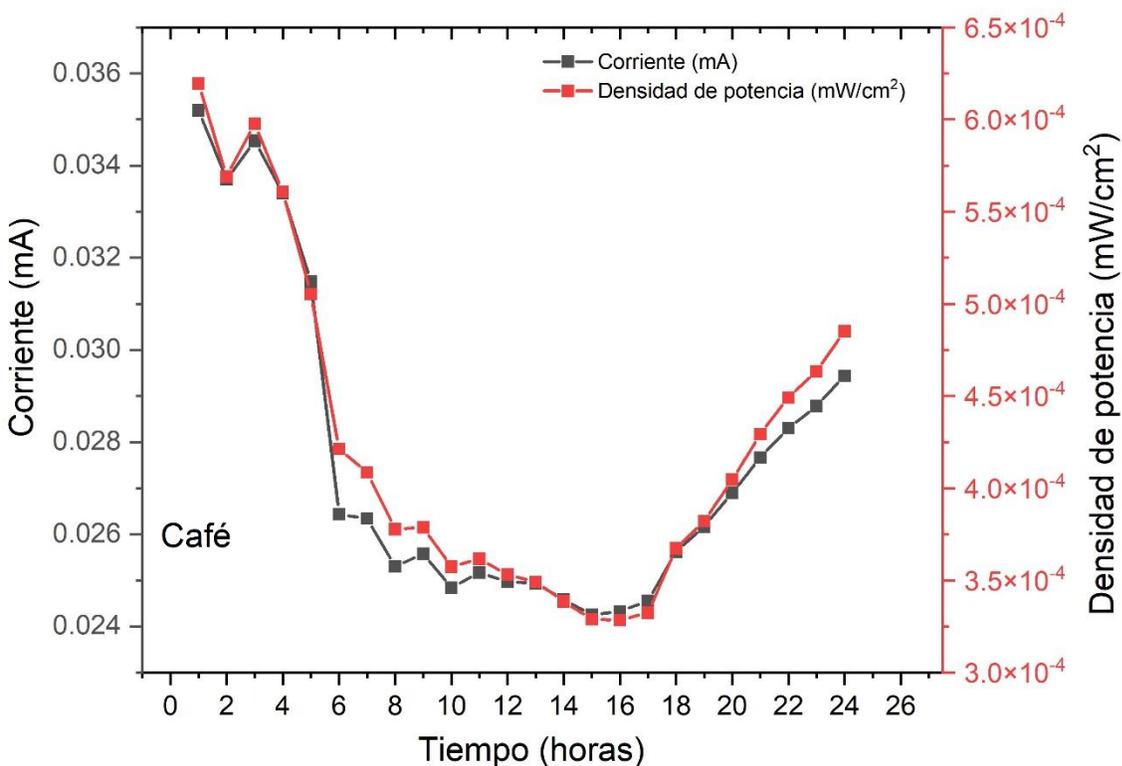


Figura 37 Densidad de potencia y corriente generada con la CCM alimentada con el efluente de Café.

En las primeras horas de medición tanto la densidad de corriente como la densidad de potencia muestran valores relativamente altos, lo que indica que el sistema tenía una buena eficiencia en la transferencia de carga y generación de potencia en esta fase temprana. Este comportamiento inicial puede atribuirse a la alta actividad de los microorganismos o procesos electroquímicos que, al estar en contacto con el electrodo y en condiciones óptimas, generan una transferencia eficiente de electrones a través de la resistencia de 500 ohmios (Oh, 2004).

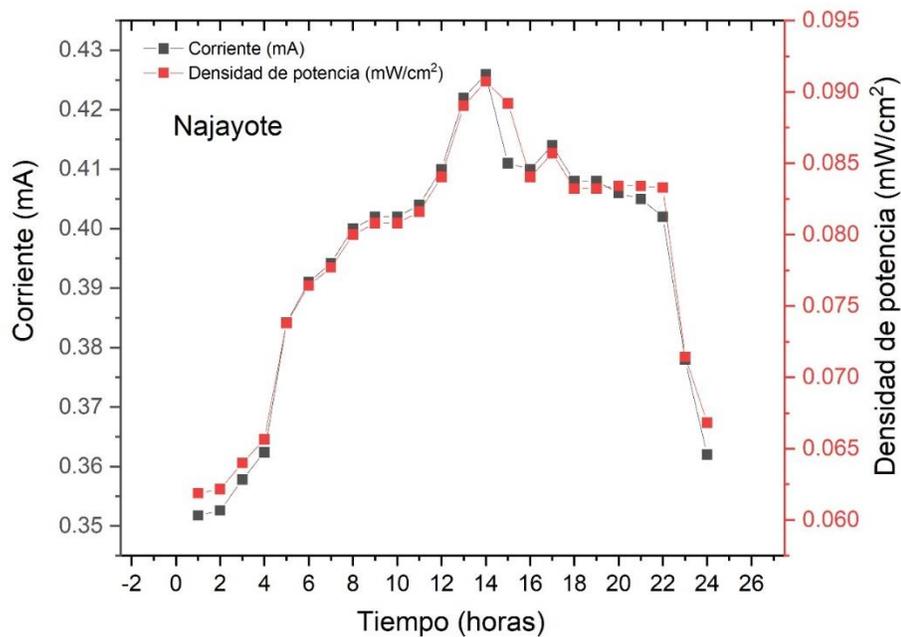
A medida que pasa el tiempo, observamos una disminución gradual en ambas variables. Esta tendencia podría deberse a varios factores:

Reducción en la actividad microbiana: En una celda de combustible microbiana (CCM), es común que la actividad de los microorganismos decaiga con el tiempo debido a la disminución de nutrientes la acumulación de productos tóxicos.

Formación de biófilms: La acumulación de un biofilm grueso puede disminuir la eficiencia de la transferencia de electrones hacia el electrodo.

Posible cambio en la resistencia interna del sistema: Aunque la resistencia externa se mantiene en 500 ohmios, es posible que la resistencia interna de los electrodos y conexiones aumente con el tiempo debido a los depósitos, lo cual reduce la eficiencia general del sistema.

En las horas finales de la medición, ambas densidades parecen alcanzar un nivel estable y bajo. Esto podría interpretarse como el equilibrio entre la actividad electroquímica residual y las limitaciones del sistema (como la falta de nutrientes o la inhibición microbiana). En esta fase, el sistema sigue generando corriente y potencia, pero a niveles reducidos debido a las condiciones limitantes. Al utilizar una resistencia de 500 ohms en estas mediciones contribuye a estabilizar la generación de corriente en el rango de densidades mostrado, ya que la resistencia proporciona una carga constante contra la cual los electrones deben fluir. Este valor de resistencia es común en estudios de celdas de combustible microbianas porque permite una generación de corriente moderada sin que el sistema se sobrecargue.



### Figura 38 Densidad de potencia y corriente generada con la CCM alimentada con el efluente de Nejayote.

En la gráfica se observa el comportamiento de la corriente (mA) y la densidad de potencia ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) en función del tiempo para el sustrato de najayote. Al inicio del experimento, tanto la corriente como la densidad de potencia muestran un incremento gradual hasta alcanzar sus valores máximos entre las 12 y 14 horas, con una corriente máxima de aproximadamente 0.42 mA y una densidad de potencia máxima cercana a  $0.090 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . Este aumento inicial puede estar relacionado con la estabilización del sistema y el incremento en la actividad electroquímica o microbiológica, lo que permite una mayor eficiencia en la transferencia de electrones. Posteriormente, a partir de las 14 horas, ambas variables comienzan a disminuir progresivamente, lo cual podría atribuirse a factores como el agotamiento de nutrientes o la acumulación de productos inhibitorios en el sistema. La reducción es más notable entre las 20 y 24 horas, indicando que el sistema ha alcanzado una fase en la cual no puede sostener la generación de energía de manera óptima. Este comportamiento sugiere un ciclo típico en sistemas electroquímicos o microbianos, donde después de un período de máximo rendimiento, la actividad decae, resaltando así el intervalo de tiempo ideal para la operación antes de que el sistema requiera ajustes o regeneración.

Varios factores pueden afectar la eficiencia del sistema mostrado en la gráfica. La disponibilidad de nutrientes en el sustrato (najayote) es crucial, ya que, al agotarse con el tiempo, la actividad microbiana puede disminuir, reduciendo así la transferencia de electrones y, por ende, la densidad de corriente y potencia. La acumulación de subproductos metabólicos también puede inhibir la actividad microbiana, alterando el pH o creando un ambiente menos favorable para la transferencia eficiente de electrones. Además, el grosor y la estructura del biofilm sobre el electrodo pueden generar limitaciones de difusión, dificultando el acceso a nutrientes para los microorganismos y la expulsión de desechos. La resistencia interna en la celda, incluyendo las resistencias de los electrodos, la membrana y el electrolito, puede obstaculizar el flujo de corriente y reducir la eficiencia general. También, las características del material del electrodo, como el área superficial, la porosidad y el tipo de material, afectan la eficiencia de la transferencia electrónica, siendo los materiales a base de carbono generalmente más efectivos. Además, cambios en el pH y la temperatura pueden impactar negativamente el metabolismo microbiano y las reacciones electroquímicas, disminuyendo las tasas de reacción. Finalmente, en sistemas donde el oxígeno actúa como aceptor final de electrones, la difusión de oxígeno hacia el cátodo

es clave; una cantidad insuficiente de oxígeno puede limitar la reacción catódica y reducir la generación de energía. (Adrianus Kristy Prabowo, 2016)

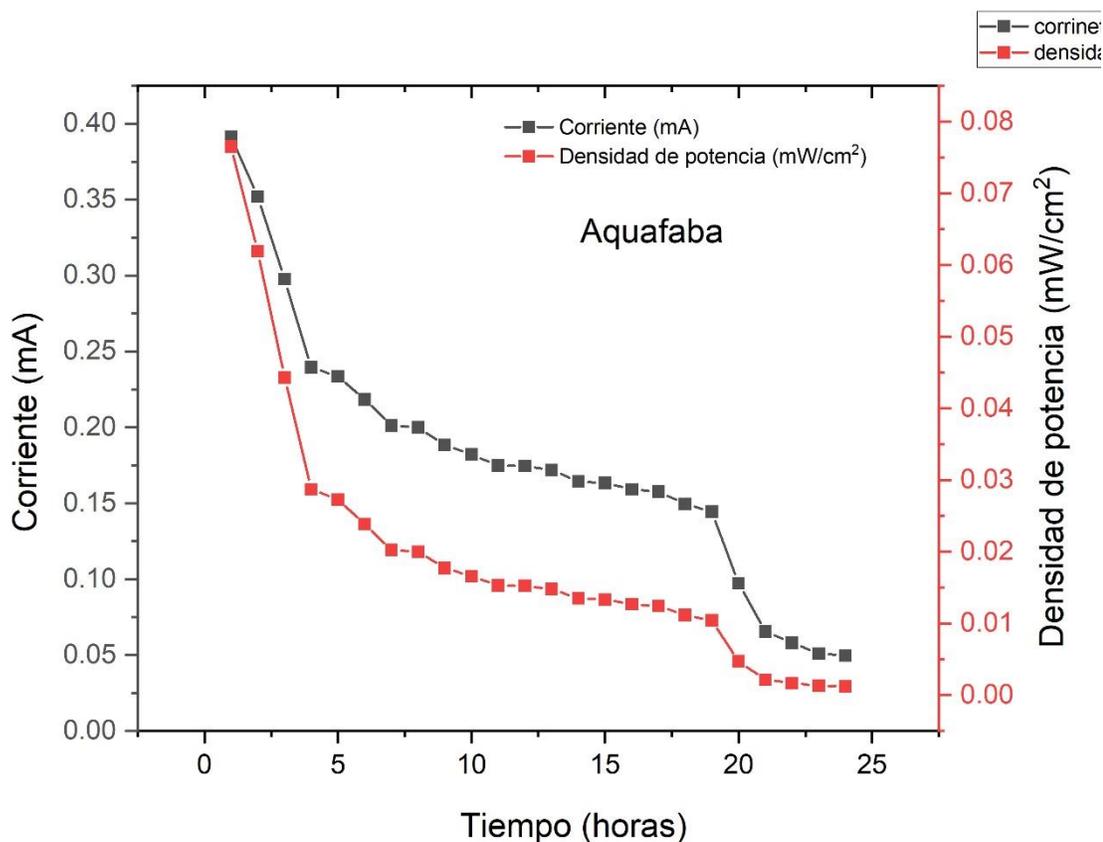


Figura 39. Densidad de potencia y corriente generada con la CCM alimentada con el efluente de Aquafaba.

En la gráfica se observa la evolución de la corriente (mA) y la densidad de potencia (mW/cm<sup>2</sup>) en función del tiempo para el sustrato de aquafaba. Al inicio del experimento, se registra un máximo de corriente de aproximadamente 0.40 mA y una densidad de potencia máxima de alrededor de 0.07 mW/cm<sup>2</sup>. Ambos valores comienzan a disminuir rápidamente en las primeras horas, lo que indica un periodo inicial de alta actividad electroquímica o microbiana en el sistema.

A partir de las primeras horas, la corriente y la densidad de potencia muestran una tendencia descendente constante, alcanzando niveles mucho más bajos hacia las 20 horas y manteniéndose en esos valores hasta el final del experimento. Esta disminución progresiva puede atribuirse a varios factores. Uno de ellos podría ser el agotamiento de nutrientes en el sustrato de aquafaba,

que limita la actividad metabólica de los microorganismos en una celda de combustible microbiana. Además, la acumulación de productos metabólicos podría crear un ambiente menos favorable para la generación de energía, afectando la eficiencia de la transferencia de electrones en el sistema. La formación de un biofilm en el electrodo también podría contribuir, ya que, aunque inicialmente facilita la transferencia de electrones, su crecimiento excesivo puede dificultar el acceso a nutrientes y la eliminación de desechos, reduciendo así la actividad electroquímica general. En conjunto, estos factores explican la tendencia descendente de la corriente y densidad de potencia observada en el experimento (Ieropoulos I, 2013).

#### 9.4 Conclusión

En este estudio, la voltamperometría cíclica (CV) permitió una evaluación exhaustiva del comportamiento electroquímico de electrodos de carbono con y sin biopelículas bacterianas. Los resultados mostraron que los electrodos con biofilm (E1, E2 y E3) exhibieron picos de corriente de oxidación y reducción más pronunciados en comparación con el electrodo desnudo, indicando una mayor actividad redox. Esto resalta el papel mediador del biofilm bacteriano en la transferencia de electrones, lo cual sugiere que los microorganismos adheridos actúan como mediadores biológicos que facilitan la conversión electroquímica. Esta actividad es fundamental en aplicaciones como las celdas de microbianas combustibles, donde la presencia de biopelículas puede mejorar la eficiencia de la transferencia de carga y contribuir a una generación de corriente estable.

Asimismo, el análisis de generación de electricidad en celdas de combustible microbianas (CCM) utilizando distintos sustratos (efluente de café, najayote y aquafaba) mostró un patrón inicial de alta densidad de corriente y potencia, seguido de una disminución gradual. Esta tendencia es atribuible a factores como la reducción de nutrientes, la acumulación de productos inhibidores y la posible resistencia interna del sistema. En el caso del efluente de café, la actividad inicial decayó debido a la disminución de la actividad microbiana y formación de biopelículas más gruesas, mientras que en el najayote, la densidad de corriente alcanzó un máximo prolongado antes de disminuir. Para la aquafaba, la actividad disminuye rápidamente, reflejando limitaciones de nutrientes y acumulación de subproductos metabólicos.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de optimizar las condiciones de operación, como la disponibilidad de nutrientes, el control de la resistencia interna y el manejo del biofilm para mantener una alta eficiencia en la generación de energía en CCM. La

comparación entre los tres sustratos revela que los diferentes tipos de efluentes proporcionan distintos patrones de actividad electroquímica, lo cual es valioso para el diseño de sistemas de conversión energética sostenibles. Estos hallazgos son aplicables a la mejora de sistemas bioelectroquímicos para la conversión de residuos en energía, destacando el papel crucial de los microorganismos y su interacción con los electrodos en la transferencia de electrones y generación de energía.

#### 9.5 Trabajos Futuros.

**Optimización de Condiciones de Operación en Celdas de Combustibles Microbianas (CCM):** Dado que la actividad microbiana y la eficiencia electroquímica disminuyen con el tiempo, se podría investigar la adición de nutrientes o la introducción de un flujo continuo de sustrato para mantener la actividad de los microorganismos y mejorar la estabilidad en la generación de corriente y densidad de potencia a largo plazo.

**Estudio de la Estructura y Dinámica del Biofilm en el Electrodo:** Explorar métodos para controlar el grosor y la densidad del biofilm en la superficie del electrodo, ya que un biofilm muy denso podría disminuir la eficiencia de transferencia de electrones. Esto podría incluir el uso de inhibidores del crecimiento excesivo del biofilm o de técnicas que favorezcan la formación de biofilms estructurados y estables.

**Investigación de Sustratos Alternativos y Su Efecto en la Eficiencia de CCM:** Ampliar el estudio a otros tipos de efluentes agroindustriales o residuales y cómo evaluar su composición afecta la actividad electroquímica y la eficiencia de generación de energía. Podrían explorarse sustratos ricos en nutrientes específicos que prolongan la actividad bacteriana o que favorecen la transferencia de electrones.

**Modificación de Materiales de Electrodo para Mejorar la Interacción Biofilm-Electrodo:** Probar materiales de carbono modificados o recubiertos con agentes que promuevan una mayor adherencia y actividad de los biofilms. Esto podría mejorar la eficiencia de transferencia de electrones y aumentar la densidad de corriente en sistemas bioelectroquímicos.

## CONCLUSIONES

Las cámaras de combustión microbiana constituyen una alternativa de tratamiento para las aguas residuales generadas por la agroindustria del estado, son un sistema bioelectroquímico la cual emplea diferentes bacterias exo-electrógenas para la generación de bioelectricidad.

Las bacterias utilizadas a partir del inóculo, consumieron los distintos desechos orgánicos e inorgánicos y utilizaron su metabolismo oxidativo para convertir la energía química a energía eléctrica en un orden de  $0,25 \text{ mW/m}^2$ , lo que indica que la generación de bioelectricidad a partir de este biofilm es adecuado y permite remover el 60% de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

## REFERENCIAS DOCUMENTALES

ADDI ALEMAYEHU, Yitayal, LETA ASFAW, Seyoum y ALEMU TIRFIE, Tadesse. 2019. *Opciones de manejo de las aguas residuales del procesamiento del café*. **En:** Springer Japan KK [en línea]. **Disponible en:** <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00953-y> [consulta: agosto del 2023].

ADRIANUS KRISTYO PRABOWO, A. P. (2016). Microbial Fuel Cells for Simultaneous Electricity Generation and Organic Degradation from Slaughterhouse Wastewater . Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED), 5 (2) 2016: 107-112.

ALLEN, RM, Bennetto, HP, 1993. Pilas de combustible microbianas. aplicación Bioquímica Biotecnología. 39 (1), 27–40.<https://doi.org/10.1007/BF02918975>

An, J., Lee, HS, 2014. Ocurrencia e implicaciones de la inversión de voltaje en apilados pilas de combustible microbianas. ChemSusChem 7(6),1689–1695.<https://doi.org/10.1002/cssc.201300949>

ANNA SIKORA, Mieczysław Błaszczak MJ and UZ. Lactic Acid Bacteria in Hydrogen-Producing Consortia: On Purpose or by Coincidence? Lactic Acid Bacteria - R & D for Food, Health and Livestock Purposes 2013:450. doi:10.5772/50364.

AÑILEMA BUÑAY, Luis Miguel. (2019). Modelado y simulación del proceso de generación de bio-electricidad en una celda microbiana (MFC) con los sustratos: glucosa y lixiviados. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.

ARGUN, Mustafa, ARGUN, Mehmet. Tratamiento y posibilidades alternativas de uso de un efluente especial: Nejayote. Food Process Engineering. 2017. DOI: 10.1111/jfpe.12609

BASNAYAKA, C. S. (2024). Marine Photosynthetic Microbial Fuel Cell for Circular Renewable Power Production. *Bioenerg. Res.*

BENITES, M., ...[et al.]. (2020). Bioelectricity from *Saccharomyces cerevisiae* yeast through low-cost microbial fuel cells [Bioelectricidad a partir de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* a través de celdas de combustible microbiana de bajo costo]. Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2020(102). <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.102>

BOSE, D., et al., Rendimiento del cátodo de carbono activado para la generación de energía sostenible a partir de celdas de combustible microbianas. Combustible 236, 2019. 325–337.<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.002> Butti, SK, Velvizhi, G., Sulonen, ML, Haavisto, JM, Koroglu, EO, Cetinkaya, AY,

CASTRO LEAL, Cesar Felipe. Evaluación del potencial energético de subproductos del beneficio del cacao para la obtención de bioelectricidad en celdas de combustión microbianas. 2022.

CASTRO SILGADO, Luis Miguel, et al. Implementación de celdas de combustible microbianas para el aprovechamiento energético de la biomasa residual obtenida de la postcosecha del cultivo de plátano. 2023.

CRUZ SALOMON, Abumale, et al. .Evaluación del Tiempo de Retención Hidráulica en el Tratamiento de Aguas Residuales del Procesamiento de Café (CPWW). Biorreactor EGSB. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. MDPI, 2017. DOI:10.3390/su10010083.

DÍAZ-MONTES, E., CASTRO-MUÑOZ, R., & YÁÑEZ-FERNÁNDEZ, J. An overview of nejayote, a nixtamalization by product. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2016. 8(2), 41-60. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.03.002>

DE LA CRUZ, M. et al. Use of waste from the sugar industry for the production of bioelectricity [Uso de los desechos de la industria azucarera para la producción de bioelectricidad]. *Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2021-July(130). <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.130>

ELSHOBARY, M. Recent insights into microalgaeassisted microbial fuel cells for generating sustainable bioelectricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. xxxx, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.251>

FITRIANA FITRIANA, M. AULIQ, F. AKBAR y MUBAROK Z. “Bioelectricidad de los residuos de mazorcas de cacao como sustrato en una pila de combustible microbiana de doble cámara”, *JME* , vol. 12, núm. 2, págs. 93 - 99, octubre de 2023.

GÁMEZ HERNÁNDEZ, Danna Melissa; ROMERO MEJÍA, Maria Camila. Obtención de energía eléctrica por celdas de combustión microbiana con plantas, en un sistema de una sola cámara sin el uso de membranas. 2020. <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01667>

GARCIA, M., Liu, T., & Kumar, R. (2020). Proton Exchange Membrane Reactors in Microbial Fuel Cells: Advancements and Challenges. *Journal of Power Sources*, 456, 227089.

GRABIEL RIOS, Katherine Sofía; PLASENCIA VERDE, Claudia Cristina. Evaluación del potencial energético de residuos de Theobroma cacao por medio de celdas de combustible microbiano. 2020.

GONZÁLEZ, R., Pérez, C., & López, M. (2022). Microbial Fuel Cells: Current Trends and Future Perspectives. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 14(2), 0234

GUO, Yajin. Tratamiento simultáneo de aguas residuales y recolección de energía en celdas de combustible microbianas: una actualización sobre los biocatalizadores. **[En línea]**. (Ed). Londres: The Royal Society of Chemistry, 2020. N° 14. DOI: 10.1039/[d0ra05234crsc.li/rsc-advances](https://doi.org/10.1039/d0ra05234crsc.li/rsc-advances).

KUMAR, G., Patel, S., & Sharma, P. (2019). Microbial Fuel Cells: Recent Advances and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 108-125

IEROPOULOS I, G. J. (2013). Energy production and sanitation improvement using microbial fuel cells. *J Water Sanit Hyg Dev.*, 3(3): 383-391.

LA CRUZ-NORIEGA, De, et al. Generación de bioelectricidad a través de levadura *Galactomyces* sp. 2020. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.520>

LEMMA, B., ARARSO, K., EVANGELISTA, P. Attitude toward biogas Technology, use and prospects for greenhouse gas emission reduction in Southern Ethiopia. *Journal of cleaner production*. s.pp. 2020. <https://onx.la/f14bc>

LI, Y., LI, H. Los pili tipo IV de *Acidithiobacillus ferrooxidans* pueden transferir electrones de donantes de electrones extracelulares. *J. Microbiol básico*. 2014. 54 (3), 226–231. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200300>

LÓPEZ-PACHECO, Itzel Y., et al. Combination of nejayote and swine wastewater as a medium for *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris* production and wastewater treatment. *Science of the total environment*, 2019, vol. 676, p. 356-367. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.278> 0048-9697/

MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; 9.17 - Life Cycle Analysis of Renewable Energy. *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)*. vol 9, 2022, pag 234-246. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00016-9>

MEJÍA CABEZAS, Nora T., y CAMPOVERDE SANTOS, Diana K. Estudio comparativo de propiedades funcionales y fisicoquímicas de aquafaba de distintas leguminosas. AlfaPublicaciones, 2022. 4(1.2), 35–50. Disponible en: <https://doi.org/10.33262/ap.v4i1.2.182>.

MENDOZA, J., López, A., & García, R. (2019). Biodigestores anaeróbicos en cámaras de combustión microbiana: Principios, diseño y aplicaciones. *Renewable Energy Reviews*, 104, 123-135.

MERAZ, Karla Alejandra Suarez, et al. Eco-friendly innovation for nejayote coagulation–flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 284, p. 536-542. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.026>

Oh, S. M. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Env. Sci. Technol.*, 4900-4904.

RAHMAN, W. Anaerobic digestion of toluene-laden wastewater under oxygen-deficient mesophilic condition and concurrent retrieval of methane-enriched biogas. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. [https://www.researchgate.net/publication/346089349\\_Anaerobic\\_digestion\\_of\\_toluene\\_laden\\_wastewater\\_under\\_oxygen\\_deficient\\_mesophilic\\_condition\\_and\\_concurrent\\_retrieval\\_of\\_methane-enriched\\_biogas](https://www.researchgate.net/publication/346089349_Anaerobic_digestion_of_toluene_laden_wastewater_under_oxygen_deficient_mesophilic_condition_and_concurrent_retrieval_of_methane-enriched_biogas)

PEÑALOZA CASANOVA, Carlos Antonio; Eugenio Barroso, Jeffer Sneider. Utilización de la *Spirulina platensis* (Arthrospira) para la producción de energía mediante celdas de combustión con aguas residuales domésticas como sustrato. 2018.

RAMÍREZ, J., Gómez, A., & Pérez, M. (2020). Integration of Activated Sludge Digesters with Microbial Fuel Cells: Advances and Challenges. *Journal of Environmental Engineering*, 146(7), 04020078.

RANA Mustaf; YUE He; Joven Joven Cuña; Reaney JT, Martín. (2018). Aquafaba, agua residual de las conservas de garbanzos, funciona como sustituto del huevo en bizcocho. *Food science + Technology*. doi:10.1111/ijfs.13813.

REYES HUAMÁN, Rolando. Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales de la industria de cacao mediante celdas de combustible microbiana. 2023.

RINCÓN-CATALÁN, Néstor Isidro, Abumalé Cruz-Salomón, P.J. Sebastian, Sergio Pérez-Fabiel, Maritza del Carmen Hernández-Cruz, Rocío Magdalena Sánchez-Albores, Jesús Mauricio Ernesto Hernández-Méndez, María Emperatriz Domínguez-Espinosa, Héctor Armando Esquinca-Avilés, Edna Iris Ríos-Valdovinos, and et al. 2022. "Banana Waste-to-Energy Valorization by Microbial Fuel Cell Coupled with Anaerobic Digestion" *Processes* 10, no. 8: 1552. <https://doi.org/10.3390/pr10081552>

ROJAS-FLORES S., De La Cruz-Noriega M., Nazario-Naveda R., Santiago M. Benites, D. Delfín-Narciso, W. Rojas-Villacorta, Cecilia V. Romero. 2022 Bioelectricity through microbial fuel cells using avocado waste, *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 9, Pages 376-382, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.100>.

ROJAS-FLORES, S., Benites, S. M., La Cruz-Noriega, D., Nazario-Naveda, R., Gallozzo-Cardenas, M., Diaz, F., & Delfín-Narciso, D. (2023). Generación de energía eléctrica a través de desechos de lácteos en celdas de combustible microbianas. LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.477>

ROJAS FLORES, Segundo Jonathan, et al. Bioelectricity through microbial fuel cells from decomposed fruits using lead and copper electrodes.[Bioelectricidad mediante Celdas de Combustible Microbiana a partir de frutas descompuestas usando electrodos de plomo y cobre.]. 2020. Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.17> ISBN: 978-958-52071-4-1

ROJAS FLORES, Segundo, Orlando Pérez Delgado, Renny Nazario Naveda, Henry Rojas Alfaro, Santiago M. Benites, Magaly De La Cruz Noriega y Nélide Milly Otiniano. 2021. "Uso Potencial de Residuos de Papaya como Combustible para Generación de Bioelectricidad" *Procesos* 9, núm. 10: 1799. <https://doi.org/10.3390/pr9101799>

ROJAS-FLORES, S., Nazario, R., Benites, S., De La Cruz, M., Cabanillas, L., Otiniano, M., Rodriguez, M., Valdiviezo, F., & Rojas, W. (2021). Generation of bioelectricity through grape waste [Generación de bioelectricidad mediante desechos de uvas]. *Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 1-6. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.135>

SAMIL ARGUN M., EMIR ARGUN M. Tratamiento y posibilidades alternativas de uso de un efluente especial nejayote. *Willey Periodicals*, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12609>

SIEGMEIER, Torsten; BLUMENSTEIN, Benjamin; MÖLLER, Detlev. Bioenergy production and organic agriculture. En *Organic Farming*. Woodhead Publishing, 2019. p. 331-359. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00012-4>.

SINGH S, JAIN S, PS V, Tiwari AK, Nouni MR, Pandey JK, et al. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;51:623–33. doi:10.1016/j.rser.2015.06.040.

TOLEDO-LÓPEZ, Virginia; TITTOR, Anne. Contradictions Regarding Innovations and Certifications in the Bioenergy Sector in Argentina. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 2019, no 26, p. 87-110. Disponible en: <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.26.2019.3896>.

Thomas. A., García. E., Vela. G., Velázquez. A. y Guadalupe, V.(2019) Producción de aquafaba a partir de garbanzos naturales. *Academia Journals*, 11(9).

Valencia, M. (2018). Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales del Camal.

VÁSQUEZ, Germán Aníbal Narváez; GONZÁLEZ, Atzimba; CRISTOBAL, Luis Asencio. Los parques tecnológicos como una estrategia para la innovación en el sector agroindustrial. *RILCO DS: Revista de Desarrollo sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, 2021, vol. 3, no 18, p. 6

VIDAL MORALES, Luisa Valeria; ZAMBRANO BARÓN, Laura Daniela, 2022. Desempeño de un sistema de celdas de combustible microbiano para el tratamiento y generación de bioelectricidad a partir de efluentes de una industria de curtiembre ubicada en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca.

Zhou, Y., Zhu, N., Guo, W., Wang, Y., Huang, X., Wu, P., Xian, J., 2018. Simultáneo producción de electricidad y eliminación de antibióticos mediante celdas de combustible microbianas. *J. Medio Ambiente. Administrar* 217,565–572. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.013>

## ANEXOS



Figura 32 .Potenciómetro



Figura 33. Celda de Combustión Microbiana