

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES



**“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CÉLULAS DE COMBUSTIBLE A PARTIR
DE MICROORGANISMOS PRESENTES EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

AUTOR:

NAVARRETE LÓPEZ RODRIGO SEBASTIÁN

DIRECTOR

JUAN CARLOS GARCÍA MONTOYA, PHD.

IBARRA - ECUADOR

2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios por haberme guiado en el camino hacia la culminación de mis estudios de tercer nivel. Le agradezco por haberme escuchado y brindado su misericordia en los momentos más difíciles de esta etapa de mi vida.

También quiero agradecer de todo corazón a mis padres, Iban Navarrete y Elizabeth López quienes son lo más valioso en mi vida después de Dios. Su sacrificio diario, apoyo moral y económico han sido fundamentales para llegar hasta aquí. Los valores que me han transmitido me han enseñado a no abandonar mis sueños en la primera adversidad que se presenta. A mis hermanos Iván Navarrete y su familia, Gabriela Navarrete, Joselyn Navarrete y Ainhoa Navarrete, les agradezco por haber sido un ejemplo de lucha, trabajo y constancia, así como por haberme brindado su apoyo en todos los sentidos de la palabra.

Así mismo, quiero expresar mi gratitud a mi familia, quienes siempre han estado presentes en mi desarrollo académico y personal siendo un ejemplo que forjó mi carácter, algo que me ha permitido luchar por mis metas.

No puedo dejar de mencionar a mi pareja, quien ha sido mi apoyo durante todos estos años y ha hecho posible finalizar gratamente esta etapa de mi vida. Juntos compartimos metas y sueños que nos impulsan a seguir adelante.

De Igual manera quiero agradecer a mi director de investigación, Dr. Juan Carlos García Montoya, a mis asesores MSc. Jorge Granja, MSc. Santiago Cabreara, docentes MSc. Luis Álvarez y MSc. Juan Guamán gracias por ayudarme a ser un profesional consciente, responsable, crítico y comprometido. Gracias al equipo de investigación de LABINAM, en especial al Ing. Jonathan Cordovillo e Ing. Karen Portilla, a los docentes de la Universidad Yachay Tech, Dr. Carlos Reinoso y MSc. Jonathan Escorza, por su tiempo y conocimientos que aportaron gran valor académico al proyecto de mi formación profesional.

Por último, deseo agradecer a todos los amigos y compañeros que han sido parte de este logro, por estar siempre prestos para ayudar, aconsejar o acompañar. Vuestra presencia ha sido fundamental en mi camino hacia el éxito.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado a Dios, pues sin él no soy nada: *" Y todo lo que hagan o digan, háganlo en el nombre del Señor Jesús, dando gracias a Dios el Padre por medio de él"*
COLOSENSES 3:17

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, Elizabeth López, quien me ha dado el regalo más grande que puede recibir un ser humano: la vida. Desde entonces, ha sido mi guía, mi apoyo y mi inspiración constante. A mi padre, Iban Navarrete, quien ha sido un pilar fundamental en mi educación y formación como persona y profesional, gracias por su amor incondicional y su motivación constante. A mi hermano y hermanas, quienes han estado a mi lado en todo momento, dándome fuerza y ánimo en los momentos más difíciles. A toda mi familia, por su amor, su paciencia y su confianza en mí. Y por último, pero no menos importante, quiero dedicar este trabajo a todas aquellas personas que han sido parte de mi vida y han dejado una huella en mí, gracias por inspirarme, enseñarme y ayudarme a crecer como persona y profesional. Este logro también es para ustedes.

REPÚBLICA DEL ECUADOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 ACREDITADA RESOLUCIÓN N°. 173-SE-33-CACES-2020
 FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
 CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
 AMBIENTALES

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
 TITULACIÓN**

Ibarra, 8 de mayo de 2023

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CÉLULAS DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE MICROORGANISMOS PRESENTES EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA”**, de autoría del señor **RODRIGO SEBASTIÁN NAVARRETE LÓPEZ** estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

PhD. Juan Carlos García
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

MSc. Luis Álvarez
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Santiago Cabrera
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

FIRMA



**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
 TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA :	1003163613
NOMBRES Y APELLIDOS:	Navarrete López Rodrigo Sebastián
DIRECCIÓN:	Ciudadela del Chofer II Etapa – Ibarra
EMAIL:	sebastian_ml@hotmail.com
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	0967579837

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CÉLULAS DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE MICROORGANISMOS PRESENTES EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA”
AUTOR:	Navarrete López Rodrigo Sebastián
FECHA:	09 mayo 2023
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Energías Renovables
DIRECTOR:	PHD. Juan Carlos García Montoya



2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrán en defensa de la universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 9 días del mes de mayo del 2023

EL AUTOR:

Nombre: Rodrigo Sebastián Navarrete López

Índice de Contenido

RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
Capítulo I	1
Introducción	1
1.1. Revisión de Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema y Justificación.....	4
1.3. Pregunta Directriz	6
1.4. Objetivos de la Investigación	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. Hipótesis.....	6
Capítulo II.....	7
Marco Teórico.....	7
2.1. Revisión de Literatura	7
2.1.1. Energía.....	7
2.1.2. Energía Eléctrica.....	7
2.1.3. Energía Química	7
2.1.4. Energía de Biomasa	8
2.1.5. Célula de Combustible.....	8
2.1.6. Funcionamiento de la Célula de Combustible	8
2.1.7. Relación de la Intensidad de Corriente y el Sobrepotencial en una CCM.....	10
2.1.8. Tipos de Células de Combustible	12
2.1.9. Transferencia de Electrones en una CCM	17
2.1.10. Materiales de una CCM.....	18
2.1.11. Arquitectura de una CCM.....	20
2.1.12. Aplicaciones de las CCMs.....	22
2.1.13. Desempeño Electroquímico.....	23
2.1.14. Calidad del Agua	26
2.1.15. Demanda Química de Oxígeno DQO	27
2.1.16. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅	27

2.1.17. Microorganismos	28
2.2. Marco Legal	30
2.2.1. Constitución de la República del Ecuador.....	30
2.2.2. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2015-2030	30
2.2.3. Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025	31
2.2.4. Código Orgánico Ambiental (COA).....	31
Capitulo III.....	32
Metodología	32
2.3. Área de Estudio	32
2.4. Tablas de Materiales.....	33
2.5. Métodos	34
2.5.1. Análisis de la Calidad del Agua de la Laguna de Yahuarcocha	34
2.5.2. Evaluación de la Capacidad de Generación Bioeléctrica de las Células de Combustible en un Ambiente Controlado.....	39
2.5.3. Determinación de la incidencia del uso de diferentes resistencias en la generación de bioelectricidad.....	50
Capítulo IV.....	53
Resultados y Discusión.....	53
3.1. Análisis de Calidad del Agua de Yahuarcocha	53
3.1.1. pH y Temperatura	53
3.1.2. DQO y DBO ₅	59
3.1.3. Biovolumen.....	60
3.2. Evaluación de la capacidad bioeléctrica de las células de combustible en un medio controlado.....	61
3.2.1. Cultivo de Cianobacterias.....	61
3.2.2. Evaluación de Voltaje de Circuito Abierto de la CCM con Diferentes Muestras	63
3.3. Efecto en la Generación Bioeléctrica el Uso de Diferentes Cargas.	66
3.3.1. Resistencia Interna.....	66
3.3.2. Intensidad de Corriente Eléctrica.....	66
3.3.3. Potencia de CCM.....	70
3.3.4. Densidad de Potencia de la CCM	72

3.3.5. Porcentaje de Remoción de DQO.....	75
Capitulo V.....	78
Conclusiones y Recomendaciones.....	78
3.4. Conclusiones.....	78
3.5. Recomendaciones.....	78
Bibliografía.....	80
Anexos.....	94

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Costo de los Materiales Utilizado en el Electrodo Ánodo</i>	18
Tabla 2 <i>Formas Comerciales del Grafito</i>	19
Tabla 3 <i>Trabajos Publicados de Células de Combustibles Microbianas</i>	25
Tabla 4 <i>Materiales y Equipos Útiles en la Investigación</i>	33
Tabla 5 <i>Puntos Georreferenciados de Muestreo</i>	35
Tabla 6 <i>Parámetros para Analizar Aguas Contaminadas</i>	36
Tabla 7 <i>Preparación Medio de Cultivo BG11 para Cianobacterias</i>	41
Tabla 8 <i>Medidas de las Células de Combustible Microbianas Cámara Sencilla</i>	43
Tabla 9 <i>Matriz de Variables Dependiente e Independientes</i>	48
Tabla 10 <i>pH de la Laguna de Yahuarcocha Durante 30 Días</i>	54
Tabla 11 <i>Resultados Prueba Estadística ANOVA del pH</i>	55
Tabla 12 <i>Medianas de los Datos de pH de la Laguna de Yahuarcocha</i>	55
Tabla 13 <i>Temperatura de la Laguna de Yahuarcocha Durante 30 Días</i>	56
Tabla 14 <i>Resultados de la Prueba Estadística ANOVA para la Temperatura</i>	57
Tabla 15 <i>pH y Temperatura 2013 a 2022</i>	58
Tabla 16 <i>Parámetros DBO₅ y DQO</i>	59
Tabla 17 <i>Biovolumen de Yahuarcocha</i>	61
Tabla 18 <i>Experimentación en Voltaje de Circuito Abierto con Diferentes Muestras</i>	64
Tabla 19 <i>Evaluación de Diferentes Cargas Durante 142 Horas</i>	67
Tabla 20 <i>Intensidad de Corriente [nA]</i>	69
Tabla 21 <i>Potencia de la CCM en [nW]</i>	71
Tabla 22 <i>Densidad de Potencia en [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]</i>	73
Tabla 23 <i>Remoción de DQO en [%]</i>	76

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Estructura Básica de una Célula de Combustible</i>	9
Figura 2 <i>Curvas de Polarización Potencial – Densidad de Corriente</i>	11
Figura 3 <i>Célula de Combustible Microbiana o Microbiológica</i>	15
Figura 4 <i>Esquema de una CCM Fotosintética</i>	16
Figura 5 <i>Mecanismos de Transferencia de Electrones</i>	17
Figura 6 <i>Células de Combustible Microbianas de Cámara Sencilla</i>	21
Figura 7 <i>Descomposición de la Materia Orgánica a partir de Microorganismos</i>	27
Figura 8 <i>Mapa de Ubicación de la Laguna de Yahuarcocha</i>	32
Figura 9 <i>Puntos Georreferenciados de Muestreo</i>	35
Figura 10 <i>Método Prueba de DBO₅</i>	37
Figura 11 <i>Análisis de DQO por el Método de Dicromato</i>	38
Figura 12 <i>Medición del pH y Temperatura In-Situ antes de los Análisis Físicos-Químicos</i>	39
Figura 13 <i>Cultivo en el Medio Nitrofoska más Bicarbonato</i>	40
Figura 14 <i>Adquisición de fitoplancton de la Laguna de Yahuarcocha</i>	40
Figura 15 <i>Preparación Medio de Cultivo BG11 para Cianobacterias</i>	41
Figura 16 <i>Cultivo de Cianobacterias en un Medio Sólido de BG11 más Agar</i>	42
Figura 17 <i>Resiembra del Cultivo en un Medio Líquido de BG11 e Incubación</i>	42
Figura 18 <i>Obtención de la Curva de Crecimiento Mediante Gravimetría</i>	43
Figura 19 <i>Modelamiento 3D en el Programa FreeCAD e impresión de las CCMs</i>	44
Figura 20 <i>Compuesto de los Electrodo y Malla de Acero</i>	44
Figura 21 <i>Corte y Limpieza de Malla de Acero Inoxidable</i>	45
Figura 22 <i>Preparación de la Mezcla PDVF, PVA y Plaquetas de Grafeno</i>	45
Figura 23 <i>Creación de los Electrodo</i>	46
Figura 24 <i>Muestras BG11, CIA y YAH para Evaluación Voc</i>	49
Figura 25 <i>Llenado de CCMs</i>	50
Figura 26 <i>Pruebas de Adquisición y Operación de las CCMs</i>	50
Figura 27 <i>Medición de Resistencia Interna de la CCM</i>	51
Figura 28 <i>Variación del pH de Yahuarcocha entre Diciembre y Enero durante 30 Días</i>	53
Figura 29 <i>Diferencia de los Puntos de Muestreo en la Laguna de Yahuarcocha</i>	56
Figura 30 <i>Temperatura de Yahuarcocha entre Diciembre y Enero durante 30 días</i>	57

Figura 31 <i>Temperatura de la Laguna de Yahuarcocha</i>	58
Figura 32 <i>Cultivo de Cianobacterias de Dos Semanas</i>	61
Figura 33 <i>Cianobacterias de Características Similares</i>	62
Figura 34 <i>Curva de Crecimiento del Cultivo</i>	62
Figura 35 <i>Voltaje de Circuito Abierto de una CCM en Milivoltios [mV]</i>	63
Figura 36 <i>Evaluación de las Tres Muestras en Voc Cajas y Bigotes</i>	65
Figura 37 <i>Evaluación con Diferentes Cargas Durante 142 Horas</i>	67
Figura 48 <i>Intensidad de Corriente Durante 142 Horas</i>	68
Figura 39 <i>Intensidad de Corriente con las Diferentes Cargas</i>	69
Figura 40 <i>Potencia de la CCM con Diferentes Cargas que Trabaja con la Muestra CIA</i>	70
Figura 41 <i>Potencia de la CCM en [nW]</i>	72
Figura 42 <i>Densidad de Potencia de una CCM en [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]</i>	72
Figura 43 <i>Variabilidad de la Densidad de Potencia en [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]</i>	74
Figura 44 <i>Remoción de DQO con Diferentes Cargas</i>	76

Índice de Anexos

Anexo 1 <i>Botellas de Vidrio Ámbar de 1.5L de Tapa Blanca</i>	94
Anexo 2 <i>Enjuague de Botellas de Vidrio</i>	94
Anexo 3 <i>Recolección de Muestras</i>	95
Anexo 4 <i>Pruebas de Fugas y Hermetizar las CCMs</i>	95
Anexo 5 <i>Incubador de Control de Ambiente Cerrado</i>	96
Anexo 6 <i>Multímetros Utilizados en la Adquisición de Datos</i>	96
Anexo 7 <i>Interfaz Gráfica de LabVIEW 2019</i>	97
Anexo 8 <i>Interfaz de Adquisición de Datos UNIT</i>	97
Anexo 9 <i>Programación en LabVIEW 2019</i>	98
Anexo 10 <i>Protocolo para la Preparación del Medio de Cultivo BG11</i>	99

RESUMEN

El ritmo de vida actual origina problemas ambientales desde varios enfoques, comprometiendo a la comunidad científica en buscar soluciones, la generación eléctrica y el agua son puntos primordiales en los cuales se procura trabajar para obtener fuentes de energía renovables que contribuyan a disminuir la contaminación ambiental, revirtiendo la eutrofización acelerada provocada por actividades antrópicas en lagos como Yahuarcocha. El objetivo de esta investigación fue evaluar celdas de combustible microbianas (CCM) con microorganismos presentes en la Laguna de Yahuarcocha. Se realizó un análisis de los parámetros físico-químicos del agua en tres puntos de la laguna y se hicieron dos evaluaciones de la celda de combustible. La primera evaluación consistió en medir el voltaje de circuito abierto con diferentes muestras en un ambiente controlado a 22°C durante 225 horas, se trabajó con tres muestras: el medio de cultivo (BG11), las cianobacterias cultivadas (CIA) y el agua de Yahuarcocha (YAH). En la segunda evaluación se utilizó las cianobacterias cultivadas en la CCM con diferentes cargas externas de 2, 5 y 8M Ω durante seis días tomando la medida de voltaje generado, con el cual se calculó la intensidad de corriente, potencia y densidad de potencia. Además, del porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) otro parámetro que se analizó. Los resultados de los parámetros físico-químicos indican que hubo diferencias significativas en el pH del agua 8.6 el cual varía en función al punto de muestreo, además tuvo correlación con la temperatura 22.7°C que es homogénea en todo el lago, los parámetros DQO y DBO₅ mantienen diferencias significativas según el día por la presencia de turistas, los parámetros analizados se mantienen dentro de la normativa de cuidado ambiental. La evaluación de la celda de combustible mostró que el voltaje de circuito abierto alcanzó un voltaje de $91.64 \pm 31.08\text{mV}$, resultando que las muestras de cianobacterias cultivadas son más estables y productivas $98.31 \pm 0.60\text{mV}$. Finalmente, al conectar las cargas a la CCM con la muestra CIA, se obtuvo un voltaje de $38.37 \pm 9.21\text{mV}$, siendo 8 M Ω la carga con mayor voltaje con $45.69 \pm 9.15\text{mV}$ sin embargo, intensidad de corriente, potencia y densidad de potencia mostraron una mejor producción con 2M Ω . Además, la remoción de la demanda química de oxígeno fue del 76.90% mejorando la calidad del agua al haber menor carga orgánica presente.

Palabras clave: Celdas de combustible, microorganismos, cianobacterias, cargas, pH, DQO, voltaje, intensidad de corriente, potencia, densidad de corriente.

ABSTRACT

The current pace of life causes environmental problems from various approaches, committing the scientific community to seek solutions, electricity generation and water are key points in which we are trying to work to obtain renewable energy sources that contribute to reduce environmental pollution, reversing the accelerated eutrophication caused by anthropogenic activities in lakes such as Yahuarcocha. The objective of this research was to evaluate microbial fuel cells (MFC) with microorganisms present in the Yahuarcocha Lagoon. An analysis of the physical-chemical parameters of the water at three points in the lagoon was carried out and two evaluations of the fuel cell were made. The first evaluation consisted of measuring the open circuit voltage with different samples in a controlled environment at 22°C for 225 hours, working with three samples: the culture medium (BG11), the cultured cyanobacteria (CIA) and the Yahuarcocha water (YAH). In the second evaluation, the cyanobacteria cultured in the MCC were used with different external loads of 2, 5 and 8M Ω for six days, taking the measurement of the voltage generated, with which the current intensity, power and power density were calculated. In addition, the percentage removal of chemical oxygen demand (COD) was another parameter analyzed. The results of the physical-chemical parameters indicate that there were significant differences in the pH of the water 8.6, which varies according to the sampling point; it also correlated with the temperature 22.7°C, which is homogeneous throughout the lake; the COD and BOD₅ parameters maintain significant differences according to the day due to the presence of tourists; the parameters analyzed remain within the environmental care regulations. The evaluation of the fuel cell showed that the open circuit voltage reached a voltage of $91.64 \pm 31.08\text{mV}$, resulting that the cultured cyanobacteria samples are more stable and productive $98.31 \pm 0.60\text{mV}$. Finally, when connecting the loads to the CCM with the CIA sample, a voltage of $38.37 \pm 9.21\text{mV}$ was obtained, being 8 M Ω the load with the highest voltage with $45.69 \pm 9.15\text{mV}$ however, current intensity, power and power density showed a better production with 2M Ω . In addition, the chemical oxygen demand removal was 76.90% improving the water quality as there was less organic load present.

Keywords: Fuel cells, microorganisms, cyanobacteria, charges, pH, COD, voltage, current intensity, power, current density.

Capítulo I

Introducción

La evaluación de celdas de combustible microbianas (CCM) utilizando consorcios microbianos, representa una alternativa sostenible y prometedora para la generación de energía eléctrica. En este contexto, se propone en el trabajo de grado investigar el desempeño y la eficiencia de CCMs alimentadas con consorcios microbianos obtenidos de la Laguna de Yahuarcocha, evaluando su capacidad electrogénica y su potencial para reducir la contaminación.

1.1. Revisión de Antecedentes

La incertidumbre internacional por la contaminación ambiental debido a la industrialización empezó años atrás, en 1972 hubo el primer congreso de las Naciones Unidas por el Cambio Climático en Estocolmo, para en 1992 en Río firmar el primer convenio, después en 1997 se aprueba el Protocolo de Kioto y en 2015 se establecen en 193 estados miembros los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el fin de mejorar el entorno global y alcanzar un equilibrio mundial en la calidad de vida hasta el año 2030 (ONU, 2015).

El objetivo número siete de los ODS, tiene como principio la obtención de energía asequible y no contaminante, garantizado el acceso para todos de forma sostenible y moderna, el objetivo seis trata sobre el Agua Limpia y Saneamiento que garantiza la disponibilidad del agua mediante una gestión sostenible y el objetivo trece es la Acción por el Clima, en el cual se adoptan medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

La principal fuente de vida para todos los seres vivos es el agua, al desempeñar funciones en la estructura y composición de cada uno de los organismos de este Planeta siendo un elemento primordial para proliferación de flora y fauna (Borchardt, 2016). Según la Organización Mundial de la Salud OMS (2016), la cantidad necesaria de agua por cada individuo en diferentes actividades del diario vivir como: higiene personal, limpieza del hogar, cocción de alimentos e hidratación es de aproximado de 50 litros por día, lo que equivale al 10% del consumo en general.

Los países en vías de desarrollo como Ecuador tienen problemas con la degradación del recurso hídrico a causa de agroquímicos, aguas residuales de origen industrial y doméstico siendo

los mayores contaminantes debido a su persistencia, alrededor del 80% del agua sin tratamiento termina en ríos, quebradas y en otros lugares contaminando las fuentes de abastecimiento, se estima que solo se trata el 28% (ONU, 2021). Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2019) en el territorio ecuatoriano los Gobierno Autónomo Descentralizado Municipales (GADMs) son los encargados de realizar el tratamiento del agua residual, sin embargo, de los 213 GADMs solo el 70.1% realizan esta actividad, el 26.3% no realizan ningún tratamiento de agua y el 3.6% no tiene alcantarillado que garantice el cuidado de las cuencas hidrográficas, ni tampoco agua potable.

En la provincia de Imbabura hay cuatro ciudades que dan tratamiento a sus aguas contaminadas mediante procesos tradicionales y poco sofisticados, solo el GAD San Miguel de Ibarra cuenta con una planta de tratamiento de elevado nivel tecnológico, que procura mantener controlado el río Tahuando siendo el principal cuerpo receptor, la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra EMAPA-I (2020), indica que la planta de tratamiento procesa el 90% de las aguas residuales pertenecientes a la zona urbana.

Se conoce que las condiciones actuales de la Laguna de Yahuarcocha según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica MAATE tras un monitoreo la calidad del agua en noviembre del 2020 afirma que existe deterioro por la presencia de elevados niveles de coliformes, amoníacos, fenoles, demanda química y bioquímica de oxígeno, así como presencia de metales pesados como hierro, plomo y zinc, recomendando acciones en la gestión de desechos, control y manejo de descargas de aguas residuales, para así, amortiguar la problemática del ecosistema de Yahuarcocha.

Por otro lado, la producción de energía bruta en Ecuador, teniendo en consideración las importaciones de los enlaces internacionales y el aporte del parque generador nacional, alcanzó los 27.120GWh en 2020 siendo un 2.21% menor a la producción de 2019 debido al Covid-19, esta reducción se produjo en la generación termoeléctrica, hidroeléctrica y no convencional: 8.36% termoeléctrica, 1.48% no convencional, 0.92% interconexión y 89.24% hidroeléctrica (CENACE, 2020).

La energía en todas sus formas es un sector estratégico administrado por el Estado Ecuatoriano, el cual, basándose en los principios de sostenibilidad ambiental, prevención,

precaución y eficiencia pretende explotar los recursos naturales renovables a través de centrales hidroeléctricas, parques eólicos y plantas fotovoltaicas ubicadas a lo largo del territorio, de esta manera iniciar un futuro alternativo (Cortez, 2017).

Por ello surgen alternativas tecnológicas como las células de combustible microbianas las cuales (CCM) son reconocidas como una tecnología desafiante y alentadora en el tratamiento de agua contaminada y ahorro de energía de manera simultánea, al ser dispositivos que contribuyen a superar problemas ambientales con la capacidad de producir electricidad a partir de compuestos orgánicos e inorgánicos mediante el uso de bacterias o microorganismos (Pandey et al., 2016). El número de investigaciones publicadas en revistas aumentaron notablemente, aportando información como: comunidades microbianas, condiciones de operación para el desempeño, diseños, configuraciones, electrodos o modificaciones de su superficie, además de formación de biopelículas, desafíos y posibilidades en la aplicación (Ramadan & Purwono, 2017).

Según las investigaciones de He et al. (2017) y Do et al. (2018) las CCMs son más sostenibles cuando se aplican en el tratamiento de aguas contaminadas debido su capacidad para convertir directamente la energía del sustrato en electricidad, esto reduce la presencia de lodos activados en los procesos de tratamiento de agua a diferencia de otros procesos de digestión anaeróbica que acumulan, además las CCMs tienen insensibilidad al entorno operativo, no requieren de ningún tratamiento para el gas y se pueden instalar en lugares sin estructura eléctrica.

Chaudhuri & Lovley (2003) demostraron que los microorganismos reductores de Fe (III) pueden transferir electrones a un electrodo (ánodo) utilizando glucosa como donante de electrones, lo que significa que las CCMs pueden parcialmente derivar la energía almacenada en forma de carbohidratos en biomasa de fuentes naturales, agrícolas, aguas residuales industriales o municipales. Zhao et al. (2012) en su investigación con CCM y cianobacterias del Lago Taihu en China, mencionan que las cianobacterias son ricas en carbohidratos, proteínas, así como en otros nutrientes de los cuales lograron una potencia máxima de 72 mW/m^2 , una tasa de remoción de DQO del 76.2% y una tasa de degradación de sustrato $0.607 \text{ kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. La CCM es una fuente alternativa capaz de obtener electricidad a partir de la hidrólisis o fermentación de microalgas dentro de un reactor, Velásquez et al. (2009) mencionan que la *Chlorella Vulgaris* fitoplancton presente Yahuarcocha produjo una energía por masa de sustrato de 2.5 kWh Kg^{-1}

1.2. Planteamiento del Problema y Justificación

Los hábitos y actividades antrópicas del hombre han generado un alto impacto ambiental por la emisión de gases efecto invernadero (GEI), esto origina el calentamiento global causante de modificar ecosistemas, motivo por el cual, diversos países han propuesto mecanismos para mitigar el impacto originado en las actividades económicas, consecuencias como la extinción masiva de especies donde también estaría la humana (González et al., 2003). El desarrollo tecnológico ha traído consigo la necesidad energética, siendo un desafío para las generaciones futuras, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) (2020) en 38.5 años habrá una escasez de petróleo, si esto sucediera el planeta entraría en una crisis que afectaría la seguridad energética mundial.

Ecuador al ser un país petrolero, su economía se desarrolla en torno a los combustibles fósiles, los cuales son utilizados en la generación eléctrica, transporte y cocción de alimentos, además permiten el progreso humano, científico y tecnológico. No obstante, no es sustentable al ser un recurso limitado, además causa estragos en el sector ambiental cuando se quema o derrama, perturba la calidad del aire, agua, suelo y alimentos (Pucachaqui, 2019). El agua se considera contaminada cuando su naturaleza cambia debido a la degradación de su calidad sea de forma instantánea o lenta hasta no ser apta para su consumo (Echarri, 2007).

Por otro lado, UNESCO (2021) menciona que el deterioro del recurso hídrico pone en peligro el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030 que pretende conseguir el acceso al agua potable para alrededor de 2200 millones de personas que no cuentan y 4200 millones de habitantes tampoco cuentan con un saneamiento de alcantarillado en los próximos 10 años. El agua es fundamental para un correcto desarrollo, sin embargo, en Ecuador se descarga el agua residual sin tratada en ríos 51%, 38.7% en quebradas y 5.1% en otras ubicaciones, además se estima que el 80% de las industrias del país no cuentan con un sistema de tratamiento o remediación de sus residuos (Nava & Castillo, 2018).

Debido a las actividades antrópicas como el uso de suelo, la gastronomía, el turismo, la ganadería y agricultura presentes la microcuenca de Yahuarcocha desde la cota alta hasta la laguna hacen que exista alta incidencia por escorrentías en épocas lluviosas, el agua arrastra todo hacia la laguna. Los componentes abióticos y bióticos establecen que la microcuenca no tenga un enfoque

de conservación ambiental, sino un rol principal socio-económico en el manejo de los actores que conforman el cuidado de la microcuenca (GADM San Miguel de Ibarra, 2018).

La contaminación es notoria, en el agua se observan características organolépticas, es decir cambios de coloración y turbidez importantes para definir la calidad del agua (Caracciolo et al., 2015). Además, las cianobacterias presentes en la Laguna de Yahuarcocha son consideradas mundialmente como las especies con mayor incidencia de intoxicación debido a sus características morfológicas, capacidad de reproducción y su relativa toxicidad (Morales & Guevara, 2022).

También es importante el enfoque energético, el Operador Nacional de Electricidad CENACE (2020) menciona que el consumo energético nacional registrado alcanzó en 2020 un total de 25.975GWh, de los cuales el 94.84% pertenece a la demanda de energía de las empresas distribuidoras y el 5.16% a las exportaciones por enlaces internacionales con Colombia y Perú.

Debido a la incorporación de hidroeléctricas y otras fuentes de energías renovables los consumos de combustibles fósiles utilizados en la generación eléctrica fueron analizados en una comparativa desde el año 2011 hasta 2020, donde se evidencia una reducción 161.55 millones de galones de fuel oil (ARCERNNR, 2020). El aprovechamiento de la biomasa es una alternativa para mitigar el cambio climático y degradación hídrica, sin embargo, según la IEA (2019) en Ecuador tan solo se aprovecha el 2% de la biomasa de la cual se obtiene tres fuentes de energía; biogás, biocombustibles y bioelectricidad.

Las celdas de combustible microbianas son dispositivos que implican un avance innovador y tecnológico, aprovecha la bioenergía de los recursos residuales por medio de dos electrodos que captan los protones y electrones disueltos en las cámaras. Su uso surge como una opción aplicable en el proceso del tratamiento de agua contaminada y generación eléctrica, esta investigación experimental propone evaluar la producción eléctrica de las CCMs a partir de los microorganismos presentes en la Laguna de Yahuarcocha, fortaleciendo la investigación académica y dirigiéndose hacia un desarrollo sostenible y tecnológico.

1.3. Pregunta Directriz

¿Existe generación bioeléctrica que pueda mejorar la calidad del agua en una célula de combustible que utiliza los microorganismos presentes en la Laguna de Yahuarcocha?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el rendimiento de células de combustible a partir de microorganismos presentes en la Laguna de Yahuarcocha.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la calidad del agua de la Laguna de Yahuarcocha.
- Evaluar la capacidad de generación bioeléctrica de las células de combustibles en un ambiente controlado.
- Determinar la incidencia del uso de diferentes resistencias en la generación de bioelectricidad.

1.5. Hipótesis

H0. Las células de combustible microbianas que trabajan con los microorganismos de la Laguna de Yahuarcocha no tienen generación bioeléctrica y tampoco mejoraran la calidad del agua.

Capítulo II

Marco Teórico

En este capítulo se presentó la información necesaria para el desarrollo experimental, utilizando referencias de artículos científicos, investigaciones, informes y otros estudios con un enfoque a la evaluación del rendimiento de las células de combustible a partir de microorganismos.

2.1. Revisión de Literatura

2.1.1. *Energía*

La energía es algo inmaterial y fundamental del universo, la cual, se perciba o no, está definida como la capacidad para realizar un trabajo, es una magnitud física capaz de realizar un efecto, su unidad de medida es el joule (J), misma que establece la ley de conservación donde se menciona que la energía no crea ni destruye, solo se transforma (Alomá & Malaver, 2007). Existen diferentes formas de energía como la mecánica, la electricidad, la térmica, química; estas energías son obtenidas de fuentes renovables como el sol, el viento, el agua y la gravedad o de fuentes no renovables siendo las fósiles las más usadas (Medina & Zapata, 2017).

2.1.2. *Energía Eléctrica*

Se describe como la diferencia de potencial existente entre dos puntos, esto permite que haya una corriente cuando se los conecta por medio de un conductor eléctrico, se puede transformar en diferentes formas de energía, tales como la mecánica, térmica o lumínica (Valderrama, 2018). Su unidad de medida es el kilovatio hora (kWh), siendo el producto de la potencia y el tiempo de funcionamiento, las empresas eléctricas utilizan contadores para poder realizar los cobros mensuales a cada vivienda (Wilson et al., 2020).

2.1.3. *Energía Química*

Es energía que está almacenada en los enlaces químicos de las moléculas, se liberan cuando reaccionan uno o varios productos químicos (Medina & Zapata, 2017). Para que ocurra una ruptura o formación de enlaces químicos se dependerá de la diferencia de temperatura inicial - final y de la diferencia del contenido energético del producto con el reactivo como por ejemplo los alimentos, las baterías o combustibles. Además, se puede ser transformada en otras formas de energía como la mecánica, eléctrica o térmica a través de procesos de conversión (Schmidt, 2015).

2.1.4. Energía de Biomasa

También conocida como bioenergía, es la energía que se origina mediante fuentes biológicas de la materia orgánica, la biomasa sólida procedente de las zonas urbanas o agrícolas y no pertenecientes a materia fósil, también se considera el contenido biodegradable disuelto en las aguas servidas municipales e industriales (Srebotnjak & Hardi, 2011).

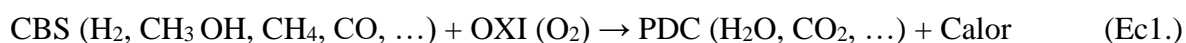
Esta energía se encuentra presente en las plantas que absorben la luz solar, agua y dióxido de carbono (CO₂) para realizar la fotosíntesis, mediante este proceso la planta almacena la energía en enlaces químicos, los cuales son liberados en la combustión, la digestión y descomposición (Sampeiro & Martínez, 2010).

2.1.5. Célula de Combustible

Una célula o celda de combustible se define como un dispositivo electroquímico capaz de convertir de forma directa, la energía química de una reacción a energía eléctrica cuando se proporciona combustible y oxidante, esta característica la diferencia de otro tipo de baterías ya que ambas proporcionan energía, no obstante, las baterías convencionales una vez se terminan los reactivos deben someterse a un reciclaje, mientras que las celdas de combustible son continuas (EG&G Technical Services, 2004).

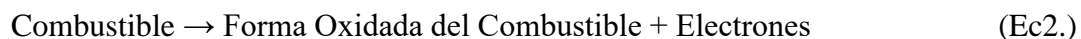
2.1.6. Funcionamiento de la Célula de Combustible

La oxidación de los combustibles (CBS) y la reducción del oxidante (OXI) son las reacciones que suceden dentro de las células de combustible, de las cuales se obtienen diferentes productos de la combustión (PDC) en manera general la reacción se puede representar con la siguiente ecuación (1) (González et al., 2015).

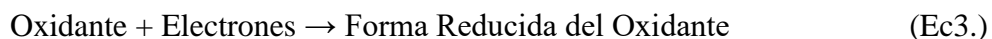


Las células de combustible microbianas funcionan como un reactor bio-electroquímico, independientemente de su arquitectura cuenta con dos electrodos, estos pueden encontrarse en circuito abierto o cerrado: En circuito abierto los electrodos no tienen conexión entre sí, pero están conectados a un sensor de voltaje que mide la cantidad de energía que genera sin tener carga (resistencias); en circuito cerrado los electrodos están conectados entre sí por medio de un cable conductor y una resistencia para así poder obtener otras magnitudes eléctricas (Revelo et al., 2013).

2.1.6.1. Ánodo. Es el electrodo que recibe los electrones que entregan las bacterias en una reacción de oxidación, normalmente en las CCMs se vincula al polo positivo por el tránsito de la corriente eléctrica, pero no siempre es así ya que en las luces led es todo lo contrario, siendo el ánodo el polo negativo (Varela, 2019). El proceso químico que sucede en el ánodo se representa en la siguiente ecuación (Ec2.):



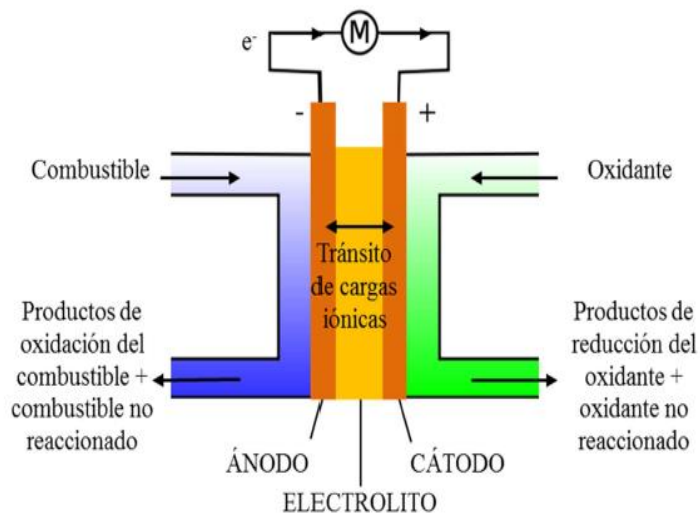
2.1.6.2. Cátodo. En el proceso químico es el electrodo que sufre una reacción de reducción, su estado de oxidación se reduce cuando recibe electrones. Al igual que con el ánodo, fue Faraday quién sugirió el término cátodo que proviene del griego (Varela, 2019). El proceso químico que sucede en el cátodo se representa en la siguiente ecuación (Ec3.):



En las reacciones que generan y consumen electrones existe un flujo de cargas, el movimiento de los electrones se hace a través de un circuito externo donde se encuentra una carga con una determinada demanda de electricidad, representa la estructura básica de una célula de combustible, ver en la Figura 1.

Figura 1

Estructura Básica de una Célula de Combustible



Nota. Reproducida de esquema básico de una célula de combustible, (González et al., 2015).

La capacidad de las células de combustible para transformar la energía libre (ΔG) de las reacciones en electricidad, se pueden relacionar mediante principios termodinámicos descritos en la ecuación 4.

$$\Delta G = -nFE_0 \quad (\text{Ec4.})$$

Donde:

n= número de electrones.

F= constante de Faraday.

E_0 = voltaje de la célula en equilibrio termodinámico.

Según Mikkola (2001) el equilibrio ideal (E_0) es la diferencia que existe entre los potenciales de equilibrio de los dos electrodos cátodo ($E_{c, o}$) y ánodo ($E_{a, o}$) cuando acontecen las reacciones como muestra la ecuación (5). No obstante, el valor real de voltaje de una célula de combustible (E) siempre será inferior al voltaje ideal termodinámico, a esta diferencia de potencial la denominan sobrepotencial (η) se calcula a través de la ecuación (6) (Carrette et al., 2001).

$$E_0 = E_{c, o} - E_{a, o} \quad (\text{Ec5.})$$

$$\eta = E_0 - E \quad (\text{Ec6.})$$

A demás mencionan que tres variables son responsables de los sobrepotenciales:

- Las resistencias eléctricas producen caídas óhmicas y el sobrepotencial óhmico (η_{ohm}).
- La cinética electroquímica genera el sobrepotencial de activación (η_{act}).
- La transferencia de materia causa el sobrepotencial de concentración (η_{con})

2.1.7. Relación de la Intensidad de Corriente y el Sobrepotencial en una CCM

La sumatoria de los sobrepotenciales mencionados anteriormente pueden ser representados por las ecuaciones (Ec7.), (Ec8.) y (9) para el ánodo, cátodo y célula en donde las pérdidas óhmicas existentes se identifican como iR (EG&G Technical Services, 2004).

$$\eta_{\text{ánodo}} = \eta_{\text{act},a} + \eta_{\text{con},a} \quad (\text{Ec7.})$$

$$\eta_{\text{cátodo}} = \eta_{\text{act},c} + \eta_{\text{con},c} \quad (\text{Ec8.})$$

$$E = E_0 - |\eta_{\text{ánodo}}| - |\eta_{\text{cátodo}}| \quad (\text{Ec9.})$$

Según Bard & Faulkner (2001) se distingue tres regiones en las curvas de polarización:

2.1.7.1. Región I. Se identifican las pérdidas por activación (polarización) cuando hay bajas corrientes, se produce una caída brusca del potencial y la densidad de corriente, debido a la velocidad que limita las reacciones electroquímicas (p.145).

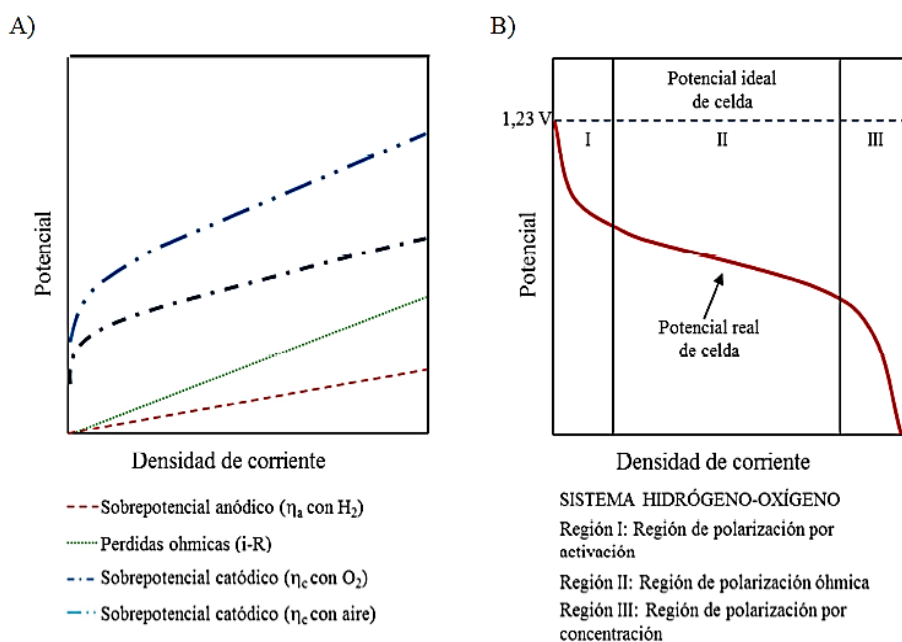
2.1.7.2. Región II. Se encuentran las pérdidas óhmicas (polarización) cuando existen valores intermedios de la densidad de corriente, las pérdidas se deben a las resistencias de los elementos de la célula teniendo un comportamiento dentro de la ley de Ohm (p.145).

2.1.7.3. Región III. Se ubican las pérdidas por concentración (polarización y difusión) donde la falta de reactivos causa una caída brusca del potencial y la densidad de corriente (p.145).

El rendimiento de cada sobrepotencial se muestra en la Figura 2A; la influencia de cada sobrepotencial en la célula se muestra en la Figura 2B donde también se aprecia que existe tres regiones en las curvas de polarización potencial y densidad de corriente (Mikkola, 2001).

Figura 2

Curvas de Polarización Potencial – Densidad de Corriente



Nota. A) Contribución de los sobrepotenciales. B) Influencia de los sobrepotenciales en la potencia de la célula, (González et al., 2015).

2.1.8. Tipos de Células de Combustible

2.1.8.1. CCM Basada en Hidrógeno. Estas células de combustible trabajan con dos cámaras acopladas; una es un sistema microbiológico de producción de bio hidrógeno y otra es una célula que consume el hidrógeno. La fermentación ácido génica es una de las formas más típicas para producir biohidrógeno, debido a que los microorganismos transforman la materia orgánica presente en el agua contaminada en ácidos grasos volátiles y biohidrógeno productos de importante valor añadido, el género *Clostridium* son microorganismos capaces de convertir glucosa en dióxido de carbono, hidrógeno y diferentes ácidos acéticos o butíricos (González et al., 2015).

Independientemente del microorganismo, se debe seguir una ruta metabólica de la cual se obtendrán varios productos finales, este proceso puede verse afectado por factores importantes en el metabolismo de las bacterias, siendo estudiados los que mejoren la producción de hidrógeno (Wang & Wan, 2009). Los ajustes o cambios fisiológicos forman parte del proceso de aclimatación en donde los microorganismos se adaptan a un ambiente determinado proliferando los más fuertes mediante la selección natural, permitiendo mejorar su tiempo de vida y descendencia fértil (Sánchez, 2016).

2.1.8.2. Inóculo. Son microorganismos que llevan a cabo la fermentación acidogénica, los cuales se diferencian en cultivos puros o cultivos mixtos.

Cultivos Puros. En la fermentación de hidrógeno, se utilizan cultivos puros, que se realizan con una sola especie de bacteria. Estos cultivos suelen ser del género *Enterobacter* o *Clostridium* debido a que son las mayores productoras de hidrógeno. No obstante, una de las principales desventajas de los cultivos puros es su susceptibilidad a la contaminación por otras bacterias u hongos, lo que representa un gran obstáculo a nivel industrial debido al elevado costo para mantener el cultivo puro. En este sentido, se han desarrollado técnicas de secuenciación de ADN de próxima generación para la caracterización de comunidades microbianas biogásicas, que pueden proporcionar una alternativa más eficiente y sostenible para la producción de hidrógeno a partir de la fermentación (Wirth et al., 2012, p. 19)

Cultivos Mixtos. De acuerdo con (Chong et al., 2007) los cultivos mixtos son más prácticos debido a su fácil operatividad y control, permiten utilizar una amplia variedad de sustratos sin necesidad de esterilizarlos. Además, según Bouallagui et al. (2005), los cultivos

mixtos pueden ser operados en condiciones extremas que reducen la presencia de bacterias metanogénicas, lo que favorece la producción de hidrógeno, en este sentido, el uso de cultivos mixtos se presenta como una opción práctica en la producción de hidrógeno a partir de microorganismos.

2.1.8.3. Tipo de Sustrato. Es el alimento de los microorganismos, se dividen en cuatro grupos de sustratos utilizados en la fermentación acidogénica en las investigaciones son más utilizados los sustratos puros por no necesitar tratamientos previos (Bartace et al., 2007).

Sustratos Energéticos. Son cultivados y cosechados en diferentes formas para el uso energético como, por ejemplo; amaranto, hierba, remolacha, *Miscanthus* entre otros (p.86).

Sustratos Puros. Son sustratos estándares que tienen certificación y no contienen otros compuestos como; la glucosa, almidón, lactosa, fructosa o celulosa entre otros (p.86).

Residuos Sólidos. Tienen características variables al ser residuos alimenticios (p.87).

Aguas Contaminadas. Es un sustrato que contiene gran cantidad de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales, por ende, gran cantidad de material orgánico el cual puede ser degradado por las bacterias (p.87).

2.1.8.4. Tipo de Reactor. En el proceso de fermentación anaerobia, es fundamental el uso de reactores que permitan el tratamiento de aguas residuales, los reactores pueden ser continuos o discontinuos, en investigaciones a nivel de laboratorio se suelen utilizar los segundos por su facilidad de operación y control (Ortiz et al., 2019).

Reactores discontinuos. Se encuentra el Sequencing Batch Reactor - SBR, que mezcla el agua contaminada con lodo biológico para ser tratada en un medio anaerobio (p.315).

Reactores continuos. Son más utilizados a nivel industrial, pero presentan inconvenientes en cuanto a los tiempos de retención hidráulica TRH. Dentro de los reactores continuos, se pueden mencionar los Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB, que son reactores de flujo ascendente y resultan muy eficientes en el tratamiento de aguas contaminadas(p.315).

2.1.8.5. Iones Metálicos. Son inhibidores de la actividad bacteriana en concentraciones elevadas, sin embargo, en concentraciones bajas son importantes para la producción de biohidrógeno como por ejemplo el ion Fe^{2+} esencial en la enzima hidrogenasa, existen otros iones necesarios como los metales pesados Cu, Ni, Cr, Zn, Cd o Pb (Li & Fang, 2007).

2.1.8.6. Nutrientes. Están constituidos por nitrógeno y fosfato, el nitrógeno es necesario para el desarrollo de las bacterias, un nivel de nitrógeno apropiado beneficia la producción de hidrógeno. Además el fosfato también es un nutriente importante para la producción de hidrógeno, por ende, una relación C/P y C/N es fundamental en la fermentación acidogénica es un proceso en el que los microorganismos descomponen materia orgánica en ácidos orgánicos más simples, ácido acético, el ácido láctico y el ácido butírico (Wang & Wan, 2009).

2.1.8.7. Temperatura. Según Gadhamshetty et al. (2009) mayor producción fue en torno a los 22°C, no obstante, es necesario conocer las curvas de crecimiento en función a la temperatura de cada bacteria, puesto que, a elevadas temperaturas su alimento puede verse afectado por la desnaturalización e inactivación de la proteína perdiendo el cultivo.

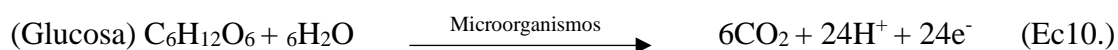
2.1.8.8. Células de Combustible de Membrana Polimérica (PEM). Surgen por las dificultades que se presentaron en el manejo del electrolito alcalino en las células AFC, actualmente se emplean membranas de intercambio iónico con alta conductividad protónica como; los catalizadores de platino en conjunto con láminas de carbón, placas de grafito o metales preciosos que se conectan al circuito externo (Darkrim et al., 2002).

2.1.8.9. Celdas No Basadas en Hidrógeno. Estas celdas transforman la materia orgánica directamente en energía eléctrica, los microorganismos de la cámara anódica son similares a los metanogénicos, estos se encargan de oxidar la materia orgánica, la diferencia es que estos microorganismos son capaces de transferir los electrones libres directamente al ánodo. Además, los protones se intercambian por medio de una membrana o puente salino hasta la cámara catódica, en donde el electrodo cátodo sede los electrones al oxígeno que es un aceptador natural, todo este proceso se realiza a temperatura ambiente (Angenent et al., 2004).

2.1.8.10. Células de Combustible Microbianas CCM – MFC. Microbial Fuel Cell es un instrumento tecnológico que utiliza los microorganismos para transformar la energía química del material orgánico en energía eléctrica. La CCM cuenta con dos electrodos separados por una membrana de características semipermeables que permiten el intercambio de protones; la cámara catódica está separada por una membrana de intercambio protónico MIP de la cámara anódica donde se encuentran las bacterias que oxidan la materia orgánica (Gerteisen et al., 2007).

Esto es posible cuando hay las condiciones idóneas, en donde los microorganismos pueden transferir los electrones generados en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) y no al oxígeno que es un captador de electrones natural (Revelo et al., 2013). El proceso contribuye a degradación del sustrato y puede contribuir a la biorremediación de compuestos como los metales pesados o xenobióticos debido a que las bacterias aceptan electrones desde el otro electrodo (cátodo) (Srebotnjak & Hardi, 2011). Los electrones (e^-) pasan a la cámara catódica por medio de un circuito externo generando una corriente eléctrica y los protones (H^+) pasan a la cámara catódica a través de la membrana PEM (Gerteisen et al, 2007).

El proceso químico que sucede en el ánodo se representa en la siguiente ecuación (10):



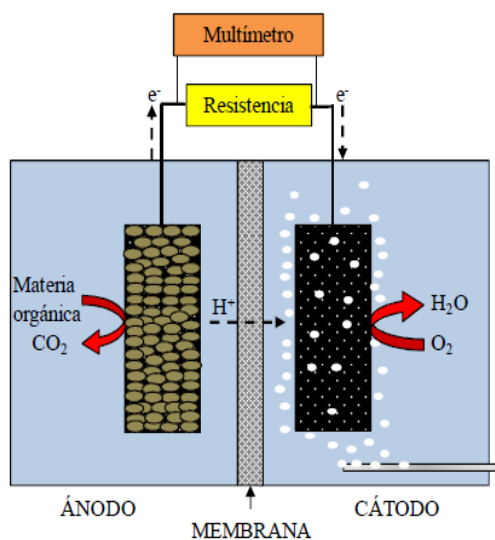
El proceso químico que sucede en el cátodo se representa en la siguiente ecuación (11):



El esquema de una célula de combustible microbiana donde se muestra el funcionamiento de una CCM, las partes involucradas en su funcionamiento, los productos y subproductos resultantes se puede ver en la Figura 3.

Figura 3

Célula de Combustible Microbiana o Microbiológica



Nota. Reproducida de Esquema de una célula de combustible microbiológica, (González, 2015).

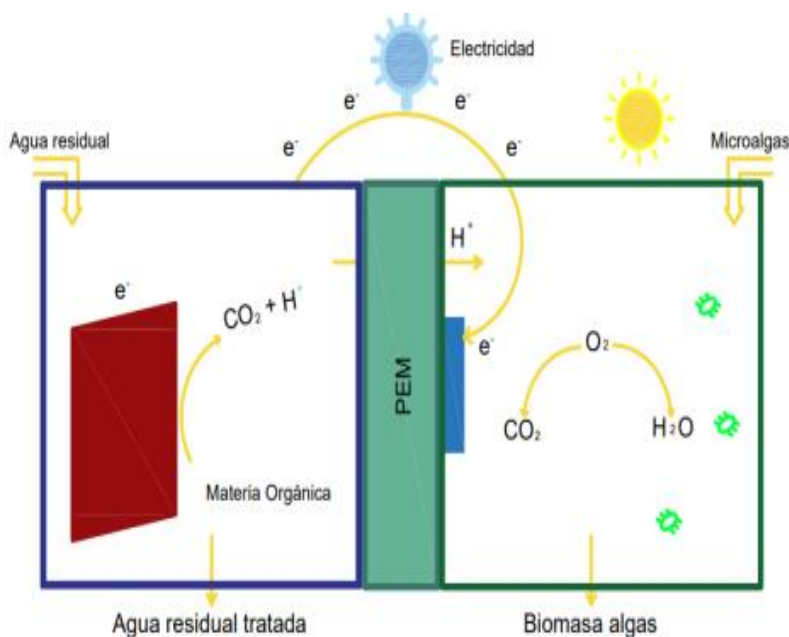
2.1.8.11. CCMs Heterótrofas. Estas células de combustibles generan electricidad por medio del proceso metabólico de respiración microbiana, en su mayoría están compuestas por dos cámaras separadas por una membrana de intercambio de protones donde los microorganismos activos electroquímicamente mejoran las condiciones de generación eléctrica cuando están adheridos a superficies bióticas o abióticas (Seow et al., 2016).

2.1.8.12. CCMs Fotosintéticas. Son conocidas como células bio-solares que funcionan mediante reacciones biocatalíticas, estas CCMs utilizan organismos fotosintéticos como; cianobacterias o algas verde-azules que aprovechan la radiación solar para convertir el dióxido de carbono CO_2 más H_2O en moléculas de oxígeno y carbohidratos necesarios en su respiración (Obileke et al., 2021). Además, liberan electrones con mecanismos de transferencia extracelular hacia el cátodo a través del circuito externo y de forma paralela los protones H^+ atraviesan la membrana de intercambio para unirse al oxígeno formando agua, este proceso permite la generación eléctrica sin necesidad de materia orgánica (Bazdar et al., 2018).

El funcionamiento de una célula de combustible fotosintética para la producción de energía, los sustratos y subproductos que resultan se observa en la Figura 4.

Figura 4

Esquema de una CCM Fotosintética



Nota. Reproducida de Esquema fotosintético MFCs, (Sánchez et al., 2021), adaptado de (Bazdar et al., 2018).

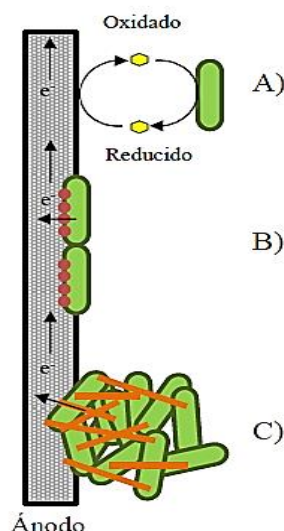
2.1.9. Transferencia de Electrones en una CCM

Los microorganismos seleccionados son un factor importante en el funcionamiento de una CCM para la generación de corriente, se encargan de degradar la materia orgánica en condiciones anaerobias, generando productos resultantes como: los electrones libres que se deben trasladar a la superficie del ánodo H_2O y CO_2 , el proceso que sucede entre microorganismos y material del ánodo para entregar o aceptar los electrones es un tema de estudio (Logan et al., 2008).

Según González et al. (2015) se han presentado varios mecanismos para explicar cómo suceden estas reacciones; la “Transferencia directa con la participación de citocromos, transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el propio organismo y transferencia por medio de nano cables bacterianos o Pili”, se puede ver en la siguiente Figura 5.

Figura 5

Mecanismos de Transferencia de Electrones



Nota. A) Transferencia con ayuda de mediadores externos, B) Transferencia directa con la participación de Citocromos y C) transferencia por medio de nano cables bacterianos o poli Reproducida de Mecanismos de transferencia de electrones, (González et al., 2015).

2.1.9.1. Mecanismos de Transferencia. Los electrones se transfieren directamente al ánodo por medio de los citocromos tipo C o conductores proteicos llamados Pili presentes en las bacterias electrogénicas, también existen bacterias sin la capacidad de transferir electrones de forma directa porque su membrana no es conductiva y requieren de mediadores exógenos o endógenos externos que reducen mediante el proceso de oxidación metabólica de los materiales orgánicos y después se reoxidan para transportar los electrones al ánodo (Revelo et al., 2013).

2.1.10. Materiales de una CCM





La selección adecuada de materiales para los componentes de las celdas de combustible es un desafío importante en la investigación y el desarrollo de tecnologías porque influyen en la eficiencia, costos y generación estructuras escalables, por ello existen criterios sostenibles en la construcción del ánodo, cátodo y membrana de intercambio protónico (Logan, 2010).

2.1.10.1. Ánodo. Los materiales para la construcción del ánodo deben tener características anticorrosivas, ser biocompatibles y estables químicamente con la solución del reactor. Además, deben tener una conductividad y porosidad elevada que permita el flujo fácil de electrones, así como un costo bajo y facilidad de construcción en diferentes dimensiones (Logan, 2008).

El carbón es uno de los materiales más utilizados porque cuenta con una variedad de presentaciones como: papel, malla, espuma, tela o su forma compleja como el carbón vítreo reticulado (RVC), se presenta la información del costo de los materiales, así como del aspecto de cada presentación mencionada en la siguiente Tabla 1 (Logan, 2008).

Tabla 1

Costo de los Materiales Utilizado en el Electrodo Ánodo

Imagen	Forma del Material	Precio Aproximado en Dólares por m ²
	Tela de Carbón	800
	Malla de Carbón	7.5
	Carbón Vítreo Reticulado	300
	Papel Carbón	600

Nota. Los precios pueden variar dependiendo de la ubicación y proveedor.








En los últimos años han investigado nuevos materiales a base polímeros como el fluoruro de polinilideno PDVF y acetato de polivinilo PVA que, en conjunto con otros materiales conductores como los nanotubos de carbono, carbón activado, óxido de grafeno y grafeno se han logrado características físicas, químicas y electrónicas sobresalientes (Briones et al., 2020).

El grafito es un material útil en la construcción del electrodo ánodo, por el bajo costo, buena conductividad y su área superficial definida. Además de variedad en las formas como: fieltro, espuma, lámina, papel, varilla o barras. Sin embargo, su baja porosidad interna impide tener una buena adherencia bacteriana, por lo tanto, se han desarrollado nuevas formas comerciales de grafito en fibras, cepillos y gránulos con elevadas tasas de porosidad, conductividad y área superficial. (Logan, 2008).

Las formas comerciales del grafito para el uso en electrodos se observan en la Tabla 2.

Tabla 2

Formas Comerciales del Grafito

Imagen	Forma del Grafito
	Varilla o Barra
	Lámina de grafito
	Plato de grafito
	Hoja de grafito
	Gránulos de grafito
	Cepillo de grafito
	Fibras de grafito

Nota. Todas las formas tienen diferentes tamaños que se adaptan a los requerimientos del estudio.

2.1.10.2. Cátodo. Es un elemento influente y limitante en una CCM por ser el electrodo que lleva a cabo las reacciones electroquímicas en diferentes estados físicos (líquida, sólida y gaseosa), por ende, los materiales de construcción deben ser seleccionados con criterio, los cuales pueden ser los mismo del ánodo, no obstante, al ser utilizados en el cátodo es necesario un catalizador que incremente la velocidad de reducción del oxígeno. El platino es un catalizador de elevado costo, por lo que se recomienda que el material posea $0.1\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ de platino en una de sus caras (Logan, 2008).

2.1.10.3. Membrana. Las CCMs en su mayoría utilizan la membrana para separar la cámara anódica de la catódica, sin embargo, no son imprescindibles ya que los protones se transportan a través de la fase líquida, las membranas influyen en las CCMs en diferentes aspectos económicos como funcionales pues permiten condiciones anaeróbicas en la cámara anódica, no obstante, afecta a la cinética del sistema lo que provoca una reducción de rendimiento al aumentar su resistencia interna (Logan et al., 2010).

Las membranas más utilizadas son las de Nafion 117 o 115 y Ultrex CMI-7000 pero al tener elevado costo se pueden utilizar otro tipo de material conductor iónico que sea inerte y no sea biodegradable, todas las membranas deben tener la característica de permitir la transferencia de protones entre las dos cámaras (Cheng et al., 2006).

2.1.11. Arquitectura de una CCM

Existen diferentes arquitecturas o diseños de células de combustibles microbianas, estas se clasifican tomando en cuenta criterios, modos de operación como numero de cámara; única o sencilla, de dos cámaras, multicámara y tubular usadas en varias situaciones.

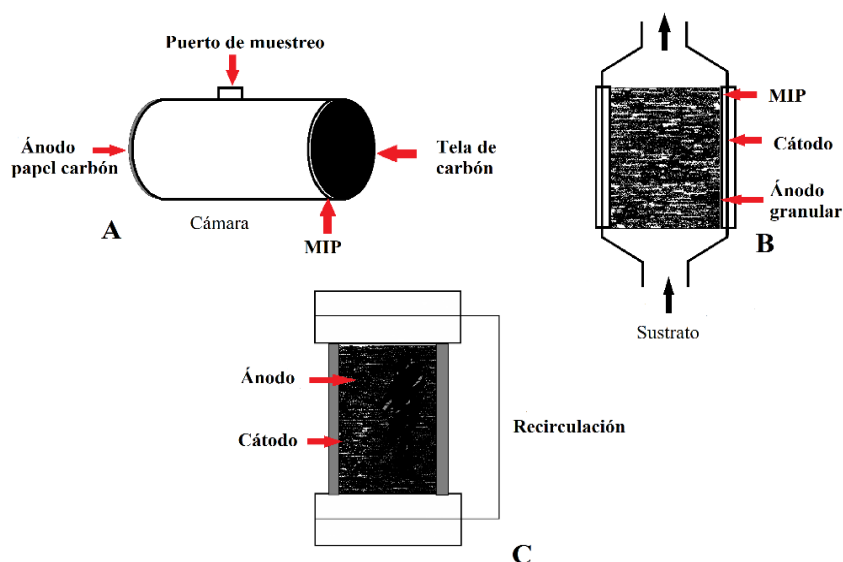
2.1.11.1. CCM de Cámara Única o Sencilla. Estas células tienen una arquitectura simple, económica y eficiente, se configurada por un solo compartimiento que sitúa a los dos electrodos, el cátodo está expuesto directamente al ambiente, por lo que no existe una cámara catódica, no requiere aireación forzada mediante bombas, estos electrodos están separados por medio de una membrana de intercambio de protones, la cual debe unirse al cátodo para funcionar como una electro membrana; las principales dificultades en esta arquitectura es la contaminación microbiana del cátodo y la difusión de oxígeno existente entre los electrodos (Logan & Oh, 2006).

Liu et al. (2004) diseñaron una CCM de cámara sencilla con los electrodos en los extremos de un cilindro de plexiglás, utilizaron un ánodo de papel carbón sin presencia de catalizador, para el cátodo experimentaron con dos materiales: tela de carbón flexible junto con una membrana de intercambio de protones de Nafion, en la conexión del circuito externo utilizaron platino. El estudio de Aelterman et al. (2006) utilizó una arquitectura cilíndrica de cámara única y seleccionó gránulos de grafito para el ánodo, el cátodo lo hicieron con una barra de grafito y una membrana de intercambio catódica. Los electrones fluían hacia el cátodo a través de un circuito externo, mostrando así una corriente eléctrica, los resultados mostraron que la celda de cámara única tenía una eficiencia de transferencia de electrones del 80%. Además, la celda de combustible mantuvo un alto rendimiento durante un período prolongado de tiempo, lo que sugiere una buena durabilidad.

De igual manera, Zhang et al. (2008) construyeron una CCM con un plexiglás cilíndrico, el ánodo era de gránulos de grafito, para el cátodo utilizaron tela de carbón flexible y para la conexión del circuito externos utilizaron alambre de cobre. Los diferentes modelos de las células de combustible microbianas con cámara sencilla de autores referentes en la investigación de CCM que han podido crear diseños prácticos y aplicables, ver en la Figura 6.

Figura 6

Células de Combustible Microbianas de Cámara Sencilla



Nota. El diseño A pertenece a la investigación de (Liu et al., 2004), el diseño (B) pertenece a la investigación de (Aelterman et al. 2006) y el diseño (C) pertenece a la investigación de (Zhang et al., 2008). Fuente: (You et al., 2008).

2.1.11.2. CCM de Dos Cámaras. Una CCM típica consta de dos cámaras anódica y catódica que están separadas por medio de una membrana de intercambio de protones o un puente salino que permite el paso de los H⁺ desde la cámara anódica hasta la cámara catódica (Du et al., 2007). Los microorganismos están en la cámara anódica ya que el oxígeno impide la generación eléctrica, los dos electrodos están conectados en circuito abierto o cerrado (Revelo et al., 2013).

2.1.11.3. CCM Multicámara. Al conectar varias cámaras se considera multicámara, su conexión puede ser en serie o paralelo siendo la conexión en paralelo es la más eficiente al haber mayor velocidad de reacción, es idóneo para utilizar de forma industrial (Logan & Oh, 2006).

2.1.11.4. CCM Tubular. Según Torres et al. (2017), "el diseño de la CCM tubular se considera uno de los más eficientes para su uso a escala comercial, ya que permite un flujo continuo y uniforme, lo que resulta en una reducción de los costos de operación y un aumento del tiempo de retención hidráulica, además de tener una mayor densidad de potencia" (p. 24).

2.1.12. Aplicaciones de las CCMs

Las células de combustible microbianas tienen varias aplicaciones para mitigar problemas ambientales o energéticos, se menciona las formas más usuales de aprovechar a las CCMs (Farias, 2016)

Tratamiento de Aguas Residuales. Las aguas residuales provenientes de la industria, agricultura y urbe contienen grandes cantidades de materia orgánica, por lo que son ideales para este tipo de tratamiento electroquímico, las CCMs producen energía y a la vez limpian el agua generando ahorros energéticos y controlan la disposición de lodos (p.28).

Biosensores. Se puede aplicar para detectar compuestos tóxicos o químicos como glucosa y acetato debido a que las bacterias tienen baja actividad metabólica cuando son inhibidas por dichos compuestos, todo esto contribuye a entender o modelar respuestas de los ecosistemas obteniendo estímulos del medio ambiente (p.29).

Biorremediación. El tratamiento de contaminantes como hidrocarburos, selenito o fenol se puede realizar usando células de combustible microbianas, al modificar las células de combustibles microbianas convencionales se permite llevar a cabo reacciones de remoción sin la haya producción eléctrica, la degradación de contaminantes orgánicos sucede en el ánodo y la reducción de productos químicos inorgánicos en el cátodo (p.30).

Generación Eléctrica. Las CCMs surgen como una alternativa energética capaz de trabajar en rangos de temperatura entre 10°C y 60°C con eficiencias de conversión superior al 70%, utilizan de combustible cualquier material biodegradable, al ser tecnología innovadora su potencia sigue siendo bajo para ser una alternativa del petróleo (p.31)

2.1.13. Desempeño Electroquímico

Para evaluar el desempeño de una CCM se efectúan mediciones de los parámetros necesarios: Voltaje de circuito abierto (V_{oc}), intensidad de corriente (A), potencia (W), densidad de potencia DP (Wm^{-2}), resistencia interna iR (Ω) son parámetros que se obtienen a partir de curvas de polarización y potencia (González et al., 2015).

2.1.13.1. Voltaje de Circuito Abierto. La tensión de circuito abierto es la máxima fuerza electromotriz (f_{em}) que genera la CCM, es decir cuando no se conecta ninguna carga externa, el V_{oc} depende de factores, como naturaleza del sustrato, densidad de los electrones disponibles en el sustrato, actividad microbiana y distancia entre los electrodos (Santoro et al., 2017)

2.1.13.2. Intensidad de Corriente Eléctrica. La intensidad de corriente eléctrica se refiere al flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo a través de un material conductor, existe cuando hay diferencia de potencial, se mide en amperios (A) y se representa por la letra "I". Además, la intensidad de corriente se calcula dividiendo la cantidad de carga que fluye a través de un conductor por el tiempo que tarda en pasar (Purcell, 2005).

2.1.13.3. Resistencia Interna. La RI es un parámetro muy importante en la caracterización de un generador de corriente, se puede obtener al medir el voltaje en la resistencia externa, al analizar las curvas de polarización o también por la técnica de espectroscopia de impedancias que al aplicar una señal de voltaje en la célula y la medición de la corriente de esta (Revelo, 2013).

Autores como Oh et al. (2004) mencionan en su investigación con celdas de combustible microbianas una resistencia interna de 960Ω , de igual manera Fan et al. (2008) obtuvieron una resistencia interna de 235Ω , mientras que Borole et al. (2009) una resistencia de 27Ω todas las investigaciones trabajaron con distintos materiales y diseño de CCM. Además, la resistencia interna de una celda de combustible microbiana es una medida importante de su eficiencia energética y se utiliza para evaluar su rendimiento.

2.1.13.4. Potencia. Es la cantidad de energía que entrega o genera la CCM en un tiempo determinado. Se calcula mediante la ecuación (12).

$$P = V * I \quad (\text{Ec12.})$$

Donde:

P=Potencia en Watts (w)

V=Voltaje en Voltios (V)

I=Intensidad de corriente eléctrica en Amperios (A)

2.1.13.5. Densidad de Potencia DP. Es la cantidad de corriente por la unidad de área que se transporta por un conductor, además es una magnitud vectorial, ver en la ecuación (13).

$$DP \left(\frac{mW}{m^2} \right) = \frac{\text{Potencia (mW)}}{\text{Area de contacto del electrodo (m}^2\text{)}} \quad (\text{Ec13.})$$

Donde:

P: Potencia V*I en (mW)

A: Área de la superficie del electrodo anódico en (m²)

Por otro lado, es importante tener en cuenta los trabajos publicados en los cuales se utilizaron células de combustible microbianas para la generación de energías y reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, ver en la Tabla 3.

Trabajos Publicados de Células de Combustibles Microbianas

Tipo de CCM	Inoculo	Sustrato	Membrana	Operación (°C)	Material electrodo	Voc (mV)	DP mW/m ²	Ef. coulombica (%)	Reducción DQO (%)	Referencia
Doble cámara	Shewanella oneidensis MR-1	Luria-Bertani (LB)	Nafion 115 de 15.9 cm ²	80-90 (°C) Horas de operación: 1	Grafito	492	144	5.7	65	(Baniasadi & Vahabzadeh, 2021)
Doble cámara	Cianobacterias del lago Taihu (600 mL)	Solución nutritiva modificada (200 mL)	Sin membrana (separado por sedimentos)	90 (°C) Horas de operación: 22-30	Filtro de carbono	427	72	-	76.2	(Zhao et al., 2012)
Una cámara	Vegetal E. crassipes	Maleza con fertilizante líquido	Sin membrana	37 (°C) 72 h de operación	Grafito	760	0.34	-	-	(Bustos & Rojas, 2019)
Doble cámara	Lodos anaerobios misófilos	Amonio (NH ₄) 60-100 mg	Nafion 211 de 150 cm ²	30 días	Filtro de grafito	530-560	3.25	-	-	(Zhu et al., 2016)
Una Cámara	Aguas residuales	Aguas residuales	Sin membrana	Temperatura Ambiental 30 días	Grafito	-	1.85	-	59	(Collazos & Montaña, 2016)
Una Cámara	Algas verdeazuladas	Algas verdeazuladas	Sin membrana	105 (°C) 2 h de operación	Filtro de carbono	580	144	-	78.9	(Yuan et al., 2011)
Doble cámara	Aguas residuales domésticas reales	Mezcla acuosa de agar 2%	Sin membrana	Temperatura Ambiental 5 días de operación	Barras de carbón de pilas comerciales	-	40	-	80	(Rea et al., 2021)
Una cámara	Algas verdes	Oxígeno y fotosíntesis	PEM (Membrana intercambio de protones)	25-30 (°C) Horas de operación: 60 días	-	9	149.5	-	-	(Yadav et al., 2015)
Doble cámara	Synechococcus sp y lixiviados de residuos sólidos urbanos	Microflora anaeróbica	PEM	30 (°C) Horas de operación: 24 h	Grafito sin recubrimiento	102	95.63	-	50	(Lakshmidivi et al., 2020)

2.1.14. Calidad del Agua

La calidad del agua es el término que se utiliza para describir características químicas, biológicas y físicas del agua, las cuales permiten entender la calidad desde un punto de vista funcional, como la capacidad intrínseca que tiene el agua para ser ocupada en alguna actividad o de igual manera, desde un punto de vista ambiental definiéndose como las condiciones que deben estar presentes en el agua para que se mantenga un ecosistema equilibrado y pueda cumplir unos determinados objetivos de calidad ecológica como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que la definen (Ministerio del Medio Ambiente, 2000).

2.1.14.1. Calidad del Agua de la Laguna de Yahuarcocha. El lago pertenece a una microcuenca hidrográfica, que tiene un gran valor histórico, turístico y ecológico siendo importante para el desarrollo de los imbabureños, es por ello, que la laguna se ve afectada por actividades antrópicas de su alrededor, asimismo por la calidad del agua que se aporta desde las diversas fuentes como: El Canal el Quince del río Tahuando y las quebradas Polo Golo, Manzano Huayco que abastecen conjuntamente de forma natural a la laguna con un caudal promedio de 79.53l/s, de igual manera se tiene un caudal proveniente de vertidos ilegales que descargan aproximadamente 5.04l/s, existiendo un caudal total que ingresa a la laguna de Yahuarcocha de 84.57l/s (GADM San Miguel de Ibarra, 2018).

La incorporación de sustancias y ambientes extraños a su estado natural bien sea; en cantidad o en calidad, provoca modificaciones de sus características químicas, físicas y microbiológicas que afectan a la laguna de forma salubre, económica, ecológica, social y estética (GADM San Miguel de Ibarra, 2018).

2.1.14.2. Aguas Residuales. Las aguas residuales domésticas e industriales están contaminadas con microorganismos como: gérmenes, sólidos, detergentes, patógenos, nitrógeno, fósforo y materia orgánica biodegradable como lípidos, proteínas, carbohidratos y otros compuestos (Revelo et al., 2013).

Se conoce sus características mediante una valoración de la cantidad de oxígeno necesario para realizar el proceso de oxidación de la materia orgánica, teniendo en cuenta las siguientes variables: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y la cantidad total de carbono (Métadier & Bertrand, 2011).

2.1.15. Demanda Química de Oxígeno DQO

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno necesario para que sustancias susceptibles sean oxidadas por medios químicos y convertirlo en CO_2 y H_2O , estas sustancias están presentes en el agua de forma disuelta o en suspensión, la DQO también se utiliza para conocer el grado de contaminación, cuanto mayor sea su valor, más contaminada está el agua y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/L) (Hayakawa et al, 2006). La energía teórica contenida en 1kg de DQO, es de 1kWh, pero en una célula de combustible microbiana teóricamente es de aproximadamente 4kWh (López, 2014).

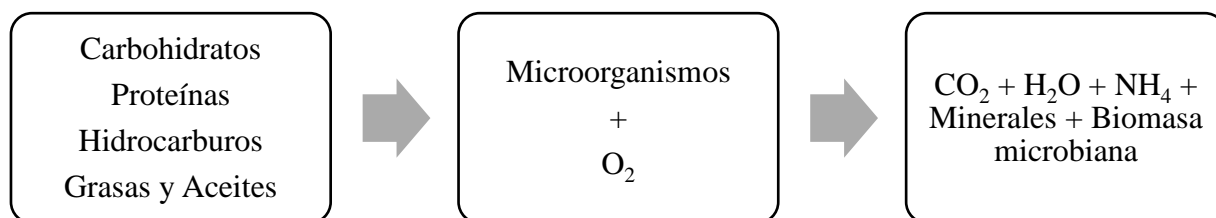
2.1.16. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅

Es importante en el análisis del agua, el parámetro DBO₅ indica la presencia y biodegradabilidad de los materiales orgánicos presentes en la muestra. Al estimar la cantidad de oxígeno que se precisa para estabilizar el carbono orgánico, se conoce la velocidad de las bacterias para metabolizar los materiales (Metcalf & Eddy, 1995).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno al ser un proceso biológico requiere ciertos cuidados y atención en la técnica analítica, el tratamiento de las muestras y manejo (Metcalf & Eddy, 1995). La DBO₅ también se define como la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C para metabolizar compuestos orgánicos degradables biológicamente (Cisterna & Peña, 2018), ver en la Figura 7.

Figura 7

Descomposición de la Materia Orgánica a partir de Microorganismos



Nota. La materia orgánica es metabolizada por los microorganismos demandando oxígeno para el proceso. Fuente de (Cisterna et al., 2018).

Para obtener un resultado estable y reproducible, el oxígeno consumido será cuantificado en un periodo de cinco días, durante los primeros dos días estos microorganismos metabolizan los compuestos orgánicos disponibles y fáciles de degradar biológicamente, las condiciones medioambientales apropiadas para un ensayo deben ser: pH neutro, presencia de un inóculo aclimatado, presencia de una cantidad adecuada de nutrientes minerales necesarios para el crecimiento microbiano siendo los más importantes: N, P, Ca, Mg, Fe, S y finalmente una la incubación en la oscuridad (Cisterna & Peña, 2018).

Se ha verificado que gran parte de los microorganismos metabolizan aeróbicamente los sustratos orgánicos como: lípidos, azúcares, alcoholes o proteínas alcanzando un máximo rendimiento de producción celular a partir de 0.4g de células en peso seco por gramo de DQO eliminada, esto involucra a que, cuando los microorganismos metabolizan aeróbicamente 1g de DQO inmovilizan un 13% de la materia orgánica en forma de biomasa y consumen oxígeno para oxidar el 87% restante (Sikes, 1975).

Por otro lado, la respiración endógena constante para cultivos microbianos promedio es de 10g de oxígeno consumido aproximadamente, por gramo de biomasa peso seco por día, en una incubación prolongada, las células se mineralizan completamente y la DBO₅ infinita se acerca al valor inicial del DQO (Cisterna & Peña, 2018).

2.1.17. Microorganismos

Los microorganismos también conocidos como microbios o incluso gérmenes son organismos microscópicos imposibles de observarse a simple vista, los podemos encontrar en todas partes como: bacterias, hongos, virus o parásitos debido a que fueron las primeras y únicas formas de vida hace aproximadamente 4000 millones de años, sin estos microorganismos la vida no sería posible ya que, gracias ellos se generó parte de la atmósfera en la Tierra (Sanchez et al. 2017).

Los microorganismos son clasificados en tres diferentes dominios generales: Bacterias o Eubacterias, Arqueas (Archaea o arqueobacteria) y Eucariontes (*Eucarya*), también se consideran microorganismos a los virus, viroides y priones que son clasificados según sus variaciones en forma y tamaño celular, su morfología, su tipo de división celular o reproducción, su capacidad metabólica y adaptación (O'Callaghan & Wright, 2023).

Según Sánchez et al. (2017) a la fecha se reportan alrededor de 70000 especies de hongos, 45000 especies de bacterias, 38000 especies de protozoarios y 1×10^{32} especies de virus, se pronostica que existen hasta dos millones hongos y de tres a diez millones de bacterias sin identificar, los virus son el grupo más cuantioso que no se pueden identificar completamente, sobre todo los provenientes de los océanos debido a gran adaptabilidad y cambio constante.

2.1.17.1. Bacterias. Las bacterias son organismos unicelulares que corresponden a la familia procariontes por lo que no poseen un núcleo celular y orgánulos como: Las mitocondrias, los cloroplastos o el aparato de Golgi, estos microorganismos tienen una pared que protege a la célula del ambiente externo, donde se encuentra su ADN libre por el citoplasma, además, presentan diferentes formas como: Filamentos, cocos, vibrios, bacilos y espirilos con un tamaño entre 0.5 a 5μ de longitud (Sánchez et al., 2017).

2.1.17.2. Microorganismos electrogénicos. La experimentación con las CCMs ha permitido el hallazgo de microorganismos electrogénicos capaces de transferir electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales (Loyley, 2006). *Escherichia Coli* es una de las bacterias que, en ciertas condiciones de temperatura, material del electrodo, mediador y pH son capaces de realizar un proceso de biodegradación y generación de energía eléctrica, otras bacterias como las *Geobacter* son versátiles ya que transfieren electrones fuera de la célula conocido como Flujo Exocelular (Nuñez, 2008).

2.1.17.3. Cianobacterias. Las cianobacterias son microorganismos fotosintéticos que se encuentran en una amplia variedad de ambientes acuáticos y terrestres en todo el mundo, estos son capaces de producir energía a través de la fotosíntesis, utilizando la luz solar para convertir el dióxido de carbono y el agua en carbohidratos y oxígeno, habilidad que despertado un gran interés en el campo de la energía renovable (Hannon & Gimpel, 2017).

Las cianobacterias poseen características tanto de algas como de bacterias, que en condiciones favorables aguas con altos contenidos de nutrientes o residuos químicos ocurre un fenómeno denominado “floreamiento o bloom algal”, durante el cual se advierte la formación de espuma y alcanza una densidad celular elevada que producen una gran cantidad de efectos adversos sobre el recurso hídrico y los ecosistemas acuáticos (Calleja et al., 2019).

Además de su capacidad para producir oxígeno y fijar el carbono atmosférico, las cianobacterias también se han investigado como fuente potencial de biocombustibles y productos químicos, los biocombustibles como el etanol y el hidrógeno tienen el potencial de ser una alternativa más sostenible y económica a los combustibles fósiles. Las cianobacterias también se han utilizado para producir productos químicos valiosos, como los bioplásticos y los polímeros, que pueden reemplazar a los plásticos derivados del petróleo (Hannon & Gimpel, 2017).

2.2. Marco Legal

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador garantiza el derecho a vivir en un ambiente sano, enfatizando el reconocimiento de los derechos de la naturaleza, sede la competencia a los Gobiernos Autónomos Municipales para que a través de las Ordenanzas realicen el manejo de las aguas residuales (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

En los artículos que están dentro de la Constitución Ecuatoriana del 2008, los cuales citan lo siguiente:

Art. 15.- “El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.”(p.15).

Art. 413.- “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.”(p.124).

2.2.2. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2015-2030

Objetivo 7. - Energía asequible y no contaminante indica lo siguiente:

Meta 7.2. - “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas” (ONU, 2015);

Objetivo 13.- Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (ONU, 2015).

2.2.3. Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025

El Eje transición ecológica menciona en el Objetivo 11 “Conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales”, Objetivo 12 “Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático y Objetivo 13 “Promover la gestión integral de los recursos hídricos” (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

2.2.4. Código Orgánico Ambiental (COA)

Art. 5. - Derecho de la población a vivir en un ambiente sano. El derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado comprende: 8. – “El desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías alternativas no contaminantes, renovables, diversificadas y de bajo impacto ambiental”(p.12).

Art. 248.- Fines. Los fines del Estado en materia de cambio climático serán: “Desarrollar programas de educación, investigación, innovación, desarrollo, desagregación y transferencia de tecnología sobre el cambio climático”; y en inciso 9. “Fomentar el uso y garantizar el acceso de energías renovables”(p.65-65).

Art. 261.- De las medidas mínimas. La Autoridad Ambiental Nacional, como ente rector, coordinará con las entidades intersectoriales priorizadas para el efecto y en base a las capacidades locales, lo siguiente: en el inciso 9. “La promoción y el fomento de programas de eficiencia energética, dentro de toda la cadena, así como el establecimiento de incentivos económicos y no económicos de energías renovables convencionales y no convencionales”(p.68).

Capítulo III

Metodología

La metodología de la investigación está direccionada a la descripción del área de estudio, materiales utilizados y al cumplimiento de los tres objetivos específicos.

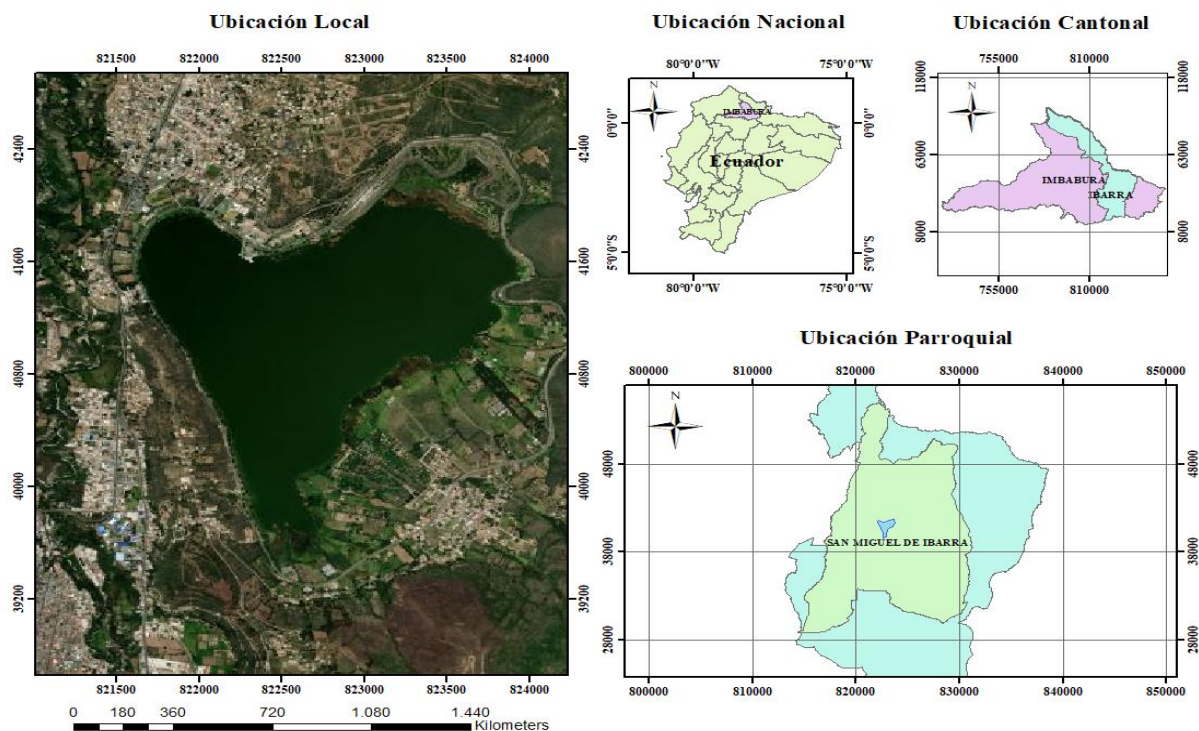
2.3. Área de Estudio

El estudio se realizó en la Laguna de Yahuarcocha ubicada en la provincia de Imbabura cantón Ibarra zona norte de los Andes del Ecuador, con límites provinciales como Pichincha por el sur, Esmeraldas por el oeste, Sucumbíos y Carchi por el norte (Pabón et al., 2012). Yahuarcocha se encuentra a una altitud media de 2403 m.s.n.m, las coordenadas son: latitud norte $0^{\circ}21'6.2''$ y longitud oeste $-78^{\circ}7'20.4''$, su temperatura oscila desde los 5 a 25°C ; como se indica en la Figura 8 (Yamazaki et al., 2020).

La Laguna de Yahuarcocha es de origen glaciar y tipología endorreica, el agua que ingresa en el lago y no evacua en cantidades significativas por desagüe superficial o infiltración, sino evacua por la evaporización del agua en su superficie (Cañón y Valdés, 2011).

Figura 8

Mapa de Ubicación de la Laguna de Yahuarcocha



2.4. Tablas de Materiales

Especificación de los materiales y equipos que fueron utilizados en trabajo de campo, laboratorios y oficina para cumplir con los objetivos en la Tabla 4.

Tabla 4

Materiales y Equipos Útiles en la Investigación

Campo	Laboratorio	Oficina
Cooler plástico	Crisesoles 30mL	Computadora Lenovo
Guantes	Matraz erlenmeyer 250 y 500mL	Libreta de apuntes
Mascarilla	Papel aluminio	Esfero
Botas de caucho	Mechero de bunsen	Marcador permanente
Botellas ámbar de 1500mL	Probetas de 2 y 5mL	Calculadora Casio
Cámara fotográfica	Pera	Microsoft Excel
	Balón volumétrico 100mL	Software UNI-T
	Frascos ámbar	Programa LabVIEW
	Agitadores magnéticos	Software Statgraphics Centurion
	Mascarilla	
	Tubo fusible	
	Puntas para micropipeta de 1000uL	
	Algodón	
Equipos	Reactivos	Insumo de Análisis
Termo reactor	Ácido nítrico 65%	Muestras de agua de Yahuarcocha
Estufa	Cloruro de potasio	Cianobacterias
Sensor Velp Científic	Hidróxido de potasio	
Balanza digital	Agua destilada	
Autoclave	Dicromato	
Microscopio Leica MB750	Medio de cultivo BG-11	
Multímetro KEITHLEY 2410C		
Multímetro UNI-T UT61E+		
Bañera de Ultrasonido		
Sonicador		
Bomba de aire de peceras		
Centrifugadora de laboratorio		

2.5. Métodos

La metodología para el desarrollo de la investigación y el cumplimiento de los objetivos.

2.5.1. *Análisis de la Calidad del Agua de la Laguna de Yahuarcocha*

El análisis físico-químico del agua de la Laguna de Yahuarcocha se realizó de diferentes parámetros como: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Potencial de Hidrogeno (pH) previo al estudio se estableció la metodología del muestreo y conservación de muestras descritas en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169:2013.

Se tuvo en cuenta que el agua contaminada o superficial se adaptan a cambios en diferentes grados como resultado a reacciones físicas, químicas o biológicas que ocurren desde el momento del muestreo o al principio del análisis de tal modo que si no existen precauciones antes, durante y después del transporte, así como también en el tiempo de conservación de las muestras en el laboratorio previo al análisis, los resultados y concentraciones establecidas serán distintas a las existentes en el momento de la recolección (INEN, 2013).

2.5.1.1. Recipiente. Según la normativa INEN se debe utilizar recipientes de vidrio evitando que la tapa sea coloreada para reducir los metales pesados y componentes inorgánicos que pueden aumentar el contenido de silicio o compuestos orgánicos (p.3).

La preparación de los recipientes fue necesario enjuagar los contenedores tres veces para minimizar la contaminación de la muestra en los análisis químicos: el tipo de agente de limpieza utilizado y el material del contenedor dependen de los componentes a analizar (p.4).

2.5.1.2. Muestreo. El proceso de muestreo de los parámetros físico-químicos se llevó a cabo en cuatro puntos específicos, los cuales se identificaron mediante la nomenclatura pHT1, pHT2, pHT3 y P1, se georreferenciaron para tener un mayor control en la toma de muestras. Es importante considerar que el agua puede estratificarse térmicamente, lo que puede generar diferencias significativas en la masa del agua. Por esta razón, se tomó en cuenta esta variable al momento de georreferenciar los puntos de muestreo, tal como lo indica el INEN (2000).

En el caso del punto P1, el cual se encuentra en una propiedad privada, fue necesario tomar muestras desde un bote para asegurar la fidelidad de los resultados del muestreo.

Este proceso garantiza la calidad y precisión de los datos obtenidos durante el muestreo y asegura la validez de los resultados en futuros análisis, los puntos georreferenciados se pueden encontrar detallados en la Tabla 5.

Tabla 5

Puntos Georreferenciados de Muestreo

Ubicación	Punto	Coordenadas en X	Coordenadas en Y	Msnm
Descarga de la PTAR	P1	0823051	10040736	2234
Estrada Vehicular a Laguna	pHT1	0821648	10041670	2225
Muelle de Yahuarcocha	pHT2	0822346	10041619	2232
Vuelta de la Paloma	pHT3	0827663	10041364	2230

Nota. Coordenadas UTM Zona 17; P1, Planta de Tratamiento (PTAR) se analizaron los parámetros DQO, DBQ; En pHT1, pHT2 y pHT3 los parámetros analizados son pH y Temperatura.

El Mapa de los puntos anteriores dentro de la Laguna se ubican en la Figura 9.

Figura 9

Puntos Georreferenciados de Muestreo



A partir de ello, se aplicó la normativa 2169:2013 Agua, Calidad del Agua, Muestreo, Manejo y Conservación de Muestras (INEN, 2013).

2.5.1.3. Llenado del Recipiente. Las muestras se llenaron y sellaron con Parafilm para que no ingrese aire, esto limitó la interacción de la fase gaseosa y la agitación durante el transporte evitando cambios en el contenido de dióxido de carbono o cambios del pH (p.5).

2.5.1.4. Refrigeración de las Muestras. Las muestras se enfriaron a 5°C inmediatamente después del muestreo, se utilizó un bloque de hielo en un cooler para mantener la temperatura y proteger de la luz preservando las muestras durante el transporte al laboratorio como menciona la normativa, durante el transporte las muestras estuvieron protegidas y selladas para evitar daños, pérdida de líquido y posibles contaminaciones externos especialmente cerca de la boca de la botella, sin exceder el tiempo de retención recomendado no fue excedido previo al análisis (p.5).

2.5.1.5. Rotulado. Los recipientes se rotularon de forma clara y permanente con las nomenclaturas P1, pHT1, pHT2, pHT3 además, se registró todos los detalles que permitieron la interpretación precisa de los resultados en el laboratorio como: la fecha y hora del muestreo, nombre del muestreador, naturaleza y observaciones (p.7).

2.5.1.6. Recepción de Muestras en el Laboratorio. Se estableció la cadena de custodia hasta el laboratorio, el análisis no se pudo realizar de forma inmediata, las muestras se almacenaron previniendo cambios en su contenido por contaminantes externos. Para ello se utilizó un refrigerador o un lugar frío y oscuro, antes del análisis fue necesario comparar la cantidad de la muestra con el registro de volumen rotulado en la botella (p.7).

Los parámetros analizados en la Laguna de Yahuarcocha, tipo de recipientes, técnicas de conservación, vida útil y métodos de ensayo se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros para Analizar Aguas Contaminadas

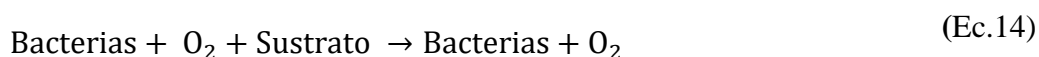
Parámetro	Tipo de Recipiente	Volumen típico [mL]	Técnica de Preservación	TMR	Método de Ensayo
DBO ₅	V	1000	Se enfría a 1 y 5°C	24h	APHA 5210 B
DQO	P o V	1000	Acidificar a pH 1 a 2 con H ₂ SO ₄	1 mes	APHA 5220 D
pH	P o V	1000	Se enfría a entre 1 y 5°C.	6h	973

Nota. V, vidrio; P, plástico; TMR, tiempo máximo recomendado.

Se deben llenar los recipientes completamente para excluir el aire, los parámetros DBO₅ y DQO deben mantener las muestras almacenadas en la oscuridad y para analizar el pH se debe realizar inmediatamente en el lugar del muestreo.

2.5.1.7. Análisis de DBO₅. En el análisis se determinó el requisito relativo de oxígeno del agua de Yahuarcocha la salida de la planta de tratamiento para medir las cargas de desecho después del proceso, ya que con la prueba DBO₅ se mide el oxígeno molecular utilizado durante un período de incubación específico en este caso cinco días a 1 atm y 20°C identificando la demanda carbonosa y la oxidación de materiales inorgánicos (APHA, 2012).

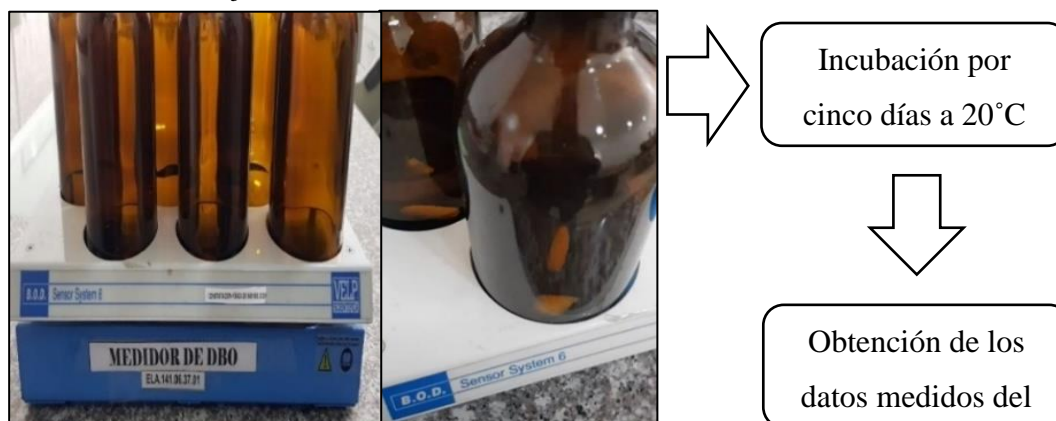
Según la norma APHA 5210 B se tomó un pequeño volumen 50 mL de muestra completamente homogénea a un pH de 8.5. La ecuación (14) es ideal, porque el consumo de oxígeno se puede determinar restando la cantidad de oxígeno disuelto al comienzo de la prueba de la cantidad de oxígeno disuelto al final de la prueba.



El sistema sensor de DBO₅ Velt en la pantalla representa en mg/L la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para estabilizar la materia orgánica a través de la actividad bioquímica aeróbica en las muestras de agua incubadas en la oscuridad durante cinco días. El blanco (muestra sin carga bacteriana) es agua de dilución que se usó para corregir la cantidad de oxígeno consumido por el diluyente, que teóricamente debería ser cero y se determinó el punto inicial de oxígeno disuelto. Ver en la Figura 10.

Figura 10

Método Prueba de DBO₅



2.5.1.8. Análisis de DQO. Con el método APHA 5220 D se estimó la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica en el agua, para esta prueba se utilizan técnicas de espectroscopia de absorción, que permiten una lectura directa de mg/L de oxígeno. Las muestras fueron oxidadas químicamente por la acción del dicromato de potasio a 150°C durante 2 horas, este método utiliza cantidades más pequeñas de muestra y reactivos. Se usó sulfato de plata como catalizador y sulfato de mercurio para evitar la interferencia de cloruro, que luego se determinó espectrofotométricamente, ver en la Figura 11.

Figura 11

Análisis de DQO por el Método de Dicromato



2.5.1.9. Análisis de pH y Temperatura. La mayoría de las fuentes naturales tienen un pH entre 4 y 9 es ligeramente alcalina debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos, las desviaciones de los valores normales en el agua pueden ser causadas por desechos industriales ácidos o alcalinos. Para el análisis del pH según la normativa INEN 973 es necesario instrumentos, reactivos, procedimientos, tolerancias aceptables y resultados finales informados (INEN, 1984).

- **Equipos.** Multiparámetro con electrodos de vidrio, pipeta y un vaso de precipitación (p.1).
- **Reactivos.** Solución tampón de pH4, pH7 y pH9 y agua destilada (p.1).
- **Procedimiento.** Se efectuó la determinación por duplicado sobre la muestra (p.1).

Se lavan los electrodos con agua destilada y calibrar el aparato a la temperatura de la muestra, utilizando una solución de referencia, cuyo pH sea similar al esperado. Después se coloca la muestra en el vaso de precipitación; para seguidamente introducir los electrodos y efectuar la determinación del pH, el procedimiento se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Medición del pH y Temperatura In-Situ antes de los Análisis Físicos-Químicos



El error aceptable se obtuvo cuando la diferencia entre las dos mediciones no excedió de dos décimas de unidad de pH, en el caso contrario se tomó una nueva medición, se levantó la información de campo durante 30 días a las 14h00 en los tres diferentes puntos que anteriormente se georreferenciaron con las coordenadas UTM (INEN, 1984).

Se mantuvo la nomenclatura de pHT1, pHT2 y pHT3, también se tomaron las mediciones correspondientes de temperatura en grados centígrados. El control y medición del pH es muy importante para vigilar la contaminación del agua en las plantas de tratamiento de aguas residuales, también es importante para controlar la corrosión en las redes de distribución eléctrica (p.1).

2.5.2. Evaluación de la Capacidad de Generación Bioeléctrica de las Células de Combustible en un Ambiente Controlado

En la evaluación hubo pasos previos antes de empezar con la estimación bioeléctrica, primero se cultivó las cianobacterias que fue el inóculo para la generación eléctrica y un sustrato que le facilite el alimento necesario para su metabolismo.

2.5.2.1. Cultivo de Cianobacterias. Se realizó un cultivo de los microorganismos de la Laguna, la revisión bibliográfica evidenció que existe gran porcentaje de cianobacterias, como primera opción se ejecutó una siembra de las cianobacterias en un medio líquido, se preparó seis cultivos utilizando tubos de ensayo de 20 mL con 10 mL de medio de cultivo Nitrofoska más bicarbonato, como se indica en la Figura 13 (Hernández et al., 2019).

Figura 13

Cultivo en el Medio Nitrofoska más Bicarbonato



Nota. El cultivo no fue en condiciones estériles.

El primer método fue filtrar las muestras utilizando filtros de microfibra de vidrio, numeración 1825-025 de 25 mm de diámetro, la biomasa filtrada se introdujo en seis tubos de ensayo con 10 mL de medio y se mantuvo en una incubadora entre 20 a 25°C con 24 horas de luz durante dos semanas, el cultivo no dio los resultados esperados (Sánchez, 2022). Por lo cual se procedió a cambiar el método de cultivo, se adquirieron muestras de fitoplancton de la Laguna como inóculo con una malla de 20 μm , un cubo de 20 litros y una jarra de 1 litro, además se generó un nuevo medio de cultivo BG11 específico para entregar los nutrientes necesarios a las cianobacterias ver en la Figura 14 (Hernández, 2016).

Figura 14

Adquisición de fitoplancton de la Laguna de Yahuarcocha



Para realizar el nuevo medio de cultivo BG11 se utilizó el protocolo de la Universidad Católica de Chile Anexo 10, el cual, mediante cuatro stocks compuestos por diferentes sales, más

agua destilada, carbonato de sodio y nitrato de sodio se forma un medio nutritivo idóneo para las cianobacterias, ver en la Tabla 7.

Tabla 7

Preparación Medio de Cultivo BG11 para Cianobacterias

Stock 1	10mL
Stock 2	10mL
Stock 3	10mL
Stock 4	1mL
CO ₃ Na ₂	Pesar 0.02 g y agregar en el momento de preparación del medio
NaNO ₃	Pesar 1.5 g y agregar en el momento de preparación del medio

Nota. Ajustar pH a 7.5 y volver a esterilizar con la autoclave. El pH final queda aproximadamente a 7.1, el medio tiende a precipitar.

Una vez mezclado cada Stock se debe ajustar a un pH a 7.5 para después introducir en la autoclave durante una hora, al finalizar se debe dejar enfriar a una temperatura ambiente y luego refrigerar (p.1). Ver el proceso se observa en la Figura 15.

Figura 15

Preparación Medio de Cultivo BG11 para Cianobacterias



Una vez preparado el medio de cultivo BG11 se prepararon cajas petri con agar más BG11 para realizar las siembras en un medio sólido, de esta manera se obtuvo un inculo maduro y de buena salud para lograr trasladar el cultivo a un medio líquido, ver en la Figura 16.

Figura 16

Cultivo de Cianobacterias en un Medio Sólido de BG11 más Agar



Nota. Mediante la técnica de estriado se realizaron las siembras de cianobacterias en un ambiente estéril.

En las dos semanas siguientes en el laboratorio LABINAM se procedió a trasladar el cultivo sólido a un medio líquido, se utilizó dos matraces de 500 mL para M1 y M2, con 300 mL del medio de cultivo BG11 y una porción de inóculo que se obtuvo de la caja petri. Además con una bomba de pecera se oxígeno y agito el cultivo, el cual se mantuvo en una incubadora durante dos semanas a una temperatura entre 20 a 25°C con fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad para mejorar el crecimiento de las cianobacterias, ver en la Figura 17 (Coe et al., 2019).

Figura 17

Resiembra del Cultivo en un Medio Líquido de BG11 e Incubación



Se obtuvo un cultivo acuoso con alta concentración de cianobacterias al cual se realizó un control para conocer la curva de crecimiento mediante gravimetría durante una semana, como se observa en la Figura 18.

Figura 18

Obtención de la Curva de Crecimiento Mediante Gravimetría



En la balanza analítica se pesó dos tubos eppendorf de 2 mL vacíos, después se tomó una alícuota de 2 mL de cada matraz M1 y M2 con una micropipeta de 1000 μL y se centrifugó a 13000 rpm durante cinco minutos, en algunos casos se repitió el proceso de centrifugado al no decantarse toda la biomasa, se retiró el exceso de líquido de los tubos con una micropipeta de 100 μl hasta dejar solo la biomasa en el fondo, se introducen los tubos con biomasa en la estufa durante 24 horas a 85°C para volver a pesar los tubos con la biomasa deshidratada obteniendo la curva de crecimiento, este proceso se realizó a las 11 a.m. durante dos semanas (Khan & Raof, 2011).

Construcción de la Célula de Combustible. El tipo de células que se seleccionó para las experimentaciones fue de cámara sencilla con cátodo de aireación pasiva en un total de cinco células, para el modelado 3D se utilizó el programa FreeCAD creando los archivos STL que son manejados en la impresión 3D de filamentos sintéticos PLA plus con un porcentaje de relleno de 50% útil (Logan, 2010).

Las medidas utilizadas se pueden ver en la Tabla 8 y los resultados en la Figura 19.

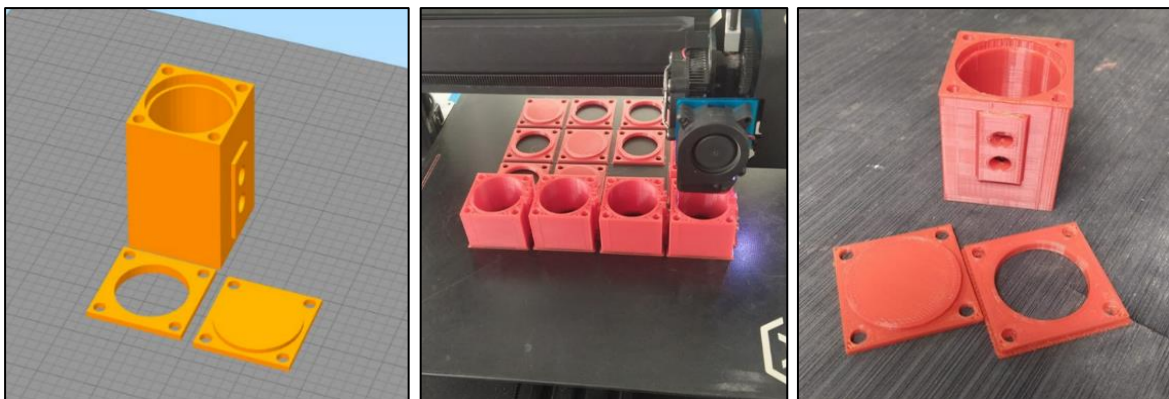
Tabla 8

Medidas de las Células de Combustible Microbianas Cámara Sencilla

Parte	Largo [cm]	Ancho [cm]	Alto [cm]	Otros
Cuerpo	4	4	5	80 volumen [cm^3]
Interior del cuerpo diámetro	3	3	5	48 volumen [cm^3]
Tapa completa	4	4	0.2	-
Tapa con agujero	4	4	0.2	Diámetro 3 [cm]

Figura 19

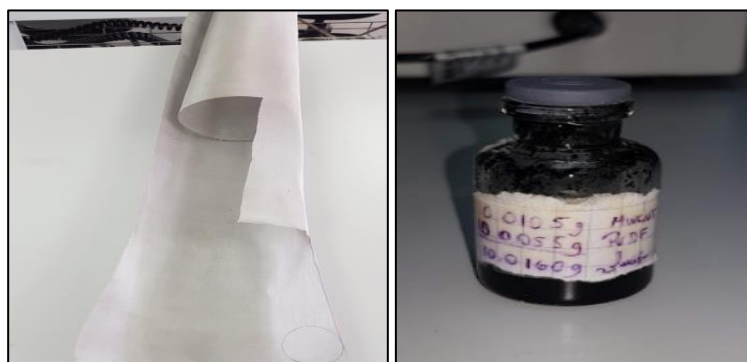
Modelamiento 3D en el Programa FreeCAD e impresión de las CCMs



2.5.2.2. Construcción de los Electrodo. Los materiales de los electrodos son importantes en el proceso, mediante una investigación realizada por la Universidad de Yachay se obtuvieron los electrodos a base de pellets de fluoruro de polivinilideno PVDF con peso molecular de alrededor de 275 g mol^{-1} , alcohol polivinílico PVA con el peso molecular de 26.3 a 30 g mol^{-1} , plaquetas de grafeno de pocas capas de tamaños laterales entre 0.5 y $1 \mu\text{m}$ (Briones et al., 2020), ver en la Figura 20.

Figura 20

Compuesto de los Electrodo y Malla de Acero



Los electrodos están compuestos con una mezcla de PVDF al 0.5%, PVA al 0.5% y Grafeno al 0.1% que ensamblan a una malla de acero inoxidable de $70 \mu\text{m}$ de apertura, se realizó los cortes de 3.5 cm de diámetro en la malla y se desenhebro unos hilos de la malla para usar como contactos de las CCMs, seguidamente se dio un baño en diferentes alcoholes para quitar cualquier residuo o grasa hasta colocarlo en un vaso de precipitación con alcohol isopropílico cubriendo

completamente todas las mallas de acero inoxidable, finalmente se dio un baño de ultrasonido por 30 minutos (p.27), ver en la Figura 21.

Figura 21

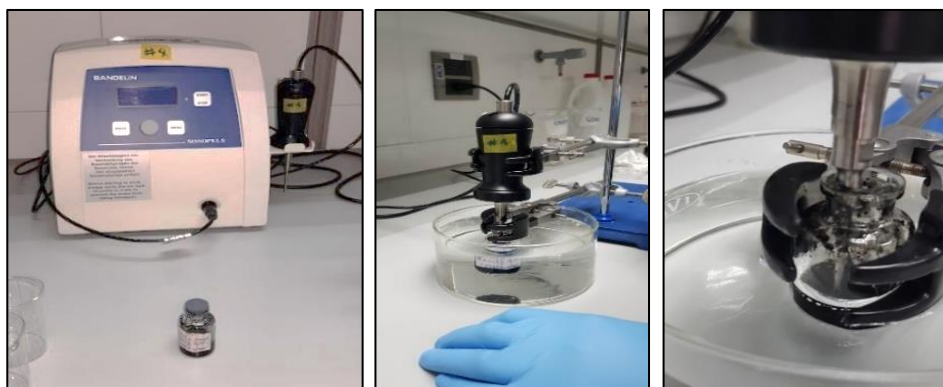
Corte y Limpieza de Malla de Acero Inoxidable



La sonicación es un proceso comúnmente utilizado en la síntesis y procesamiento de materiales, especialmente en la fabricación de materiales compuestos. Se realizó la sonicación de un compuesto que contenía polidifluoruro de vinilideno (PDVF), alcohol polivinílico (PVA) y plaquetas de grafeno, con el fin de homogeneizar la mezcla y evitar la formación de coágulos(p.27). Ver en la Figura 22.

Figura 22

Preparación de la Mezcla PDVF, PVA y Plaquetas de Grafeno



Nota. Es importante tener en cuenta que el proceso de sonicación puede generar calor y estrés mecánico en el material, lo que puede afectar sus propiedades y desempeño.

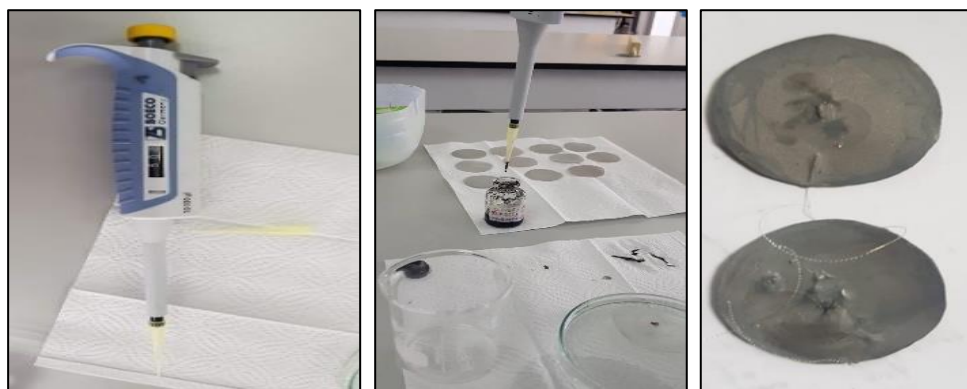
Se tuvo precaución con la aguja del sonicador para que no topase con el frasco debido que la generación de calor puede trizar el cristal, la elección de la amplitud y la duración del proceso de sonicación depende de las propiedades del material y del objetivo específico del proceso (p.27).

En este caso, se programó al 80% de amplitud durante una hora, con pulsos de 2 a 10 segundos y un total de 130.76kJ de energía, lo cual permitió una adecuada dispersión y homogeneización de los componentes del compuesto, con todo lo necesario en una caja petri de gran profundidad se colocó agua destilada hasta casi completar su capacidad y mediante una micropipeta calibrada a 50 μ L junto unas pinzas se procedió a montar los electrodos (p.27).

El proceso consistió en absorber con la micropipeta 50 μ l de la mezcla una vez homogenizada, después soltar en el agua destilada de la caja Petri a una altura de alrededor de 30cm para así formar un halo de material (p.27), ver en la Figura 23.

Figura 23

*Creación de los Electrodo*s



El halo de material debe ser pescado con una malla de acero inoxidable previamente cortada a la medida, desde abajo hacia arriba hasta cubrir la malla completamente, este proceso se debe realizar cinco veces por cada lado, esperando unos minutos para que se escurra el agua de la malla y así no se desprenda, se obtuvo seis pares de electrodos de cinco capas para realizar las evaluaciones bioeléctricas en las CCMs (Briones et al., 2020).

2.5.2.3. Comprobación de Hermeticidad de las CCMs. La hermeticidad en las CCMs es un paso importante en el diseño y construcción, ya que garantizó un funcionamiento adecuado del sistema y evitó posibles fugas o ingresos de aire que pudieran afectar el rendimiento y la durabilidad de las células. En este sentido, se tomaron medidas para asegurar la hermeticidad de las CCMs, utilizando tornillería, orlings y tapones de goma que ayudaron a sellar las diferentes partes de la célula, esto garantizó que no existieran fugas en la entrada y salida de gas, así como en los orificios para la conexión de los electrodos (Logan & Oh, 2006).

2.5.2.4. Construcción del Incubador. El incubador es una herramienta clave en las investigaciones científicas, especialmente en aquellas que requieren de condiciones específicas y controladas para realizar experimentos. En este caso, el objetivo principal de la construcción un incubador fue poder controlar el ambiente y reducir la cantidad de variables presentes en las experimentaciones con las CCM (Schertenleib et al., 2019).

Se eligió un cooler de 40 litros de capacidad de poliestireno expandido, ya que es un material aislante y resistente, que permite mantener una temperatura estable en el interior. Además, se colocó una ventana de cristal para poder observar el interior del incubador sin necesidad de abrir la tapa, lo que podría afectar las condiciones del ambiente. Para controlar la temperatura interna del incubador, se utilizó un Módulo W1209 12vdc, que permite programar y mantener una temperatura constante en el interior del cooler. Asimismo, se colocó una lámpara de 9 W y un ventilador para homogenizar la atmósfera y la temperatura, evitando que se produzcan variaciones en diferentes zonas del incubador (p.4).

2.5.2.5. Adquisición de Datos. La adquisición de datos es un proceso fundamental en cualquier experimento científico, ya que permite obtener información precisa y confiable sobre las variables que se están midiendo. En esta investigación, se utilizó dos multímetros para la adquisición de datos: el multímetro de banco KEITHLEY 2410 – C de precisión $\pm 0.012\%$ o 0.03mV y el multímetro UNIT-UT61E+ de precisión 0.01% los cuales se conectaron a una Laptop Lenovo V110 para almacenar los datos (Melo et al., 2021).

El multímetro KEITHLEY 2410 – C se conectó mediante un conector serial r32 a USB junto con el software LabVIEW 2019, que es un programa de adquisición y análisis de datos muy utilizado en el campo de la ingeniería y la ciencia. Por otro lado, el multímetro UNIT-UT61E+ trabajó con el software específico de la marca y se conectó mediante USB D-09 de transmisión bidireccional (p.156).

La adquisición de datos es un proceso crítico en cualquier investigación científica, ya que los datos obtenidos son la base para la toma de decisiones y la obtención de conclusiones. Durante la experimentación se obtuvo datos cada 1 minuto durante 25 horas en mV realizando tres repeticiones por muestra, lo que permitió tener una amplia cantidad de información para realizar análisis y evaluaciones se utilizó como referencia la investigación de (Medina & Zapata, 2017).

2.5.2.6. Diseño Investigativo. La investigación se llevó a cabo bajo un enfoque cuantitativo basado en la recopilación y análisis de datos numéricos para probar una hipótesis nula; este enfoque es objetivo ya que los datos se midieron de manera precisa y se analizaron mediante técnicas estadísticas rigurosas, estableciendo patrones de comportamiento. El nivel de la investigación perteneció al nivel explicativo, ya que se buscó comprender el comportamiento de los hechos a través de la relación causa-efecto entre las variables independientes y dependientes (Bahamonte & Chinchin, 2020).

Los datos obtenidos fueron analizados con la estadística descriptiva, lo que permitió determinar las posibles relaciones y correlaciones entre las variables y establecer conclusiones basadas en los resultados. Se consideró esta investigación de tipo experimental, ya que se creó un ambiente artificial donde se controlaron y modificaron las variables para poder observar y medir los resultados. La utilización de técnicas experimentales permitió aislar las variables de interés y establecer relaciones causales entre ellas. Además, el control y la manipulación de las variables permitieron obtener resultados precisos y repetibles, lo que aumentó la validez interna de la investigación (Hernandez, 2018). Las variables que se involucra en este trabajo experimental son la que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Matriz de Variables Dependiente e Independientes

	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Independiente		Medio BG11	Químico
	Muestra	Cultivo de Cianobacterias	Controlado
		Agua de Yahuarcocha	Real
	Temperatura	T	°C
	Potencia de hidrógeno	pH	Ácido, Neutro o Alcalino
	Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L
Dependientes	Voltaje en circuito abierto	Voc	mV
	Intensidad de Corriente	I	mA o μ A
	Porcentaje de Remoción de DQO	R	%

2.5.2.7. Evaluación de las CCMs. Se realizó en un ambiente controlado, manteniendo la temperatura constante en 25°C, cada muestra estuvo en reposo durante 10 minutos antes de ser evaluada para permitir la estabilización del voltaje, se mantuvieron en un recipiente de vidrio previamente esterilizado con etanol al 70%. Para la muestra del cultivo CIA se utilizó una concentración de cianobacterias de 2.5×10^6 células/mL, mientras que para la muestra de la Laguna de Yahuarcocha se utilizó una concentración de 4.7×10^5 células/mL (He et al., 2009).

En el caso de la muestra de blanco, se utilizó solo medio de cultivo BG11 como se observa en la Figura 24.

Figura 24

Muestras BG11, CIA y YAH para Evaluación Voc



Nota. Las experimentaciones con las muestras se realizaron en diferentes días.

2.5.2.8. Operación de las CCMs. Se rellenó las CCMs con un alícuota de 35mL siendo un volumen común en las tres muestras BG11, CIA y YAH. Además, se dejó una franja de aire de 10mL con el propósito de que se estabilicen. Las CCMs se introdujeron en el incubador, que mantuvo una temperatura entre 22 a 25°C con la atmosfera cerrada y homogénea, permitiendo replicar el ambiente en todas las experimentaciones (Valencia, 2018).

Se comenzó con las mediciones de voltaje, para verificar la diferencia de potencia entre los dos polos de la célula, cada CCM fue evaluada en tres ocasiones cambiando las muestras, pero manteniendo los electros durante 25 horas consecutivas (p.37).

Se puede ver el llenado y toma de parámetros eléctricos en las Figura 25 y 26.

Figura 25*Llenado de CCMs*

Nota. Se debe realizar con todas las protecciones, ya que las cianobacterias generan cianotoxinas que afectan a la piel y otros órganos, así como al sistema nervioso.

Figura 26*Pruebas de Adquisición y Operación de las CCMs*

2.5.3. Determinación de la incidencia del uso de diferentes resistencias en la generación de bioelectricidad

En este objetivo se mantuvo la misma metodología y diseño experimental del objetivo anterior, no obstante, se realizó ciertas modificaciones y aplicó ecuaciones para analizar el comportamiento eléctrico del sistema con variables de operación establecidas como; corriente eléctrica (I), resistencia interna (iR), voltaje (V), potencia generada (P), densidad de potencia (DP), Eficiencia de remoción de DQO (ϵ_r) mismas que de detallan a continuación:

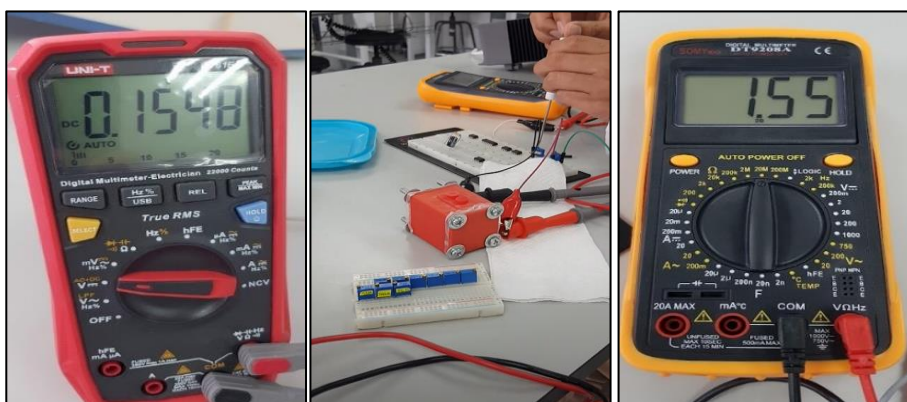
2.5.3.1. Medición de Resistencia Interna. Para la determinación de la iR de las CCMs, se utilizó resistencias de precisión de variabilidad lineal con valores desde 100Ω hasta 10Ω .

El procedimiento de medición inició con la conexión de dos multímetros a la CCM, el primer multímetro midió la resistencia calibrada en su máxima capacidad resistiva de $10\text{ M}\Omega$, mientras que el segundo multímetro midió el voltaje. A continuación, se conectó los polos de la CCM a la resistencia, lo que provocó una disminución gradual del voltaje, hasta alcanzar la estabilización (Kim, Chang, Dinsdale, & Guwy, 2021).

Con el voltaje obtenido, se empezó a reducir el ohmiaje de la resistencia con el objetivo de encontrar la mitad de su valor. Una vez que se llegó a la mitad de ese valor, se determinó la resistencia interna de la CCM (p.10). Este proceso se repitió en tres ocasiones para obtener valores de resistencia de trabajo precisos y confiables, como se observa en la Figura 27.

Figura 27

Medición de Resistencia Interna de la CCM



Nota. La medición se repetió por tres veces obteniendo los mismos valores.

2.5.3.2. Intensidad de Corriente Eléctrica. Se obtuvo mediante la ley de Ohm ya que es la cantidad de flujo o carga eléctrica que pasa por un circuito en un tiempo determinado (López, 2021), como se muestra en la Ecuación (15).

$$I = V/R \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

I=Intensidad de corriente eléctrica, en Amperios (A)

V=Voltaje, en Voltios (V)

R=Resistencia externa, en Ohmios (Ω)

2.5.3.3. Obtención de Potencia. Se calculó con la intensidad de corriente y el voltaje mediante la ecuación (12) dando como resultado la cantidad watts que es capaz la CCM de generar (Yaqoob, Ibrahim,, Yaakop, & Ahmad, 2021).

2.5.3.4. La Densidad de Potencia. Se utilizó la ecuación (13) por unidad de área del electrodo permitiendo comprar con la producción de diferentes sistemas (p.1951).

2.5.3.5. Eficiencia de Remoción de Material Orgánica. Es la base para la aceptación del sistema, está se define como un porcentaje de materia orgánica que es contenida dentro del sistema (célula de combustible microbiana) como parte del tratamiento, así el agua sobrante presenta una reducción de carga orgánica mejorando así la calidad de agua (Daud et al., 2021).

Su fórmula se expresa de la siguiente manera ecuación (16).

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{DQO}_{\text{entrada}} - \text{DQO}_{\text{Salida}}}{\text{DQO}_{\text{entrada}}} * 100 \quad (\text{Ec.16})$$

Dónde:

Remoción= Eficiencia de remoción de materia orgánica, en (%)

$\text{DQO}_{\text{entrada}}$ = Cantidad de materia orgánica en la entrada, en (mg/L)

$\text{DQO}_{\text{Salida}}$ = Cantidad de materia orgánica en la salida, en (mg/L)

Capítulo IV

Resultados y Discusión

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de las células de combustible microbianas en el periodo de experimentación. Para el análisis de la información se utilizaron figuras y tablas que permiten al lector comprender los resultados.

3.1. Análisis de Calidad del Agua de Yahuarcocha

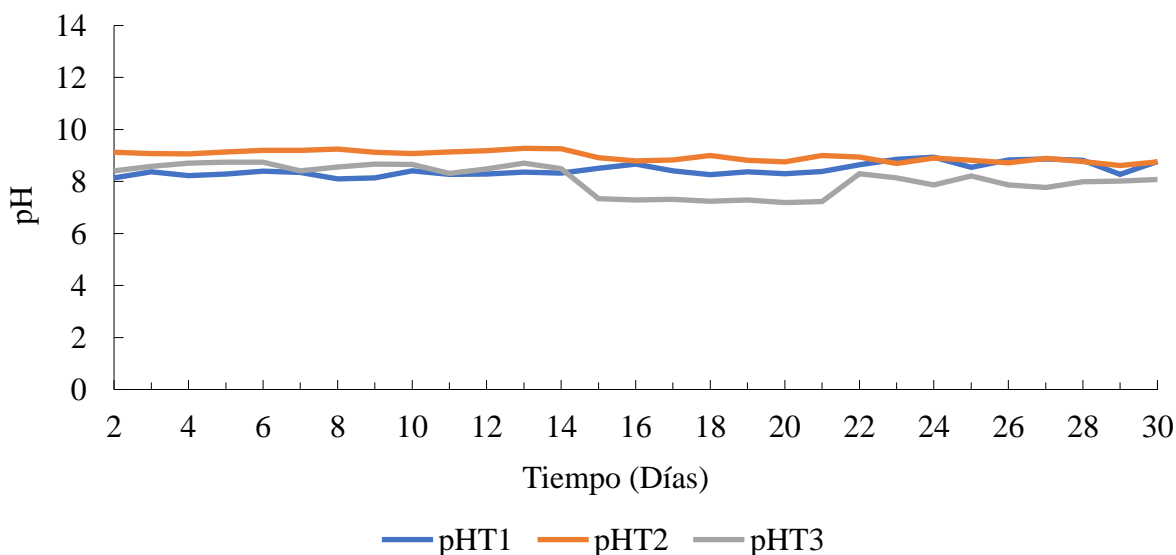
El muestreo y análisis se realizó en los puntos P1 (PTAR), pHT1 (Entrada vehicular), pHT2 (Muelle), pHT3 (Vuelta de la Paloma) con criterios específicos de la normativa NTE INEN 2169:2013 y metodologías para cada parámetro pH y Temperatura, DQO, DBO₅, ST. Los resultados se discuten con las referencias bibliográficas.

3.1.1. pH y Temperatura

Los resultados del parámetro pH se muestra en una figura, siendo el eje Y el rango de potencial hidrogeno pH comprendido entre 0 a 14, mientras que el eje X presenta la duración de la toma de datos 30 días. Por otro lado, los puntos se visualizan de la siguiente manera: pHT1 con una línea de color azul, pHT2 con una línea de color naranja y pHT3 con una línea de color gris, como se puede ver en la Figura 28.

Figura 28

Variación del pH de Yahuarcocha entre Diciembre y Enero durante 30 Días



La Laguna de Yahuarcocha durante 30 días mantuvo el pH en un rango de 7.19 a 9.27, se apreció que pHT2 (muelle) es el punto con el pH más básico del lago con valores superiores a 8.61 y picos de 9.27 esto puede ser a causa de la proximidad al autódromo internacional José Tobar, el área de recreación y el parque de bomberos que no cuentan con alcantarillado, sino con pozos sépticos, sin presencia de vertidos directos al Lago. A pesar de ello existe contaminación por infiltración y arrastre de detergentes, jabones, aceites, refrigerantes y residuos de combustibles desde la carretera ubicados cerca de la franja protectora de Yahuarcocha (GADM San Miguel de Ibarra, 2018).

El punto pHT1 (entrada) se mantuvo en valores entre 8.1 y 8.93 de pH siendo normales dentro de los datos obtenidos durante el levantamiento de información. El punto pHT3 (vuelta de la Paloma) desde el día 15 al 21 presentó un pH neutro de 7.19 como mínimo debido a los días lluviosos, este punto es cercano a la quebrada San Antonio que recoge el agua de la quebrada Girón desde la cuenca alta hasta llegar al espejo de agua, lo cual dio lugar a esa disminución de potencial de hidrógeno, los datos del pH con respecto a los puntos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

pH de la Laguna de Yahuarcocha Durante 30 Días

	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
pHT1	8.44	0.24	2.90%	8.1	8.93	0.83
pHT2	8.98	0.19	2.16%	8.61	9.27	0.66
pHT3	8.11	0.54	6.73%	7.19	8.74	1.55
Total	8.51	0.50	5.98%	7.19	9.27	2.08

3.1.1.1. Prueba ANOVA en pH de Yahuarcocha. Se realizó la prueba ANOVA para comprobar que la normalidad en los datos del pH, se utilizó el programa Statgraphics Centurion para obtener el resultado de una prueba estadística que compara las medias de dos o más grupos.

La tabla incluye información sobre la varianza entre los grupos (que se representa como la "Suma de Cuadrados" en la columna "Entre grupos") y la varianza dentro de los grupos (que se representa como la "Suma de Cuadrados" en la columna "Intra grupos").

Además, la tabla también proporciona el estadístico F (que se representa como la "Razón-F") y el p-valor (que se representa como el "Valor-P"), ver en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados Prueba Estadística ANOVA del pH

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	11.64	2	5.82	44.06	0.0000
Intra grupos	11.49	87	0.13		
Total (Corr.)	23.13	89			

En la tabla se observa que F es igual a 44.06 un valor mayor al umbral y que el valor P de F es menor que 0.05. Por lo tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los puntos con un nivel del 95% de confianza. La diferencia estadística de la media del pH entre los puntos es (pHT1-pHT2) 0.54 (pHT1-pHT3) 0.33 y (pHT2-pHT3) 0.87.

La mediana se utiliza con datos no paramétricos porque no requiere que los datos sigan una distribución normal. Además, es menos sensible a los valores extremos a diferencia de la media siendo una medida de tendencia central más robusta para los datos no paramétricos, por lo tanto, se realizó la prueba de las medianas, ver los resultados de la prueba en la siguiente Tabla 12.

Tabla 12

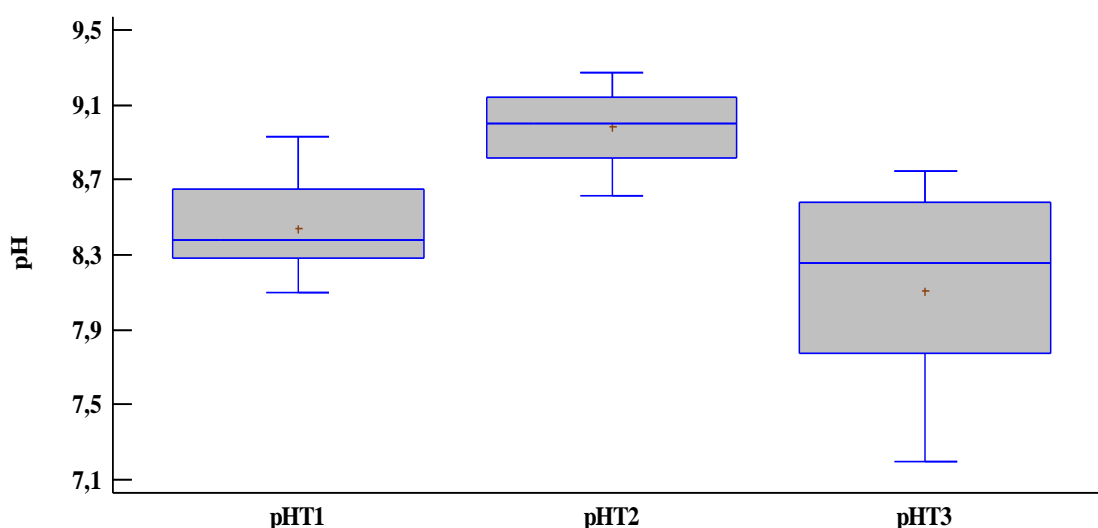
Medianas de los Datos de pH de la Laguna de Yahuarcocha

Muestra	Tamaño de Muestra	Mediana	LC inferior	LC superior
pHT1	30	8.37	8.28	8.54
pHT2	30	9.00	8.82	9.13
pHT3	30	8.26	7.86	8.54

La mediana global del pH de Yahuarcocha es 8.6 siendo un potencial de hidrogeno básico a causa de la contaminación mencionada, así como de las mismas cianobacterias que son capaces de generar un ambiente básico durante la fotosíntesis, ver en la Figura 29.

Figura 29

Diferencia de los Puntos de Muestreo en la Laguna de Yahuarcocha



El oxígeno reacciona con el agua y forma ácido carbónico, que simultáneamente se descompone para formar átomos de oxígeno e iones de hidrógeno, estos últimos se eliminan por medio de la fijación del nitrógeno atmosférico, dejando átomos de oxígeno en exceso que nuevamente se unen con iones de hidrogeno formando moléculas de agua lo que aumenta el pH del medio.

Por otro lado, la temperatura de la Laguna se analizó de forma simultánea al pH obteniendo los valores en un rango de 20.15 y 24.8°C con un promedio de 22.7°C, la desviación estándar es de 0.99 y el coeficiente de variación es 4.37%. Se muestran las diferentes Temperaturas de Yahuarcocha durante 30 días en las Tabla 13 y Figura 30.

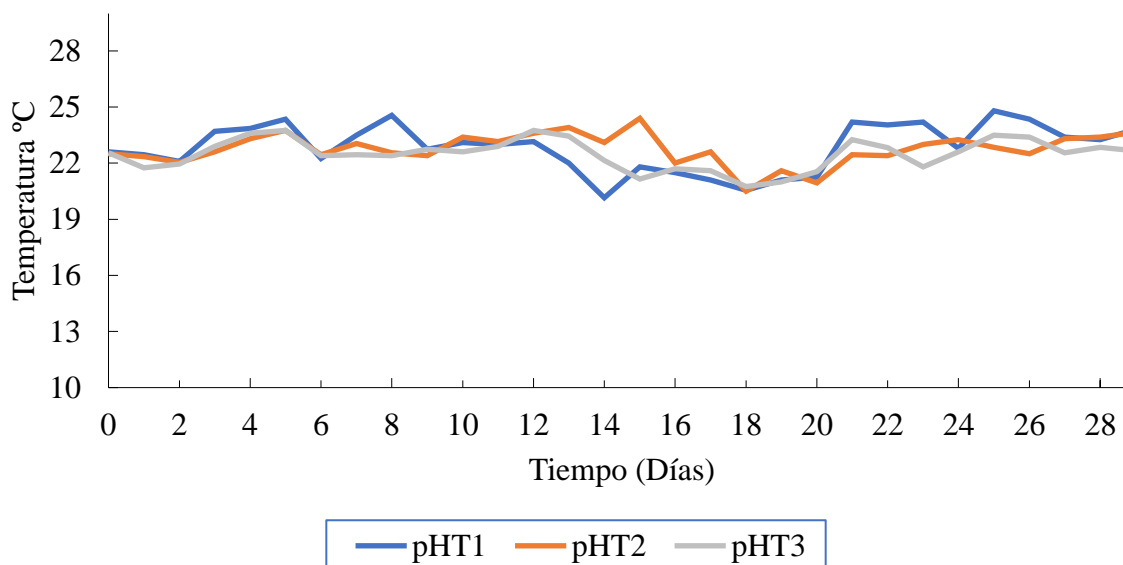
Tabla 13

Temperatura de la Laguna de Yahuarcocha Durante 30 Días

	Promedio [°C]	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Rango [°C]
pHT1	22.85	1.25	5.51%	20.15	24.8	4.65
pHT2	22.76	0.83	3.66%	20.5	24.4	3.9
pHT3	22.48	0.81	3.62%	20.75	23.75	3.0
Laguna	22.70	0.99	4.37%	20.15	24.8	4.65

Figura 30

Temperatura de Yahuarcocha entre Diciembre y Enero durante 30 días



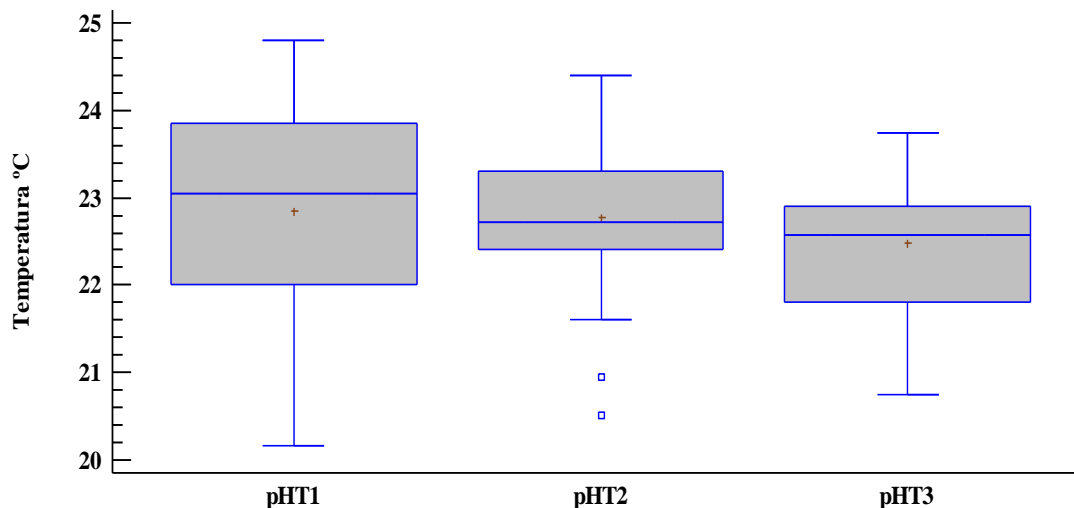
3.1.1.2. ANOVA de la Temperatura de Yahuarcocha. Para verificar la normalidad de los datos se realizó la prueba ANOVA, como resultado se obtiene que: La razón-F 1.14, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de grupos. El valor-P de la razón-F es 0.32 mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel de 95% de confianza esto sugiere que los datos siguen una distribución normal y que las medias de las variables son similares, ver en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14

Resultados de la Prueba Estadística ANOVA para la Temperatura

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2.24	2	1.12	1.14	0.32
Intra grupos	85.45	87	0.98		
Total (Corr.)	87.70	89			

Para representar gráficamente los datos de temperatura se utilizó el diagrama de cajas y bigotes. Este tipo de gráfico muestra la distribución de los datos, permitiendo visualizar la mediana, los cuartiles y los valores extremos, ver en la Figura 31.

Figura 31*Temperatura de la Laguna de Yahuarcocha*

3.1.1.3. Discusión de Resultados de pH y Temperatura. Los resultados del análisis físico químico en la Laguna de Yahuarcocha durante 30 días son pH: 8.6 ± 0.5 teniendo diferencias significativas entre los puntos muestreados y Temperatura es $22.70 \pm 0.99^\circ\text{C}$ sin diferencias en todos los puntos de muestreo, estos valores están dentro de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua, los cuales son de 6 a 9 pH y 16 a 25°C , algo que también menciona la autora Ochoa (2017) y el GADM de San Miguel de Ibarra (2018).

Al realizar una comparativa temporal de los datos de la Laguna de Yahuarcocha se evidenció un aumento considerable en la temperatura, existe un aumento 2°C en el periodo comprendido entre 2013 y 2022. Esto puede ser a causa de la época climática en el cual fueron tomas las mediciones correspondientes, ver en la Tabla 15.

Tabla 15*pH y Temperatura 2013 a 2022*

Parámetro	2013-2014	2014-2015	2016-2018	2021-2022
pH	8.8	8.9	8.76	8.6
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	20	21.4	20.76	22.7

Nota. Fuente adaptada de Ochoa (2017), GAD de San Miguel de Ibarra (2018) & Proyector VLIR-UTN

Con los datos de Yahuarcocha se obtuvo un promedio multitemporal del pH es de 8.76 y la temperatura es de 21.22°C información que fue útil para emular las condiciones óptimas en el desarrollo de cianobacterias y las experimentaciones de las CCMs con respecto a la evaluación de generación bioeléctrica.

Bazdar et al. (2018) menciona que las condiciones necesarias están a temperatura ambiente de 25 ± 2 °C y el pH medio para la vida de las cianobacterias oscila entre 7 a 8 coincidiendo y evidenciando que las condiciones encontradas en el lago Yahuarcocha son las óptimas para el desarrollo de dichas especies.

Además, Gallo & Apolo (2012) confirman que los factores naturales como el incremento de temperatura mayores a 20°C y un pH Alcalino dan origen a la formación de floraciones de cianobacterias. Mientras, Reynolds & Walsby (1975) afirma que la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de cianobacterias se encuentra en un rango de 25 °C a 35 °C. y un pH de 8 a 9 permitiendo la floración de varias especies dentro de un lago.

3.1.2. DQO y DBO₅

Se analizó en el punto P1 (descarga de la PTAR) los parámetros DBO₅ y DQO importantes en el estudio de las CCM's. Los análisis se realizaron en tres días diferentes: miércoles (Día1), viernes (Día2) y domingo (Día3), en el primer día los valores obtenidos de DBO₅ fueron de 2 mg/L y 10 mg/L de DQO, en el segundo día se obtuvo un DBO₅ de 10 y 37.42 de DQO, el tercer día se obtuvo un DBO₅ 11.3 mg/L y 105 mg/L DQO similares al valor de referencia, ver los resultados en la Tabla 16.

Tabla 16

Parámetros DBO₅ y DQO

Parámetros	Unidad	Día1	Día2	Día3	Dato GAD	Método de Ensayo
DBO ₅	[mg/L]	2	10	11.3	8	APHA 5210 B
DQO	[mg/L]	10	37.42	105	108	APHA 5520 D

Nota. El dato fue tomado del plan de Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica Yahuarcocha 2018.

Los resultados del Día1 son considerados valores atípicos, la causa de esta variación se debió al tomar las muestras cuando se liberó agua potable cerca del punto de muestreo P1, la acción fue realizada por parte de los trabajadores de la planta de tratamiento de Yahuarcocha. Para el Día2 y Día3 se utilizó un bote, el cual permitió obtener las muestras sin alteraciones, no obstante, presentaron resultados diferentes, debido a las actividades antrópicas con respecto a los días muestreados, habiendo en el Día3 mayor ingreso de aguas residuales a la planta de tratamiento.

Según el Acuerdo Ministerial 097-A del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente en la Norma de Calidad Ambiental y de Efluentes al Recurso Agua en donde se detallan los criterios de calidad de agua para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y estuarios.

Menciona que, en agua dulce los parámetros analizados deben tener los siguientes valores; DQO de 40 mg/L y DBO₅ de 20 mg/L. Se determina que Día1 y Día2 están dentro de la normativa, no obstante, el Día3 posee un valor alto de DQO que sobrepasa con 65 mg/L a la normativa, lo cual, quiere decir que existe mayor material que debe ser oxidado químicamente.

3.1.3. Biovolumen

En la Laguna de Yahuarcocha existe abundancia de fitoplancton que da ese tono verdoso al agua, tiene una diversidad promedio de 57 géneros según el registro del proyector VLIR-UTN. El plan de manejo integral de la Cuenca (2018) menciona que la especie *Cylindrospermopsis sp* tiene una predominancia del 51% siendo la cianobacteria con mayor presencia en el lago Yahuarcocha. Además, Ochoa (2017) ratifica que es el 70% de individuos, constituyéndose como especie dominante espacial y temporal en el lago determinado en un año de monitoreo.

En actuales investigaciones realizadas por el Labinam, los autores Morales & Guevara (2022) obtuvieron los siguientes resultados de biovolumen en las tres especies presentes de fitoplancton; 56% *Planktothrix sp*, 5% *Cryptochroococcus tibeticus* y 1% *Arthronema gyaxiana*. Se observó que el numero de células por mL de la especie *Raphidiopsis* tiene 34683 células por un mililitro un valor muy alto a diferencia de las otras especies que tan solo tienen 3 y 1 como se observa en la Tabla 17.

Tabla 17*Biovolumen de Yahuarcocha*

Especie	Biovolumen Media/ Especie	N ° Células/mL	Tamaño Celular [μm]
<i>Planktothrix sp.</i>	56	34683	141.85
<i>Cryptochroococcus tibeticus</i>	5	3	0.53
<i>Arthronema gygaxiana</i>	1	1	0.5

Nota. La información de la tabla fue obtenida en su totalidad del Trabajo de grado de (Morales & Guevara, 2022).

3.2. Evaluación de la capacidad bioeléctrica de las células de combustible en un medio controlado

Para la evaluación y ensamble de las CCMs se siguieron pasos previos, cada uno contribuyó a obtener los resultados del objetivo específico, como el cultivo de las cianobacterias, la construcción de la célula y la adquisición de datos.

3.2.1. Cultivo de Cianobacterias

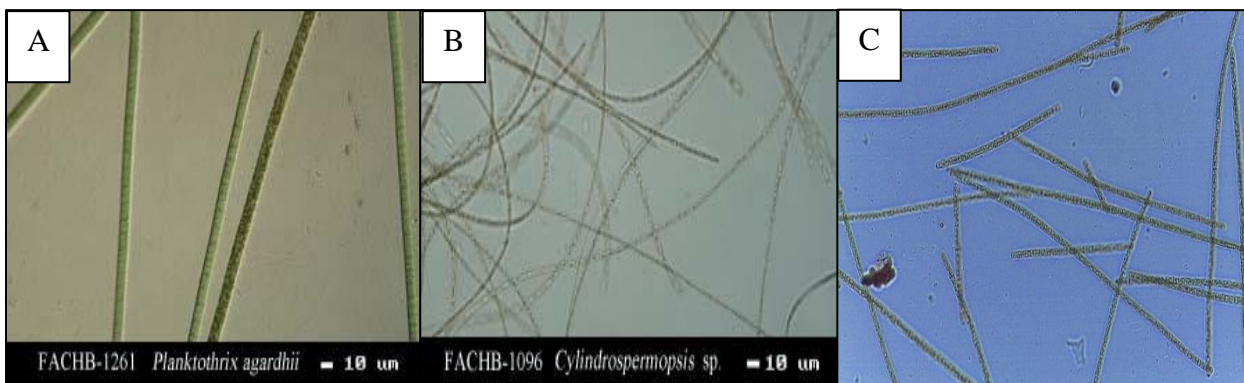
El cultivo de cianobacterias se realizó con medio BG11 en condiciones no estériles, las cianobacterias se mantuvieron vivas durante dos semanas sin colocar más cantidad de BG11 en los matraces. El cultivo con los días alcanzó la saturación y empezaron a morir las cianobacterias o ser alimento para otros microorganismos como amebas, ver en la Figura 32.

Figura 32*Cultivo de Cianobacterias de Dos Semanas*

Se identificó la especie de cianobacterias taxonómicamente, hubo dificultades al tener dos especies de cianobacterias con características similares *Planktothrix sp* y *Cylindrospermopsis sp*. No obstante, Morales y Guevara (2022) mediante la identificación molecular ADN determinaron que se trata de la especie *Planktothrix sp*, se pueden comparar en la Figura 33.

Figura 33

Cianobacterias de Características Similares

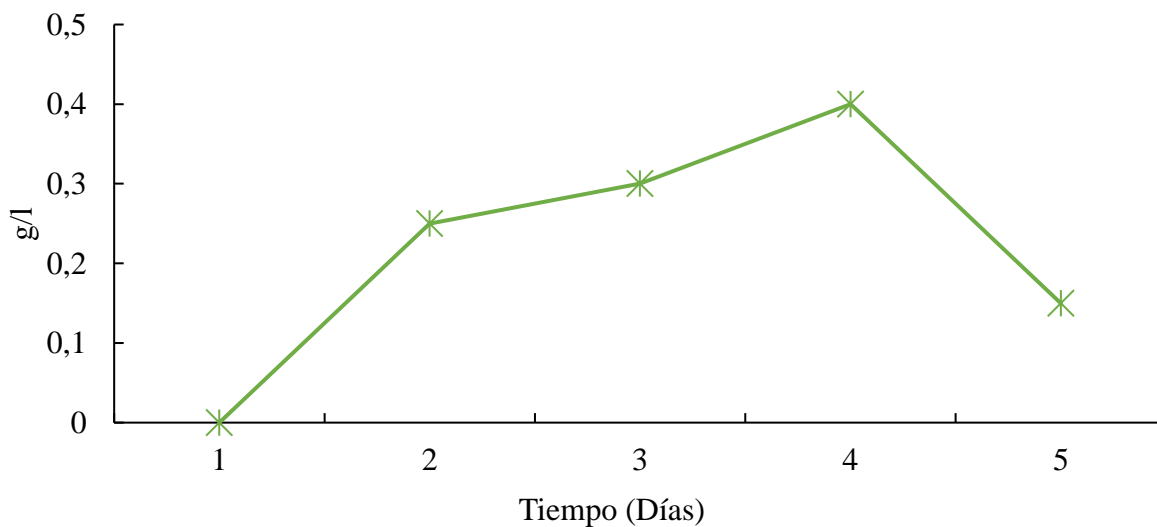


Nota, A) *Planktothrix*, B) *Cylindrospermopsis sp*. Las imágenes fueron obtenidas de la Colección de cultivo de algas de agua dulce del (Instituto de Hidrobiología, 2013); C) Cultivo imagen tomada del Microscopio Leica MB750.

3.2.1.1. Curva de Crecimiento. Los resultados de la gravimetría se presentan mediante una curva de crecimiento del cultivo con una línea verde (—), en el eje Y se observan los gramos por litro de muestra y en el eje X los días, como se puede ver en la Figura 34.

Figura 34

Curva de Crecimiento del Cultivo



En el día 1 hubo un valor a 0g/L, no obstante, existía presencia de cianobacterias que no tenían un peso medible en la balanza analítica, el día 2 tuvo una biomasa de 0.25g/L, el día 3 aumento hasta 0.3g/L, en el día 4 alcanzo su pico con una biomasa de 0.4g/L y el día 5 la curva se declinó hasta los 0.15g/L, esto marca las cuatro fases que existe en el crecimiento de los Microorganismos; latencia, exponencial, estacionaria y muerte

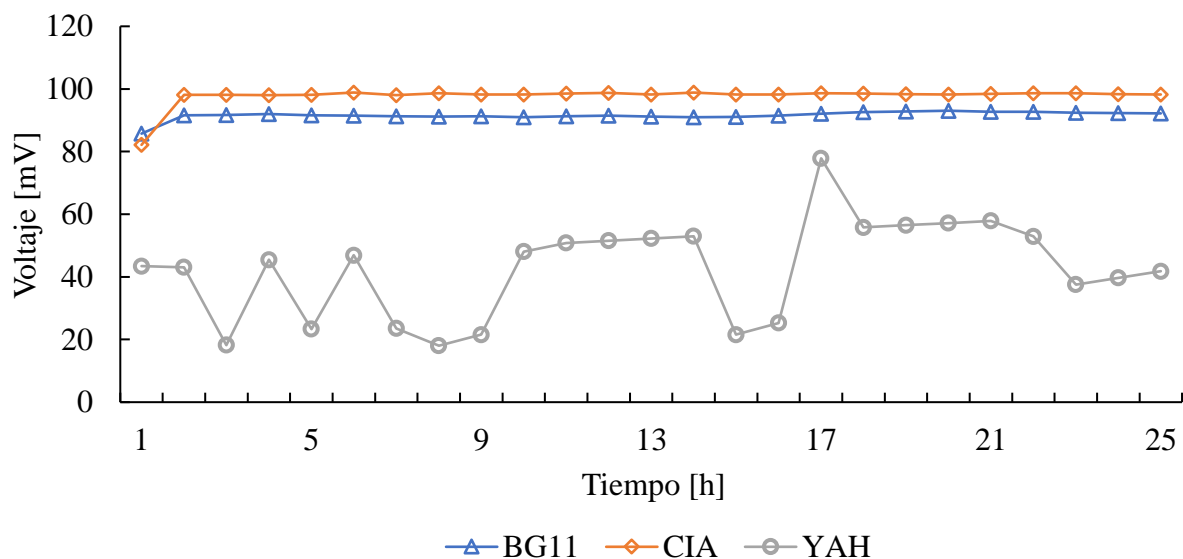
3.2.2. Evaluación de Voltaje de Circuito Abierto de la CCM con Diferentes Muestras

Los resultados experimentales se obtuvieron al evaluar en milivoltios [mV] el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) que generan las células de combustible microbianas con 35 ml de diferentes muestras: BG11, CIA y YAH. Para exponer los resultados se utilizó únicamente la mediana de las tres repeticiones, un total de 75 horas de experimentación por muestra, estos resultados se presentan con una línea continua de color azul para la muestra BG11, línea naranja CIA y línea gris para la YAH en función a las horas ubicadas en el eje x. Cabe destacar que se realizó un suavizado de las líneas mediante una interpolación de tipo spline para facilitar la visualización de las tendencias en los datos.

Los datos experimentales se muestran con triángulos azules (\blacktriangle), rombos naranjas (\blacklozenge) y círculos grises (\bullet) se utilizó la mediana de las tres repeticiones de cada muestra, debido a que son datos no paramétricos a continuación se observa en la Figura 35.

Figura 35

Voltaje de Circuito Abierto de una CCM en Milivoltios [mV]



La curva del comportamiento eléctrico de la muestra BG11, en la primera hora empezó con un voltaje de 85.75mV, en la siguiente hora aumentó hasta los 91.62mV, este voltaje fluctuó en ± 1 mV hasta alcanzar un valor máximo de 93.21mV, se observó una curva de comportamiento eléctrica estable, ya que, mantuvo el voltaje durante toda la experimentación. La composición del medio BG11 en su mayoría sales, permite que la célula de combustible mantenga un voltaje estable, ya que durante la reacción química de oxidación, una molécula, ion o átomo pierde sus electrones y se convierte en un oxidante.

Con la segunda muestra CIA se observó una curva de comportamiento eléctrico lineal, el voltaje empezó con un valor de 82.16mV hasta estabilizarse en los 98mV, esta muestra alcanzó un voltaje máximo de 99.04mV durante la experimentación. La muestra CIA está compuesta por medio de cultivo y cianobacterias en su mayoría, lo que evidenció un comportamiento similar a la primera muestra, no obstante, se observa un aumento de voltaje de 6.56mV con respecto a BG11.

Por otra parte, en la experimentación con la muestra YAH se observó una curva de comportamiento eléctrico muy variable, el voltaje empezó en 43.42mV y cayó hasta los 18.23mV en la tercera hora, se mantuvo esta tendencia durante toda la experimentación evidenciado la inestabilidad, esto puede deberse a la composición química del agua de Yahuarcocha.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las muestras evaluadas con la célula de combustible microbiana, datos como la mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimos y máximos que están en la magnitud de mili voltios [mV], ver en la Tabla 18.

Tabla 18

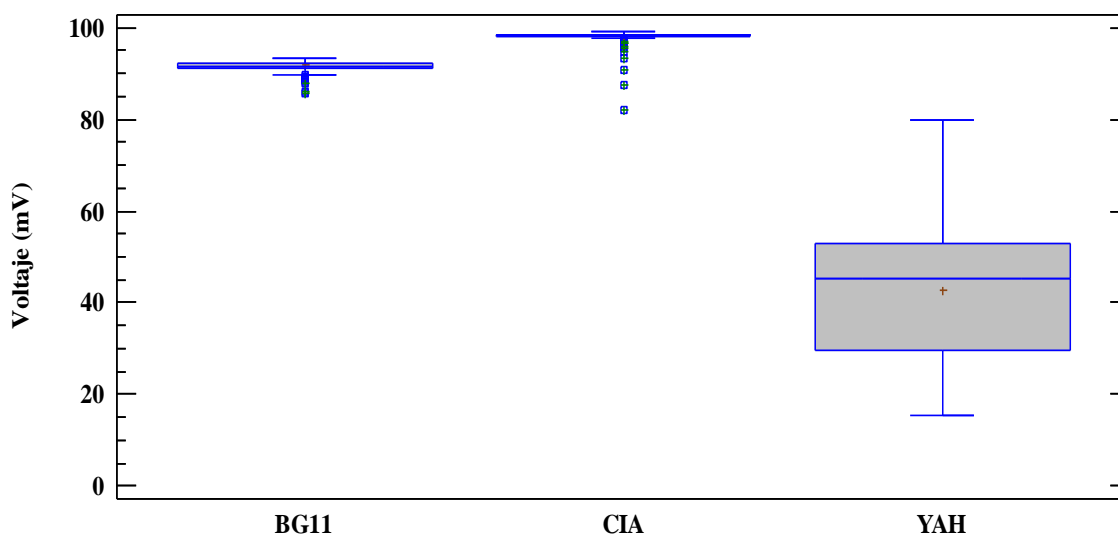
Experimentación en Voltaje de Circuito Abierto con Diferentes Muestras

	Mediana [mV]	D. Estándar	C. Variación [%]	Mínimo [mV]	Máximo [mV]
BG11	91.72	0.72	0.79%	85.75	93.21
CIA	98.31	0.60	0.63%	82.16	99.04
YAH	44.41	15.58	34.87%	15.37	79.87
CCM	91.64	31.08	33.92%	15.37	99.04

La muestra BG11 tuvo una generación de $91.72 \pm 0.72\text{mV}$, un mínimo de 85.75mV y un máximo de 93.21mV con un coeficiente de variación de 0.79% ; la muestra CIA tuvo una generación de $98.31 \pm 0.60\text{mV}$, un mínimo de 82.16mV y un máximo de 99.04mV con un coeficiente de variación de 0.63% , mientras que YAH tuvo una generación de $44.41 \pm 15.58\text{mV}$ un mínimo de 15.37mV y un máximo de 79.87mV con un coeficiente de variación de 34.87% , para apreciar la variación de los datos, los límites inferior y superior, así como las medianas de cada una, ver en la Figura 36.

Figura 36

Evaluación de las Tres Muestras en Voc Cajas y Bigotes



La célula de combustible evaluada en voltaje de circuito abierto, al trabajar con las tres muestras obtuvo una mediana general $91.64 \pm 31.08\text{mV}$, un voltaje mínimo de 15.37mV y un máximo de 99.04mV con un coeficiente de variación de 33.92% en un total de 225 horas de experimentación. La muestra CIA cultivo de cianobacterias es la más eficiente para el uso de esta tecnología, lo que puede incurrir en los costos de producción, no obstante, se obtendría mayor eficiencia de generación eléctrica.

En la investigación de Yadav et al. (2015) utilizaron una CCM de cámara única con una membrana y algas verdes obteniendo un voltaje en circuito abierto de 9mV a una temperatura de 25 a 30°C con el oxígeno y la fotosíntesis como sustrato. De igual manera, Yuan et al. (2011) trabajaron con una CCM de cámara única sin membrana y algas verdeazuladas, obtuvieron un voltaje de 580mV en 2 horas de experimentación a 105°C .

Zhao et al. (2012) utilizaron una CCM de cámara doble sin membrana con cianobacterias del Lago Tiahu más una solución nutritiva como sustrato, a una temperatura de 90°C durante 30 horas de operación obtuvieron 427mV. Se observó que ninguna de las investigaciones tiene valores cercanos, al existir variaciones en diseño, materiales, sustratos, así como horas de operación y temperatura.

3.3. Efecto en la Generación Bioeléctrica el Uso de Diferentes Cargas.

Para conocer el efecto en la generación bioeléctrica se realizó la evaluación con la muestra CIA debido a su estabilidad energética, la resistencia interna de la CCM permitió seleccionar las tres diferentes resistencias (cargas) que en conjunto con la adquisición de datos que se realizó con el multímetro UNIT-UT61E+ con la precisión $\pm 0.1\%$ obteniendo resultados cuantitativos que posteriormente se analizaron de forma estadística.

3.3.1. Resistencia Interna

La resistencia interna (IR) de la CCM fue evaluada con la muestra CIA dando como resultado 1.55 Mohms, una resistencia interna alta debido al uso de Parafilm como una membrana MIP o los materiales de construcción, sin embargo, en la investigación se planteó trabajar con esta configuración en el caso de la membrana por temas económicos. La resistencia interna está relacionada con la eficiencia de la célula de combustible microbiana, cuanto a mayor sea su valor, menor será la generación eléctrica. Los autores Oh et al. (2008) mencionan que hicieron pruebas con distintos materiales obteniendo una resistencia interna máxima de 960Ω con una membrana de Nafion 117 y cátodo de Pt más oxígeno disuelto, mientras que al trabajar con un cátodo de ferricianuro la resistencia interna fue de 800Ω . De igual manera, Fan et al. (2008) en su investigación tuvieron una resistencia interna de 235Ω con electrodos de fibra de carbono y sin membrana MIP, otros autores trabajaron con electrodos de fieltro de carbono, varillas de grafito y una membrana de Nafion 115 reduciendo la resistencia interna a tan solo 27Ω (Borole et al., 2009).

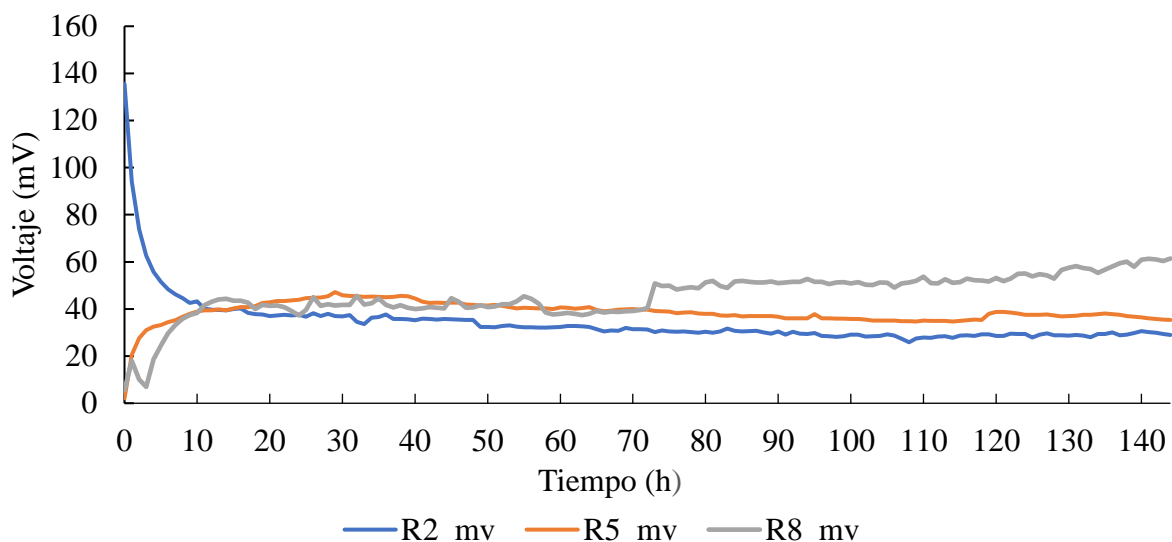
3.3.2. Intensidad de Corriente Eléctrica

La intensidad de corriente eléctrica se evaluó utilizando tres cargas mayores a la resistencia interna de 1.55 Mohms estas fueron de 2, 5 y 8 M Ω , seleccionadas por accesibilidad, las resistencias se nombraron como R2, R5 y R8 respectivamente.

Se realizó la adquisición del voltaje en mili voltios [mV] durante seis días por cada carga para después aplicar la ecuación 15 la ley de Ohm, estos resultados se representan con una línea continua de color azul para la carga R2, naranja R5 y gris para R8 en función a las horas que están ubicadas en el eje x, ver en la Figura 37.

Figura 37

Evaluación con Diferentes Cargas Durante 142 Horas



El voltaje de la CCM junto con la muestra CIA y las cargas R2, R5 y R8 en las primeras diez horas se observó que el sistema necesitó estabilizarse, sin embargo, tuvo un comportamiento estable, el mismo comportamiento en la evaluación en voltaje de circuito abierto para CIA que se estabilizó en 98mV en este caso se obtuvieron valores de voltaje más bajos, ver los resultados en la Tabla 19.

Tabla 19

Evaluación de Diferentes Cargas Durante 142 Horas

	Mediana [mV]	D. Estándar	C. Variación	Mínimo [mV]	Máximo [mV]
R2	30.86	8.90	28.85%	25.88	135.57
R5	38.1	4.09	10.75%	2.07	47.46
R8	45.69	9.15	19.95%	0.05	73.1
CCM	38.37	9.21	24.00%	0.05	135.57

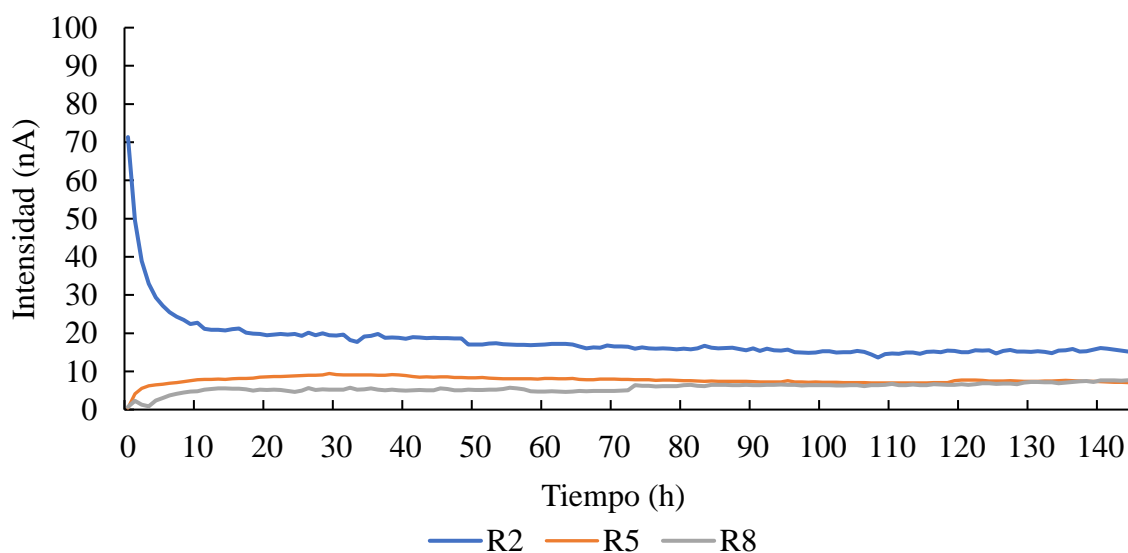
Los voltajes con cargas fueron las siguientes; R2 empezó con un voltaje de 135.57mV que fue disminuyendo con el paso del tiempo hasta los 25.88 mV, el voltaje mantuvo una mediana de $30.86 \pm 8.9\text{mV}$ con un coeficiente de variación del 28.85%; R5 por el contrario, empezó con un voltaje bajo de 2.07mV el cual fue aumentando hasta alcanzar un máximo de 47mV, con una mediana de voltaje de $38.1 \pm 4.09\text{mV}$ con un coeficiente de variación de 10.75% y el voltaje R8 tuvo un comportamiento de crecimiento exponencial el cual comenzó en 5.59 mV hasta alcanzar un máximo de 73.1mV, con un mediana de $45.69 \pm 9.15 \text{ mV}$ y coeficiente de variación de 19.95%.

El voltaje de una celda de combustible microbiana que utilizó el cultivo de cianobacterias (CIA), cuando se le conectó diferentes cargas al circuito externo fue de $38.37 \pm 9.21\text{mV}$ valor inferior al voltaje de circuito abierto $98.31 \pm 0.6\text{mV}$ habiendo una diferencia de 60mV entre ambas evaluaciones de voltaje, esto se debe a las resistencias que disminuyen la corriente que fluye a través del circuito externo, esto es conocido por caída de voltaje.

Al conocer el valor de las cargas y el voltaje se calculó la intensidad de corriente en nano amperios (nA) mediante la ley de Ohm ecuación 15. Los resultados se presentan con una línea continua de color azul para la carga R2, naranja R5 y gris para R8 en función a las horas que están ubicadas en el eje X, ver en la Figura 48.

Figura 38

Intensidad de Corriente Durante 142 Horas



Los datos de la intensidad de corriente de las diferentes cargas son detallados con la siguiente información; la mediana, desviación estándar, mínimos, máximos y coeficiente de variación, ver en la siguiente Tabla 20.

Tabla 20

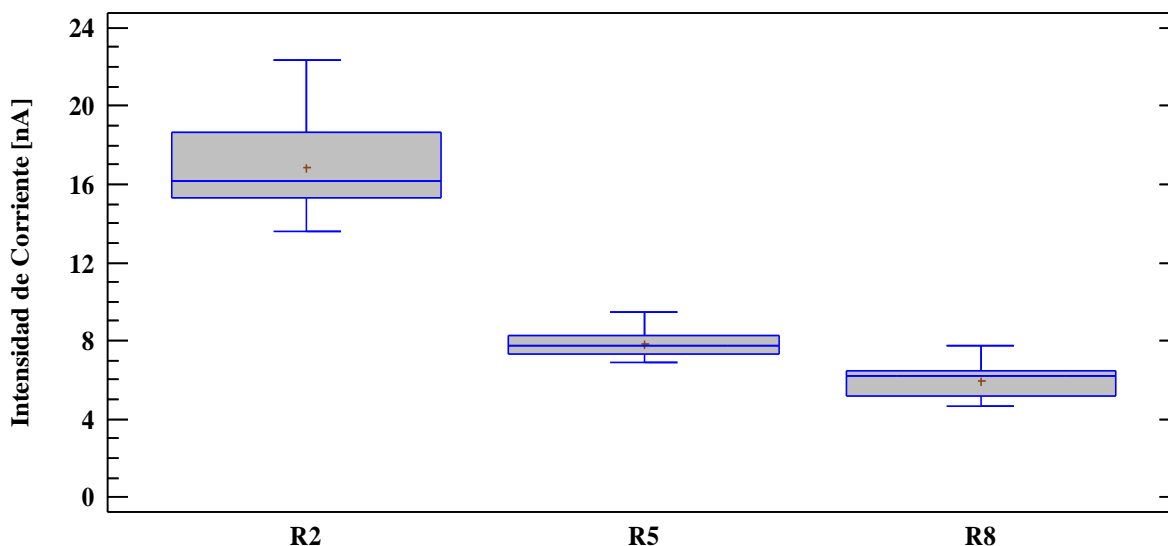
Intensidad de Corriente [nA]

	Mediana [nA]	D. Estándar	C. Variación [%]	Lc inferior [nA]	Lc superior [nA]
R2	16.14	1.78	11.09%	16.1	16.19
R5	7.69	0.63	8.29%	7.69	7.76
R8	6.16	0.85	13.89%	6.13	6.2
CCM	7.72	3.71	48.07%	6.13	16.19

La intensidad de corriente de R2 empezó con 71.35nA, al igual que el voltaje, fue disminuyendo hasta alcanzar un mínimo de 14.5nA, su mediana fue de 16.14 ± 1.78 nA con un coeficiente de variación de 11.09%; R5 empezó con un valor mínimo de 0.41nA intensidad de corriente que aumento hasta alcanzar un máximo de 9.49nA, la mediana fue de 7.69 ± 0.63 nA y un coeficiente de variación de 8.29%; R8 empezó con un mínimo de 0.01nA hasta alcanzar un máximo de 9.14nA, con una mediana de 6.16 ± 0.85 nA con un coeficiente de variación de 19.95%, observar en la Figura 39.

Figura 39

Intensidad de Corriente con las Diferentes Cargas



La intensidad de corriente de una CCM se refiere a la cantidad de corriente que se generó en el proceso de la conversión de la energía química a electricidad de los hidratos de carbono presentes en el cultivo de cianobacterias. Estos resultados determinaron, que cuando más baja sea la carga externa del circuito, mayor intensidad de corriente poseerá la CCM, se observó que la experimentación R2 fue la que mayor Intensidad de corriente obtuvo de $16.28 \pm 4.69\text{nA}$, sin embargo, R5 continuó siendo la carga más estable de las tres experimentaciones con un coeficiente de variabilidad de 10.75%.

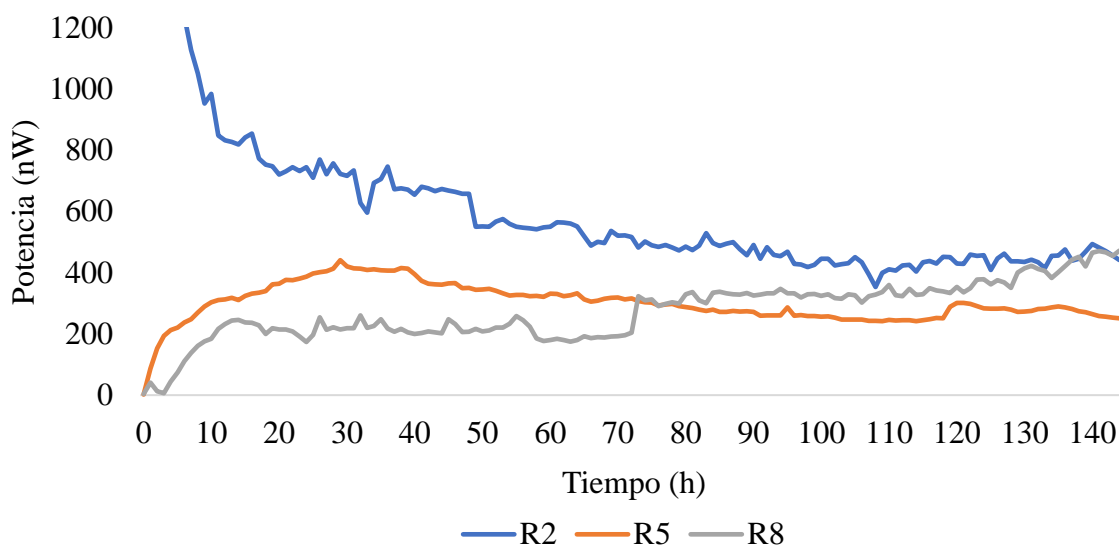
3.3.3. Potencia de CCM

La potencia se calculó aplicando la ecuación (12), se utilizó los datos del voltaje y la intensidad de corriente para obtener la potencia en nano vatios nW, la potencia puede variar al depender de varios factores como; los microorganismos, el diseño y la eficiencia de la CCM, así como de las cargas y la tasa de alimentación entre otras.

Como en las anteriores figuras se representan los resultados con líneas utilizando los mismos colores para R2, R5 y R8, en el eje Y es una escala de potencia en nW y en el eje X son las horas que fue evaluado, ver en la Figura 40.

Figura 40

Potencia de la CCM con Diferentes Cargas que Trabaja con la Muestra CIA



Se observó las curvas de la potencia con el comportamiento similar a la intensidad de corriente, en el cual, R2 empezó con una potencia de 9673.28nW que cae de forma abrupta, hasta

estabilizarse en alrededor de 500nW siendo la potencia más alta dentro de las tres experimentaciones, R5 y R8 por el contrario empezaron en 2.14nW y 3.91nW respectivamente hasta estabilizarse alrededor de 300nW, ver los resultados en la Tabla 21.

Tabla 21

Potencia de la CCM en [nW]

	Mediana [nW]	D. Estándar	C. Variación [%]	Lc inferior [nW]	Lc superior [nW]
R2	495.08	113.22	22.87%	492.5	498.31
R5	297.84	50.21	16.86%	295.68	300.93
R8	303.25	83.81	27.64%	300.25	307.4
CCM	338.34	130.9	38.69%	295.68	498.31

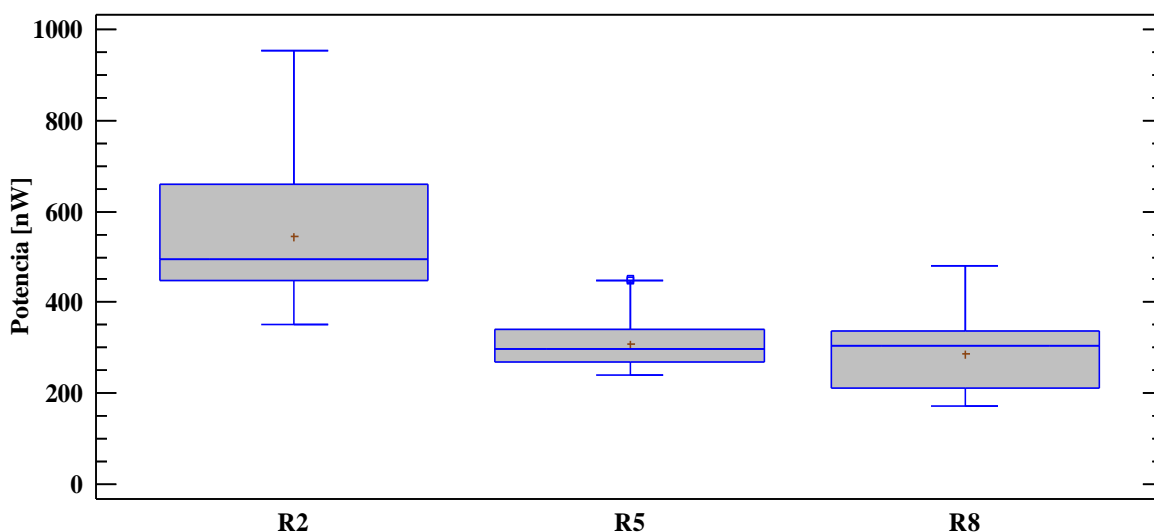
Se observó que R2 obtuvo 495.08nW una mayor potencia que R5 con 297.84nW y R8 con 303.25nW, además, la carga con mayor estabilidad es R5 con un coeficiente de variación de 16.86%, R2 con 22.87% y R8 con 27.64%, La estabilidad en la potencia es un aspecto crucial en el diseño y operación de las celdas de combustible microbianas. Según los expertos en este campo, "la estabilidad en la potencia es fundamental para la viabilidad y aplicación práctica de las celdas de combustible microbianas" (Logan et al., 2019).

La fluctuación en la producción de energía eléctrica puede afectar negativamente la eficiencia y la vida útil de la celda, así como su capacidad para generar energía constante y predecible. Por lo tanto, el monitoreo de la estabilidad en la potencia y la identificación de los factores que influyen en ella son aspectos críticos para optimizar el rendimiento y la utilidad de estas tecnologías emergentes en el campo de la energía renovable. La CCM tiene una potencia de 338.6 ± 130.9 nW con 38.69% de coeficiente de variabilidad.

En el comportamiento bioeléctrico de la CCM existieron datos atípicos que superaron los límites inferior y superior en el inicio de la experimentación, la figura de cajas y bigotes podemos ver los límites: R2 de 492.5 a 498.31nW; R5 de 295.68 a 300.93nW y R8 de 300.25 a 307.25nW con el 95% de confiabilidad, los datos son no paramétricos, por lo tanto, se utilizó la mediana como se puede observar en la siguiente Figura 41.

Figura 41

Potencia de la CCM en [nW]

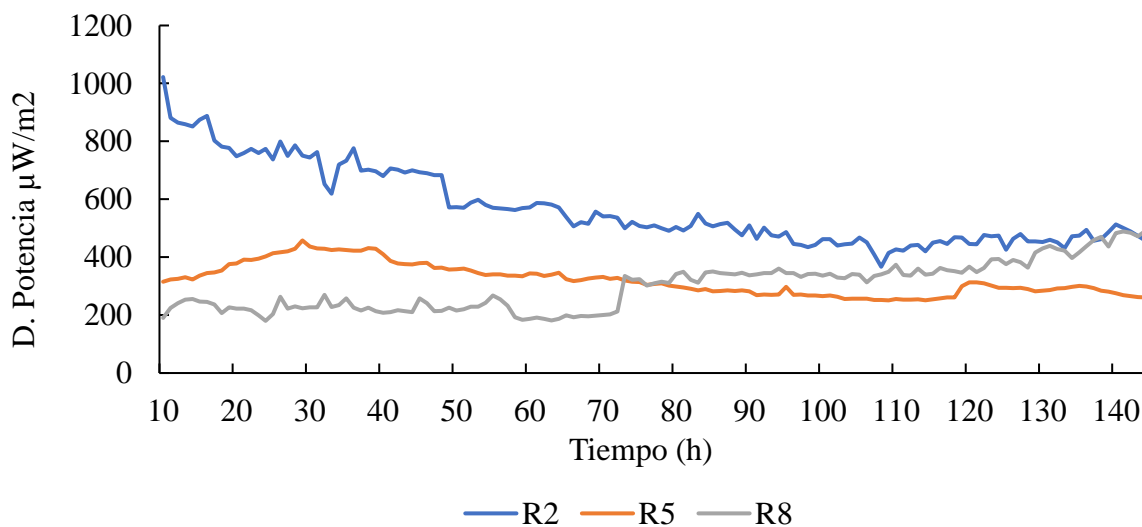


3.3.4. Densidad de Potencia de la CCM

La densidad de potencia se calculó a partir de la ecuación 17, utilizando la potencia generada y el área de la superficial del electrodo $9.62E-04m^2$, esta variable fue importante para determinar el comportamiento bioeléctrico de la CCM cuando se conectan a diferentes cargas. Los resultados de la densidad de potencia se representan en $\mu W/m^2$ con tres líneas continuas al igual que en anteriores figuras diferenciando por colores R2, R5 y R8, ver en la siguiente Figura 42.

Figura 42

Densidad de Potencia de una CCM en [$\mu W/m^2$]



Se observo que R2 tiene mayor densidad de potencia que R5 y R8, esto se debe a que R2 empieza desde una densidad de potencia muy alta de $10054.2\mu\text{W}/\text{m}^2$ como valor máximo, sin embargo, su densidad de potencia decreció hasta los $366.39\mu\text{W}/\text{m}^2$ siendo inferior a la densidad de potencia de las otras dos cargas en las últimas horas de la experimentación.

Además, la muestra R2 mantuvo una mediana de $514.57 \pm 117.73\mu\text{W}/\text{m}^2$ con un coeficiente de variación del 22.88%; la experimentación con la muestra R5 se consideró la más estable con 16.86% de coeficiente de variación, generó una densidad de potencia máxima de $468.23\mu\text{W}/\text{m}^2$ manteniendo una mediana de $309.32 \pm 52.15\mu\text{W}/\text{m}^2$.

La muestra R8 empezó con una densidad de potencia de $0\mu\text{W}/\text{m}^2$ la cual fue aumentando de forma exponencial hasta alcanzar un valor máximo de $694.25\mu\text{W}/\text{m}^2$, su coeficiente de variación es de 27.65%. Se analizó los datos de las tres resistencias diferentes obteniendo la siguiente información,

La tabla proporciona información sobre la mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, límite inferior y límite superior para cuatro mediciones de densidad de potencia en $\mu\text{W}/\text{m}^2$, obtenidas a partir de distintas experimentaciones con las celdas de combustible microbianas (CCM) a partir de las cianobacterias cultivadas, ver en la Tabla 22.

Tabla 22

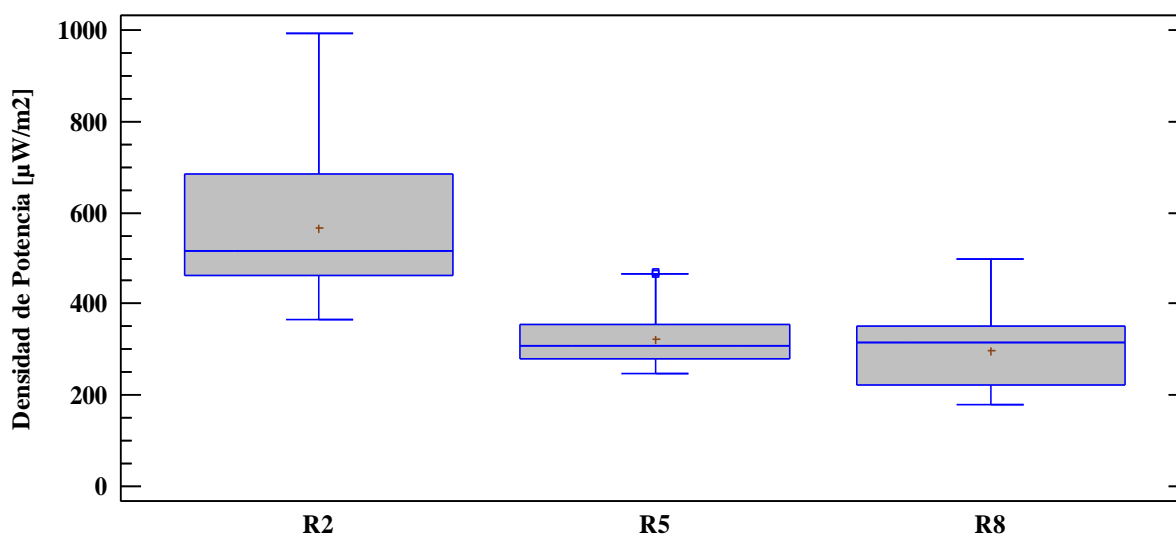
Densidad de Potencia en [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]

	Mediana [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	D. Estándar	C. de Variación [%]	Lc inferior [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]	Lc superior [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]
R2	514.57	117.73	22.88%	511.89	517.94
R5	309.32	52.15	16.86%	307.32	312.78
R8	315.98	87.36	27.65%	312.07	319.5
CCM	351.66	136.09	38.7%	307.32	517.94

La densidad de potencia de las CCM que trabajaron con las cianobacterias *Planktothrix sp* en la experimentación fueron capaz de producir una densidad de potencia de $351.66 \pm 136.09\mu\text{W}/\text{m}^2$, con el 38.7% de coeficiente de variación sobre todo en el inicio de la operación, para ver los datos de forma gráfica en la Figura 43.

Figura 43

Variabilidad de la Densidad de Potencia en [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]



Como se menciona, la densidad de potencia es un parámetro muy importante para realizar una comparación de otras investigaciones, de esta investigación se obtuvo una densidad de potencia de $0.35\text{mW}/\text{m}^2$ misma que obtuvieron Bustos & Rojas (2019) en su investigación con una CCM de una cámara sin membrana con *Vegetal E. Crassipes* como inoculo y maleza acuática con fertilizante líquido como sustrato en 72 horas de operación a 37°C siendo la densidad de potencia más bajas obtenidas. Otros autores Collazos & Montaña (2016) utilizaron una celda combustible de una sola cámara sin membrana y obtuvieron $1.85\text{mW}/\text{m}^2$ con agua residuales como inoculo y sustrato manteniendo la temperatura ambiente durante 30 días de investigación. Yuan et al. (2011) también utilizaron una CCM de una sola cámara sin membrana con algas verdeazuladas como inoculo y sustrato, obtuvieron $144\text{mW}/\text{m}^2$ en dos horas de operación a 105°C .

En la investigación de Yadav et al. (2015) mencionan que utilizaron una CCM de una cámara con membrana MIP, algas verdes como inoculo y oxígeno junto con la fotosíntesis como sustrato, obtuvieron $149.5\text{mW}/\text{m}^2$ en 60 días de operación a una temperatura de 25 a 30°C . Hay autores como Zhao et al. (2012) mencionan en su investigación trabajaron con una CCM de dos cámaras en la cual los sedimentos cumplieron la función de membrana, las cianobacterias del Lago Taihu como inoculo y una solución nutritiva como sustrato obtuvieron una densidad de potencia de $72\text{mW}/\text{m}^2$ a 90°C durante 30 horas de operación.

Analizar los resultados de investigaciones que no utilizan cianobacterias fue importante, Baniasadi et al. (2021) trabajaron una CCM de doble cámara con membrana de Nafion 115, la bacteria *Shewanella* como inóculo y Luria Bertani como sustrato, obtuvieron 144 mW/m^2 a 90°C en una hora de operación. También otras investigaciones utilizaron una CCM de doble cámara con membrana, *Synechococcus sp* y lixiviados de residuos sólidos urbanos como inóculo y microflora anaeróbica como sustrato obtuvieron 95.63 mW/m^2 a 30°C durante 24 horas (Lakshmidēvi et al., 2020).

En comparación con otras tecnologías similares, la celda de combustible microbiana diseñada tuvo un rendimiento más bajo que algunas CCM que utilizan otros microorganismos como biocatalizador. Sin embargo, hay varias razones por las que esto podría ser el caso, como las diferencias en las condiciones experimentales o la composición de los biocatalizadores utilizados. En futuros trabajos, sería importante investigar estos factores para comprender mejor por qué hay diferencias en el rendimiento entre diferentes tipos de CCMs.

En cuanto a las posibles aplicaciones de esta tecnología, la producción de electricidad a partir de cianobacterias en celdas de combustible microbianas podría tener un gran potencial en entornos donde se necesita una fuente de energía renovable y de bajo impacto ambiental. Por ejemplo, esta tecnología podría utilizarse en sistemas de generación de energía en zonas rurales o en entornos costeros donde las cianobacterias son abundantes. Además, la producción de electricidad a partir de cianobacterias podría ser una opción atractiva para la producción de energía en el espacio, ya que las cianobacterias son capaces de sobrevivir en condiciones extremas y no necesitan luz solar para crecer.

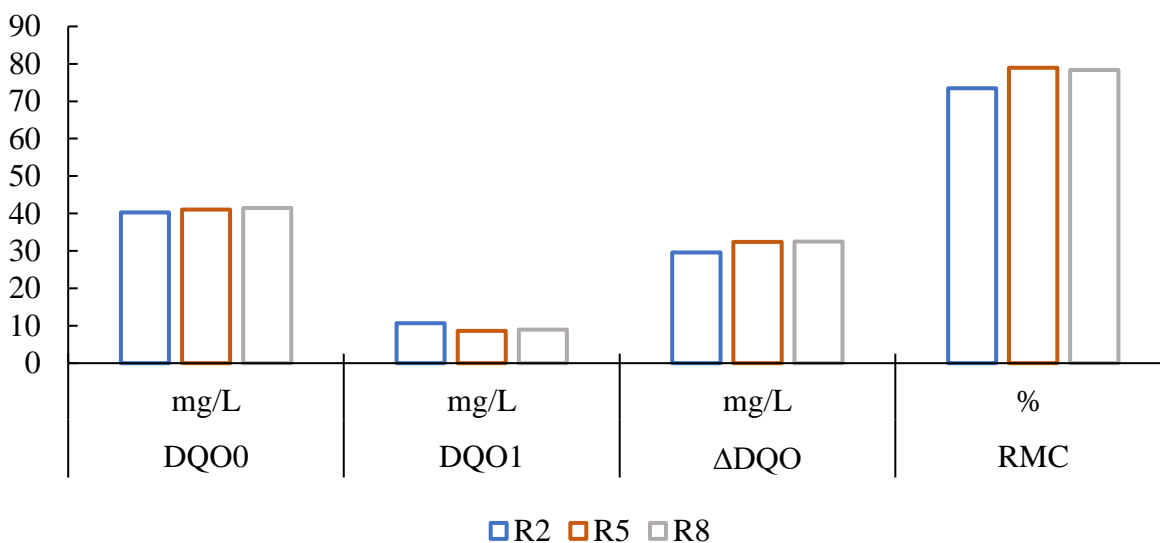
3.3.5. Porcentaje de Remoción de DQO

Conocer el porcentaje de remoción de la celda de combustible microbianas determina el impacto ambiental que tiene la aplicación de esta tecnología, se calculó la eficiencia de remoción de materia orgánica utilizando la ecuación 18, para ello, antes de cada experimentación se tomó una alícuota de 10 mL de la muestra CIA para analizar el DQO_0 inicial, esta misma muestra se introdujo en la CCM. Al finalizar la experimentación de 144 horas nuevamente se analizaron otros 10 mL para conocer el DQO_1 final, obteniendo los resultados de la siguiente Tabla 23.

Tabla 23*Remoción de DQO en [%]*

Muestras	DQO ₀ [mg/L]	DQO ₁ [mg/L]	Δ DQO [mg/L]	RMC [%]
R2	40.31	10.7	29.61	73.46
R5	41.02	8.64	32.38	78.94
R8	41.5	9	32.5	78.31
CCM	40.94	9.45	31.50	76.90

Los resultados de la muestra CIA obtuvieron un DQO₀ inicial promedio de 40.94 ± 0.59 mg/L, con el paso de los días el porcentaje DQO₀ inicial aumento 1.2 mg/L como se observa en la evaluación de R5 y R8, después del proceso de la generación bioeléctrica según las cargas se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO de $76.90 \pm 3\%$. Este resultado es prometedor, ya que es una reducción significativa de DQO puede indicar una disminución en la carga contaminante del agua, es decir una mejora en su calidad, ver los resultados en la Figura 44.

Figura 44*Remoción de DQO con Diferentes Cargas*

En el resultado se destaca, que la evaluación con la resistencia R5 que obtuvo un porcentaje del 78.94% de remoción de DQO siendo la evaluación con mayor eficiencia de las tres experimentaciones. Sin embargo, es importante señalar que aunque una eliminación de DQO en general es 76.9% porcentaje significativo, aún queda una cantidad considerable de materia orgánica en el agua tratada.

Es posible que se requieran más etapas de tratamiento o un tratamiento más prolongado para lograr una reducción aún mayor de la DQO. Además, es importante considerar que la eficacia de las celdas de combustible microbianas puede verse afectada por factores ambientales y operativos, como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes y la concentración de contaminantes. Por lo tanto, es necesario realizar más investigaciones para optimizar las condiciones de tratamiento y evaluar la viabilidad y eficacia a largo plazo de esta técnica de tratamiento de aguas residuales

La remoción del DQO es un parámetro con el cual se puede discutir con los resultados obtenidos en otras investigaciones para así conocer la eficiencia de la celda de combustible microbiana, al utilizar electrodos de materiales poliméricos PDVF Y PVA junto a las plaquetas de grafeno con los que se alcanzó un 76.9% de remoción de DQO, Collazos et al. (2016) menciona que con electrodos de grafito obtuvo un porcentaje de reducción de 59% mientras que Yaun et al. (2011) utilizando electrodos de fieltro de carbono tuvieron un porcentaje de reducción de 78.9% haciendo sus investigaciones con una CCM de una sola cámara.

Por otro lado, investigaciones con CCMs de doble cámara Baniasadi & Vahabzadeh (2021) obtuvieron 65% de remoción con electrodos de grafito, Zhao et al. (2012) con electrodos de fieltro de carbono lograron un 76.2% de remoción de DQO, investigadores como Rea et al. (2021) con barras de carbón de pilas comerciales como electrodos obtuvieron 80% de remoción y Lakshmidēvi et al., con electrodos de grafito sin recubrimiento lograron reducir el DQO un 50%.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

3.4. Conclusiones

El análisis fisicoquímico del agua manifestó que la Laguna de Yahuarcocha mantuvo un pH alcalino de 8.6 ± 0.5 y una temperatura de $22.7 \pm 1^\circ\text{C}$ estos resultados se atribuyen a la contaminación por escorrentía de agentes contaminantes y a la presencia de cianobacterias que aumenta el potencial de hidrógeno a través de la fotosíntesis. Además, la DBO₅ y DQO aumenta el fin de semana debido a la presencia de turistas.

Se determinó que la capacidad bioeléctrica de la celda de combustible microbiana varía según la muestra utilizada. El cultivo de cianobacterias CIA fue la más productiva con $98.31 \pm 0.60\text{mV}$, seguido del medio BG11, mientras que YAH presentó el voltaje más bajo de $44.41 \pm 15.58\text{ mV}$. Estos resultados indican que las cianobacterias cultivadas son un biocatalizador efectivo para maximizar la producción de energía en celdas de combustible microbianas.

El estudio manifestó que la incidencia por el uso de diferentes resistencias en la generación bioeléctrica fue que a medida que aumenta la resistencia externa aumenta el voltaje y el porcentaje de remoción de DQO. Sin embargo, la carga externa es proporcional a la intensidad de corriente y densidad de potencia, lo que significa que a medida que la carga externa aumenta, la capacidad bioeléctrica de la CCM disminuye, siendo poco eficiente debido a su alta resistencia interna.

3.5. Recomendaciones

Se recomienda monitorear en tiempo real utilizando equipos multiparámetros, que por medio de sensores permitan obtener más información del estado de la Laguna de Yahuarcocha, pudiéndose evaluar el agua durante todo el año de forma remota y evitando alterar los resultados así como también reducir el tiempo al no tener que trasladarse en cada muestreo.

Es necesario desarrollar métodos más eficientes para aislar y cultivar cianobacterias a gran escala, así como también es importante investigar como influyen factores como la temperatura, la humedad y la concentración de nutrientes en la eficiencia y rendimiento de una celda de combustible microbiana.

Se recomienda abordar diferentes aspectos claves como, trabajar en la reducción de la resistencia interna mediante la optimización de los materiales de construcción y la selección de microorganismos eficientes. Así mismo, se sugiere investigar otras metodologías que permitan reducir el tiempo de estudio de las celdas y mejorar la producción energética de los microorganismos.

Bibliografía

(n.d.).

Aelterman, P., Korneel, R., The Pham, H., Boon, N., & Verstraete, W. (2006). Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environ Sci Technol*, 3388-94. doi:10.1021/es0525511

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Quito: ARCERNNR.

Alomá, E., & Malaver, M. (2007). Análisis de los conceptos de energía, calor, trabajo y el Teorema de Carnot en textos Universitarios de Termodinámica. *Enseñanza de Las Ciencias*, 387-400. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/256971863_ANALISIS_DE_LOS_CONCEPTOS_DE_ENERGIA_CALOR_TRABAJO_Y_EL_TEOREMA_DE_CARNOT_EN_TEX_TOS_UNIVERSITARIOS_DE_TERMODINAMICA

American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd Ed.) Method 5220D: Determination of the Chemical Oxygen Demand*. Washington D.C.: American Public Health Association.

American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd Ed.) Method 5210 B: 5-Day BOD Tes*. Washington D.C.: American Public Health Association.

Angenent, L., Karim, K., Al-Dahhan, M., Wrenn, B., & Domínguez, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *TRENDS in Biotechnology*, 22(9), 477-485. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001>

Angulo Cortez, I. (2017). *Análisis de la incidencia de la cooperación entre China y Ecuador en el cambio de la matriz energética ecuatoriana*. Quito.

Bahamonte, R., & Chinchin, B. (2020). *Modificación de membranas bioinspiradas en el mejillón para celdas de combustible microbianas (MFCs) en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil*. Quito: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22011>

Baniasadi, B., & Vahabzadeh, F. (2021). The Performance of a Cyanobacterial Biomass-Based Microbial Fuel Cell (MFC) Inoculated with *Shewanella Oneidensis* MR-1. *Journal of*

- Environmental Chemical Engineering*, 9, 30.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106338>
- Bard, A., & Faulkner, L. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications* (Segunda Edición ed.). Wiley. doi:ISBN: 978-0-471-04372-0
- Bartacek, J., Zabranska, J., & Lens, P. (2007). Developments and constraints in fermentative hydrogen production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, 201-214. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/bbb.17>
- Bazdar, E., Roshandel, R., Yaghmaei, S., & Mardanpour, M. (2018). The effect of different light intensities and light/dark regimes on the performance of photosynthetic microalgae microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 261, 350-360. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241830539X>
- Borchardt, D. (2016). La contaminación aumenta en la mayoría de los ríos de América Latina, África y Asia. *El PAIS*, pp. 14-16.
- Borole, A., Hamilton, C., Vishnivetskaya, T., Leak, D., & Andras, C. (2009). Improving power production in acetatefed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems. *Biochemical Engineering Journal*, 48(1), 71-80. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X09002678>
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Hamdi, M., & Hamdi, N. (2005). Mesophilic biohydrogen production from waste of date palm trees. *International Journal of Hydrogen Energy*, 599-604. doi:DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.09.013
- Breeze, P. (2019). *Power Generation Technologies*. El Sevier. Retrieved from https://books.google.com.ec/books/about/Power_Generation_Technologies.html?id=D9qSDgTbRZoC&redir_esc=y
- Briones, M. L., Zamora, C., & Suppan, G. (2020). *Advanced few Layers Graphene Nanoplatelets - Based Electrodes with Enhanced Electrocatalytic Activity for Oxygen Reduction Reaction*. Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay. Retrieved from <https://repositorio.yachaytech.edu.ec/bitstream/123456789/240/1/ECQI0058.pdf>
- Bustos, L., & Rojas, N. (2019). Producción de Bioelectricidad por Medio de una Celda de Combustible Microbiana Fotosintética. *Universidad El Bosque*, 155. doi:<http://hdl.handle.net/20.500.12495/2568>

- Calleja, M., Varela, D., & Vicente, M. (2019). Bloom algal causado por cianobacterias: una revisión de su impacto y estrategias de control. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 54(3), 488-502. doi:<https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.3.1894>
- Caracciolo, J., Moncada, J., Aranguren, J., & Mora, A. (2015). Programa educativo ambiental para el manejo sustentable del agua en la cuenca alta del Río Pao, Estado Carabobo, Venezuela. *Agropecuaria UPEL IPC*.
- Cardona, A. (2003). *Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del Río La Soledad, Valle de Angeles, Honduras*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Carrette, L., Friedrich, K. A., & Stimming, U. (2001). Fuel cells - fundamentals and applications. *Fuel Cells*, 1, 5-39. doi:[https://doi.org/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1615-6854(200105)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G)
- Castro, M. (2011). *Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador*. Quito: CEDA.
- CELEC EP. (2021, 05 12). *Corporación Eléctrica del Ecuador*. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/contacto/direccion/2-uncategorised/47-que-es-laenergia-eolica#:~:text=Es%20la%20energ%C3%ADa%20cuyo%20origen,sol%20se%20convierte%20en%20viento>.
- CENACE. (2020). *Informe Anual*. Quito: CENACE operador nacional de electricidad.
- Cengel, Y., & Bole, M. (2011). *Séptima edición Termodinámica*. McGraw-Hill.
- Cerdá, E. (2015). *Energía obtenida a partir de biomasa*. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/38687177/CICE_83_117-140__78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DEnergia_obtenida_a_partir_de_biomasa.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=A
- Chaudhuri, S., & Lovley, D. (2003). Electricity from direct oxidation of glucose in mediator-less microbial fuel cells. *Nat Biotechnol*, 1229–1232.
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental science & technology*, 40(7), 2426-2432. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es051652w>

- Chong, M. L., Sabri, S., & Chan, E. S. (2007). Fermentative hydrogen production by mixed microflora: Effect of pH and substrate concentration. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 23-33. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s12257-005-0101-x>
- CIHH. (2006). *Procedimiento para la Medición de Sólidos Totales*. Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas , Laboratorio de Sistemas Ambientales , Panamá. Retrieved from <https://utp.ac.pa/documentos/2011/pdf/PCUTP-CIHH-LSA-211-2006.pdf>
- Cisterna, P., & Peña, D. (2018). *Determinación de la relación de DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25000 habitantes en la VIII región*.
- Coe, M., Saia, S., & Goldman, E. (2019). *Analítica de aprendizaje en la educación superior*.
- Collazos, A., & Montaña, E. (2016). Bacterial Diversity Associated with Anodic Biofilms in Microbial Fuel Cells With Wastewater. *SciELO*, 8. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Quito.
- Darkrim, F., Malbrunot, P., & Tartaglia, G. (2002). Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(2), 193-202. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901001033>
- Daud, N., Ahmad, A., Yaqoob, A., & Ibrahim, M. (2021). Application of rotten rice as a substrate for bacterial species to generate energy and the removal of toxic metals from wastewater through microbial fuel cells. *Environmental Science and Pollution Research*, 62816-62827. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15104-w>
- Do, M., Ngo, H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S., Nguyen, D., . . . Ni, B. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production. *Science of The Total Environment*, 910-920. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol Adv*, 464-82. doi:0.1016/j.biotechadv.2007.05.004
- EG&G Technical Services, Inc. (2004). *Fuel Cell Handbook*. West Virginia: U.S Department of Energy.

- Fan, Y., Sharbrough, E., & Liu, H. (2008). Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 42(21), 8101-8107.
- Farias, N. (2016). *Análisis Técnico - Económico de la Tecnología de Celdas de Combustible Microbianas para la Producción de Energías Alternas*. CIDETEQ. Retrieved from <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/80/1/An%C3%A1lisis%20t%C3%A9cnico-econ%C3%B3mico%20de%20la%20tecnolog%C3%ADa%20de%20celdas%20bioelectroqu%C3%ADmicas%20microbianas%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADas%20altern>
- Gadhamshetty, V., Johnson, D., Nirmalakhandan, N., Smith, G., & Deng, S. (2009). Dark and acidic conditions for fermentative hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 821-826. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.040>
- GADM San Miguel de Ibarra. (2018). *Actualización del Plan de Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica de la Laguna de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura*.
- Gallo, N., & Apolo, B. (2012). *Fundamentos de Fisiología*. Quito: Gráficas Ortega.
- Gerteisen et al, D. (2007). AC impedance modelling study on porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using an agglomerate model. *Journal of Power*, 1, 346-356.
- González del Campo, A., Fernández, F., & Lobato, J. (2015). *Valoración Energética y Tratamiento de Efluentes Residuales Mediante Celdas de Combustible Microbiológicas*. Universidad de Castilla la Mancha-Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas. UCLM. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10578/6531>
- González, M., Jurado, E., G. S., Aguirre, Ó., Jiménez, J., & Návar, J. d. (2003). *Cambio Climático Mundial: origen y consecuencias*. Ciencia UANL , 6(3). Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/1287/>
- Hannon, M., & Gimpel, J. (2017). The potential for cyanobacteria as a source of renewable energy. *Life*, 7(3), 27. doi:<https://doi.org/10.3390/life7030027>
- Hayakawa et al, A. (2006). Evaluating stream water quality through land use analysis in two grassland catchments: impact of wetlands on stream nitrogen concentration. *Ecological Engineering*, 617-627.

- HE, L., Du, P., Chen, Y., Lu, H., Cheng, X., Chag, B., & Wang, Z. (2017). Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 388-403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>.
- He, Z., Kan, J., Mansfeld, F., Angenent, L., & KH, N. (2009). Selvesustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria. *Environ Sci Technol*, 1648-1654.
- Hernández, A. (2019). Evaluación del crecimiento de cianobacterias obtenidas de muestras de agua de la laguna de Aculeo. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(3), 1350-1358. doi:DOI.10.15381/rivep.v30i3.15925
- Hernández, E. (2016). *Muestreo de fitoplancton en ecosistemas de agua dulce*. Diario de Medio Ambiente.
- Hernández, H., Buitrón, G., Lopez, C., & Cervantes, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales. *IWA publishing*, 9-24. Retrieved from <http://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30973>
- Hernandez, R. (2018). *Metodologías de la Investigación las rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta*. McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from https://www.google.com.ec/books/edition/METODOLOG%C3%8DA_DE_LA_INVESTIGACI%C3%93N/5A2QDwAAQBAJ?hl=es
- IEA. (2017). Retrieved from <https://www.iea.org/sankey/?c=Islamic%20Republic%20of%20Iran&s=Balance&c=World&s=Balance#?c=Ecuador&s=Balance>
- INEN. (1984). *Agua Potable. Determinación del pH*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana, Quito.
- INEN. (2000). *Agua, Calidad del Agua, Muestreo y Diseño de los Programas de Muestreo*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana, Quito.
- INEN. (2013). *Agua, Calidad del Agua, Muestreo, Manejo y Conservación de Muestras*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana, Quito.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2019). *Gestión de Agua Potable y Saneamiento*. Quito: Agencia de Regulación y Control del Agua.
- Internacional Energy Agency. (2020, Julio 28). Retrieved from http://www.iea.org/papers/2011/EV_PHEV_Roadmap.pdf

- Khan, R., & Raof, A. (2011). Gravimetric analysis. In *Analytical Chemistry*. Springer, 45-62. Retrieved from <https://www.khanacademy.org/science/chemistry/chemical-reactions-stoichiome/limiting-reagent-stoichiometry/a/gravimetric-analysis-and-precipitation-gravimetry>
- Khanal, S., Chen, W., Li, L., & Sung, S. (2004). Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(11), 1123-1131. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2003.11.002>
- Kim, B., Chang, I., Dinsdale, R., & Guwy, A. (2021). Accurate measurement of internal resistance in microbial fuel cells by improved scanning electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 137388. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137388>
- Lakshmidēvi, R., Gandhi, N., & Muthukumar, K. (2020). Carbon Neutral Electricity Production from Municipal Solid Waste Landfill Leachate Using Algal-Assisted Microbial Fuel Cell. *Springer*, 15. doi:(<https://doi.org/10.1007/s12010-019->
- Lee, Y., Miyahara, T., & Noike, T. (2002). Effect of pH on microbial hydrogen fermentation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 77(6), 694-698. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/jctb.623>
- Li, C., & Fang, H. (2007). Inhibition of heavy metals on fermentative hydrogen production by granular sludge. *Chemosphere*, 67(4), 668-673. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506014172>
- Logan, B. (2008). *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cXnc2wMrE9gC&oi=fnd&pg=PR7&dq=logan+be+2008+microbial+fuel+cells&ots=CoWRZPHr9M&sig=5Il6RhtneacDrgaBtWwbVFqTKiE>
- Logan, B. (2010). Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(6), 1665-1671. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2378-9>
- Logan, B., & Oh, S. (2006). Membrana de intercambio de protones y áreas de superficie de electrodos como factores que afectan la generación de energía en celdas de combustible microbianas. *Microbiol Biotechnol*, 162-169. doi:10.1007/s00253-005-0066-y

- Logan, B., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H., Sleutels, T., Jeremiasse, A., & Rozendal, R. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environmental science & technology*, 42(23), 8630-8640. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es801553z>
- López, M. (2021). *Estudio de casos del Conocimiento Didáctico del Contenido sobre la Ley de Ohm en profesores de Física de Secundaria en ejercicio*. Universidad de Costa Rica. Retrieved from <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84468>
- Lui, H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environ Sci Technol*, 2281-5. doi:10.1021/es034923g
- Mantilla Quijano, G., & González, H. (1977). *Intensidad de la corriente eléctrica*.
- Medina, S. A., & Zapata, M. (2017). Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio. *Fundacion Universitaria de América*. Retrieved from <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6032/1/5152236-2017-1-IQ.pdf>
- Mejía, L., Castro, A., & Meneses, O. (2002). *La mecánica: una propuesta didáctico -alternativa de aprendizaje significativo a partir del concepto de energía: una mirada desde el enfoque de sistemas e interacciones*. Universidad de Antioquia .
- Melo, T., Neto, J., & Silva, J. (2021). Integración de la instrumentación virtual en la enseñanza de la adquisición de datos y el curso de sistemas de interfaz. *Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 16(2), 154-160. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9458315/>
- Métadier, M., & Bertrand, J. (2011). Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm event loads in combined sewer systems. *Water Science and Technology*., 63(12), 2983-2991.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales*. FreeLibros.
- MICSE. (2013). *Consejo Sectorial de los Sectores Estratégicos, Catálogos de Políticas Sectoriales*. Quito.

- Mikkola, M. (2001). *Experimental Studies on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks*. Helsinki University of Technology. Retrieved from <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2020120448266>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2000). La situación actual y los problemas persistentes y previsibles. In *Libro Blanco del Agua*. España: Centro de Publicaciones. Retrieved from https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan%20de%20Recuperaci%C3%B3n%20del%20J%C3%ACar/Cap.3_part2._Libro_blanco_del_agua.pdf
- Morales, A., & Guevara, V. (2022). *Evaluación de Cianobacterias en el Lago Eutrófico Yahuarcocha por medio de Estudio de Secuencias de ADN*. Ibarra: UTN.
- Mu, Y., Zheng, X., Yu, H., & Zhu, R. (2006). Biological hydrogen production by anaerobic sludge at various temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(6), 780-785. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.06.016>
- Nava, P., & Castillo, M. (2018). Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de las sostenibilidad: Agua, energía y contaminación. *Revista de Ingeniería Innovativa*, 18-34.
- O'Callaghan, M., & Wright, D. (2023). Inoculation with microorganisms. *Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00220-2>.
- Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248121000874>
- Ochoa, M. E. (2017). *Evaluación del Crecimiento de Cianobacterias en Relación a los Parametros Fisico - Químicos del Agua en el Lago Yahuarcocha*. Ibarra: Universidad Tecnica del Norte. Retrieved from <http://n9.cl/d2r4e>
- Oh, S., Min, B., & Logan, B. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science Technology*, 38(18), 4900-4904.
- Olguín et al., E. (2010). *Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México*. Veracruz, México.

- ONU. (2015). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Santiago: Naciones Unidas.
- ONU. (2021). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. Unesco. Retrieved from <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es/download-report>
- Organización de las Naciones Unidas. (2017). *La importancia del agua, su conservación y el desarrollo de recursos para llevarla a lugares donde no tienen acceso o está contaminada*. ONU.
- Ortiz, N. I., Contreras, E., & Montes, M. A. (2019). Producción de hidrógeno a partir de aguas residuales y su aprovechamiento energético. *Una revisión. Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 305-327.
- Pabón, G., Reascos, D., Yépez, L., Oña, T., Velarde, E., Vásquez, L., & Molina, P. (2012). *Actualización del plan de manejo integral de la microcuenca hidrográfica de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura*. Ibarra. Ibarra.
- Pandey, P., Shinde, V., Deopurkar, R., Kale, S., Patil, S., & Pant, D. (2016). Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Appl. Energy*, 168, 706-723.
- Panwar et al, N. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1513-1524.
- Pucachaqui, M. (2019, Septiembre). *Análisis del efecto sobre el crecimiento económico del incremento de la producción de energía renovable en el Ecuador para el periodo 1970-2016*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20485/1/CD%209976.pdf>
- Purcell, E. (2005). *Berkely Physics Course: Electricidad y Magnetismo*. Barcelona: Reverte, S.A. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=zAHCeKH4RYUC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Rea, S., Bahamonte, R., Zurita, D., & Cevallos, C. (2021). Construction and Performance of a Microbial Fuel Cell Made with Low-cost Materials. *Universidad Central del Ecuador*, 14. doi:10.26807/ia.vi.193
- Republica del Ecuador . (2017). *Plan Nacional Toda una Vida*. Quito.

- Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013, abril 26). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *SciELO*, 24, 17-28. doi:10.4067/S0718-07642013000600004
- Reynolds, C., & Walsby, A. (1975). Water-Blooms. *Biological Reviews*, 50, 437-481. doi:http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-185X.1975.tb01060.x
- Röder, M. (2019). 12-Bioenergy. *ScienceDirect*, 379-398.
- Saha, T., Protidad, A., Zohora, F., & Salimula, A. (2019). Aplicación de Celda de Combustible Microbiana (MFC) para la generación de electricidad a Partir del Vertido de Basura e Identificación de Posibles Bacterias Electrogénicas. *Avances en Biotecnología Industrial*, 9. doi:10.24966 / AIB-5665/100010
- Sampeiro, J., & Martínez, A. (2010). BIOENERGÍA. *Ciencia*, 30-32.
- Sánchez, E. (2022). *Cultivo de microalgas en agua de enfriamiento de la industria cementera y agua residual doméstica como estrategia para la producción de carbohidratos*. Upemor. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.upemor.edu.mx/posgrados/documentos/tesis/T.%204890%20Ortiz%20S%C3%A1nchez,%20Edwin.pdf
- Sánchez, G., Flores, L., & Martínez, E. (2016). Adaptación de microorganismos a ambientes extremos. *Ciencia UANL*, 41-46. Retrieved from https://www.redalyc.org/jatsRepo/422/42246503006/html/index.html
- Sánchez, M., González, T., Ayora, T., Martínez, Z., & Pacheco, N. (2017). ¿Qué son los microbios? *Ciencia*, 68(2).
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Leropoulos, I. (2017). Microbial Fuel Cells: From Fundamentals to Applications. A review. *Power Sources*, 1-20. doi:DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109
- Schertenleib, A., Sigrist, J., Friedrich, M., Ebi, C., Hammes, F., & Marks, S. (2019). Construction of a Low-cost Mobile Incubator for Field and Laboratory Use. *Visualized Experiments*, 145, 1-17. Retrieved from https://www.jove.com/video/58443
- Schmidt, K. (2015). Why Combustion are always exothermic, Yielding About 418 per Mole of O₂. *Chemical Education*, 2094-2099.
- Senplades. (2017, Septiembre 22). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida*. Quito.

- Seow, T., Lim, C., Md Nor, M., Mubarak, M., Lam, C., Yahya, A., & Ibrahim, Z. (2016). Review on Wastewater Treatment Technologies. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 11(1), 111-126. Retrieved from www.ripublication.com/ijaes16/ijaesv11n1_08.pdf
- Sikes, R. (1975). Theoretical heterotrophic yields. *Journal- Water pollution Control Federation*, 47, 591-600.
- Srebotnjak, T., & Hardi, P. (2011). Prospects for sustainable bioenergy production in selected former communist countries. *Ecological Indicators*, 11(5), 1009-1019.
- Surya Ramadan, B., & Purwono. (2017). Challenges and opportunities if microbial fuel cells (MFCs) technology development in Indonesia . *MATEC*.
- Swanwick, E. (2017). Defining and Monitoring Power Measurement in Elite Swimmers. *American Journal of Sports Science and Medicine*, 57-63.
- Torres, C., Montañez, L., Ruiz-Valdiviezo, V., & Oropeza, M. (2017). Células de combustible microbianas: fundamentos, diseño y aplicaciones. *Mexicana de Ingeniería Química*, 11(27), 11-27. doi: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642017000200009&lng=es&tlng=en.
- UNESCO. (2021). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos Hídricos en el Mundo*.
- Universo. (2020, Diciembre 12). Entregan primer informe sobre situación actual de la laguna de Yahuarcocha. *El Universo*, p. 1. Retrieved from <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/12/12/nota/8080999/entregan-primer-informe-sobre-situacion-actual-laguna-yahuarcocha/>
- Valderrama, J. (2018). *Análisis de la situación de las tarifas de servicio público de electricidad en Panamá Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología*. Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología IDI-UNICYT.
- Valencia, M. (2018). *Evaluación de Generación de Electricidad y Remoción de Materia Orgánica en Células de Combustible Microbiana en Aguas Residuales de Camal*. Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Posgrado, Perú. Retrieved from http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7944/Valencia_Pacho_Marleni%20Yovanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Varela, I. (2019). *¿Qué es ánodo y el cátodo?* Oviedo: Lifeder-Universidad de Oviedo .

- Velasquez Orta, S., Curtis, T., & Logan, B. (2009). Energy from algae using microbial fuel cells. *Biotechnol Bioeng*, 1068–1076.
- Wang, J., & Wan, W. (2009). Factors influencing fermentative hydrogen production: a review. *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 799-811. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.015>
- Wilson, J., Buffa, A., & Lou, B. (2020). *Collage Physics Essentials* (Vol. 2). Eighth Edition.
- Wirth, R., Kovács, E., Maróti, G., Bagi, Z., Rákhely, G., & Kovács, K. L. (2012). Characterization of a biogas-producing microbial community by short-read next generation DNA sequencing. *Biotechnology for Biofuels*, 5(41), 19. Retrieved from <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-41>
- Yadav, A., Nayak, S., & Acharya, C. (2015). Algal-assisted Microbial Fuel Cell for Wastewater Treatment And Bioelectricity Generation. *Energy Sources*, 9. doi:<https://doi.org/10.1080/15567036.2011.576422>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J., . . . Bates, P. (2020, noiembre 29). *topographic-map.com*. doi:10.1002/2017GL072874
- Yaqoob, A., I. M., Yaakop, A., & Ahmad, A. (2021). Application of microbial fuel cells energized by oil palm trunk sap (OPTS) to remove the toxic metal from synthetic wastewater with generation of electricity. *Applied Nanoscience*, 1949-1961. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s13204-021-01885-6>
- You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Liu, H., Jiang, J., & Zhao, S. (2008). Increased sustainable electricity generation in up-flow air-cathode microbial fuel cells. *Biosens Bioelectron*, 1157-60. doi:10.1016/j.bios.2007.10.010
- Yuan, Y., Chen, Q., Zhou, S., Zhuang, L., & Hu, P. (2011). Bioelectricity Generation and Microcystins Removal in a Blue-green Algae Powered Microbial Fuel Cell. *Elsevier*, 5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.042>
- Zhang, J., Zhao, P. L., You, S. J., jiang, J. Q., & Ren, N. (2008). Continuous electricity production from leachate in a novel upflow. *Water Science & Technology*, 1017-1021. Retrieved from <https://doi.org/10.2166/wst.2008.063>
- Zhao, J., Li, X. F., Ren, Y. P., Wanga, X. H., & Jianb, C. (2012). Electricity generation from Taihu Lake cyanobacteria by sediment microbial fuel cells. *SCI Society of Chemical Industry*, 1567-1573.

- Zhao, J., Li, X.-F., Ren, Y.-P., Wang, X.-H., & Jian, C. (2012). Electricity Generation from Taihu Lake Cyanobacteria by Sediment Microbial Fuel Cells. *J Chem Technol Biotechnol* , 7. doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.3794>
- Zhu, G., Chen, G., Yu, R., Li, H., & Wang, C. (2016). Enhanced Simultaneous Nitrification/denitrification in the Biocathode of a Microbial Fuel Cell Fed with Cyanobacteria Solution. *Elsevier*, 51, 9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.11.004>

Anexos

Anexo 1

Botellas de Vidrio Ámbar de 1.5L de Tapa Blanca



Anexo 2

Enjuague de Botellas de Vidrio



Anexo 3

Recolección de Muestras



Anexo 4

Pruebas de Fugas y Hermetizar las CCMs

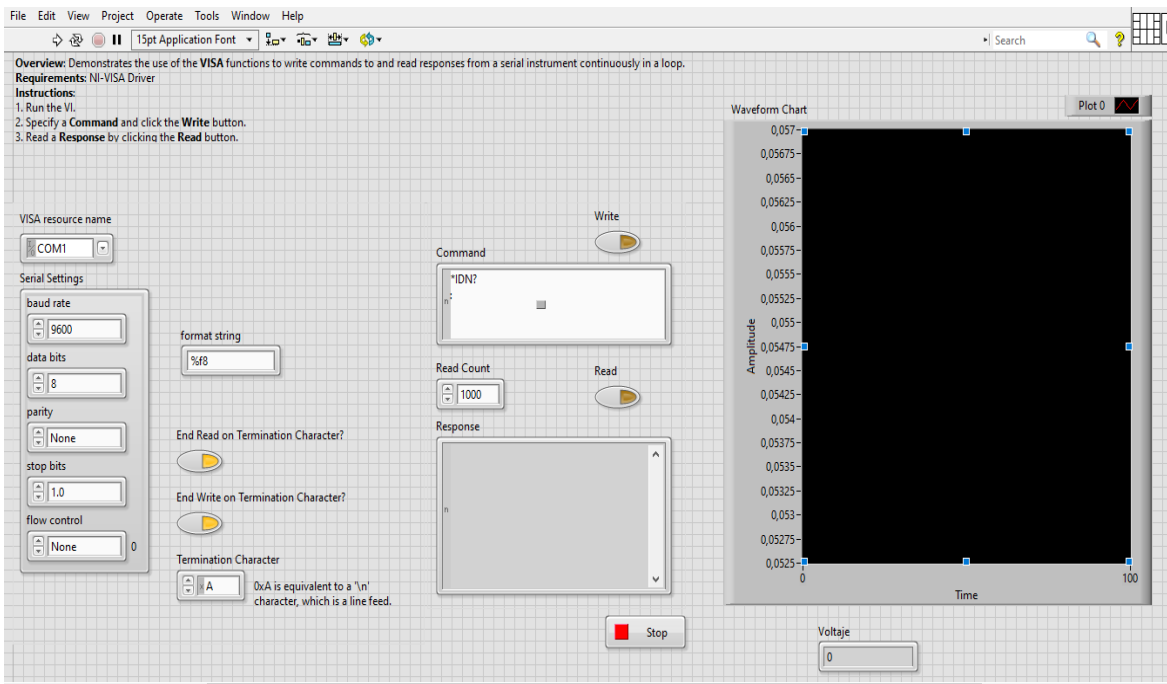


Nota. Se trabajó las superficies planas para mayor contacto.

Anexo 5*Incubador de Control de Ambiente Cerrado***Anexo 6***Múltímetros Utilizados en la Adquisición de Datos*

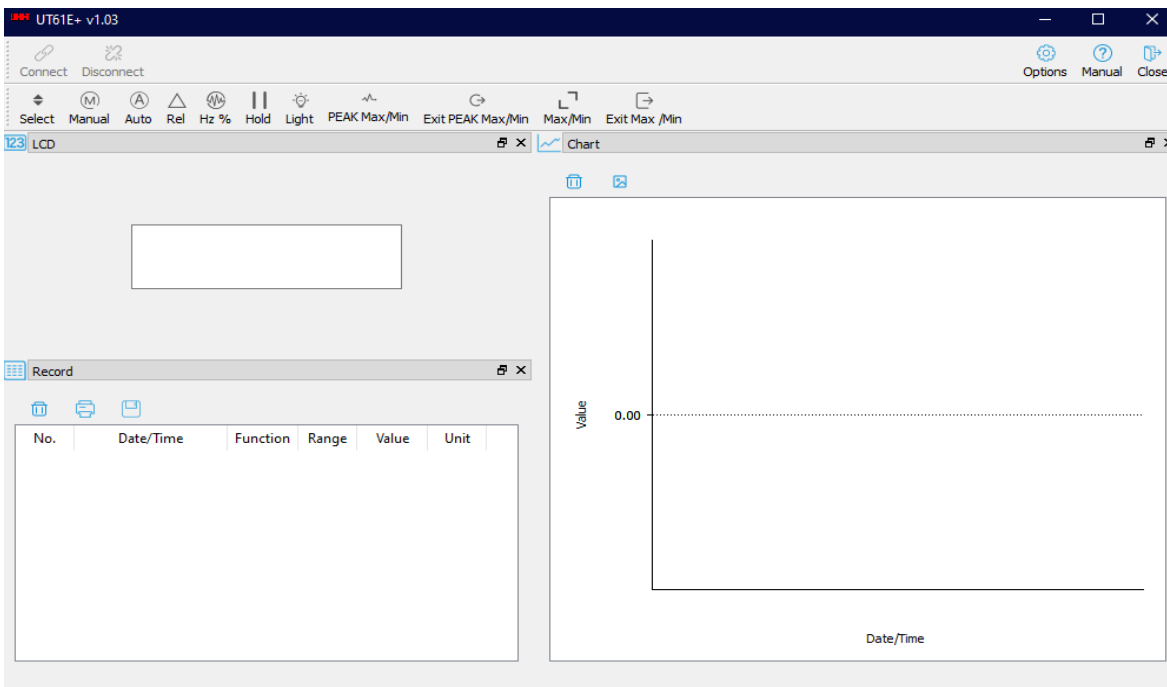
Anexo 7

Interfaz Gráfica de LabVIEW 2019



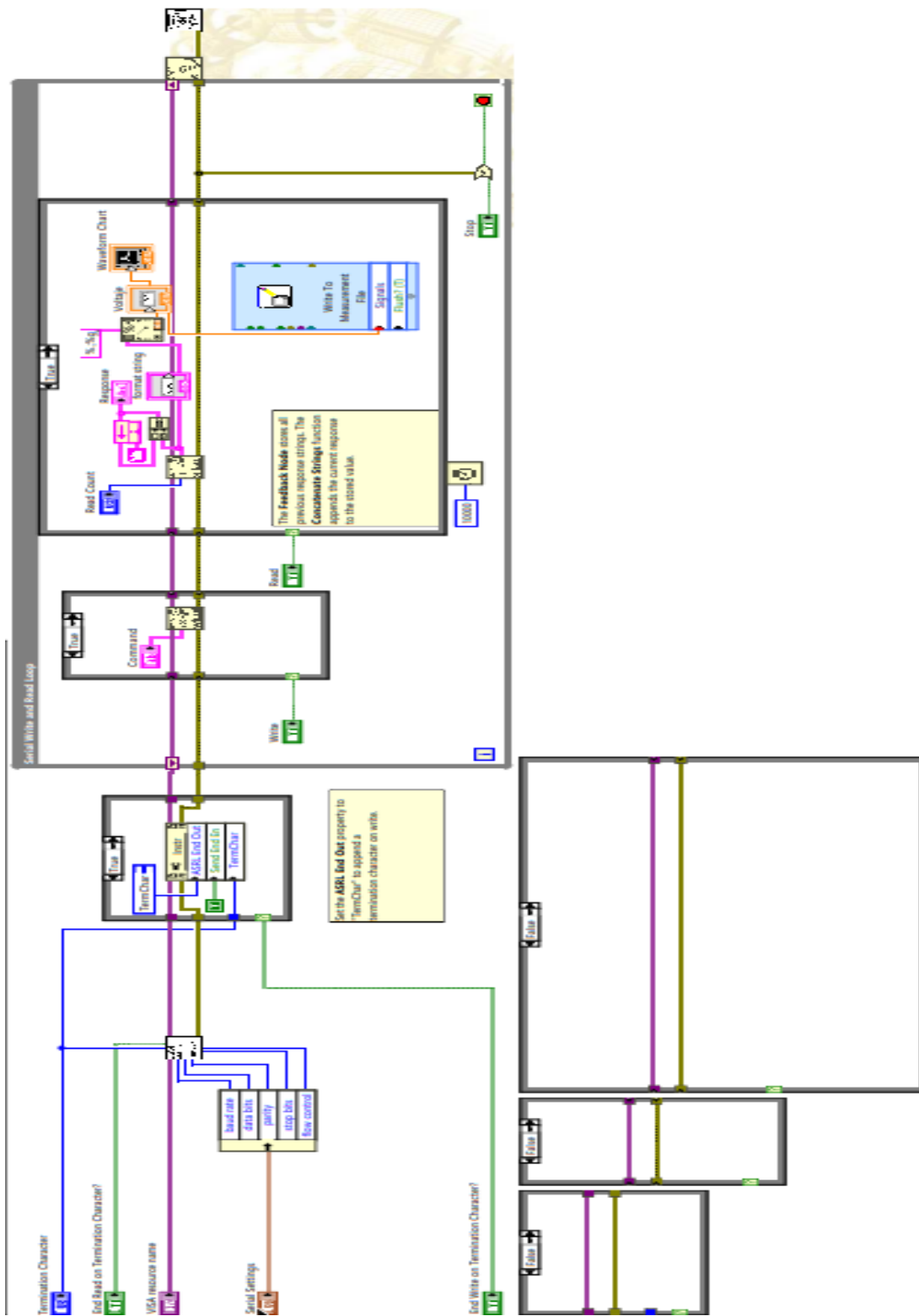
Anexo 8

Interfaz de Adquisición de Datos UNIT



Anexo 9

Programación en LabVIEW 2019



Nota. Para obtener el archivo de la programación contactarse al correo rsnavarretel@utn.edu.ec

Anexo 10

Protocolo para la Preparación del Medio de Cultivo BG11



UNIDAD DE MICRO Y MACROALGAS PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PROTOCOLOS

Preparación medio de cultivo BG11 para cianobacterias

Se prepara a partir de 4 soluciones stock

Stock 1

Utilizar EDTA (tritriplex) di sódico 0.1 g/L; Citrato férrico de amonio 0.6/L; Ácido cítrico 0.6g/L; Cloruro de calcio 3.6 g/L

Stock 2

Sulfato de Magnesio heptahidratado 7.5 g/L

Stock 3

Fosfato Monohidrógeno di potásico 3.05 g/L

Stock 4

Ácido Bórico	2.86 g/L
Cloruro de Manganeso tetrahidratado	1.82 g/L
Sulfato de Zinc heptahidratado	0.222 g/L
Sulfato de Cobre pentahidratado	0.079 g/L
Cloruro de Cobalto hexahidratado	0.05 g/L
Molibdato de Sodio dihidratado	0.391 g/L

Por cada litro de medio BG11 agregar:

Stock 1	10 ml
Stock 2	10 ml
Stock 3	10 ml
Stock 4	1 ml
CO ₃ Na ₂	Pesar 0.02 gr y agregar en el momento de preparación del medio
NaNO ₃	Pesar 1.5 gr y agregar en el momento de preparación del medio

Ajustar pH a 7.5 y luego autoclavar. El pH final queda aproximadamente a 7.1, el medio tiende a precipitar