



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Industrial

Autor:

Huilca Modumba, Luis Angel

Tutor:

Ing. Córdova Suarez, Manolo Alexander. Mgs, PhD.

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Luis Angel Huilca Modumba**, con cédula de ciudadanía **0250135522**, autor del trabajo de investigación titulado: **Generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 27 días del mes de mayo de 2025.



Luis Angel Huilca Modumba
C.I: 0250135522

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

En la Ciudad de Riobamba, a los 10 días del mes de ABRIL de 2025, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **LUIS ANGEL HUILCA MODUMBA** con CC: **0250135522**, de la carrera **INGENIERÍA INDUSTRIAL** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **“GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA DE TRIPLE ÁNODO”**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Ing. Manolo A. Córdova S.

TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación: Generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo, presentado por Luis Angel Huilca Modumba, con cédula de identidad número 0250135522, bajo la tutoría del tutor Ing. Manolo Alexander Córdova Suarez; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación.

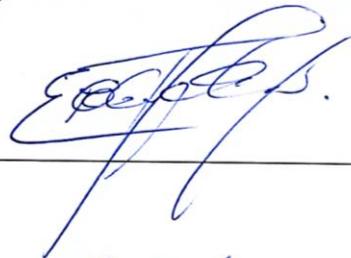
Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 27 días del mes de mayo de 2025.

Ing. Vicente Soria Granizo, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Fidel Vallejo Gallardo, Ph.D.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Omar Cabrera Escobar, Ph.D.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



CERTIFICADO ANTIPLAGIO

Que, **Huilca Modumba Luis Angel** con CC: **0250135522**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA DE TRIPLE ÁNODO”** cumple con el 8%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO MAGISTER**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de mayo de 2025.



Ing. Manolo Alexander Córdova S, Mgs.

TUTOR

DEDICATORIA

A mi amada madre Sonia Modumba y mi audaz padre Oracio Huilca,

Quienes, con su entrega, dedicación y su arduo trabajo en el agro me brindaron la oportunidad de haber estudiado esta carrera, el haberme inculcado los valores de sinceridad, honestidad, respeto e integridad, mismos que han sido la luz que han guiado mis pasos hasta coronar este logro.

A mis hermanos, Jonathan y Pamela,

Su incondicional compañía y apoyo moral fueron el combustible necesario e idóneo para seguir día a día en mi desarrollo personal y universitario.

A mi novia, Michelle,

Su paciencia y apoyo incondicional marcaron un antes y un después en mi vida y ser la prueba más fehaciente que en realidad, ¡Siempre llegarán personas y días mejores!

Mis amigos, Angel, Isaac y Thalia,

Por hacer que las despedidas no dolieran tanto al salir de casa y saber que siempre que regrese, tendré a los hermanos que la vida me regaló.

Este logro también es de ustedes y por haber formado parte de esta maravillosa etapa de mi vida y recordarles que siempre estaré eternamente agradecido con cada uno de vosotros.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, a mi virgencita de la Nube, mi Patrona Santa Rita de Casia y mi Bermejo de Oro, por sus bendiciones y ser la fortaleza espiritual de esta maravillosa etapa de mi vida.

A mis amados padres Sonia y Oracio, sin duda alguna sin su constante apoyo y aliento este logró no estaría haciéndose realidad.

A la Universidad Nacional de Chimborazo y la carrera de Ingeniería Industrial, por haberme la abierto las puertas de su institución y brindarme la oportunidad de formarme académicamente donde hoy por hoy es considerada una de las universidades TOP del Ecuador.

A mi tutor, Ing. Manolo Córdova, por su inigualable y tan acertada orientación profesional en la elaboración de este trabajo.

A la Ing. Magdalena Paredes, quien siempre tuvo la generosidad de abrir las puertas de su empresa cada vez que fue necesario y fue de vital importancia para el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, el Ing. Ulises Sánchez y la Ing. Karen Tirado, cuyo apoyo y orientación metodológica fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

A todos y cada uno de ustedes mi más profundo y debido agradecimiento; ya que sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible.

Con estima y consideración, Luis Huilca.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Planteamiento del Problema	16
1.1.1 Descripción del Problema.....	16
1.1.2 Formulación del Problema.....	17
1.2 Delimitación	17
1.2.1 Delimitación del Contenido.....	17
1.2.2 Delimitación Temporal.....	17
1.2.3 Delimitación Espacial.....	18
1.3 Justificación	18
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo General.....	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Enfoque teórico.....	20
2.2 Antecedentes.....	20

2.3	Fundamentación Teórica	22
2.3.1	Aguas residuales en el proceso de lavado de autos de las lubricadoras	22
2.3.2	Celdas de Combustible Microbiana (CCM)	22
2.3.3	Generación de energía eléctrica en una CCM	24
2.3.4	Clasificación de las CCM	28
2.3.5	Materiales empleados en las CCM-TA	30
2.3.6	Tipo de sustrato utilizado en las CCM	33
2.3.7	Construcción de la CCM-TA.....	33
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		35
3.1	Enfoque.....	35
3.2	Tipo de Investigación	35
3.3	Diseño de la Investigación.....	35
3.4	Población y Muestra	36
3.4.1	Población	36
3.4.2	Muestra	36
3.5	Técnicas e Instrumentos de Investigación	36
3.5.1	Técnicas	36
3.5.2	Análisis fisicoquímico de la muestra.....	39
3.5.3	Obtención de los electrodos (barras de grafito).....	40
3.5.4	Activación de las Membranas de Intercambio de Protones.....	42
3.5.5	Activación de los electrodos (barras de grafito).....	44
3.5.6	Evaluación de CCM-TA – Voltaje	45
3.5.7	Instrumentos	46
3.5.8	Identificación de Variables	47
3.5.9	Procedimiento de la Investigación.....	48
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		49
4.1	Resultados.....	49

4.2	Recursos empleados en el método tradicional.....	49
4.3	Diseño y construcción de la CCM-TA	50
4.4	Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual.....	56
4.5	Medidas electroquímicas.	56
4.5.1	Voltaje producido	56
4.5.2	Curva de polarización.....	58
4.5.3	Densidad de Potencia.....	58
4.5.4	Discusión de los resultados.....	59
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		63
5.1	Conclusiones.....	63
5.2	Recomendaciones.	64
BIBLIOGRAFÍA		65
ANEXOS		73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de parámetros de desempeño de diferentes configuraciones en CCM	32
Tabla 2 Parámetros fisicoquímicos analizados en el Laboratorio	40
Tabla 3 Operacionalización de la Variable Independiente	47
Tabla 4 Operacionalización de la Variable Dependiente	47
Tabla 5 Recursos financieros empleados en el método tradicional	49
Tabla 6 Identificación fisicoquímica del agua residual del proceso de lavado de autos	56
Tabla 7 Comparación con otros resultados.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Partes principales de una CCM convencional (doble cámara)	23
Figura 2	Generación de electricidad en una CCM	25
Figura 3	Típica Curva de Polarización de una CCM	27
Figura 4	Tipo de CCM según la configuración del electrodo	29
Figura 5	Lavadora y Lubricadora "MAGBLAD"	38
Figura 6	Toma de la muestra del Agua Residual del proceso de lavado de autos	39
Figura 7	Extracción de barras de grafito (electrodos)	41
Figura 8	Prueba de Circuito Abierto para los electrodos	42
Figura 9	Activación de la Membrana de Intercambio de Protones	43
Figura 10	Activación de electrodos (barras de grafito)	45
Figura 11	Tarjeta de adquisición de datos	46
Figura 12	Vista Isométrica del prototipo de la CCM de Triple Ánodo	50
Figura 13	Piezas que constituyen las cámaras de la CCM-TA	51
Figura 14	Cámara Anódica y Catódica Ensamblada	52
Figura 15	Ensamble Estructural de la CCM-TA	52
Figura 16	Diagrama de Circuito para la CCM-TA	53
Figura 17	CCM-TA en funcionamiento	54
Figura 18	CCM-TA conecta a la Tarjeta de Adquisición de datos	55
Figura 19	Voltaje producido	57
Figura 20	Curva de Polarización Generada	58
Figura 21	Densidad de Potencia	59

RESUMEN

El crecimiento sostenido de la demanda energética a nivel mundial ha impulsado el desarrollo de tecnologías basadas en fuentes renovables. Entre estas, las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) destacan por su capacidad de generar electricidad a partir de compuestos orgánicos mediante la acción de microorganismos. Este estudio evaluó el desempeño de una Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo (CCM-TA) a escala de laboratorio, utilizando materiales reciclados y de bajo costo, con el objetivo de promover soluciones sostenibles. Se empleó como sustrato agua residual proveniente del lavado de vehículos de la empresa MAGBLAD, combinada con una solución de ferricianuro de potasio ($K_4[Fe(CN)_6]$) y fosfatos (PO_4^{3-}) como electrolito. La celda operó en condiciones climáticas de la ciudad de Riobamba y presentó un voltaje máximo de 142,85 mV y un mínimo de 49,51 mV. El sistema, con un volumen total de 216 cm³, integró electrodos de grafito reciclados y una Membrana de Intercambio de Protones (MIP) de poliéster activada con NaOH. Además, se incorporó un circuito electrónico con convertor ADS1115 y una pantalla LED para el monitoreo en tiempo real. Los resultados reflejaron una eficiencia electroquímica constante, sin pérdidas de voltaje evidentes durante un periodo continuo de 24 días de funcionamiento.

Palabras clave: Celdas de Combustible, Energías Alternativas, Reciclaje, Agua de proceso.

ABSTRACT

The sustained growth of energy demand worldwide has driven to the development of technologies based on renewable sources. Among these, Microbial Fuel Cells (MFCs) stand out for their ability to generate electricity from organic compounds through the action of microorganisms. This study evaluated the performance of a Triple Anode Microbial Fuel Cell (MFC-TA) on a laboratory scale, using recycled and low-cost materials, with the aim of promoting sustainable solutions. Waste water from the MAGBLAD company's vehicle wash was used as substrate, combined with a solution of potassium ferricyanide ($K_4[Fe(CN)_6]$) and phosphates (PO_4^{3-}) as electrolyte. The cell operated in climatic conditions of the city of Riobamba and presented a maximum voltage of 142.85 mV and a minimum of 49.51 mV. The system, with a total volume of 216 cm³, integrated recycled graphite electrodes and a NaOH-activated polyester Proton Exchange Membrane (PEM). In addition, an electronic circuit with ADS1115 converter and a LED display for real-time monitoring were incorporated. The results reflected constant electrochemical efficiency, with no evident voltage losses during a continuous 24-day period of operation.

Keywords: Fuel Cells, Alternative Energies, Recycling, Process Water.



Tatiana Elizabeth
Martinez Zapata



Reviewed by:
Mgs. Tatiana Martínez Zapata
ENGLISH PROFESSOR
C.C: 0605777192

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La humanidad ha utilizado a los combustibles fósiles como el medio por el cual se cubre el mayor porcentaje de la demanda energética mundial (Alzate-Gaviria et al., 2008). El uso de los combustibles fósiles presenta las desventajas de su inminente escasez y los daños al ambiente que su uso genera, es por esto por lo que es indispensable encontrar fuentes alternativas de energía, en este trabajo se plantea la construcción de una Celda de Combustible Microbiano de triple ánodo a fin de generar energía eléctrica empleando como sustrato el agua residual del proceso de lavado de autos en la lavadora y lubricadora MAGBLAD. Como muestra tangible de lo dicho anteriormente, las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) o Microbial Fuel Cell (MFC) por su traducción al inglés, se muestra al mundo como una tecnología amigable al ambiente, protegiendo al suelo, aire, agua y además de brindar un beneficio social (Mohan, 2019).

El agua del proceso de lavado de autos contiene materia orgánica viva e hidrocarburos en un porcentaje significativo (Prieto Díaz, 1999), que podrían ayudar con el transporte de iones y posterior generación de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana de triple ánodo, sin embargo, las regulaciones ambientales solo se limitan a que las empresas de este sector cumplan con los límites establecidos en el TULSMA realizando tratamiento de aguas y no con la generación de energía limpia con aguas residuales de proceso (Ríos, 2016). Además el poco conocimiento en estas áreas obligan a levantar una línea base sobre la posibilidad del uso de aguas contaminadas en procesos para producir energía con el uso de una Celda de Combustible Microbiana de triple ánodo (Jiménez, 2012).

La generación de energía eléctrica mediante Celdas de Combustible Microbianas (CCM) a partir de aguas residuales representa una solución innovadora y sostenible a dos problemas críticos: la necesidad de fuentes de energía renovable y el tratamiento eficiente de aguas residuales de procesos de lavado de autos de las Lubricadoras. Al aprovechar microorganismos electrogénicos que descomponen la materia orgánica presente en las aguas residuales, las CCM no solo producen electricidad de manera continua y limpia, sino que también contribuyen a la reducción de contaminantes en el agua. Esta doble función, combinada con la posibilidad de operar a temperaturas y presiones ambientales, convierte a las CCM en una tecnología prometedora para la generación de energía

descentralizada y la gestión ecológica de los desechos líquidos, fomentando así la sostenibilidad y la eficiencia energética (Revelo, 2013).

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Descripción del Problema

La lavadora y lubricadora automotriz “MAGBLAD” es un negocio que brinda servicio de lavado completo, lavado exprés, cambios de aceite y limpieza de motor de los vehículos livianos, la empresa se encuentra localizada en la ciudad de Riobamba en las calles Av. Luis Cordovez y Capitán Edmundo Chiriboga. El incremento de la actividad económica mencionada anteriormente es una de las industrias que generan un mayor impacto en cuanto al uso de agua se refiere, esto debido a la falta de sistematización en sus procedimientos, ya que la mayoría de estas actividades se realizan de manera artesanal (Carrasquero, 2015).

Pues si bien es cierto, este tipo de actividad económica se encuentra en auge debido al incremento consecuente de automotores, además de tener en cuenta que el capital de inversión, los permisos de funcionamiento son relativamente accesibles para cualquier tipo de persona natural o jurídica, más aún si cuenta con un terreno a disposición y que tenga fácil acceso para la conexión a la red pública de alcantarillado.

Hoy en día, las aguas residuales producidas a partir de aceites lubricantes, detergentes y otros residuos constituyen un porcentaje significativo como contaminante, debido a que su demanda (aceites lubricantes) alcanza los 40 millones de toneladas por año (Velasco, 2003).

En Ecuador, solo el 10% de las aguas residuales recibe algún tipo de tratamiento. Esta cifra alarmante indica que el 90% de las aguas residuales con alta carga orgánica regresan a las fuentes hídricas potables sin haber recibido tratamiento alguno (UNESCO, 2017).

Los impactos ocasionados por el sector de lavado y lubricado de autos en la provincia de Chimborazo se enmarcan en la contaminación de los afluentes hídricos, este factor es determinante en pro de la contaminación ya que no existe control sobre el descargue de aguas residuales producto del lavado de autos hacia alcantarillas, ríos y suelos (Vásquez et al., 2010).

Según la secretaría del Ambiente del Gad Municipal del cantón Riobamba, hasta el año 2019 se encontraban inscritos 150 centros de servicio automotriz entre talleres y lubricadoras. De ellos aproximadamente más del 45% son lugares donde se presta el servicio de lubricación y lavado de autos (Gualán Macas, 2019). Teniendo en cuenta este dato, en la lavadora y lubricadora MAGBLAD diariamente en promedio se lavan de 15 a 30 automóviles y se estima aproximadamente que, para prestar el servicio de lavado de autos en un vehículo liviano, se emplea en promedio de 150 a 280 litros de agua, donde terminado el proceso, el agua residual producto de esta actividad es descargado en la alcantarilla sin ningún otro tipo de aprovechamiento.

La problemática del sistema antes descrito, se refleja en los daños ecológicos, la pérdida del equilibrio natural que existe en el ecosistema, el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles, producen una fuerte afección climática global, la misma que avanza a pasos agigantados y con un gran costo para nuestro ambiente, y entre más tiempo sea provocado esta afección mayor será la inversión para el ser humano intentar reponer su daño al ambiente por lo que es de interés global dicha problemática mencionada.

1.1.2 Formulación del Problema

- 1) ¿Es posible generar energía eléctrica a partir diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo, empleando como sustrato aguas residuales del proceso de lavado de autos de una lubricadora?
- 2) ¿Las curvas de densidad de potencia y corriente serán capaces de determinar la eficiencia del prototipo creado?

1.2 Delimitación

1.2.1 Delimitación del Contenido

El presente trabajo de titulación se desarrolla en el campo de la Ingeniería Industrial, dentro del en el compendio de la línea de investigación de la Ingeniería.

1.2.2 Delimitación Temporal

Este trabajo se desarrolla durante el período comprendido entre julio y noviembre de 2024.

1.2.3 Delimitación Espacial

La ejecución de cada una de las fases de este trabajo se desarrolla en la ciudad de Riobamba, tomando como punto de muestreo la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD.

1.3 Justificación

El aumento significativo de la demanda y consumo de energía ha ido evolucionando constantemente desde los inicios de la Primera Revolución Industrial (Siglo XVIII)(360), junto a ello ha venido de la mano muchas dificultades como: agotamiento de combustibles fósiles, bajo nivel de embalse en represas hidroeléctricas, etc., ya que para el año 2050 se prevé que el consumo mundial de energía llegará a un 200% en solo 53 años a partir del año 2007 (Ritchie, 2020).

La intención de tratar aguas residuales es reducir la carga contaminante y convertirla en un parámetro inofensivo para el medio ambiente y seres vivos, razón por la cual se requieren de mecanismos físicos, químicos y biológicos.

La integración de Celdas de Combustible Microbianas (CCM) en el tratamiento de aguas residuales de lubricadoras es una estrategia prometedora que reúne la remoción exitosa de contaminantes con la producción de energía limpia.

Además se recalca la necesidad de emprender el estudio de este tipo de tecnologías en la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD de la ciudad de Riobamba empleando las aguas residuales del proceso de lavado de autos, ya que se propone que este estudio sea el punto de partida en búsqueda de fuentes renovables de energía, considerando pues que el agua residual del proceso de lavado de autos de una empresa como esta son muy contaminadas por el arrastre de hidrocarburos de otros procesos de la empresa y comparados a otras aguas derivadas de los procesos de producción a nivel doméstico e industrial en Riobamba, estas son muy peligrosas ya que una gota de “x” hidrocarburo puede contaminar muchos litros de agua.

El presente trabajo de titulación se enfoca en el diseño y construcción de una Celda de Combustible Microbiana (CCM) con configuración de triple ánodo, orientada a la producción de energía limpia mediante el aprovechamiento del agua residual generada en procesos de lavado de vehículos, además este proyecto tiene como objetivo principal

evaluar la viabilidad de utilizar este tipo de agua residual como fuente de energía, aprovechando la materia orgánica contenida en ella.

Adicionalmente, se realizarán estudios sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema, incluyendo la disposición de los electrodos y la distancia entre ellos, debido a su impacto directo en el rendimiento de la CCM (Buitrón & Pérez, 2011). Dado que el agua residual de lavado de autos contiene una mezcla de detergentes, hidrocarburos y otros contaminantes, se evaluará la influencia de estos compuestos en la actividad microbiana y en la eficiencia de producción energética de la celda.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar una Celda de Combustible Microbiana (CCM) de triple ánodo para la producción de energía eléctrica a partir de aguas residuales del proceso de lavado de autos de la lubricadora MAGBLAD.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar los componentes principales para la construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo.
- Construir la CCM de triple ánodo para la generación de energía eléctrica a escala de laboratorio a partir de materiales de fácil acceso.
- Generar la curva de densidad de potencia y corriente para entender el rendimiento de la CCM de triple ánodo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Enfoque teórico

2.2 Antecedentes

A finales del siglo XVIII, con los primeros pasos de la Revolución Industrial, el ser humano comenzó a utilizar combustibles fósiles, siendo el carbón el principal de ellos, pero no fue sino hasta 1785 que el gas natural apareció en Gran Bretaña, utilizándose por primera vez para la iluminación. La Revolución Industrial y la innovación tecnológica avanzaron rápidamente, creando la necesidad de emplear combustibles de alta intensidad energética para satisfacer el consumo de las máquinas, que más adelante iniciarían lo que hoy conocemos como la sociedad moderna (André, 2012).

En el año de 1973, S. Zusuki desarrolló uno de los primeros prototipos de Celda de Combustible que empleaba ambientes herméticamente cerrados para el crecimiento de bacterias anaerobias, así pues este primer prototipo tendría muy buenos resultados en la producción de energía y disminución de Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Ríos, 2016).

En los años 2000, se realizaron importantes mejoras en los materiales utilizados para los electrodos y las membranas, así como en la comprensión de los mecanismos de transferencia de electrones, estas mejoras permitieron aumentar la eficiencia y la viabilidad de las CCM para aplicaciones prácticas, donde se propusieron mejoras en el diseño de celdas para maximizar la generación de energía y la recuperación de recursos (Logan, 2007).

A partir de estos estudios realizados en inicios de los años 2000 se establecieron las bases para que en la actualidad la mayoría de las investigaciones se centren en aumentar la eficiencia de la producción de energía a partir del concepto de una CCM; de este modo en el año 2012, Darwin Torres evalúa la producción de energía con diferentes tipos de sustratos tales como: barro, frutos secos, carne y jugo de frutas; todo esto a fin de encontrar cuál de ellos generaba más voltaje en un tiempo determinado, entre los aspectos más importantes de esta investigación resalta que la eficiencia de una CCM son los materiales de la celda y los electrodos, estos últimos son de vital importancia ya que por sus propiedades conductoras definirá la buena eficiencia en el transporte de energía (Torres, 2012).

En 2019, Debajyoti Bose investigó la generación de bioelectricidad a partir de aguas residuales. En este estudio, identificó la presencia de bacterias *Firmicutes-phylla*, que tienen una notable capacidad para formar colonias con otros tipos de bacterias, como las betaproteo-bacterias y las actino-bacterias. Estas bacterias forman comunidades electroactivas capaces de descomponer numerosos compuestos. Bose estableció que las aguas residuales generadas por la población pueden utilizarse como sustrato para las celdas de combustible microbiano en plantas de tratamiento de aguas residuales de municipios o ciudades; esto no solo reduce la concentración de contaminantes, sino que también genera varios tipos de combustibles, como metano e hidrógeno, y energía eléctrica (Wei et al., 2014).

Muestra de ello, tenemos como ejemplo al trabajo realizado por la Universidad Autónoma del Estado de México, donde emplearon una CCM a escala de laboratorio para generar electricidad, utilizando agua residual como sustrato, donde su eficiencia y eficacia fue verificada a partir de monitorear parámetros tales como: corriente eléctrica, voltaje y potencia; finalmente, el estudio arrojó la muy notable conclusión de que este tipo de tecnología es capaz de generar energía, y que a la vez sirve como un sistema de tratamiento para purificar aguas residuales (Alzate-Gaviria et al., 2008).

Por otra parte, en Ecuador, en el año 2019 el estudio “*Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica*” realizado en la Universidad Politécnica Salesiana con su sede en la ciudad de Cuenca, establecen una comparación a partir de la implementación de caucho y nitrilo como Membranas de Intercambio de Protones a fin de determinar la eficiencia eléctrica generada por la CCM, donde obtuvieron resultados prometedores con la membrana de material de Nitrilo con respecto al voltaje máximo producido el cual fue de 259.45 mV (Ortiz Ortiz, 2019).

Finalmente decimos que es importante destacar que las investigaciones previas, debido a su enfoque y objetivo, proporcionan una base sólida que guía este estudio en la dirección correcta. Dando no solo una perspectiva metodológica aplicable a diversas fases del desarrollo de la investigación actual, sino que también permiten abordar distintos aspectos de una problemática significativa y digna de ser tratada debido a su impacto.

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 Aguas residuales en el proceso de lavado de autos de las lubricadoras

Las aguas residuales generadas en lavadoras y lubricadoras de automóviles contienen altas concentraciones de aceites, grasas y detergentes. Aunque los principales contaminantes provienen del cambio de aceite, el mayor volumen de agua contaminada se origina durante el proceso de lavado, parte de estos contaminantes forman emulsiones en el agua, solubilizándose y aumentando la carga orgánica, lo que se refleja en parámetros como la DQO y la DBO5.

Además, en estos lugares de trabajo solo se implementan controles administrativos o se gestionan los residuos sólidos mediante terceros, mientras que los volúmenes de agua contaminada no reciben ningún tratamiento ni son aprovechados, agravando así su impacto ambiental. (Morales Fiallos, 2019).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA, o más conocida como FAO (Food and Agriculture Organization) por sus siglas en inglés define a las aguas residuales como un agua que surge a partir de un proceso en específico en donde terminada su aplicación carece de valor inmediato para el fin para que él se empleó ni para lo que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento que se dispone de ella (FAO, 1997).

2.3.2 Celdas de Combustible Microbiana (CCM)

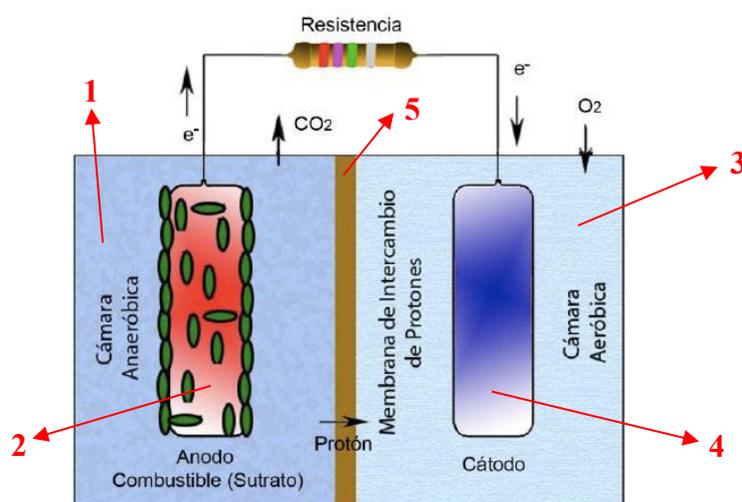
Una Celda de Combustible Microbiana es un dispositivo que tiene como objetivo producir energía eléctrica a partir de microorganismos que convierten la energía química almacenada en los sustratos, en energía eléctrica (Song Hao, 2022). Esta reacción se da gracias a que algunos de estos microorganismos tienen la capacidad de transferir electrones a partir de la actividad metabólica que se realiza dentro de la celda o cámara, hasta un electrodo (ánodo) en lugar de un aceptor natural como lo es el oxígeno (Logan, 2007).

Según Ortiz (2014), una CCM convencional de doble cámara *“presenta dos cámaras separadas físicamente o mediante una membrana semipermeable: en una de*

ella se sitúa un electro (ánodo) sumergido en una solución química, y el otro electrodo (cátodo) también dentro de la solución química en la cámara restante”. El proceso electroquímico descrito se presenta de manera gráfica en la Figura 1.

Figura 1

Partes principales de una CCM convencional (doble cámara)



Nota. La imagen muestra los componentes principales de una CCM de doble cámara. Adaptado de (Du, 2007).

Para Scott (2016), el funcionamiento de un Celda de Combustible Microbiana (Ver Figura 1) se basa en sus 5 componentes principales que son:

- 1) **Cámara Anaeróbica:** o conocida también Cámara Anódica, es la cámara en la cual se encuentran contenidas las bacterias (microorganismos). En esta sección de la CCM se coloca la fuente de energía (sustrato orgánico) que van desde aguas residuales hasta biomasa.
- 2) **Electrodo Anódico:** situado en su correspondiente cámara, este electrodo es el receptor de los electrones que se generan por las reacciones electroquímicas producidas a partir de la oxidación de los compuestos orgánicos provocada por los microorganismos.
- 3) **Cámara Aeróbica:** o llamada también Cámara Catódica, es la responsable donde se lleva a cabo la reducción de los compuestos oxidados. Normalmente esta cámara está separada una de la otra por una Membrana de Intercambio de Protones (MIP).

- 4) **Electrodo Catódico:** o cátodo, este electrodo acepta los electrones transferidos del electrodo anódico que viajan desde la cámara anódica a través de un circuito externo conectado en serie a una resistencia. Por lo general en esta cámara el oxígeno actúa como el aceptor final de los electrones.
- 5) **Membrana de Intercambio de Protones (MIP):** esta membrana permite el paso de protones generados en la cámara anódica hacia la cámara catódica, mientras separa físicamente las dos cámaras para evitar la mezcla directa de los sustratos.

En síntesis el funcionamiento de una CCM se basa en la capacidad que tienen ciertos microorganismos para oxidar compuestos orgánicos y transferir los electrones liberados directamente a un electrodo (Mohan, 2019). Las reacciones electroquímicas son el núcleo del funcionamiento de las CCM, pues estas se llevan a cabo de la siguiente manera: (Condori, 2019)

- Se oxida el sustrato por acción de los microorganismos en la cámara anódica.
- El dióxido de carbono (CO_2), electrones (e^-) y los protones (H^+) generados, se mueven hacia el cátodo a través del circuito externo conectado al cátodo.
- El protón (H^+) viaja a través del agua residual y de la membrana de intercambio de protones (MIP).
- Los electrones (e^-) viajan a través del circuito externo conectado al cátodo.
- Finalmente, los electrones reaccionan con el aceptor final (O_2) y los protones (H^+) se convierten en agua.

2.3.3 Generación de energía eléctrica en una CCM

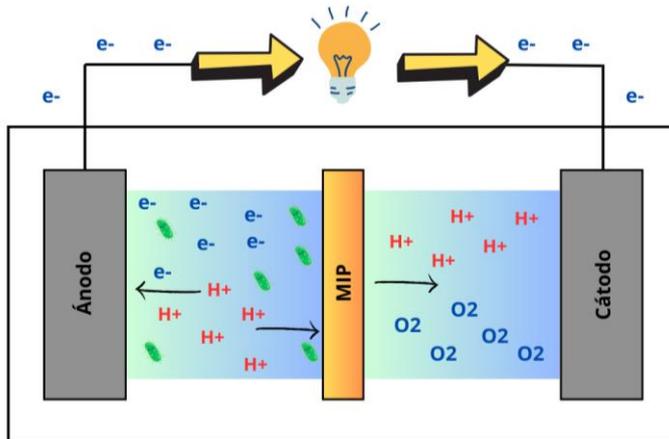
Dentro de una Celda de Combustible Microbiana se llevan a cabo dos procesos químicos: el primero se desarrolla dentro de la cámara anódica, aquí se produce la oxidación de un sustrato orgánico biodegradable a partir de bacterias anaerobias electroactivas, el segundo se desarrolla en la cámara catódica tratándose de una reacción de reducción con el oxígeno presente en la cámara, es así que se tiene como resultado la salida o producción de dióxido de carbono además de electrones y protones (Rahimnejad, 2015).

Debido a los procesos químicos que ocurren en cada una de las cámaras de una CCM, se genera una diferencia de pH en ellas, los gradientes de pH se forman por la acidificación en la cámara anódica y la alcalinización en la cámara catódica. Esto ocurre

porque en las reacciones del ánodo se producen protones, mientras que en las reacciones del cátodo se consumen protones (Revelo, 2013).

Figura 2

Generación de electricidad en una CCM



Nota. Principio de generación de electricidad en una CCM de doble cámara. Adaptado de Cárdenas et al. (2022)

Tal como se observa en la *Figura 2*, el mecanismo de transferencia anódica de electrones en las celdas de combustible microbianas (CCM) es fundamental para entender su funcionamiento. Como se observa en la imagen anterior, los microorganismos transfieren electrones al electrodo mediante un sistema de transporte de electrones que incluye varios componentes en la matriz extracelular bacteriana o mediante lanzaderas de electrones disueltas en el sustrato. (Lovley et al., 2004).

La electricidad que se obtiene en una celda de combustible microbiana por medio de bacterias es pequeña en comparación con otras fuentes de energía, no obstante, hay que tener en cuenta que esta tecnología es relativamente nueva y a pesar de esto ha avanzado hasta mil veces la eficiencia, ya que en la actualidad se produce una densidad de potencia por electrodo de W/m^2 frente a los mW/m^2 de las primeras experiencias (Romero Mejía et al., 2012). Conforme con los resultados se deduce que los electrodos han disminuido su tamaño hasta 800 veces, la densidad de corriente ha aumentado hasta 100 veces su producción en aproximadamente 10 años de investigación (Buitrón & Pérez, 2011).

2.3.3.1 Medición del desempeño de una CCM

En las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), la densidad de potencia y densidad de corriente son considerados parámetros fundamentales para evaluar el desempeño electroquímico y energético, es decir, estos indicadores permiten cuantificar la capacidad de convertir la energía química de los sustratos en energía eléctrica (Zhang et al., 2013).

2.3.3.1.1 Densidad de Potencia

La densidad de potencia (P) es el indicador principal de cuanta energía útil puede generar una CCM por unidad de área o volumen del sistema, generalmente cuantificada en W/m^2 (por área de electrodo) o W/m^3 (por el volumen del reactor), dicho de otra manera, este parámetro es de vital importancia para medir la eficiencia del sistema (Cárdenas et al., 2022).

Esta métrica es calculada de acuerdo con la siguiente expresión matemática

$$P = V * I$$

Donde:

- P: Densidad de Potencia
- V: Voltaje generado por la celda
- I: Densidad de corriente

2.3.3.1.2 Densidad de Corriente

La densidad de corriente (J) cuantifica la actividad electroquímica de la CCM como tal, es decir la corriente eléctrica generada por la unidad de área del electrodo expresada en A/m^2 (Cárdenas et al., 2022)., este parámetro es evaluado en función a la siguiente expresión matemática:

$$J = \frac{I}{A}$$

Donde:

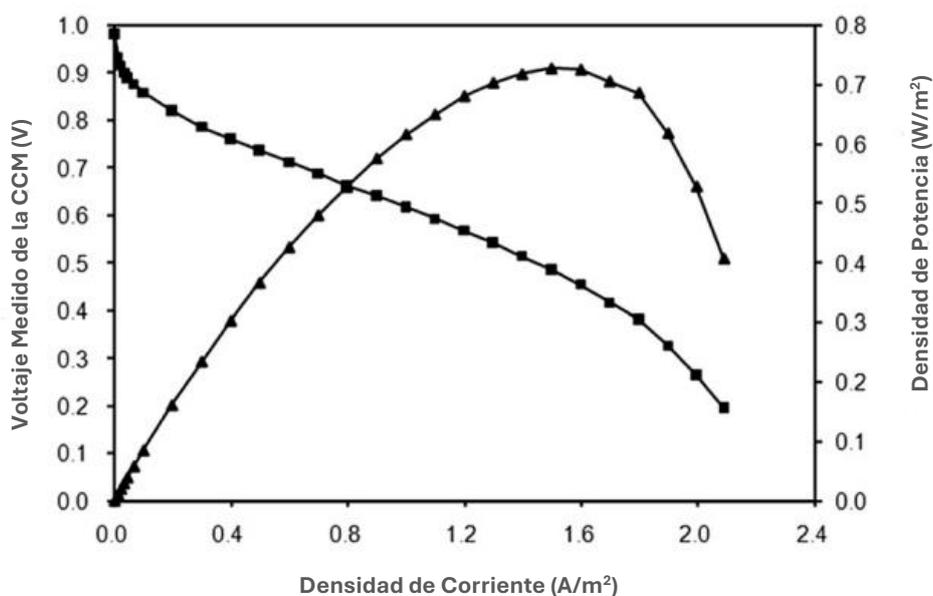
- J: Densidad de corriente

- I: Corriente eléctrica
- A: Área superficial del electrodo

Cabe indicar que estos parámetros descritos anteriormente se representan una gráfica compuesta (Ver Figura 3) donde la *densidad de corriente (J)* se ubica en el eje “x”; y la *densidad de potencia (P)* en el eje “y”; principalmente se evalúa esta gráfica con relación a tres factores clave que nos permiten interpretar de manera clara el rendimiento en términos de potencia y energía (Zhang et al., 2013).

Figura 3

Típica Curva de Polarización de una CCM



Nota. La gráfica muestra una curva típica de polarización de una CCM. Adaptado de Zhang et al. (2013)

El poder determinar la eficiencia de una CCM a partir de una curva de polarización, responde a los siguientes factores claves:

- **Pendiente inicial (región inicial):** Indica la resistencia óhmica del sistema (resistencia interna debida a los materiales del electrodo, conexiones, y electrolito). Una pendiente suave sugiere un sistema eficiente.

- **Potencia máxima:** Es el punto más alto de la curva de densidad de potencia. Refleja la máxima capacidad del sistema para convertir energía química en energía eléctrica bajo las condiciones actuales.
- **Zona de caída:** Refleja limitaciones del sistema, como el agotamiento del sustrato, el aumento de productos metabólicos inhibidores o limitaciones de difusión.

2.3.4 Clasificación de las CCM

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) se pueden clasificar de distintas maneras considerando varios criterios, a continuación, para el desarrollo de este proyecto de investigación que se basa en la generación de energía eléctrica se presenta las tres clasificaciones más comunes:

2.3.4.1 Según el tipo de Microorganismos

- **CCM de Sustrato Orgánico:** emplean bacterias que oxidan el sustrato o orgánicos como glucosa, acetato, desechos orgánicos, etc., presente en las cámaras para generar electrones (B. Min et al., 2005).
- **CCM Fotosintéticas:** emplean microorganismos tales como las cianobacterias y algas, que son capaz de absorber la radiación solar de manera que puedan generar electricidad (Pant, 2010).

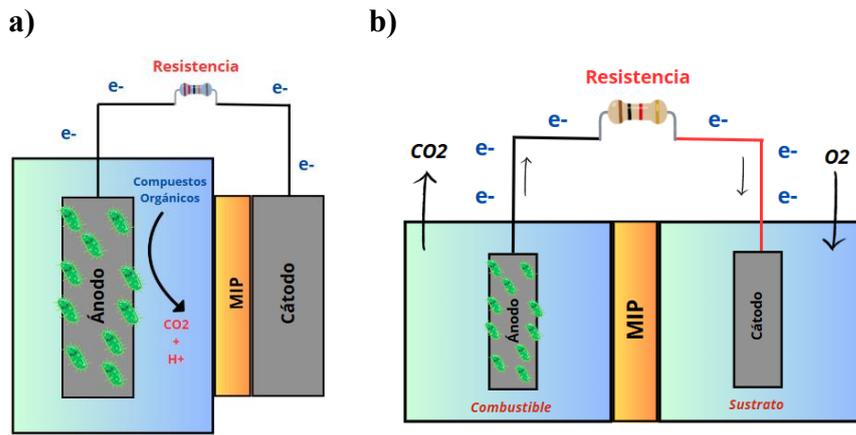
2.3.4.2 Según la configuración del electrodo

CCM de una sola cámara: este tipo de celdas están conformadas por un único compartimiento (Fig. 2a), donde el cátodo y el ánodo se encuentran en contacto directo, separados únicamente por una membrana de intercambio de protones (MIP). Cabe destacar que de acuerdo a este tipo de configuración es posible incrementar la densidad de potencia y reducir la resistencia óhmica (Sengodan, 2012).

CCM de dos cámaras: son las celdas de combustible microbianas más convencionales, en este tipo de configuración está constituida por dos compartimientos, una cámara anódica y otra catódica, con cada uno de sus electrodos separados a partir de una MIP como se observa en la Fig. 2b, por lo general en estas celdas la cámara anódica contiene el sustrato (Shankar, 2013).

Figura 4

Tipo de CCM según la configuración del electrodo



Nota. En la imagen se presenta la configuración de una celda de combustible microbiana según el tipo de electrodo, a) cámara única y b) doble cámara. Adaptado de (Arely Cárdenas, 2022)

2.3.4.3 Celdas de Combustible Microbiana de triple ánodo

Existen algunos tipos de CCM que funcionan con más de un ánodo con el objetivo de mejorar la densidad de potencia, algunos autores recomiendan el uso de celdas de combustible microbiano no solo para generar energía sino también para el tratamiento de aguas residuales (Velasquez-Orta et al., 2009).

La estructura de las CCM de triple ánodo (TA) tiene los mismos componentes que una CCM normal, aunque la aplicación es diferente la configuración y materiales son los mismos.

Una CCM típicamente está constituida por dos cámaras tal como se puede observar en la Figura 4 – b, en mitad de las cuales se encuentra un separador denominado Membrana de Intercambio de Protones (MIP) (Kim, 2008). Los materiales de las cámaras anódicas y catódicas se fabrican en materiales como el acrílico o vidrio, esto pues debido a que la constitución de la estructura de estos materiales no presenta propiedades conductoras, además que el montaje de acuerdo al diseño que se proponga es de fácil acceso (Revelo, 2013).

La relevancia de este proyecto de investigación radica en que la implementación de un sistema de triple ánodo en el diseño de la celda de combustible microbiana (CCM)

podría mejorar significativamente su eficiencia en la producción de energía (Kim, 2008). Al incrementar el área de contacto disponible, los tres ánodos facilitan una mayor transferencia de electrones por parte de los microorganismos, lo cual se traduce en un aumento de la densidad de corriente y, por ende, en una mayor producción energética (Opoku et al., 2022).

2.3.5 Materiales empleados en las CCM-TA

Diferentes tipos de tecnologías que están en auge en esta línea de investigación se centran en reducir los costos de los materiales, sobre todo de los electrodos, mientras que otras investigaciones merman la significancia económica de construcción y operación, basándose principalmente en la capacidad de generar altas densidades de potencia que de una u otra manera puedan compensar el precio de desarrollo de estas tecnologías (López Hincapié, 2014).

Así entonces, actualmente el buscar o seleccionar los diferentes tipos de materiales para la construcción de las cámaras (ánodo y cátodo), tipo de membrana y electrodos es uno de los desafíos claves, ya que al errar en la selección de alguno de ellos puede verse afecta la densidad de potencia y eficiencia Coulómbica (Kim, 2008).

2.3.5.1 Ánodo

El ánodo o cámara anódica es uno de los principales componentes que constituyen una CCM, ya que en el interior de esta cámara las bacterias catalizan la oxidación del sustrato liberando electrones como resultado de la respiración (Regan, 2006).

Entre los materiales comúnmente empleados en la construcción de la cámara anódica se encuentran los de metal y carbón, estos varían significativamente en la configuración y área superficial que permiten encontrar diferentes rangos en lo que refiere a rangos de costos operaciones, conductividad eléctrica y establecer parámetros bio-compatibles (Wei, 2011).

2.3.5.2 Cátodo

Los cátodos expuestos al aire y aquellos en fase acuosa son de los más utilizados en CCM a escala de laboratorio (Oh et al., 2004), los cátodos expuestos al aire suelen consistir en una capa de difusión (expuesta al aire), un material conductivo de soporte y una capa con catalizador (expuesta al agua). Los cátodos en fase acuosa tienen

características similares y están hechos de materiales como papel carbón, tela de carbón y mallas de platino, pero con la diferencia de que no aprovechan el oxígeno presente en la atmósfera, sino que éste se inyecta como aire en una solución acuosa (catolito), generalmente agua (Wei, 2011).

Debido a la diferencia de solubilidad del oxígeno en el aire y en el agua, se considera que las celdas que usan cátodos expuestos al aire son diseños más prácticos. Por esta razón, han llamado más la atención de los investigadores, ya que no requieren aireación (ahorrando energía) y alcanzan altas densidades de potencia (Wei, 2011).

2.3.5.3 Microorganismos en la CCM

Los microorganismos en las Células de Combustible Microbianas (CCM) juegan un papel crucial en la transferencia de electrones, un proceso que puede ocurrir en tres niveles distintos: dentro de la célula misma, de la célula hacia el electrodo y del electrodo a la célula (Ortiz, 2014). Estudiar las interacciones entre estos microorganismos, identificarlos y establecer su función en estos procesos es esencial tanto para el conocimiento básico como para el futuro mejoramiento del desempeño de estos sistemas (Revelo, 2013).

2.3.5.3.1 Microorganismos en la Cámara Catódica

En las CCM-TA los denominados microorganismos electrótrofos juegan un papel de vital importancia ya que son ellos los que pueden utilizar los electrones directamente desde un electrodo como fuente de energía para poder llevar a cabo sus procesos metabólicos (Ortiz, 2014). Así pues, las CCM que incluyan estos organismos pueden optimizarse para aplicaciones específicas, aumentando la eficiencia en la generación de energía (Rittmann, 2006).

De acuerdo con esta fundamentación, se plantea que para la CCM-TA que se propone en esta investigación no se empleará otra forma de vida microbiana, pues luego de una extensa revisión del estado del arte de estudios previos realizados en el campo de la CCM, la Tabla 1 detalla que en el caso de utilizar Aguas residuales como sustratos anolíticos, no es necesaria la presencia de otro tipo de cultivo, tan solo basta con la presencia de las bacterias que se encuentran en ella (Liu & Logan, 2004).

2.3.5.4 Electroodos

La selección de los electrodos para las cámaras anódica y catódica, son de vital importancia para su eficiencia y su rendimiento, esta debe establecer un balance idóneo entre la eficiencia electroquímica, la compatibilidad biológica, el costo y la durabilidad (Heilmann & Logan, 2006).

Para el desarrollo de la presenta investigación se utilizará electrodos de grafito, considerando una revisión de literatura muy profunda entre (Ver Tabla 1) distintas investigaciones realizadas en el campo de las CCM donde se ha establecido resultados previamente estudiados en factores tales como la Densidad de Potencia y la Eficiencia Coulumbica.

Tabla 1

Comparación de parámetros de desempeño de diferentes configuraciones en CCM

Sustrato	Cultivo	Tipo de Electrodo	Medidor redox	Densidad de Potencia $mW * m^{-2}$	Eficiencia Coulumbica %	Referencia
Lactato	Shewanella oncidencis	Carbón reticulado	Ferrocianuro potásico	24	2,4	(Wu et al., 2010)
Agua residual	Bacterias presentes en aguas residuales	Grafito	No	24	3 -12	(Liu & Logan, 2004)
Glucosa	Cultivo mixto	Grafito plano	Hexacianoferrato de potasio	36000	89	(Rabaey et al., 2003)
Acetato	Bacterias presentes en aguas residuales	Papel carbón	No	286 ±3	65	(Min & Logan, 2004)
Glucosa	Bacterias presentes en aguas residuales	Papel carbón	No	494	9 – 12	(Liu & Logan, 2004)
Acetato	Geobacter metallireducens	Papel carbón	No	40 ± 1	19	(B. Min et al., 2005)
Peptona	Bacterias presentes en aguas residuales	Papel carbón	No	269 ± 14	6	(Heilmann & Logan, 2006)
Acetato	Lodos activados	Papel carbón	No	0,097	63 – 78	(Oh et al., 2004)
Glucosa	Bacterias contenidas en agua residual	Papel carbón	No	262	40 – 55	(Liu & Logan, 2004)
Acetato	Lodos	Grafito plano	Ferrocianuro en cátodo y Mn^{3+} ánodo de grafito y Fe^{3+} cátodo de grafito	788	No reportó	(Park & Zeikus, 2003)
Glucosa	Bacterias contenidas en agua residual	Fibra de carbón	No	1430	23	(Logan et al., 2007)

Nota. La tabla muestra el tipo de electrodo a utilizarse de acuerdo con el sustrato que es empleado en la cámara anódica. Adaptado de Liliana Alzate-Gaviria (2008).

2.3.6 Tipo de sustrato utilizado en las CCM

Las denominadas Celdas de Combustible Microbianas, son consideradas como una tecnología sustentable de manera que suplanta la creciente demanda de energía, de modo que se emplean aguas residuales como sustratos (combustible), esto debido a que se genera electricidad a la par que se las va tratando de acuerdo al propósito y las condiciones de operaciones para las que fue construidas (Pant et al., 2010).

El combustible o sustrato empleado en las CCM es imprescindible para cualquier proceso biológico pues es la base de la fuente de energía. La eficiencia, efectividad y viabilidad económica de la CCM depende de las características y los componentes del material de desecho o sustrato a emplearse (Kim, 2008). El sustrato o combustible no solo se verá influenciado en la composición entera de la comunidad microbiana presente en la cámara anódica, sino también en su desempeño en lo que refiere a términos de densidad de potencia y eficiencia Coulómbica (Pant et al., 2010).

Existen una gran variedad de sustratos que suelen ser empleados en las CCM empleados en la producción de energía eléctrica, esto varía dependiendo de la pureza y mezcla de los diferentes sustratos, entonces se hace difícil comparar el desempeño de las CCM ya que esto puede variar a partir de algunos elementos clave operaciones como: áreas de superficie, tipo de electrodos y microorganismos involucrados (Pant et al., 2010).

2.3.7 Construcción de la CCM-TA

Las celdas de combustible microbianas pueden convertir la energía química de la materia orgánica biológica del ambiente en energía eléctrica a través del metabolismo fisiológico y la transferencia de electrones extracelulares de microorganismos productores de electricidad, mostrando ventajas únicas en la conversión de recursos de desechos (Rabaey & Verstraete, 2005).

Sin embargo, debido al pequeño tamaño de una sola celda de combustible microbiana, la baja tasa de transferencia de electrones de las bacterias electrogénicas del ánodo, la pobre estabilidad y las capacidades de utilización ambiental muy limitadas, limitan su aplicación práctica (Rahimnejad, 2015).

La presente investigación propone una tecnología de celdas de combustible microbianas permite conectar varias pilas de combustible microbianas individuales en

serie y en paralelo para formar una estructura de pila de batería. En este proceso, la corriente o el voltaje se superponen en consecuencia, lo que mejora enormemente el rendimiento de todo el sistema de la Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo.

2.3.7.1 Material de las cámaras de la CCM-TA

Velasquez-Orta et al. (2009), en sus estudios realizados establecen que el **acrílico** es considerado un material ideal para el diseño de cámaras en una celda de combustible microbiana (CCM) debido a ciertas propiedades que se detallan a continuación: a) es resistente a una amplia gama de químicos y al pH extremo (ácido o básico), lo cual es importante porque los electrolitos de las CCM pueden ser corrosivos; b) no interfiere químicamente con los microorganismos, el electrolito o los productos generados, asegurando que no haya contaminación ni reacciones secundarias; c) permite ensamblar cámaras herméticas con juntas selladas, evitando fugas de electrolito o pérdida de gases generados, como el hidrógeno o dióxido de carbono.

2.3.7.2 Electrodo

El grafito es un material clave como electrodo en la construcción de una celda de combustible microbiana de triple ánodo debido a su alta conductividad eléctrica, estabilidad química y biocompatibilidad, lo que permite una eficiente transferencia de electrones desde los microorganismos al circuito externo (Velasquez-Orta et al., 2009).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

Según Hernández Sampieri (2014), el enfoque cuantitativo lo define como aquel proceso en el cuál una investigación se plantea en obtener datos cuantificables o numéricos para analizar la correlación de variables de manera estadística, a fin de determinar patrones, relaciones, o comprobar hipótesis, dicho enfoque se caracteriza por su objetividad, ya que se muestra al mundo como una forma de medir y analizar datos concretos, siendo útiles para poder obtener resultados obvios a una población mayor. Por lo tanto, este paradigma se ajusta con el trabajo de investigación desarrollado en la generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo con resultados numéricos de voltaje, densidad de potencia, densidad de corriente.

3.2 Tipo de Investigación

(Smith, 2014). Además, se lleva a cabo un estudio experimental, ya que, al utilizar sustratos como el agua residual del proceso de lavado de autos, se espera mejorar la transferencia de electrones gracias a las condiciones químicas del sustrato, caracterizado por su alto contenido de hidrocarburos.

3.3 Diseño de la Investigación

El presente estudio adopta un enfoque descriptivo debido a su objetivo central: caracterizar y documentar sistemáticamente el comportamiento de una celda de combustibles microbiana (CCM) de triple ánodo como sistema innovador para la generación de energía eléctrica a partir de sustratos orgánicos. Este enfoque es pertinente porque busca, en primera instancia, identificar, medir y analizar variables clave como el voltaje generado, la densidad de corriente, la estabilidad del sistema y la eficiencia de conversión energética bajo condiciones específicas de operación.

Dado que las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) de múltiples ánodos representan una configuración emergente con potencial para superar limitaciones de sistemas convencionales (ej., escalabilidad y rendimiento), la investigación prioriza la recopilación rigurosa de datos experimentales que permitan entender su desempeño sin manipular variables externas, típico de estudios exploratorios o experimentales. Además,

al emplear residuos reales como sustrato, el trabajo aporta una descripción técnica detallada de los procesos bioelectroquímicos involucrados, sentando bases para futuras optimizaciones. Así, el enfoque descriptivo no solo valida la viabilidad del diseño propuesto, sino que también genera un marco de referencia para comparaciones con otras arquitecturas de CCM, contribuyendo a la literatura científica con datos replicables y metodologías estandarizadas.

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población está comprendida por el volumen total de agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD, durante los días de investigación.

3.4.2 Muestra

Se tomará un total de 3 litros de agua residual cruda del proceso de lavado de autos antes de que esta sea drenada por la alcantarilla en ubicada en la zona de desagüe de la zona destinada para lavado de autos.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Investigación

Para la recolección de información, se ha empleado algunas técnicas e instrumentos, mismas que se detallan a continuación:

3.5.1 Técnicas

La observación es una técnica fundamental en el desarrollo del proyecto de investigación "Generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo", ya que permite un seguimiento detallado y sistemático del comportamiento del sistema experimental. A través de la observación directa, es posible identificar visualmente la formación de biopelículas sobre los ánodos, detectar posibles cambios físicos o químicos en los materiales utilizados, y registrar alteraciones en el entorno, como variaciones de color, producción de burbujas, temperatura o pH, que pueden indicar reacciones biológicas o electroquímicas importantes. Esta técnica también contribuye al control de variables, ya que facilita la detección temprana de anomalías o desviaciones que podrían afectar la eficiencia del sistema. En conjunto, la observación proporciona datos cualitativos valiosos que

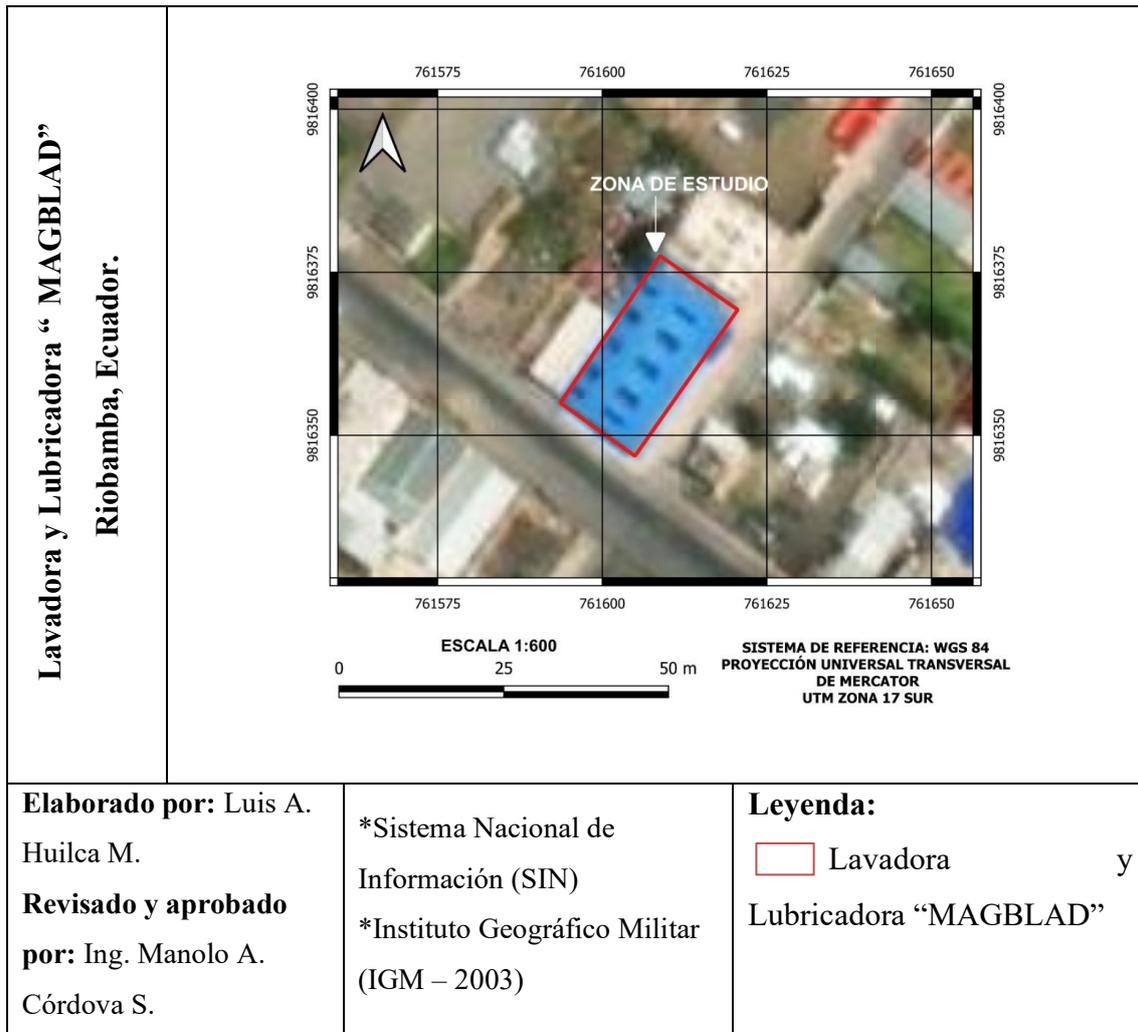
complementan las mediciones cuantitativas, fortaleciendo el análisis y la interpretación de los resultados experimentales (Sandra Hernandez & Danae Duana, 2020).

La experimentación es una técnica adecuada y esencial en el desarrollo del proyecto "Generación de energía eléctrica a partir del diseño y construcción de una Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo", ya que permite comprobar de manera controlada y sistemática la relación entre las variables involucradas en el proceso de generación eléctrica. A través del diseño experimental, es posible construir prototipos de la celda, variar parámetros como el tipo de microorganismo, el material de los electrodos o la disposición de los ánodos, y medir con precisión la producción de voltaje y corriente en cada configuración.

En relación con este contexto, como punto de partida se realizó una salida de campo a la lavadora y lubricadora MAGBLAD, ubicada (Ver Figura 5) en la intersección de la Av. Luis Cordovez y la Cap. Edmundo Chiriboga (esquina), cuya localización se obtuvo mediante un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS). La muestra de agua residual, generada por el proceso de lavado de autos en este establecimiento, se recolectó en un recipiente de plástico, se envasó y selló en un envase de 3 litros, y posteriormente se trasladó al Laboratorio de Servicios Ambientales de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la UNACH. Allí se realizó su análisis fisicoquímico y posteriormente el montaje experimental de la CCM-TA en el laboratorio de física aplicada de la Facultad de Ingeniería.

Figura 5

Lavadora y Lubricadora "MAGBLAD"



Tras la delimitación del área de estudio, se efectúa la recolección de la muestra del efluente líquido (agua residual) resultante del proceso de lavado de autos. Es fundamental asegurar la toma de muestra con anterioridad a su disposición en la red de alcantarillado sanitario de la ciudad de Riobamba. La confluencia de este efluente con otras aguas residuales (aguas negras) dentro de la red, anularía la validez del proyecto de investigación.

Figura 6

Toma de la muestra del Agua Residual del proceso de lavado de autos



Nota. La toma de la muestra se la debe realizar de manera que esta no llegue a la descarga hacia la red de alcantarillado.

3.5.2 Análisis fisicoquímico de la muestra

El análisis fisicoquímico del agua residual recolectada en la lavadora y lubricadora MAGBLAD permitió cuantificar parámetros tales como: Potencial de Hidrógeno (PH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DBO), Sólidos totales, Plomo (Pb), Nitrato (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Fosfatos

(PO_4^{3-}) y Mercurio (Hg) (Arely Cárdenas, 2022). Dichos parámetros se evaluarán mediante los siguientes métodos y normas detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 2

Parámetros fisicoquímicos analizados en el Laboratorio

Parámetro	Unidad	Método
Potencia del Hidrógeno (pH)	-	STANDARD METHODS 4500 – H B
*DBO5	mg O ₂ /L	STANDARD METHODS 5210 – B
*DQO	mg/L	STANDARD METHODS 5220 – D
*Sólidos Totales	mg/L	STANDARD METHODS 2540 – B
*Plomo	mg/L	STANDARD METHODS 3500 Pb – 3111B
*Nitrato	mg/L	STANDARD METHODS 4500 – NO ₃ - E
*Nitrito	mg/L	STANDARD METHODS 4500 – NO ₂ - B
*Fosfato	mg/L	STANDARD METHODS 4500 – P – E
*Mercurio	mg/L	STANDARD METHODS 3500 Hg – 3111B

Nota. Los ensayos marcados con (*) no cuenta la acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriana (SAE).

3.5.3 Obtención de los electrodos (barras de grafito)

Para la obtención de los electrodos de grafito se parte del reciclaje de las baterías Tipo A – Alcalinas, mismas que en su composición estructural poseen grafito, este componente es de vital importancia ya que permite conducir los electrodos hacia los terminales positivos del sistema que se esté configurando (Revelo, 2013).

Figura 7

Extracción de barras de grafito (electrodos)



Nota. Para la extracción de las barras de grafito se precisó de pinzas y alicates para separar y limpiar el resto de las partes que componen una batería de este tipo.

3.5.3.1 Prueba de circuito abierto para los electrodos

La determinación del estado funcional de los electrodos obtenidos se llevó a cabo mediante una prueba de circuito abierto (o de continuidad) empleando un multímetro. Este procedimiento permitió verificar la conductividad de cada electrodo, un factor crucial para asegurar el flujo adecuado de la energía generada, para ello se debe colocar cada una de las puntas del multímetro en los extremos del electrodo (Takamura, 2021).

Figura 8

Prueba de Circuito Abierto para los electrodos



Nota. Un pitido de baja intensidad proveniente del multímetro señala la correcta conductividad del electrodo, asegurando la transmisión de energía.

3.5.4 Activación de las Membranas de Intercambio de Protones

Debido a que las CCM con múltiples ánodos pueden experimentar variaciones en el flujo de combustible (H_2) y del agente oxidante (O_2 o aire), es necesario realizar un proceso de activación, este procedimiento mejora la actividad iónica, asegurando una conducción eficiente de protones, minimizando las pérdidas de energía y maximizando la conductividad de la membrana (Mauritz, 2016).

Además, una membrana de intercambio protónico (MIP) correctamente activada responde mejor a los cambios de carga y ayuda a evitar la formación de “hot spots” (puntos calientes) (Mauritz & Moore, 2004).

En celdas de combustible avanzadas, como las que utilizan triple ánodo, la activación de la membrana es fundamental para maximizar la eficiencia energética, garantizar la uniformidad de las reacciones electroquímicas y prolongar la vida útil del sistema; sin este paso, el rendimiento de la celda se vería afectado por mayores pérdidas óhmicas y una degradación más rápida de los componentes (Larminie & Dicks, 2003).

Es así como en el desarrollo de este proyecto de investigación se propone emplear “Tela de Serigrafía” de manera que por sus condiciones de alta porosidad pueda ser empleada como MIP, pero para ello es necesario realizar una activación química a la membrana aumentando así la conductividad iónica y se usa una solución alcalina compuesta básicamente por Hidróxido de Sodio (NaOH) y agua destilada. Dicho procedimiento se detalla a continuación:

- Disolver 3g de NaOH por cada 100 mL de agua destilada (2 M).
- Calentar la solución en una temperatura controlada que oscile entre los 60–90 °C.
- Sumergir la tela en la solución durante 1–2 horas.
- Enjuagar con agua destilada hasta alcanzar pH neutro.
- Secar al aire o a baja temperatura.

Figura 9

Activación de la Membrana de Intercambio de Protones



3.5.5 Activación de los electrodos (barras de grafito)

Se ha optado por realizar una activación química, a base de emplear ácido nítrico (HNO_3), de modo que corroa selectivamente la superficie del grafito, formando microporos y nanoestructuras que crean “puentes redox” entre los electrodos y las bacterias presentes en el agua residual (Feng et al., 2010).

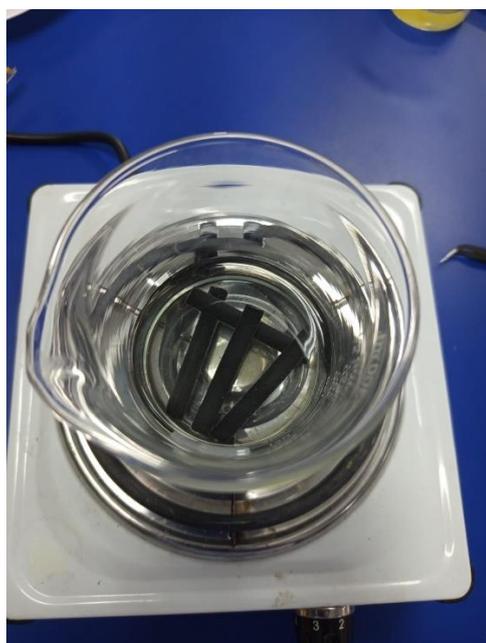
Al emplear el HNO_3 como agente de activación para las barras de grafito, se oxida la superficie del grafito, introduciendo grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$), hidroxilos ($-\text{OH}$) y carbonilos ($\text{C}=\text{O}$), que mejoran la adhesión microbiana.

Además de ello, el ácido nítrico actúa como un removedor de contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como capas pasivantes que disminuyen la resistencia interna del grafito (electrodo) y previene la polarización del ánodo, asegurando una distribución uniforme de corriente (Sun & Dillon, 2011). Dicho procedimiento se detalla a continuación:

- Limpiar los electrodos con agua destilada.
- Preparar una mezcla de 50 mL de HNO_3 con 100 mL de agua destilada.
- Calentar ligeramente la solución a temperatura controlada de 60–70 °C.
- Sumergir los electrodos durante 1–2 horas.
- Enjuagar con agua destilada hasta neutralizar el pH.
- Secar al aire o a baja temperatura (60 °C).

Figura 10

Activación de electrodos (barras de grafito)



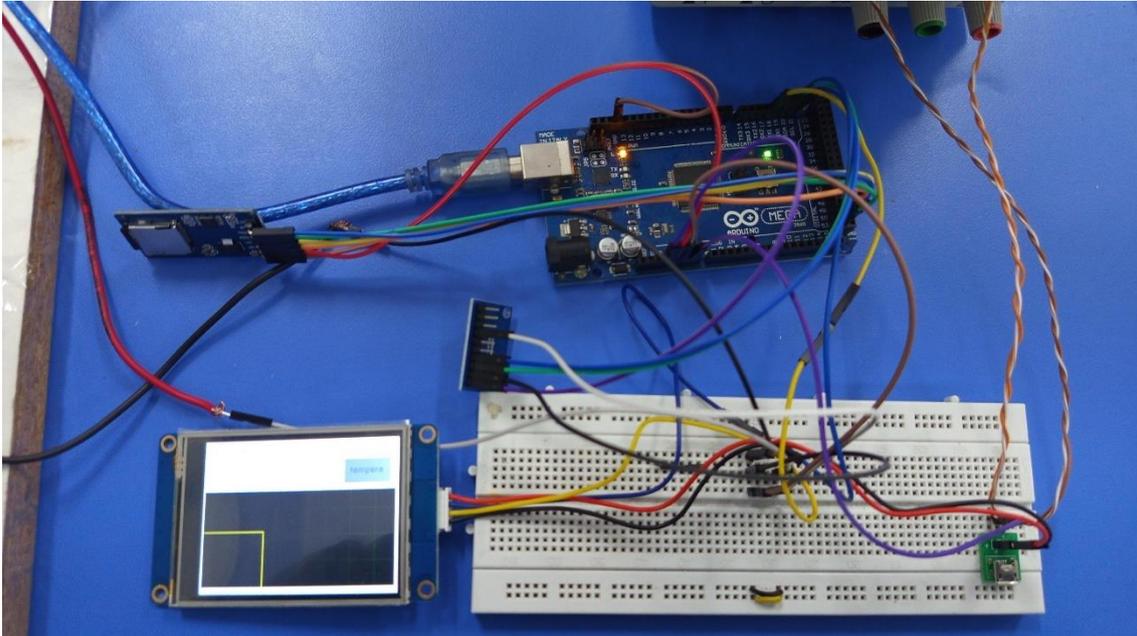
3.5.6 Evaluación de CCM-TA – Voltaje

Las CCM-TA fueron monitoreadas utilizando una tarjeta de adquisición de datos desarrollada por el estudiante y el docente Tutor. Esta tarjeta incorporó un procesador ESP32, encargado de gestionar dos módulos de conversión analógica-digital (ADC) para la lectura de las señales proveniente de la CCM, además consta con un lector de Módulo Transmisor RTD PT100 para sensores de temperatura PT100 ubicados en cada una de las cámaras.

El sistema fue alimentado por una fuente de energía fotovoltaica, lo que permitió asegurar la adquisición continua del voltaje generado por cada celda, medido en milivoltios, con una frecuencia de muestreo de un dato por minuto. Los datos de voltaje fueron almacenados localmente en una tarjeta Micro SD de 16 GB.

Figura 11

Tarjeta de adquisición de datos



3.5.7 Instrumentos

Para el diseño de las cámaras anódica y catódica se emplea el software **SOLIDWORKS®** para modelar una estructura con un volumen útil de 216 cm³ de cada una las cámaras que componen la Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo, correspondiente a dimensiones internas de 6 cm x 6 cm x 6 cm para cada una de ellas

Se empleó una cámara fotográfica para documentar la evidencia del ensamble del prototipo.

Un multímetro que nos ayudó a determinar la continuidad del circuito y medir el voltaje producido por la Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo.

Una tarjeta de adquisición de datos con salida a una LCDs, que permite visualizar en tiempo real el funcionamiento del prototipo.

3.5.8 Identificación de Variables

- **Variable independiente:** Celda de Combustible Microbiana
- **Variable dependiente:** Energía Eléctrica

Tabla 3

Operacionalización de la Variable Independiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Índice	Metodología
Celda de Combustible Microbiana	Una celda de combustible microbiana (CCM) es un dispositivo que convierte la energía química contenida en compuestos orgánicos directamente en energía eléctrica mediante la acción de microorganismos.	Número de Celdas construidas / Número de celdas planificadas	1	Principio de Funcionamiento de la celda – diseño de (Liu & Logan, 2004)

Nota. Elaboración propia

Tabla 4

Operacionalización de la Variable Dependiente

Variable	Conceptualización	Indicador	Índice	Metodología
Energía Eléctrica	Es una forma de energía que resulta del movimiento de electrones a través de un conductor.	Medida de densidad de potencia medida /Medida de densidad de potencia planeada	1	Curva para determinar la de densidad de potencia y corriente

Nota. Elaboración propia

3.5.9 Procedimiento de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación se realizó de la siguiente manera:

- a) Un análisis bibliográfico extenso sobre el funcionamiento de las Celdas de Combustible Microbianas (CCM).
- b) Se analizó los principales componentes de los cuales están constituidos una CCM.
- c) Se recolecto información referente al diseño preliminar del prototipo de la CCM de triple ánodo.
- d) Se recabó información de la manera de verificar la eficiencia del funcionamiento de la CCM.
- e) Se seleccionó los materiales para la construcción de las cámaras anódicas y catódicas.
- f) Se realizó el prototipo y construcción mediante la utilización de un Software CAD para realizar un análisis preliminar de la ubicación de las cámaras.
- g) Se recolecto un total de 3 litro de agua residual del proceso de lavado de autos.
- h) Se realiza un análisis químico para determinar las condiciones de operación en las cuales trabajará la celda y determinar el sustrato a emplearse en la cámara catódica.
- i) Se desarrolló y construyo una tarjeta de adquisición de datos a partir de la programación de un Arduino, para poder medir en tiempo real voltaje, amperaje y valores de temperatura en cada una de las cámaras.
- j) A partir de la implementación de una tarjeta de adquisición de datos con almacenamiento externo (Tarjeta SD) se realiza el monitoreo en tiempo real del desempeño de la celda.
- k) La información recolectada se dispone en una matriz, en la cual se detallan los valores de amperaje, para posteriormente ingresarlas a un software la cual nos ayudará a realizar las gráficas de densidad de corriente y de potencia.
- l) Se procesan y analizan los datos y se obtienen los resultados con los valores reales obtenidos.
- m) Se desarrolla el presente trabajo escrito.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.2 Recursos empleados en el método tradicional

La ejecución del método tradicional en el desarrollo de un proyecto de investigación describe necesariamente una inversión de recursos: a) materiales, b) económicos y c) humanos. Ver Tabla 5.

Tabla 5

Recursos financieros empleados en el método tradicional

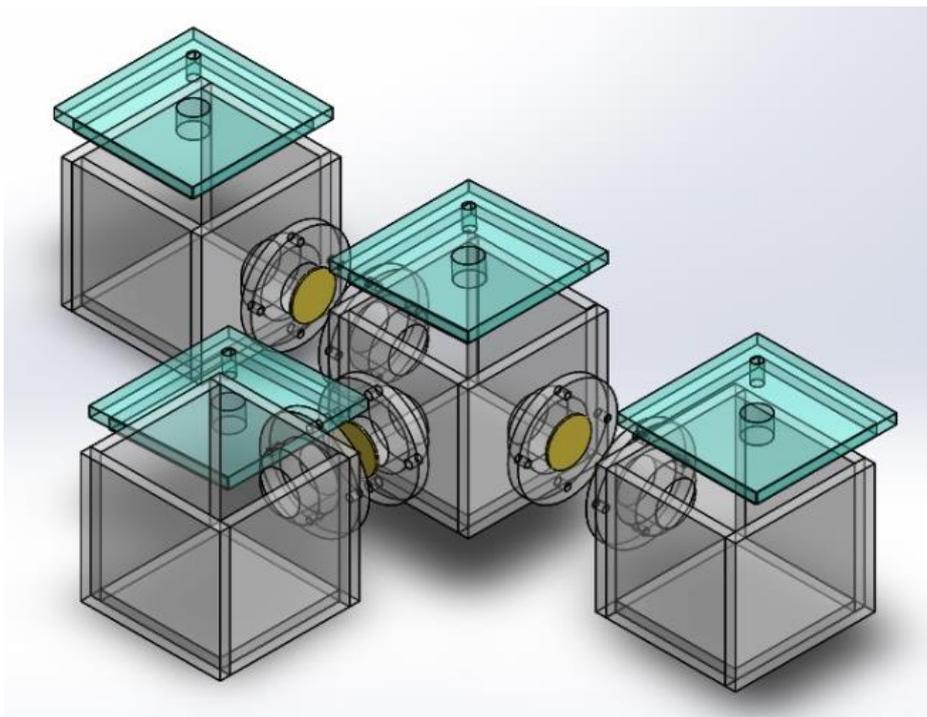
Id	Descripción	Costo (USD)
1	Plancha de Acrílico Transparente A3 (4mm)	\$ 42,00
2	Pegamento Termosellado 85 gr	\$ 5,00
3	Prisioneros y tuercas (3 mm)	\$ 10,00
4	Tela de Serigrafía (MIP)	\$ 4,00
5	Multímetro PROSKIT MT-1210	\$ 20,00
6	Cautín PROSKIT 300W	\$ 9,56
7	Análisis Físicoquímico de la Muestra	\$ 119,00
8	Pantalla Nextion NX3224T028 2.8 inch	\$ 46,20
9	Lector de tarjetas SD para Arduino	\$ 2,05
10	Convertor de voltaje análogo a digital ADS1115	\$ 20,00
11	Módulo Transmisor RTD PT100	\$ 17,39
12	Conector Tipo Lagarto 35 mm	\$ 1,57
13	Cable Flexible Aislado TFF 22 AWG	\$ 0,35
14	Cable Tipo V8 MicroUSB Xmax	\$ 2,17
15	Regulador de Voltaje MP1584EN 3A Step Down	\$ 1,78
16	Buffer Químico – Sustrato Catalítico	\$ 63,00
TOTAL		\$ 364,07

4.3 Diseño y construcción de la CCM-TA

Uno de los primeros resultados obtenidos fue el diseño del prototipo de la Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo (Ver Figura 12). Mediante la utilización del Software CAD, SOLIDWORKS® se realizó el diseño de las cámaras anódicas, un total de tres, en las cuales consta de un saliente en la cual con la ayuda de una brida será sujeta a la cámara central (cátodo).

Figura 12

Vista Isométrica del prototipo de la CCM de Triple Ánodo.



El diseño propuesto utiliza un sistema de bridas que permite desmontar fácilmente cada una de las cámaras anódicas en relación con la cámara catódica central, lo cual facilita su mantenimiento y operación. Además, al contar con una estructura más compacta, las cámaras anódicas trabajan de forma conjunta, lo que mejora la estabilidad del rendimiento de la celda de combustión microbiana de tipo tubular anódico (CCM-TA). Cada cámara incluye un orificio con forma de diafragma, alineado concéntricamente con los tres diafragmas de la cámara central (cátodo). Estos orificios permiten colocar la membrana de intercambio de protones, esencial para el funcionamiento del sistema.

Para lograr una correcta contención de los sustratos a utilizarse Velasquez-Orta et al. (2009), en sus estudios realizados ha demostrado que el acrílico es un material ideal para el diseño de cámaras en celdas de combustible microbianas (CCM), debido a sus propiedades físicas y químicas. En primer lugar, presenta una alta resistencia a una amplia gama de sustancias químicas y a condiciones extremas de pH, lo cual es esencial dado el carácter corrosivo de algunos electrolitos empleados en las CCM (Buitrón & Pérez, 2011).

Además, el acrílico no interactúa ni interfiere con los microorganismos, los electrolitos ni con los productos generados durante el funcionamiento de la celda, lo que garantiza la estabilidad del sistema y evita reacciones secundarias no deseadas (Arely Cárdenas, 2022). Finalmente, finalizada la fase de diseño de cada cámara que integra la Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo, se emplean planchas de acrílico de 4 mm de espesor, procesadas mediante corte láser, para la obtención de los elementos constitutivos de cada compartimento. Esta metodología garantiza la precisión dimensional necesaria para el ensamblaje de las cámaras.

Las condiciones y especificaciones del ensamble de cada de una de las cámaras se detallan en los planos anexados al presente documento.

Figura 13

Piezas que constituyen las cámaras de la CCM-TA

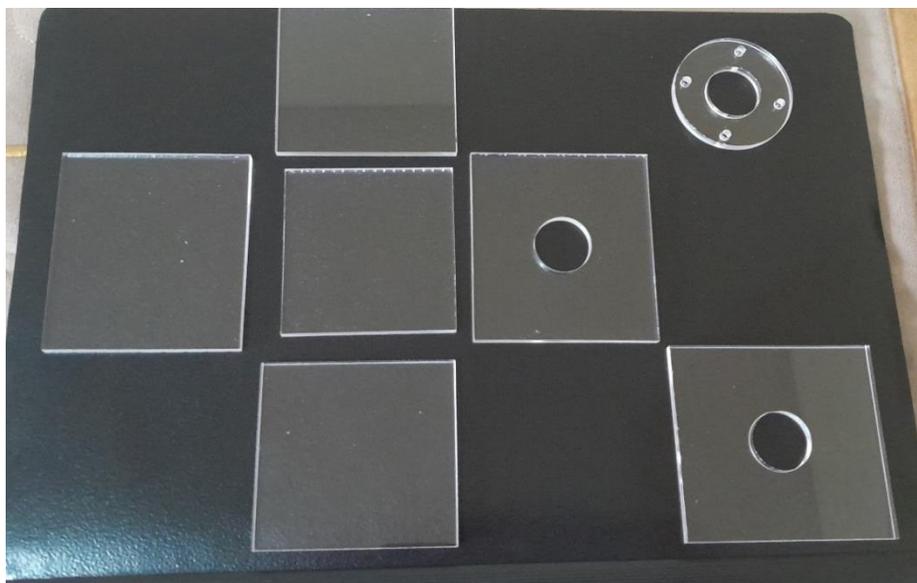
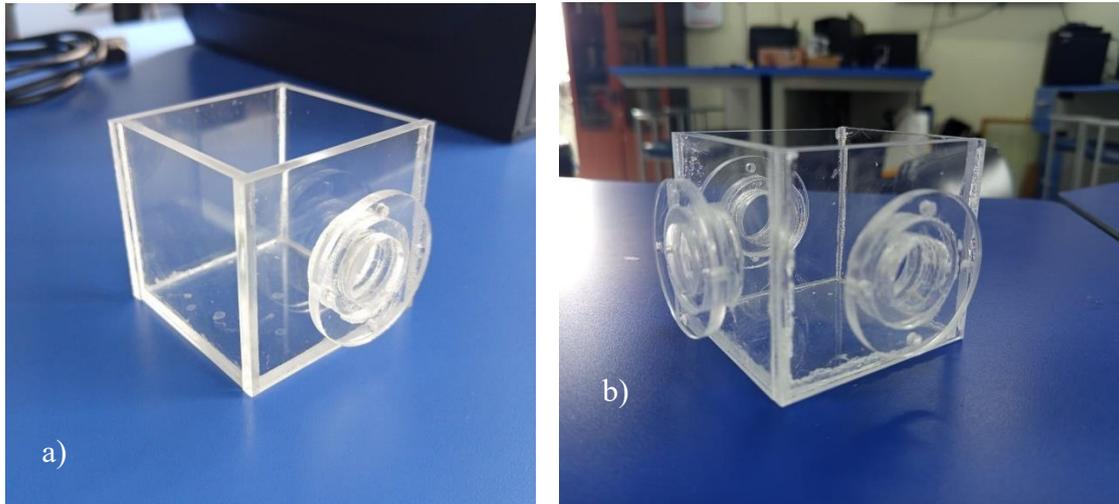


Figura 14

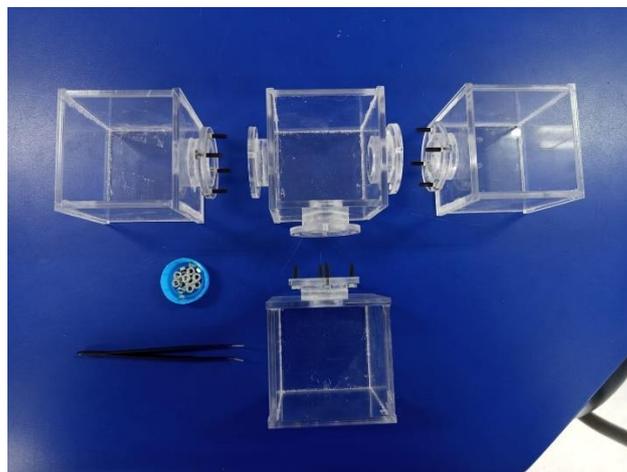
Cámara Anódica y Catódica Ensamblada



Nota. La imagen ilustra la a) cámara anódica y b) cámara catódica, cuyas piezas están unidas con pegamento termosellado para asegurar la contención de los sustratos.

Figura 15

Ensamble Estructural de la CCM-TA



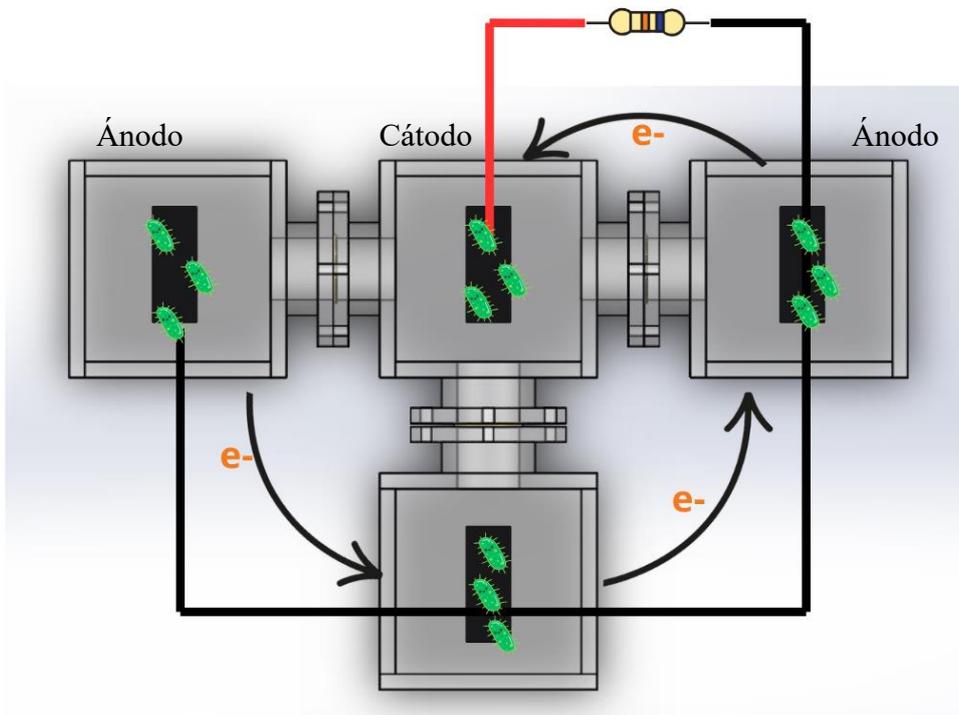


Nota. La imagen ilustra el armado estructural de la CCM-TA con la MIP en el diafragma que conecta el cátodo con los ánodos.

Una vez finalizada la etapa de ensamblaje, se diseñó el circuito para conectar los tres ánodos en serie. Esta configuración genera dos cargas (una positiva y otra negativa), lo que permite evaluar el desempeño de la CCM-TA mediante la medición del voltaje (mV) y el amperaje (mA). Con estos valores, se determinarán los indicadores de densidad de potencia y densidad de corriente.

Figura 16

Diagrama de Circuito para la CCM-TA



El diagrama ilustra el mecanismo mediante el cual las bacterias electrogénicas presentes en las aguas residuales oxidan los sustratos orgánicos, liberando electrones como subproducto metabólico. Estos electrones son transferidos al ánodo a través de un circuito externo conectado en serie. La configuración del sistema integra tres cámaras interconectadas en una única estructura, lo que optimiza su compactibilidad y mejora la estabilidad operacional del conjunto.

Posteriormente se agregan cada uno de los sustratos a las respectivas cámaras, el agua residual del producto del proceso de lavado de autos a las cámaras anódicas y la sustancia catalítica a la cámara catódica (cámara central), de modo que se pueda empezar la mediciones iniciales y de adaptación de las cámaras a las condiciones en las cuales serán evaluadas, donde en primer lugar se realizó la medición con un multímetro para verificar que la CCM-TA se encuentre en funcionamiento obteniendo un voltaje inicial generado de 114,5 mV; posteriormente es conectada a una tarjeta de adquisición de datos que permite la medición continua del voltaje generado por la celda.

Figura 17

CCM-TA en funcionamiento

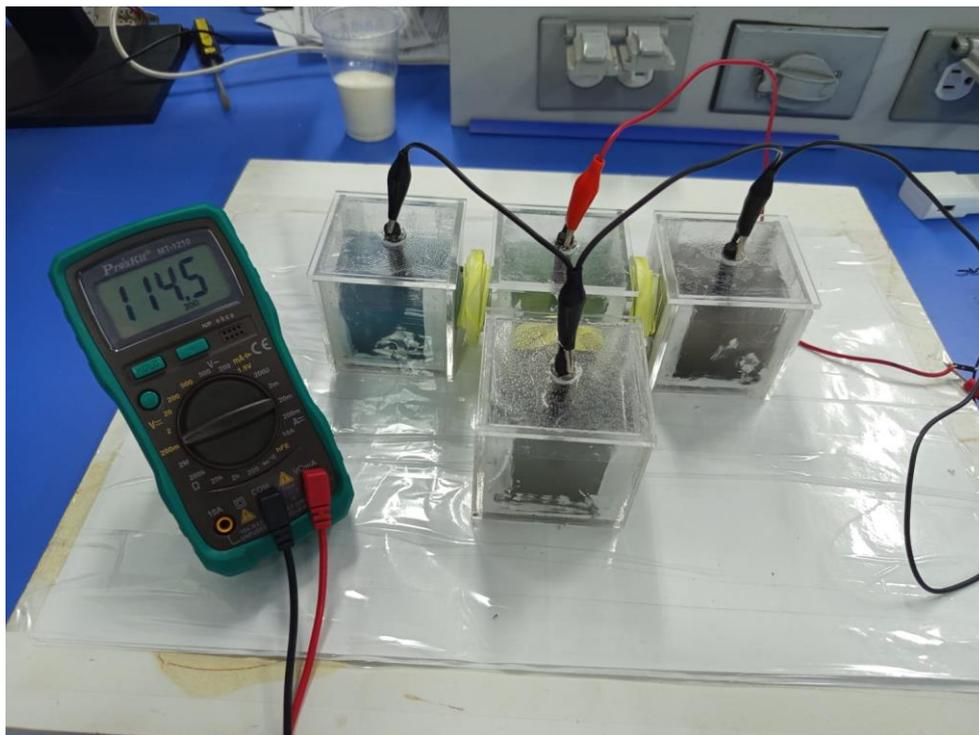
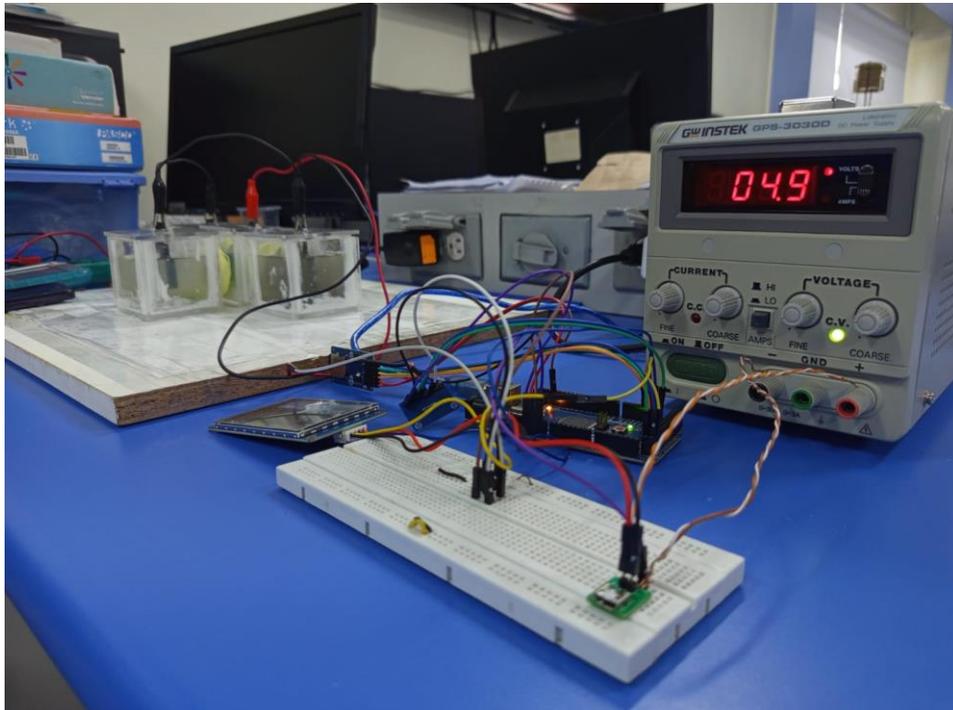
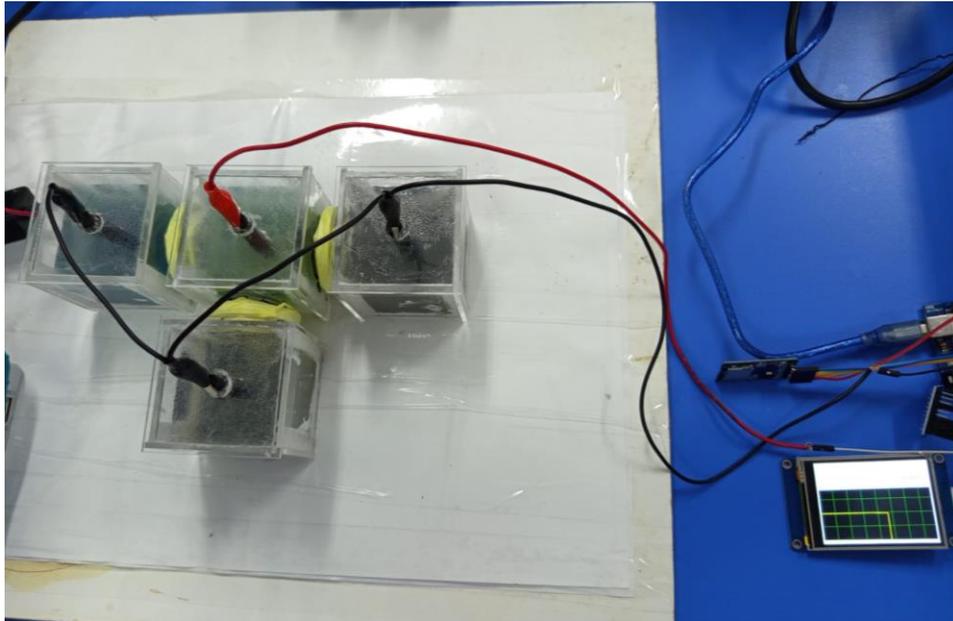


Figura 18

CCM-TA conecta a la Tarjeta de Adquisición de datos



Nota. Las placas se conectan a una fuente de CC regulable, ya que requieren 5V según sus especificaciones técnicas.

4.4 Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual

Los resultados obtenidos a partir del análisis realizado en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la carrera de Ingeniería Ambiental de la UNACH de la muestra del agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD, se detallan a continuación:

Tabla 6

Identificación fisicoquímica del agua residual del proceso de lavado de autos

Parámetro	Unidad	Límite Permisible	Resultados
Potencia del Hidrógeno (pH)	-	5 – 9	7,09
*DBO5	mg O ₂ /L	100	3000
*DQO	mg/L	250	2400
*Sólidos Totales	mg/L	1600	1757
*Plomo	mg/L	0,2	1976,7
*Nitrato	mg/L	10	200
*Nitrito	mg/L	10	122,2
*Fosfato	mg/L	-	0,52
*Mercurio	mg/L	0,005	141,6

Nota. Los resultados obtenidos se referencian en cuanto a los límites establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes.

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 7, evidencian que el 87,5 % de los parámetros analizados exceden los límites establecidos por la normativa vigente, lo que indica un nivel significativo de contaminación. En consecuencia, se concluye que el agua residual evaluada no cumple con las condiciones mínimas requeridas para sustentar vida, siendo ambiental y biológicamente inviable para su reutilización sin un tratamiento previo adecuado.

4.5 Medidas electroquímicas.

4.5.1 Voltaje producido

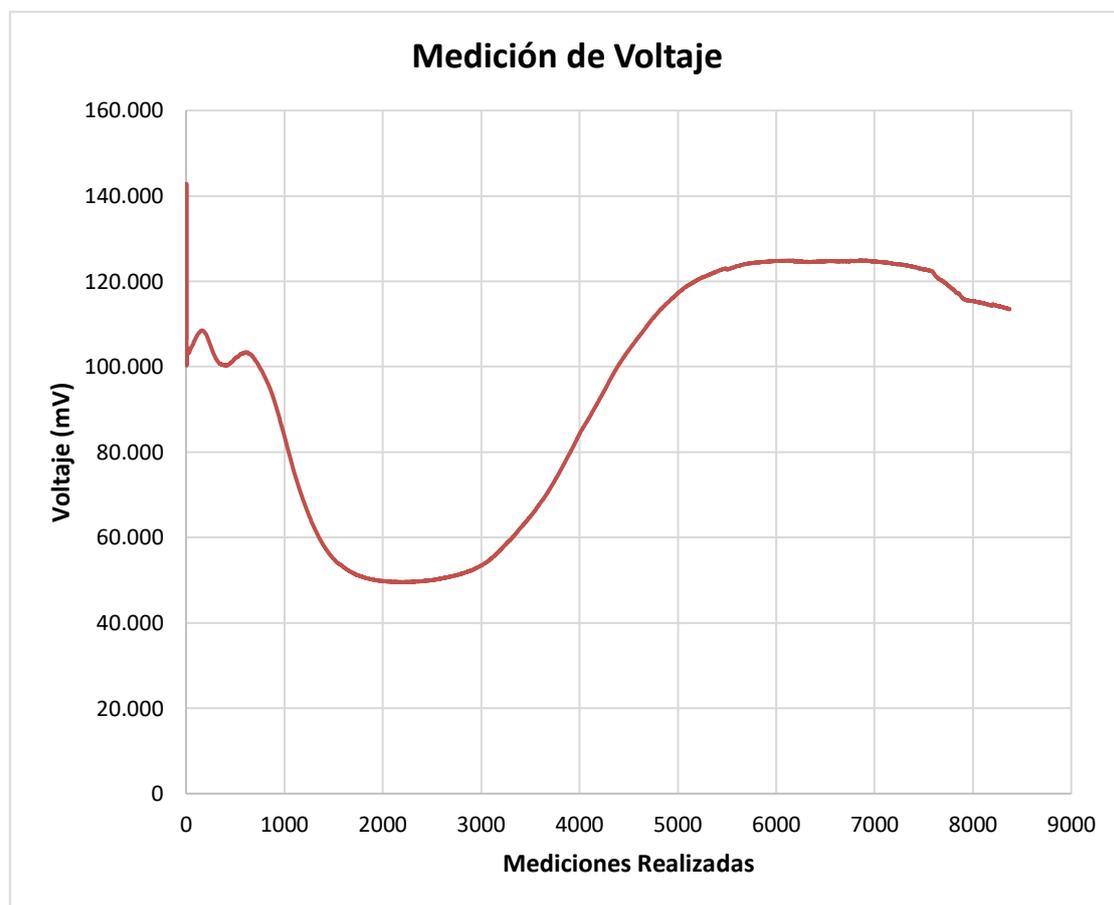
El voltaje producido, se presenta en la Figura 19, donde se observa el comportamiento de la CCM-TA, de un total de 8375 mediciones continuas. Al inicio (0

– 1000 mediciones): se observa una caída rápida de voltaje de 140 mV hasta unos 80 mV, que responde a la adaptación del sistema con el sustrato y la colonización microbiana; luego se identifica una zona de adaptación (1000 – 3000 mediciones): donde se observa una caída del voltaje al mínimo (49,51 mV), que puede deberse a una baja actividad microbiana; en el rango de mediciones de: 3000 – 7000 se observa una etapa de recuperación y estabilización que responde a un aumento significativo y progresivo de voltaje hasta alcanzar un pico máximo de 142,86 mV, que podría deberse a que el Biofilm generado ha alcanzado su etapa de maduración CITA; al final en el rango de 7000 – 8500 mediciones se evidencia una ligera caída de voltaje, esto posiblemente generado por el agotamiento de nutrientes o acumulación de subproductos tóxicos CITA.

En la figura 19, se presenta los resultados del voltaje producido por la CCM-TA en condiciones termo higrométrica de la ciudad de Riobamba para un periodo 24 días (Jang et al., 2004).

Figura 19

Voltaje producido

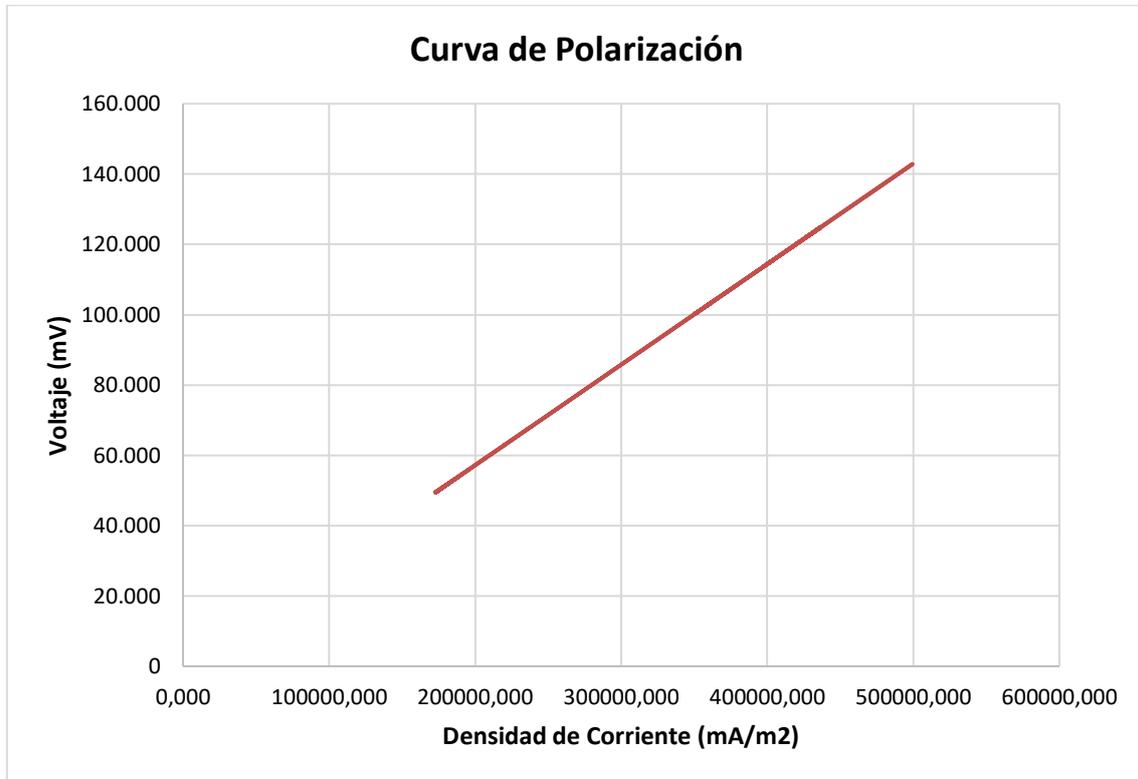


4.5.2 Curva de polarización

En la figura 20 se presenta la curva de polarización. Se observa una correlación lineal de los datos de densidad de corriente y el voltaje generado por la CCM-TA.

Figura 20

Curva de Polarización Generada



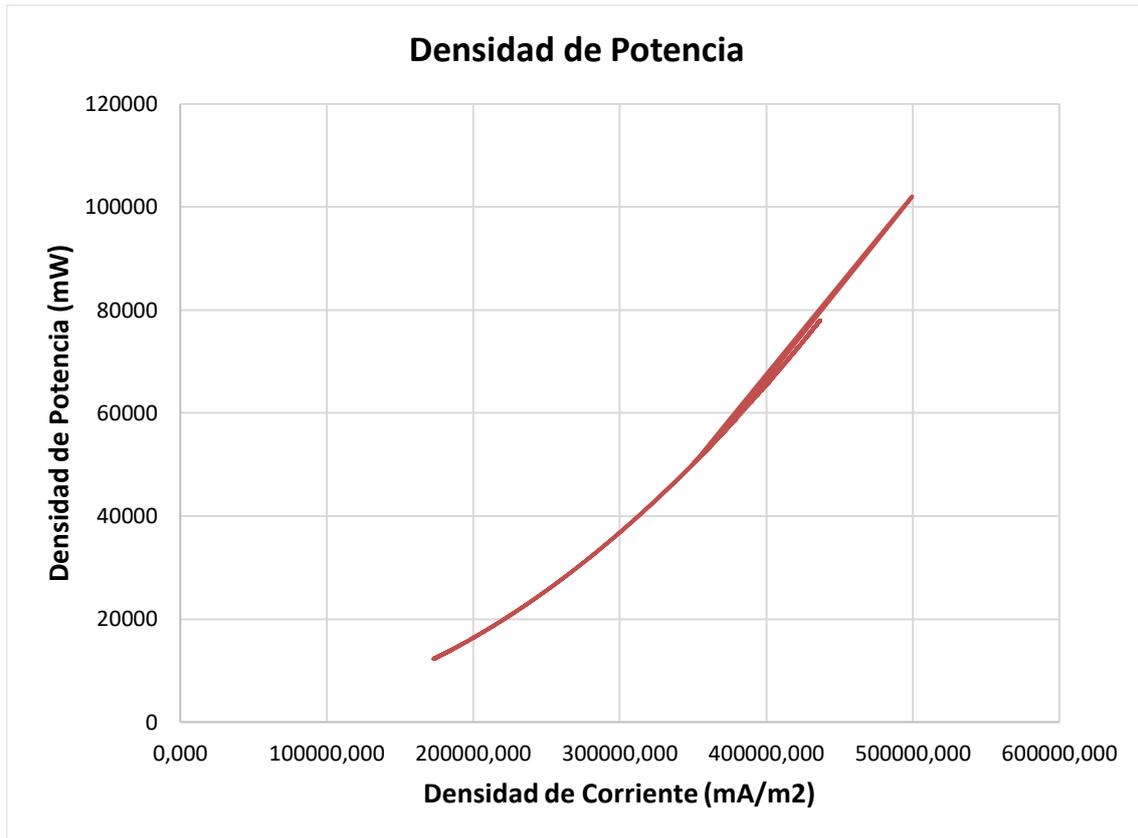
La curva de polarización indica una resistencia estable sin variación significativa de los datos por lo que se mantienen constantes. Se observa una relación directamente proporcional entre los parámetros evaluados en los dos ejes respectivos, es decir, a mayor densidad de corriente, mayor generación de voltaje.

4.5.3 Densidad de Potencia

En la Figura 21 se muestra la *Densidad de Potencia (mW)* vs *Densidad de Corriente (mA/m²)*, generada por la CCM-TA, esta curva describe una tendencia ascendente que indica un crecimiento acelerado de la potencia generada con respecto al incremento de la corriente.

Figura 21

Densidad de Potencia



La curva de *Densidad de Potencia (mW)* vs *Densidad de Corriente (mA/m²)* muestra una curva de tendencia de tipo cuadrática. No se observa la caída de rendimiento, lo que muestra que el sistema mantiene una buena capacidad de respuesta con respecto a la demanda proporcional de corriente.

4.5.4 Discusión de los resultados

Los resultados demostraron una generación de energía limpia, con un voltaje máximo de 142,86 mV y un mínimo de 49,51 mV sin embargo Liu et al, (2004) utilizando un sustrato de glucosa en una CCM con un ánodo logra un voltaje máximo de 200 mV en 10 días de operación posiblemente logra una mejor eficiencia electroquímica de la CCM por el uso de electrodos grafito puro y Membranas de Nafion 117A cuyas características presentan mejor para la evaluación de las medidas electroquímicas (Liu et al., 2004). en la Tabla 7 se muestra resultados de investigaciones relacionadas donde los autores generan voltajes entre 50 mV y 200 mV, y un promedio de 137 mV como máximo lo que

muestra que los resultados de la CCM-TA desarrollada para la generación de energía eléctrica empleando agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD de esta investigación está sobre el promedio de las 10 investigaciones más relevantes encontradas y supera el 70% en resultados de generación de voltaje máximo de los 10 autores consultados.

Tabla 7

Comparación con otros resultados

Investigación	Sustrato/Ánodo	Voltaje Máximo (mV)	Tiempo de Evaluación	Electrolito/Membrana
Este proyecto de Investigación	Agua residual de lavado de autos	142,86	24 días	Ferricianuro de K, fosfatos, poliéster
Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology (Logan et al., 2006).	Aguas residuales domésticas	100 – 150	30 días	PEM (Nafion)
Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation (Rabaey & Verstraete, 2005).	Aguas residuales industriales	80 – 120	20 días	Ferricianuro de K
Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells (Booki Min et al., 2005).	Lodo activado	50 – 90	15 días	Membrana de intercambio iónico

Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell (Liu et al., 2004).	Glucosa	180 – 200	10 días	Ferricianuro de K
A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor (You et al., 2006).	Acetato	150 – 170	14 días	PEM
Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell (Jang et al., 2004).	Aguas residuales urbanas	60 – 100	25 días	Membrana de intercambio de protones
Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure (Cheng et al., 2006).	Agua residual sintética	120 – 160	30 días	Ferricianuro de K
Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial	Aguas residuales de cervecería	90 – 130	28 días	Membrana de ultrafiltración

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Mediante el software SOLIDWORKS ©, se diseñó una Celda de Combustible Microbiana de Triple Ánodo (CCM-TA), con un volumen útil de 216 mL, de manera que cada una de las cámaras anódicas este conectadas hacia la cámara catódica (cámara central) mediante un diafragma y un método de sujeción entre las cámara del tipo brida.
- La CCM-TA con ánodos de agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD produce un voltaje máximo de 142,86 mV y un mínimo de 49,51 mV en 24 días de ensayo, utilizando una solución electrolítica formada de: a) 16,45 g de ferricianuro de potasio, b) 6,9 g de dihidrogenofosfato de potasio, c) 11,4 g de hidrogenofosfato de dipotasio y d) agua destilada, diseñado con un volumen útil de 216 cm³; con membrana de poliéster activado con NaOH 2M en condiciones termo higrométricas de la ciudad de Riobamba.
- La curva de polarización generada con la CCM con triple ánodo de agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD, tiene un comportamiento lineal de los datos de Voltaje (mV) vs. Densidad de Corriente (mA/m²) lo que indica una buena eficiencia electroquímica dentro del sistema por una menor resistencia interna que permite una conversión más eficiente de la energía química en eléctrica, y un buen desempeño del triple ánodo.
- La curva generada a partir de la Densidad de Potencia (mW) vs Densidad de Corriente (mA/m²) la CCM con triple ánodo de agua residual del proceso de lavado de autos de la Lavadora y Lubricadora MAGBLAD, tiene una relación cuadrática o exponencial, que indica que a medida de que la densidad de corriente aumenta la potencia generada por unidad de área del electrodo aumenta de forma eficiente, es decir no pierde energía generada de acuerdo al aumento de corriente, y señala una eficaz cinética de transferencia de electrones.

5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda para trabajos posteriores implementar mejoras en el diseño estructural para el diseño y construcción de las CCM-TA, esto a debido de facilitar la condiciones de montaje y desmontaje de la CCM, además de mejorar la hermeticidad del sistema interno que conforman la CCM-TA.
- Para optimizar el diseño de la CCM-TA en futuros estudios, se sugiere evaluar diferentes materiales de electrodos (como grafito modificado o mallas metálicas) para mejorar la conductividad y eficiencia energética, así como probar membranas de intercambio de protones alternativas (ej.: papel celofán, Nafion, caucho) que puedan incrementar el rendimiento electroquímico del sistema; estos cambios permitirían identificar la configuración más eficiente y escalable para aplicaciones prácticas.
- Un aspecto clave para mejorar el rendimiento en futuras investigaciones consiste en incrementar el área superficial de los electrodos y garantizar su inmersión completa en los sustratos de ambas cámaras (anódica y catódica), lo que permitiría: a) maximizar el contacto bacteria-electrodo para mejorar la transferencia de electrones, y b) optimizar la eficiencia energética global del sistema. Esta modificación estructural podría implementarse mediante el uso de electrodos porosos de mayor área geométrica que favorezcan su inmersión global.

BIBLIOGRAFÍA

- 360, L. R. *La Revolución Industrial: Orígenes y Desarrollo*.
<https://www.larenaissance360.com/ciencias-sociales/la-revolucion-industrial/>
- Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastian, P. J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Interciencia*, 33(7), 503-509.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933706> (IN FILE)
- André, F. d. C., L.; Cerdá, E. (2012). La energías Renovables en el ámbito internacional *Cuadernos Académicos de ICE*, 21, 11-38.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46752305005>
- Arely Cárdenas, D. A., Guadalupe Pichardo, Daniel Martínez, Eduardo Camacho, Catalina Rodríguez, Víctor Pérez, Ángel Rico. (2022). Celdas de combustible microbiano como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 26(76), 3 - 10.
https://www.utm.mx/edi_anteriores/temas76/T76_E01_celdas_combustible_microbiano_aguas_residuales.pdf
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS UTILIZANDO AGUA RESIDUAL: EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5-11.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43219047001> (IN FILE)
- Cárdenas, D., Villegas, J. R., Solís, C., Sanabria-Chinchilla, J., Uribe, L., & Fuentes-Schweizer, P. (2022). Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. *Revista Colombiana de Química*, 51, 40-47.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042022000100040&nrm=iso
- Carrasquero, S. T., Karen; Mas y Rubí Peña; Marielba; Colina, Gilberto. (2015). Evaluación de un tratamiento fisicoquímico en efluentes provenientes del lavado de vehículos para su reutilización. *Revista Arbitraria Venezolana del Núcleo Costa Oriental del Lago*, 10, 122-139.
https://www.researchgate.net/publication/287215326_An_assessment_in_effluents_from_chemical_treatment_car_wash_for_reuse

- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications*, 8(3), 489-494. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2006.01.010>
- Condori, A., & Torres, G. . (2019). *Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica*. Universidad Peruana Unión]. Lima. <https://repositorio.upeu.edu.pe/items/70c6fa70-331c-4663-85b8-8a899a551078>
- Du, Z., H. Li y T. Gu. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, 25(5), 464-482.
- FAO. (1997). Quality control of wastewater for irrigated crop production. <https://www.fao.org/4/W5367E/W5367E00.htm>
- Feng, Y., Yang, Q., Wang, X., & Logan, B. E. (2010). Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(7), 1841-1844. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.030>
- Gualán Macas, E. R. (2019). *ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DE ACEITES VEHICULARES RESIDUALES A TRAVÉS DEL ESTUDIO ESTADÍSTICO EN LA ZONA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Rriobamba. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13583/1/65T00338.pdf>
- Heilmann, J., & Logan, B. E. (2006). Production of electricity from proteins using a microbial fuel cell. (1061-4303 (Print)).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. . (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill, Ed. Sexta ed.).
- Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S., & Kim, B. H. (2004). Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 39(8), 1007-1012. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00203-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00203-6)
- Jiménez, S. (2012). *ESTUDIO TEÓRICO PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR GRASAS Y ACEITES GENERADA POR LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL, DOMÉSTICA Y DE SERVICIOS* INSTITUTO

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18479/1/25-1-16898.pdf>

- Kim, I. S. C., K; Choi, M; Verstraete, W. (2008). Microbial Fuel Cells: Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation. *Environmental Engineering Research* 13(2), 51-56.
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). Proton Exchange Membrane Fuel Cells. In *Fuel Cell Systems Explained* (pp. 67-119). <https://doi.org/10.1002/9781118878330.ch4>
- Liliana Alzate-Gaviria, C. F.-A., Alberto Álvarez-Gallegos y P. J. Sebastián. (2008). GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA TIPO PEM. *Interciencia*, 33(7). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700008
- Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040-4046. <https://doi.org/10.1021/es0499344>
- Liu, H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. E. (2004). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2281-2285. <https://doi.org/10.1021/es034923g>
- Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *Environmental Science & Technology*, 41(9), 3341-3346. <https://doi.org/10.1021/es062644y>
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logan, B. E. R., J. M. (2007). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. (0966-842X (Print)).
- López Hincapié, J. D. (2014). *DESARROLLO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM) PARA APLICACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES* CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO

- TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C.]. Santiago de Querétero, México.
- Lovley, D. R., Holmes De Fau - Nevin, K. P., & Nevin, K. P. (2004). Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction. (0065-2911 (Print)).
- Mauritz, K. A., & Moore, R. B. . (2016). Chapter 9: PEMFC and SOFC Materials. In *Fuel Cell Fundamentals* (pp. 303-346). <https://doi.org/10.1002/9781119191766.ch9>
- Mauritz, K. A., & Moore, R. B. (2004). State of Understanding of Nafion. *Chemical Reviews*, *104*(10), 4535-4586. <https://doi.org/10.1021/cr0207123>
- Min, B., Cheng S Fau - Logan, B. E., & Logan, B. E. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. (0043-1354 (Print)).
- Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2005). Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Research*, *39*(20), 4961-4968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.039>
- Min, B., & Logan, B. E. (2004). Continuous Electricity Generation from Domestic Wastewater and Organic Substrates in a Flat Plate Microbial Fuel Cell. *Environmental Science & Technology*, *38*(21), 5809-5814. <https://doi.org/10.1021/es0491026>
- Mohan, S. S., J; S. Venkata Mohan, J. Shanthi Sravan, Sai Kishore Butti, K. Vamshi Krishna, J. Annie Modestra, G. Velvizhi, A. Naresh Kumar, Sunita Varjani, Ashok Pandey,. (2019). Chapter 1.1 - Microbial Electrochemical Technology: Emerging and Sustainable Platform. In Elsevier (Ed.), *Microbial Electrochemical Technology* (pp. 3-18). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00001-7>
- Morales Fiallos, F., Sanchez Proaño, R. G., & Acosta Lozada, R. (2019). Tratamiento de Efluentes de Lubricadoras y Lavadoras de Autos Mediante un Sistema de Lodos Activados de Lechos Suspendido a Escala de Laboratorio. . *Applied Ecology And Environmental Research*,, *3*(3), 170-179. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i1.278>
- Oh, S., Min B Fau - Logan, B. E., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. (0013-936X (Print)).
- Opoku, P. A., Jingyu, H., Yi, L., Guang, L., & Norgbey, E. (2022). Scaled-up multi-anode shared cathode microbial fuel cell for simultaneous treatment of multiple real

- wastewaters and power generation. *Chemosphere*, 299, 134401.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134401>
- Ortiz, G. M., Laura; Jiménez, Julia. (2014). Bacterias Eléctricas. *Biosaia: Revista de los másteres de Biotecnología Sanitaria y Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria*, 4, 74-77.
https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Articulo_destacado_numero_4.pdf
- Ortiz Ortiz, D. I. (2019). *Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica* Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca]. Cuenca. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17396/1/UPS-CT008309.pdf>
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>.
- Park, D. H., & Zeikus, J. G. (2003). Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. (0006-3592 (Print)).
- Pfeifer, P., Wall, C., Jensen, O., Hahn, H., & Fichtner, M. (2009). Thermal coupling of a high temperature PEM fuel cell with a complex hydride tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3457-3466.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.041>
- Prieto Díaz, V. I. M. d. V. P., Agustín. (1999). La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 37, 13-20.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30031999000100003&nrm=iso

- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology letters*, 25, 1531-1535. <https://doi.org/10.1023/A:1025484009367>
- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 291-298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., & Oh, S. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 745-756. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031>
- Regan, B. E. L. a. J. M. (2006). Microbial Fuel Cells—Challenges and Applications. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5172-5180. <https://doi.org/10.1021/es0627592>
- Revelo, D., Hurtado, N., & Ruiz, J. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica. *Información Tecnológica*, 24(6), 17-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>.
- Ríos, S. (2016). *Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi ESPOCH. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. <https://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/5662/1/236T0214.pdf>
- Ritchie, H. R., P; Roser, M. (2020). Energy Production and Consumption. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption#article-citation>
- Rittmann, B. E. (2006). Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 24(6), 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2006.04.003>
- Romero Mejía, A. A., Vásquez, J. A., & Lugo González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, 16, 118-143. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000200011&nrm=iso
- Sandra Hernandez, M., & Danae Duana, A. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 9(17). <https://doi.org/10.29057/icea.v9i17.6019>

- Scott, K. y. H. Y., Eileen. (2016). Materiales for microbial fuel cells and reactor desing. In *Microbial Electrochemical and Fuel Cells: Fundamentals and Applications* (pp. 117-175). Woodhead Publishing.
- Sengodon, P., Hays, D. B. (2012). Microbial Fuel Cells, Future Fuel Technologies *National Petroleum Council (NPC) Study*. https://www.npc.org/FTF_Topic_papers/13-Microbial_Fuel_Cells.pdf
- Shankar, R., Mondal, P., Chand, S. (2013). Modelling and simulation of double chamber microbial fuel cell: Cell voltage, power density and temperature variation with process parameters. *Green*, 3(4), 181-194.
- Smith, H. (2014). *Introduction to Research Methods*.
- Song Hao, J. J., Li Feng, Zhang Baocai (2022). *Pila de Celdas de Combustible Microbianas para reducción de Cr (VI)* (China Patent No.
- Sun, K., & Dillon, S. J. (2011). A mechanism for the improved rate capability of cathodes by lithium phosphate surficial films. *Electrochemistry Communications*, 13(2), 200-202. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2010.12.013>
- Takamura, T. (2021). PRIMARY BATTERIES – AQUEOUS SYSTEMS | Alkaline Manganese–Zinc. In J. Garche (Ed.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* (pp. 28-42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00098-8>
- Torres, D. (2012). *Caracterización microbiológica del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada Sede Cajicá* Universidad Militar Nueva Granada]. Bogotá. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/9344/TorresMartinezDarwinLeandro2012.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- UNESCO. (2017). *Las aguas residuales: el recurso desaprovechado, resumen ejecutivo*. División de Ciencias del Agua, UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247552_spa.locale=es
- Vásquez, M. C., Guerrero Figueroa, J. T., & Quintero, A. d. P. (2010). Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12, 141-157. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752010000100014&nrm=iso

- Velasco, J. V., Tania. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Redalyc*, 41-53, Article 66.
- Velasquez-Orta, S. B., Curtis, T. P., & Logan, B. E. (2009). Energy from algae using microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*, 103(6), 1068-1076. <https://doi.org/10.1002/bit.22346>
- Wei, C.-H., Harb, M., Amy, G., Hong, P.-Y., & Leiknes, T. (2014). Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 166, 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.053>
- Wei, J. L., P; Huang, X. (2011). Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(20), 9335-9344.
- Wu, P., Fitzgerald, L., Biffinger, J., Spargo, B., Ringeisen, B., Houston, B., & Bucaro, J. (2010). Microbial Gas Production Used to Achieve Autonomous Buoyancy Control.
- You, S., Zhao, Q., Zhang, J., Jiang, J., & Zhao, S. (2006). A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor. *Journal of Power Sources*, 162(2), 1409-1415. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.063>
- Zhang, J., Zhang, H., Wu, J., & Zhang, J. (2013). Chapter 1 - PEM Fuel Cell Fundamentals. In J. Zhang, H. Zhang, J. Wu, & J. Zhang (Eds.), *Pem Fuel Cell Testing and Diagnosis* (pp. 1-42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53688-4.00001-2>

ANEXOS

Anexo 1 Carta de Autorización de la empresa



LAVADORA Y LUBRICADORA "MAGBLAD"

Riobamba - Chimborazo - Ecuador.

Riobamba, 21 de Junio de 2024

AUTORIZACIÓN

Yo **María Magdalena Paredes Godoy**, con CI: 0604424143 gerente propietaria de la empresa de servicio de lubricación y lavado de automóviles "MAGBLAD" ubicada en la ciudad de Riobamba, por medio del presente escrito se concede el acceso a las instalaciones de mi empresa para que se puede desarrollar el tema de investigación: **"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA DE TRIPLE ÁNODO"** a desarrollarse por parte del Sr. Luis Angel Huilca Modumba, estudiante egresado de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Atentamente,

Ing. María M. Paredes G, Mgs.
Gerente Propietaria

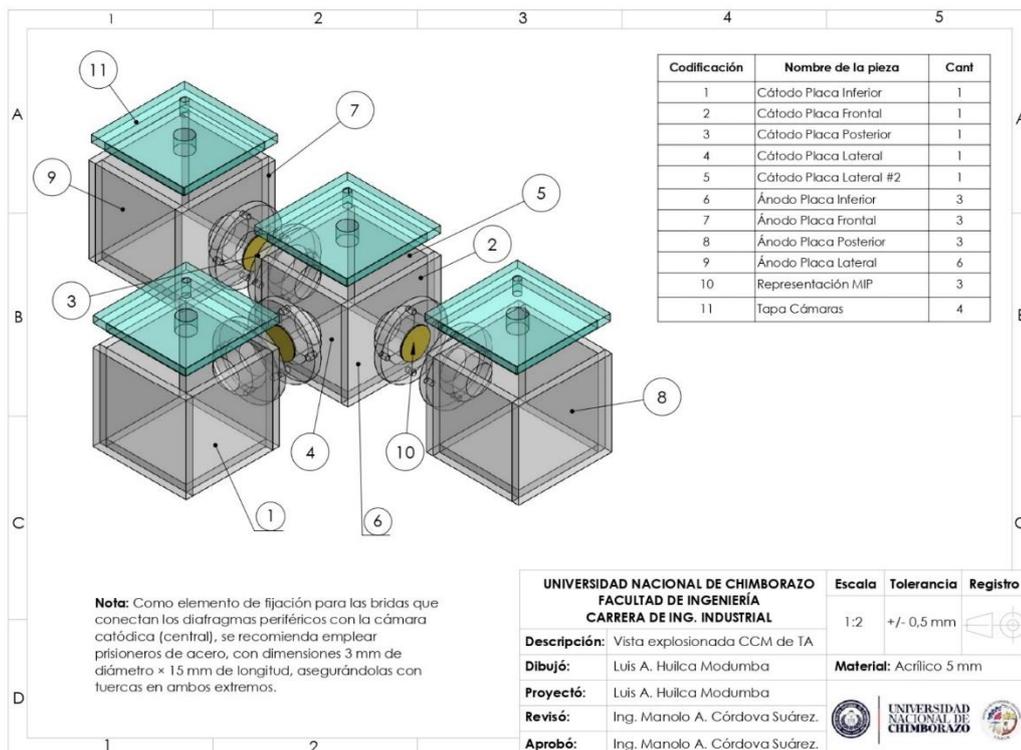
Anexo 2 Programación para la tarjeta de adquisición de datos

```

grafica9sd | Arduino IDE 2.3.2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
Arduino Mega or Mega 2...
grafica9sd.ino
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_ADS1X15.h>
3 #include <SoftwareSerial.h>
4 #include <SPI.h>
5 #include <SD.h>
6
7 // Configuración general
8 #define INTERVALO_MUESTREO 300
9 #define TIEMPO_REINICIO 100000 // 100 segundos
10 #define MUESTRAS_PROMEDIO 5 // Número de muestras para promediar
11
12 // Configuración SD
13 #define PIN_CS_SD 53 // Pin Chip Select para SD en Arduino Mega
14 #define INTERVALO_ESCRITURA 30000 // Escribir cada 1000ms (1 segundo)
15
16 Adafruit_ADS1115 ads; // Objeto ADS1115
17 File archivoDatos; // Archivo en SD
18
19 // Variables de control
20 unsigned long tiempoAnterior = 0;
21 unsigned long inicioGrafico = 0;
22 unsigned long ultimoTiempoEscritura = 0;
23 bool enPaginaPrincipal = true;
24
25
26 #define nextion Serial1
27
28 void setup() {
29   Serial.begin(9600);
30   nextion.begin(9600);
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

Anexo 3 Planos Vista Explosionada CCM-TA



Anexo 4 Detalle de Ensamble Ánodo

Nota: Unir cada una de las placas con pegamento termosellado y silicona para evitar fugas en la unión de las juntas

Codificación	Nombre de la pieza	Cant
1	Ánodo Placa Inferior	1
2	Ánodo Placa Frontal	1
3	Ánodo Placa Posterior	1
4	Ánodo Placa Lateral	2

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE ING. INDUSTRIAL		Escala	Tolerancia	Registro
		1:1	+/- 0,5 mm	
Descripción: Ensamble Cámara Anódica		Material: Acrílico 5 mm		
Dibujó: Luis A. Huilca Modumba				
Proyectó: Luis A. Huilca Modumba				
Revisó: Ing. Manolo A. Córdova Suárez.				
Aprobó: Ing. Manolo A. Córdova Suárez.				

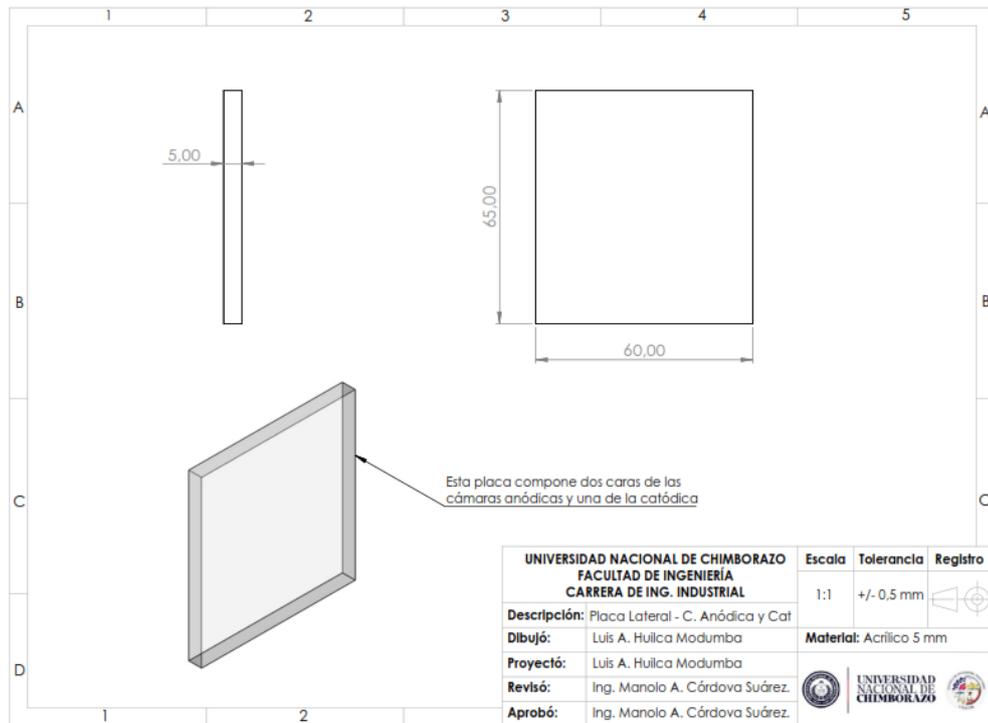
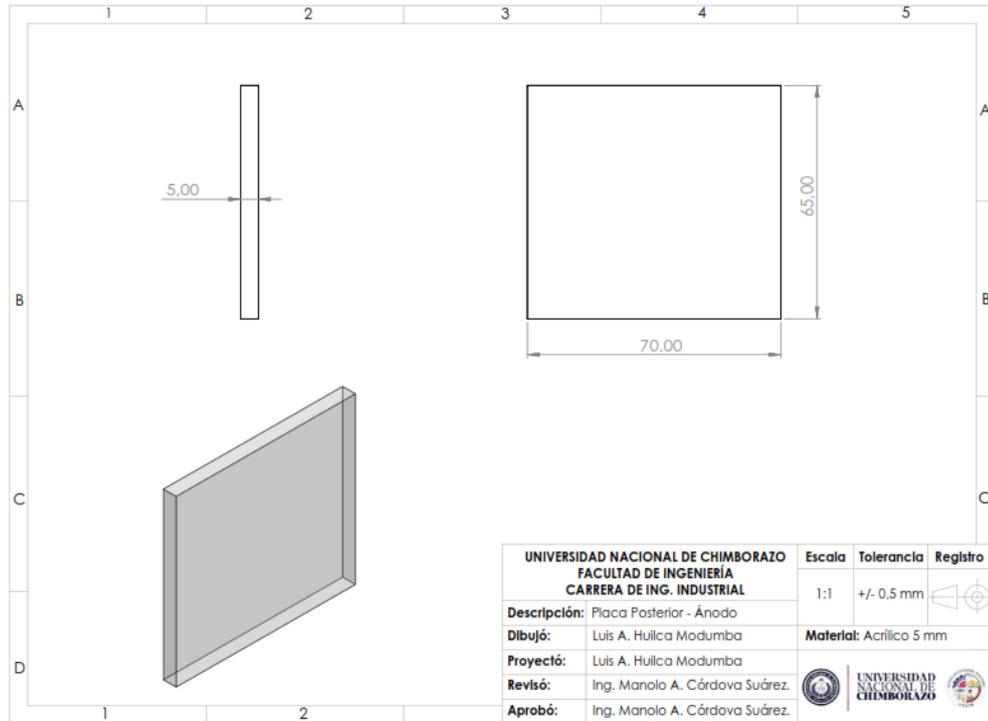
Anexo 5 Detalle de Ensamble Cátodo

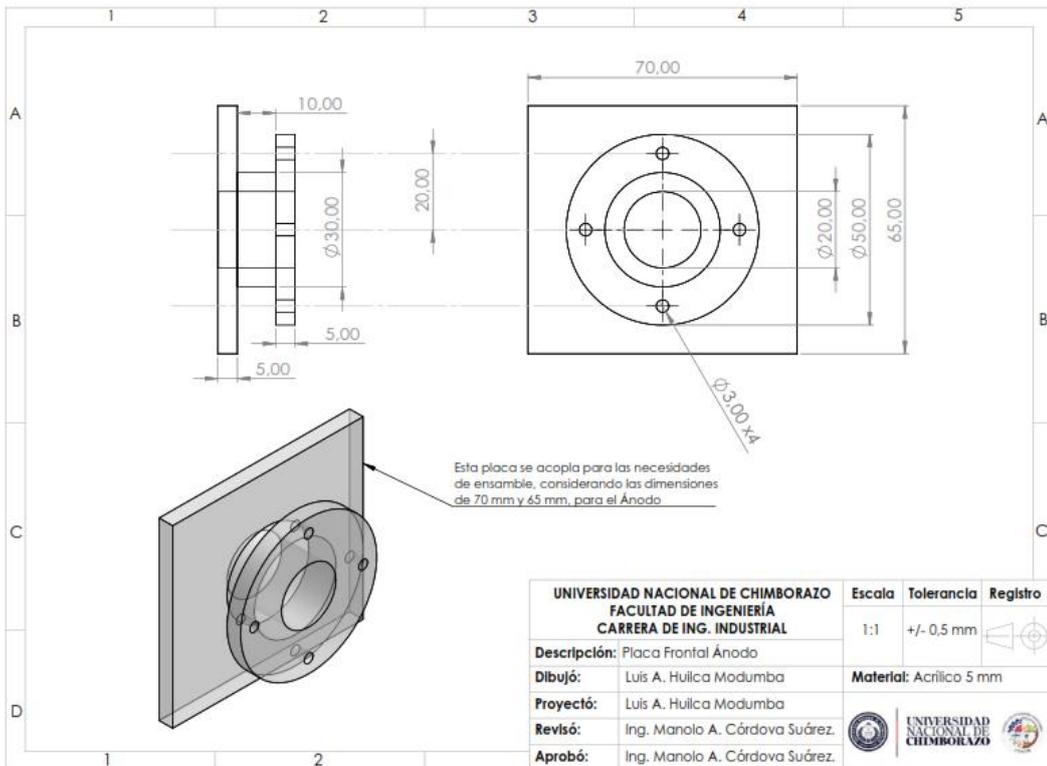
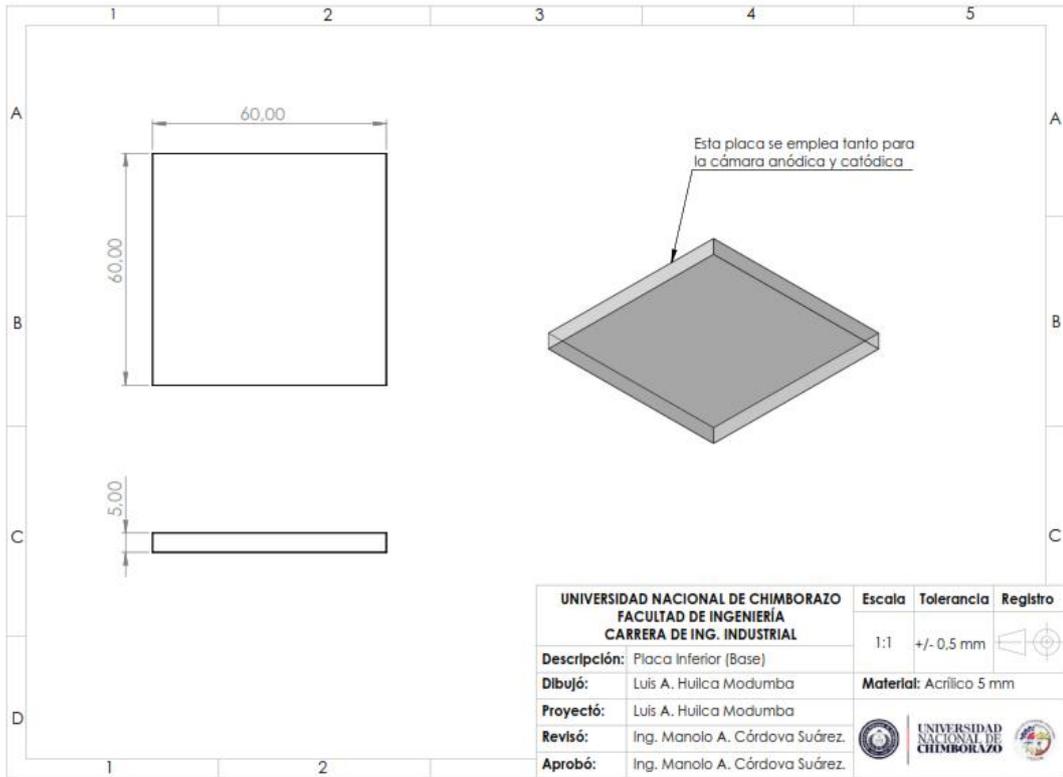
Nota: Unir cada una de las placas con pegamento termosellado y silicona para evitar fugas en la unión de las juntas

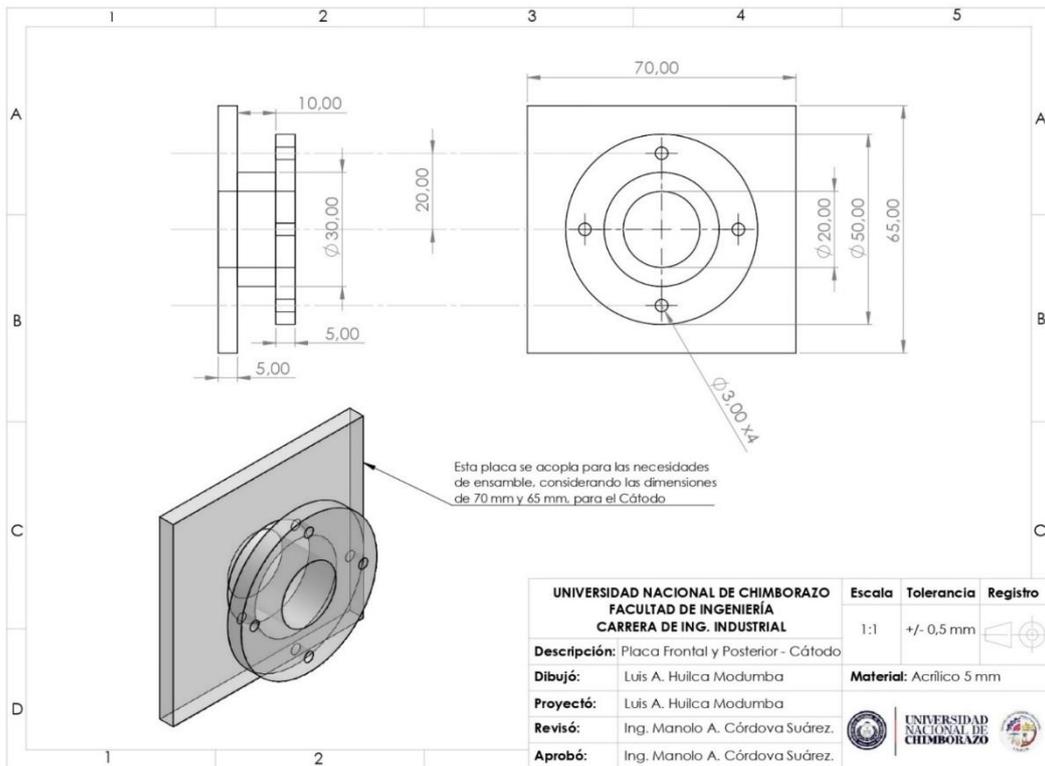
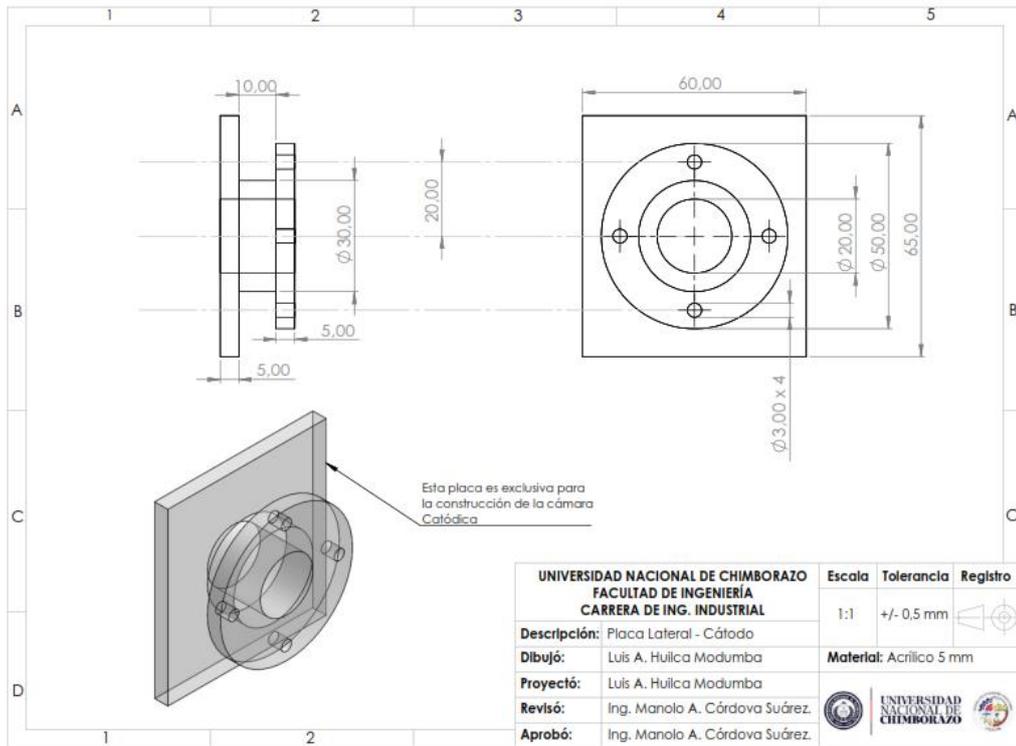
Codificación	Nombre de la pieza	Cant
1	Cátodo Placa Inferior	1
2	Cátodo Placa Frontal	1
3	Cátodo Placa Posterior	1
4	Cátodo Placa Lateral	1
5	Cátodo Placa Lateral #2	1

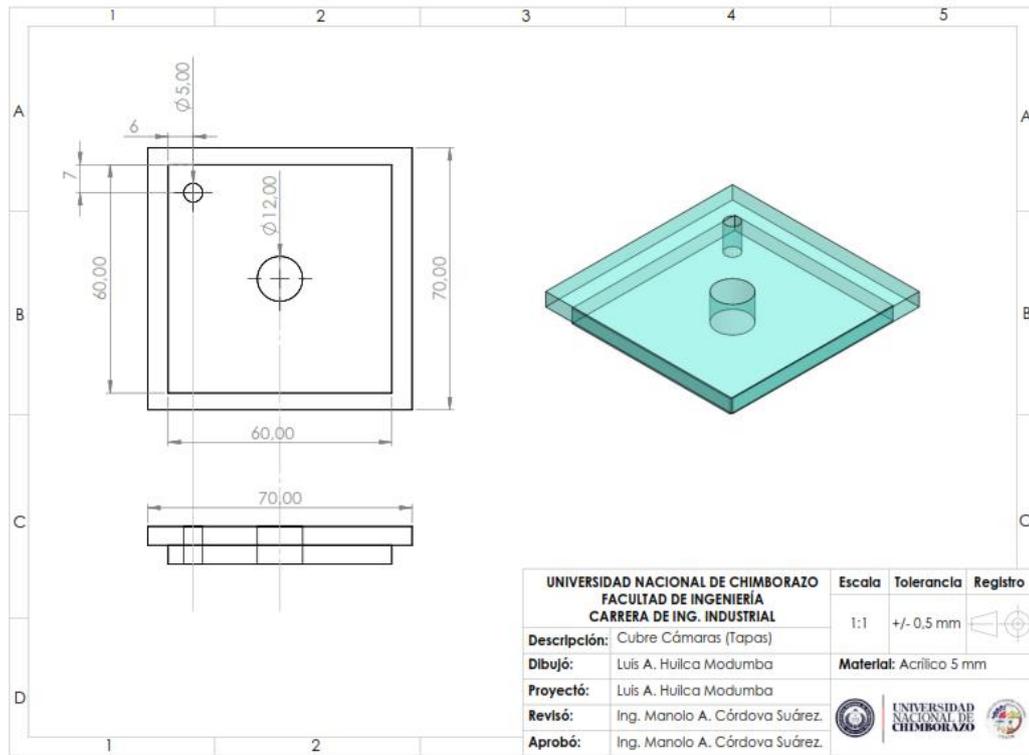
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE ING. INDUSTRIAL		Escala	Tolerancia	Registro
		1:1	+/- 0,5 mm	
Descripción: Ensamble Cámara Catódica		Material: Acrílico 5 mm		
Dibujó: Luis A. Huilca Modumba				
Proyectó: Luis A. Huilca Modumba				
Revisó: Ing. Manolo A. Córdova Suárez.				
Aprobó: Ing. Manolo A. Córdova Suárez.				

Anexo 6 Planos de diseño y corte para el material de construcción









Anexo 7 Hoja de corte AutoCAD - Plancha de Acrílico

