



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE BIOFÍSICA

“COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA UTILIZANDO ELECTRODOS DE FIBRA DE CARBONO Y UN ELECTRODO HÍBRIDO DE GRAFITO-CABUYA (AGAVE AMERICANA).”

Trabajo de titulación:

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar el grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTOR: ALCIVAR BLADIMIR ILBAY TELENCHANO

DIRECTOR: PhD. CELSO GUILLERMO RECALDE MORENO

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Alcivar Bladimir Ibay Telenchano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, **Alcivar Bladimir Ilbay Telenchano**, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 8 de septiembre de 2020.

ALCIVAR
BLADIMIR ILBAY
TELENCHANO

Firmado digitalmente por
ALCIVAR BLADIMIR ILBAY
TELENCHANO
Fecha: 2021.02.02 19:40:47
-05'00'

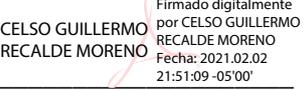
Alcivar Bladimir Ilbay Telenchano
180473652-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE BIOFÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Experimental, COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA UTILIZANDO ELECTRODOS DE FIBRA DE CARBONO Y UN ELECTRODO HÍBRIDO DE GRAFITO-CABUYA (*AGAVE AMERICANA*). , realizado por el señor: ALCIVAR BLADIMIR ILBAY TELENCHANO, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Biof. Miguel David Sáez Paguay PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 MIGUEL ANGEL SAEZ PAGUAY	2020-09-08
Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	 CELSO GUILLERMO RECALDE MORENO	2020-09-08
Biof. María Fernanda Heredia Moyano MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 Firmado electrónicamente por: MARIA FERNANDA HEREDIA MOYANO	2020-09-08

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Francisca Telenchano, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en las buenas y malas.

ALCIVAR.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un extenso reconocimiento a todos los maestros de mi educación superior, quienes me han dado las pautas para mi formación profesional, a todos quienes conforman al Grupo de Energía Alternativa y Ambiente (GEAA), a sus integrantes, en especial al Dr. Celso Recalde, Ing. Romel Palaguachi y Biofísica Diana Aguay; permitiéndome la accesibilidad a los diferentes equipos y documentos, a mi gran amigo, hermano Xavier Aguaiza por llevarme a clases cuando no quise el primer día “a rastras” sin saber que sería una de las mejores decisiones de mi vida, por siempre aconsejarme y guiarme en el trayecto de mi vida; a mi hermano Marlon y hermana Maritza quienes han estado pendientes de mi progreso día a día gracias por las palabras alentadoras en todos estos años sin desconfiar de mí y por ultimo a mi gran amor Carmen Villagrán que ha estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos, motivándome y ayudándome hasta donde sus alcances lo permitían.

ALCIVAR.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL	3
1.2. Identificación del problema.....	5
1.3. Justificación del problema.....	6
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	6

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.	7
2.1. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs).	7
2.2. Comportamiento de una CCM	7
2.3. Sustrato para una CCM	8
2.4. Material y propiedades de los electrodos.	9
2.4.1. <i>Conductividad</i>	9
2.4.2. <i>Estabilidad y durabilidad</i>	9
2.4.3. <i>Superficie y Porosidad</i>	9
2.4.4. <i>Naturaleza biocompatible</i>	9
2.4.5. <i>Tipo de materiales del electrodo</i>	9
2.4.6. <i>Electrodos a base de carbono</i>	10
2.4.7. <i>Electrodos de metal</i>	11
2.4.8. <i>Agave Americana</i>	12
2.4.9. <i>Pretratamiento de los electrodos</i>	13

2.5.	Desempeño de una CCM.	14
2.6.	Sistemas de ecuaciones	15
2.7.	Ecuación de conservación.	16
2.7.1.	<i>Ecuación de materia</i>	16
2.7.2.	<i>Ecuación de movimiento</i>	16
2.7.3.	<i>Ecuación de Nernst.</i>	17
2.7.4.	<i>Ecuación De Butler-Volmer.</i>	18
2.7.5.	<i>Ecuación de energía.</i>	18
2.7.6.	<i>Especies</i>	20
2.8.	Energía libre de Gibbs	21
2.9.	Descripción del programa COMSOL Multiphysics	22
2.9.1.	<i>Ventana de configuración.</i>	23
2.9.2.	<i>La cinta de opciones y la barra de herramientas de acceso rápido.</i>	23
2.9.3.	<i>Las bibliotecas de aplicaciones.</i>	24

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.	25
3.1.	Tipo de estudio	25
3.2.	Métodos	25
3.2.1.	<i>Método Inductivo</i>	25
3.2.2.	<i>Método deductivo</i>	25
3.2.3.	<i>Método experimental.</i>	26
3.3.	Diseño de la Investigación	26
3.3.1.	<i>Diseño Experimental.</i>	26
3.4.	Materiales y Métodos.	27
3.4.1.	<i>Electrodo de Cabuya</i>	27
3.4.2.	<i>Electrodo del ánodo (carbón activado de fibra de cabuya).</i>	38
3.4.3.	<i>Electrodo del ánodo (grafito en polvo y carbón activado de fibra de cabuya).</i>	40
3.4.4.	<i>Electrodo del ánodo (fibra de carbono).</i>	41
3.4.5.	<i>Electrodo cátodo (fibra de carbono).</i>	42
3.4.6.	<i>Membrana de intercambio protónico.</i>	42

3.5. Simulación en el software COMSOL Multiphysics versión 5.5	43
3.5.1. <i>Interfaz física</i>	43

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
4.1. Identificación de los grupos funcionales	49
4.1.1. <i>Espectrofotometría Infra Roja del carbón activado de fibra cabuya.</i>	49
4.1.2. <i>Espectrofotometría Infra Roja del grafito.</i>	51
4.2. Resultados del software COMSOL.	53
4.2.1. <i>Electrodo de Fibra de Cabuya</i>	53
4.2.2. <i>Electrodo Fibra de Cabuya-Grafito.</i>	55
4.2.3. <i>Electrodo de Fibra de carbono.</i>	57
4.2.4. <i>Potencial del electrolito y densidad de potencia de la Fibra de Cabuya.</i>	59
4.2.5. <i>Potencial del electrolito y densidad de potencia de la Fibra de Cabuya-Grafito.</i>	60
4.2.6. <i>Potencial del electrolito Fibra de Carbono.</i>	60
4.3. Validación de resultados.	61

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Sustratos Utilizados en CCMs.....	8
Tabla 2-2: Diferentes materiales, potencia MFC, fuente de bacterias y tipo CCM.	11
Tabla 1-3: Materia prima (hojas de cabuya).	27
Tabla 2-3: Fibra de cabuya.....	28
Tabla 3-3: Materiales para el secado de la fibra.	28
Tabla 4-3: Materiales para la molienda de la fibra de Cabuya.....	29
Tabla 5-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.	30
Tabla 6-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.	31
Tabla 7-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.	31
Tabla 8-3: Materiales para el lavado de carbón activado.....	33
Tabla 9-3: Reactivos	34
Tabla 10-3: Equipos utilizados para el lavado del carbón activado.....	34
Tabla 11-3: Secado del carbón activado al 40%.	35
Tabla 12-3: Materiales para la conductividad del carbón activado.....	36
Tabla 13-3: Equipos utilizados para calcular la conductividad eléctrica.	36
Tabla 14-3: Construcción de electrodo de carbón activado de fibra de cabuya.....	38
Tabla 15-3: Construcción de electrodo Grafito-Cabuya	40
Tabla 16-3: Construcción del ánodo de fibra de carbono.	41
Tabla 17-3: Membrana de intercambio protónico.....	42
Tabla 18-3: Dimensiones del modelo	43
Tabla 19-3: Parámetros del modelo COMSOL Multiphysics.....	43
Tabla 20-3: Valores para el potencial y la cinética del electrodo ánodo.....	46
Tabla 21-3: Valores para el potencial y la cinética del electrodo Cátodo.....	47
Tabla 22-3: Valores para electrodo de Fibra de cabuya en COMSOL.	47
Tabla 23-3: Valores para electrodo de Fibra de cabuya-Grafito en COMSOL	48
Tabla 24-3: Valores para electrodo de Fibra de carbono en COMSOL.....	48
Tabla 1-4: Espectrofotometría IR muestra sólida (carbón activado).	49
Tabla 2-4: Espectrofotometría IR muestra líquida (carbón activado).....	50
Tabla 3-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito-muestra sólida.	51
Tabla 4-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito-muestra líquida.....	52
Tabla 5-4: Comparación de resultados obtenidos en COMSOL Multiphysics.....	59
Tabla 6-4: Validación de resultado.	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Esquema de una CCM de cámara simple.....	7
Figura 2-2: Materiales de electrodos utilizados para MFC.....	10
Figura 3-2: Materiales de superficie específica para MFC.....	10
Figura 4-2: Principales variedades del Agave americana.	12
Figura 5-2: Agave americana Salasaca -Andes centrales del Ecuador.	12
Figura 6-2: Iniciativas productivas del agave.	13
Figura 7-2: Curva de polarización teórica y experimental de una celda de combustible.	14
Figura 8-2: Ventana de configuración COMSOL Multiphysics.....	23
Figura 9-2: Biblioteca de aplicación.	24

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2: Ventana principal de COMSOL Multiphysics.	23
Gráfico 2-2: Barra de herramientas de acceso rápido.	23
Gráfico 1-3: Recolección de las hojas del agave.	27
Gráfico 2-3: Fibra de Cabuya.....	28
Gráfico 3-3: Secado de la fibra de Cabuya.	29
Gráfico 4-3: Corte de la fibra de Cabuya.....	29
Gráfico 5-3: Materia prima final.....	30
Gráfico 6-3: Fibra de cabuya con ácido fosfórico al 40%.	32
Gráfico 7-3: Bandeja de aluminio con fibra de cabuya.....	32
Gráfico 8-3: Secado de la fibra de cabuya.	32
Gráfico 9-3: Mufla a 500°C con la fibra de cabuya.	33
Gráfico 10-3: Carbón activado final de fibra de carbono.	33
Gráfico 11-3: Agua destilada con NaOH a 80°C.....	34
Gráfico 12-3: Lavado del carbón activado.....	34
Gráfico 13-3: pH Neutro del carbón activado.....	35
Gráfico 14-3: Carbón activado de fibra de cabuya.	35
Gráfico 15-3: Pulverizado del carbón activado.....	36
Gráfico 16-3: Agitación de carbón activado de cabuya.	37
Gráfico 17-3: Conductividad eléctrica.....	37
Gráfico 18-3: pH de la solución.....	37
Gráfico 19-3: Espectrofotómetro de infrarrojo.	38
Gráfico 20-3: Recubrimiento del parafilm.....	38
Gráfico 21-3: Colocación de las amarras.....	39
Gráfico 22-3: Electrodo uniformemente.....	39
Gráfico 23-3: Electrodo de Fibra de Cabuya.....	39
Gráfico 24-3: Electrodo de Grafito-Cabuya.....	39
Gráfico 25-3: Electrodo de fibra de carbono.....	39
Gráfico 26-3: Fibra de carbono en tela.	42
Gráfico 27-3: Corte del Parafilm.	42
Gráfico 28-3: Mallado del modelo.....	45
Gráfico 29-3: Electrodo Ánodo.....	46
Gráfico 30-3: Electrodo Cátodo.....	46

Gráfico 31-3: Colector de corriente	47
Gráfico 1-4: Espectrofotometría Infra Roja del carbón activado de fibra cabuya.	49
Gráfico 2-4: Espectrofotometría IR muestra líquida (carbón activado).....	50
Gráfico 3-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito en muestra sólida.....	51
Gráfico 4-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito en muestra líquida	52
Gráfico 5-4: Potencial del Electrolito	53
Gráfico 6-4: Densidad de corriente del electrolito.....	53
Gráfico 7-4: Sobrepotencial del cátodo.	53
Gráfico 8-4: Densidad de corriente del Ánodo	54
Gráfico 9-4: Sobrepotencial del Ánodo	54
Gráfico 10-4: Potencial del electrolito.	55
Gráfico 11-4: Densidad de corriente del electrolito.....	55
Gráfico 12-4: Sobrepotencial del Cátodo.....	55
Gráfico 13-4: Densidad de corriente del Ánodo	56
Gráfico 14-4: Sobrepotencial de Ánodo.	56
Gráfico 15-4: Potencial del electrolito.	57
Gráfico 16-4: Densidad de corriente del electrolito.....	57
Gráfico 17-4: Sobrepotencial del Cátodo.....	57
Gráfico 18-4: Densidad de corriente del Ánodo.	58
Gráfico 19-4: Sobrepotencial del Ánodo.	58

INDICE DE ANEXOS

Anexo A: Obtención del carbón activado de a partir de la fibra de cabuya.

Anexo B: Construcción de los Electrodo.

Anexo C: Simulación en el software COMSOL Multiphysics.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo, comparar la producción electroquímica de celdas de combustible microbiana utilizando electrodos de fibra de carbono y un electrodo híbrido de grafito-cabuya (agave americana), para lo cual se obtuvo carbón activado desde la fibra de la cabuya mediante el método de activación química, para determinar los parámetros necesarios para el modelado en la herramienta computacional COMPSOL Multiphysics, como la conductividad eléctrica, el pH, además la caracterización de la muestra sólida y líquida del carbón activado de fibra de cabuya y el grafito. La activación química del carbón se la realizó con ácido fosfórico al 40 por ciento de concentración a una temperatura de 500 grados Celsius durante 1 hora. La identificación de los grupos funcionales presentes en el carbón activado se llevó a cabo mediante el espectrofotómetro infrarrojo JASCO FT/IR4100. Se formaron 3 electrodos con una geométrica rectangular de carbón activado obtenido desde la cabuya, grafito-carbón activado de cabuya y fibra de carbono. La identificación de densidad de potencia en los electrodos se llevó a cabo mediante la herramienta computacional COMPSOL Multiphysics enmarcada en la distribución de corrientes secundarias. El análisis de los electrodos con la herramienta computacional COMSOL Multiphysics nos arrojaron la descripción matemática de los electrodos generando voltajes de la fibra de cabuya (0.29V), el electrodo de cabuya-grafito de (0.37V) y del electrodo de fibra de carbono de (0.62V). Se concluye que la densidad de potencia de la fibra de carbono es mayor (1537.6 mW/m²) seguido del electrodo de fibra de cabuya-grafito (547.6 mW/m²) y el electrodo de Fibra de Cabuya (336.4 mW/m²). Se recomienda el uso de nanotecnología para el diseño y construcción de electrodos como parte de las mejoras del modelo, de tal manera que se pueda identificar electrodos que permita incrementar la densidad de potencia de la celda.

Palabras clave: < BIOFÍSICA > < AGAVE AMERICANA > < BIOELECTRICIDAD > < ESPECTROFOTÓMETRO INFRARROJO > < COMSOL MULTIPHYSICS (SOFTWARE) > < DENSIDAD DE POTENCIA > < ÁNODO > < CÁTODO >.



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**



0588-DBRAI-UPT-2021

ABSTRACT

The objective of the present titration work is to compare the electrochemical production of microbial fuel cells using carbon fiber electrodes and a hybrid electrode of graphite-cabuya (*agave americana*), for which activated carbon was obtained from the fiber of the cabuya by means of the chemical activation method, to determine the parameters necessary for modeling in the COMPSOL Multiphysics computational tool, such as electrical conductivity, pH, in addition, the characterization of the solid and liquid sample of the activated carbon fiber of cabuya and graphite. The chemical activation of the carbon was carried out with phosphoric acid at 40 percent concentration at a temperature of 500 degrees Celsius for 1 hour. The identification of the functional groups present in activated carbon was carried out using the spectrophotometer. infrared JASCO FT / IR4100. 3 electrodes were formed with a rectangular geometric of activated carbon obtained from the cabuya, graphite-activated carbon from the cabuya and carbon fiber. The identification of power density in the electrodes was carried out using the COMPSOL Multiphysics computational tool framed in the distribution of secondary currents. The analysis of the electrodes with the computational tool COMPSOL Multiphysics gave us the Mathematical description of the electrodes generating voltages of the cabuya fiber (0.29V), the cabuya-graphite electrode (0.37V) and the carbon fiber electrode (0.62V). It is concluded that the power density of carbon fiber is higher (1537.6 mW / m²) followed by the electrode Cabuya-graphite fiber (547.6 mW / m²) and the Cabuya Fiber electrode (336.4 mW / m²). The use of nanotechnology is recommended for the design and construction of electrodes as part of the model improvements so that electrodes can be identified that allow increasing the cell power density.

Keywords: <BIOPHYSICS> <AMERICAN AGAVE> <BIOELECTRICITY>
<INFRARED SPECTROPHOTOMETER> <COMSOL MULTIPHYSICS
(SOFTWARE)> <POWER DENSITY> <ANODE> <CATHODE>.

INTRODUCCIÓN

La constante evolución de los distintos procesos en el tratamiento de desechos orgánicos tanto como sólidos y líquidos, ha generado esta idea para la comparación y generación electroquímica de celdas de combustible microbiana (CCM) utilizando electrodos de fibra de carbono y un electrodo híbrido de grafito-cabuya (agave americana), dichas celdas son una tecnología que podría contribuir a solucionar dos problemas de la sociedad actual tales como son la crisis energética y la disponibilidad de disminuir la contaminación por dichos desechos.

El rendimiento y el costo de los electrodos son los aspectos más importantes en el diseño de la celda de combustible microbiana (MFC). Los materiales carbonosos son los materiales más utilizados para Ánodos MFC debido a su buena biocompatibilidad, buena química (Estabilidad), alta conductividad y costo relativamente bajo, donde los materiales naturales presentan una gran oportunidad de estudio.

Fibras naturales como la Cabuya que pueden ser transformadas en carbón activado. Los materiales que deberán ser utilizados para el ánodo y el cátodo deberán ser determinantes no solo en las características físicas y eléctricas de los materiales semiconductores con los cuales están realizados dichos componentes. Con este trabajo se beneficiarán todos los investigadores que buscan opciones para reemplazar el uso de combustibles fósiles, además, la energía que se genera no es contaminante.

El Capítulo I contiene el marco referencial, antecedentes, identificación del problema, justificación basados en trabajos relacionados con el tema y los objetivos propuestos a lograr en el desarrollo experimental del Trabajo de Titulación.

El Capítulo II trata sobre las bases teóricas y conceptuales que debemos tomar en cuenta para la realización correcta de este trabajo de titulación bajo las recomendaciones dadas por estudios previos en el ámbito del uso de celdas de combustible microbianas.

El Capítulo III se describe la metodología utilizada para la obtención del carbón activado a partir de la fibra de cabuya al 40% y la elaboración de electrodo combinando grafito, por lo que, se detalla el tipo de investigación, la Simulación en el software COMSOL Multiphysics para la realizar la comparación de producción electroquímica, además de la caracterización de grupos funcionales del carbón activado del Agave y del agave- grafito.

Finalmente, en el Capítulo IV, muestra el análisis e interpretación de resultados como: Densidad de corriente del Ánodo (A/m^2), Sobre potencial del Ánodo (V), Sobre potencial del Cátodo (V), Densidad de corriente del Electrolito (A/m^2), Potencial del electrolito (V), resultados adquiridos en la Herramienta Computacional Desarrollada, además de, la Validación de resultados finalizando con conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

En el Departamento de Ingeniería Química, del Instituto Nacional de Tecnología Tiruchirappalli en la India en el año 2016 se investigó el efecto del carbón activado (CA) sintetizado químicamente en el rendimiento de la celda de combustible microbiano (CCM). Se utilizó la fibra de coco como material de origen para sintetizar el CA a diferentes rangos (5, 10 y 15 mg / cm²) en lo cual se recubrió en la superficie del electrodo (ánodo) para investigar y comparar el rendimiento de MFC con el electrodo de control (superficie plana). Los resultados experimentales muestran que el electrodo recubierto con CA-5 (5 mg / cm²) produjo una densidad de potencia máxima (5,8 W / m³) que era mayor que el electrodo de control (plano) (3,8 W / m³). Cuando un electrodo recubierto con CA-15 (15 mg / cm²) se usó en el CCM, se observó la densidad de potencia más alta de 9.5 W / m³ con una eficiencia de eliminación de DQO de 74.8%. El rendimiento de CCM en términos de densidad de potencia y eficiencia de eliminación de la demanda de oxígeno químico (DQO) se incrementó al aumentar la cantidad de carga de CA. La fibra de coco se puede considerar como un material biocompatible para mejorar el rendimiento de MFC (Samsudeen et al., 2016).

En el Laboratoire de Génie Chimique, Francia, del Instituto de investigación en Génova, Italia y la Université Paris-Saclayel, Dumas se realizó un trabajo de CCM en donde se utilizó acero inoxidable como electrodos de ánodo y cátodo y reportaron una densidad de potencia máxima de 23 mW/m² (Dumas et al., 2007, p.472), en otros informes, Dumas comparó el rendimiento de un ánodo de acero inoxidable con electrodos de grafito y observaron que los electrodos de acero inoxidable dieron un rendimiento menor que el electrodo de grafito (Dumas, Basseguy y Bergel, 2008, pp.5236-5237). El titanio también se utilizó por varios investigadores como electrodo de CCM. Annemiek ter Heijne, comparó el rendimiento de los ánodos de grafito y titanio en términos de su idoneidad en CCM (Ter Heijne et al., 2008), en donde señaló que los ánodos de grafito rugoso dieron mejores resultados que el titanio recubierto con Platino, el grafito plano y el titanio no recubierto, además que la corriente no se observó para el ánodo de titanio sin recubrimiento. Michaelidou utilizó formas similares para cuatro tipos de electrodos a base de titanio en CCM y compararon su rendimiento (Michaelidou et al., 2011), los electrodos diferían en el recubrimiento de la superficie (compuestos metálicos recubiertos con Platino o Tantalio) o en la textura de la

superficie (lisa o rugosa), sin olvidar que utilizaron acetato como solución del sustrato. (Kumari, Shankar & Mondal, 2018, p.129). Durante el desempeño, los ánodos de Platino y Tantalio-recubierto, ánodos-Tibios (asociación electrodo-biopelícula) mostró mayor producción de corriente que los ánodos Tibios (asociación electrodo-biopelícula) sin recubrimiento. Richter usó oro como electrodo y sugirió que puede ser un mejor electrodo para la producción de energía (Richter et al., 2008) en esta ocasión se utilizó *Geobacter sulfurreducens* como fuente bacteriana y predijeron que el rendimiento de los electrodos de oro fue similar al rendimiento de los ánodos de grafito, finalmente se informó que el oro es un material adecuado para los CCM como electrodo, lo que brinda un mayor potencial para el ensamblaje dichas celdas y los análisis electroquímicos de las interacciones microbio-electrodo (Kumari, et al., 2018, p.129).

La Asociación Inter ciencia en la ciudad de Caracas Venezuela empleó CCM a escala de laboratorio para la generación de electricidad en el año 2008. La celda consistió de dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico (MIP). En la cual se utilizaron electrodos de papel carbón y un cátodo acuoso burbujeado con aire para proveer O₂ disuelto al electrodo. La generación de potencia en la CCM, se debió a la presencia de bacterias como biocatalizadores en la cámara del ánodo. Las bacterias fueron obtenidas de un inóculo mixto anaerobio de tipo entérico, empleando agua residual sintética (ARS) como sustrato. Se determinó la influencia de la temperatura y el pH sobre el rendimiento de la CCM, encontrando que la mayor densidad de potencia fue generada a temperatura mesofílica de 35 ±5°C y pH entre 5 y 6. Empleando resistencias de 600 y 1000Ω se obtuvieron densidades de 640 y 336mW·m⁻², respectivamente. La eficiencia coulombica obtenida fue de 59,8%. Resultando atractivo para la generación de electricidad y a la vez para la degradación de la fracción orgánica (Fuentes, et al., 2008).

En el laboratorio de Biotecnología de la Escuela de Ciencias Químicas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se estudió la influencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la producción de bioelectricidad dentro de una celda de combustible microbiano en donde se diseñó y se construyó cuatro celdas de combustible microbiano las cuales generan bioelectricidad. La celda se conforma de dos cámaras separadas por tejido de fibra de carbono y cada una posee 2,1 Kg de suelo y 60gr de carbón vegetal; las tres primeras celdas fueron objeto de experimentación mientras que la cuarta represento el grupo control (Guambo & Allauca, 2016). Se probó electrodos de cobre y electrodos de tejido de fibra de carbono para la utilización y el monitoreo, donde el mejor productor y conductor de electrones fueron los electrodos de cobre, por ende la utilización de 3 diferentes sustratos, acompañado de un blanco testigo o sin sustrato, determinándose así la influencia de los sustratos sobre los microorganismos electrogénicos, la mejor configuración de celda de combustible microbiano para la máxima producción de bioelectricidad, reactivando la celda con los sustratos de frutas y vegetales, utilizando los electrodos de cobre como ánodo y

cátodo. Consiguiendo así que se maximice la obtención de bioelectricidad con un nuevo monitoreo de 7 días, produciendo 0.51V valor mayor que los ensayos anteriores (Bonilla, 2015).

En el año 2005, en el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y el Centro Penn State Hydrogen Energy (H2E), en la Universidad Estatal de Pensilvania, University Park, Pensilvania 16802, Liu, Cheng y Logan realizaron un trabajo acerca de la generación de energía en Fed-Batch Pilas de combustible microbianas como una función de fuerza iónica, temperatura y configuración del reactor. La densidad de potencia, el potencial de electrodo, la eficiencia culombiana y la recuperación de energía en las CCM de una cámara se examinaron en función de la fuerza iónica de la solución, la separación entre electrodos y la composición del electrodo, y la temperatura. Se mostro un aumento de la fuerza iónica de la solución de 100 a 400 mM al agregar NaCl, además se evidencio el aumento de la potencia de salida de 720 a 1330 mW / m², la generación de energía también aumentó de 720 a 1210 mW / m² al disminuir la distancia entre el ánodo y el cátodo de 4 a 2 cm al final se incrementó la potencia de salida en un 68% al reemplazar el cátodo de un fabricante con su propio cátodo de tela de carbono que contiene la misma carga de Pt (Liu, et al., 2005).

1.2. Identificación del problema

Descripción del problema

En la actualidad los combustibles fósiles han creado un problema ambiental, a pesar de que existen tecnologías tales como bioelectroquímicos que degradan los desechos sólidos, dicha tecnología aun no alcanza su madures en el mundo y menos en nuestro país no se los aprovecha. La ESPOCH ha realizado pocos estudios de su posible uso como fuente de electricidad o biohidrógeno, pero no han tomado en cuenta los tipos de electrodos idóneos y de bajo costo para una mayor eficiencia en la producción de electricidad mediante microorganismos eficientes en las CCMs, a pesar de la alta biodiversidad de fibras naturales como la cabuya (Agave americana) aún no han sido probadas con microorganismos de nuestra zona en CCM.

Formulación del problema

¿Es posible que exista diferencia de producción electroquímica de celdas de combustible microbiana utilizando un electrodo de fibra de carbono y un electrodo hibrido de grafito-cabuya (agave americana)?

1.3. Justificación del problema

La constante evolución de los distintos procesos en el tratamiento de desechos orgánicos tanto como sólidos y líquidos, ha generado esta idea para la comparación y generación electroquímica de CCM utilizando electrodos de fibra de carbono y un electrodo híbrido de grafito-cabuya (agave americana), dichas celdas son una tecnología que podría contribuir a solucionar dos problemas de la sociedad actual tales como son la crisis energética y la disponibilidad de disminuir la contaminación por dichos desechos. El rendimiento y el costo de los electrodos son los aspectos más importantes en el diseño de la CCM. Los materiales carbonosos son los más utilizados para los electrodos (Ánodos y cátodo) debido a su buena biocompatibilidad, buena química estabilidad, alta conductividad y costo relativamente bajo, donde los materiales naturales presentan una gran oportunidad de estudio, como la Cabuya (Fibra de cabuya) la cuales pueden ser transformadas en carbón activado. En términos de su configuración, los electrodos a base de carbono se pueden dividir en una estructura plana, estructura compacta y estructura de cepillo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Comparar la producción electroquímica de celdas de combustible microbiana utilizando electrodos de fibra de carbono y un electrodo híbrido de grafito-cabuya (agave americana).

1.4.2. Objetivos Específicos

- Ensamblar electrodos de Fibra de Cabuya y Fibra de Cabuya-Grafito.
- Simular el comportamiento electroquímico de los electrodos en estudio mediante el software COMSOL Multiphysics.
- Comparar la densidad de potencia de los electrodos en estudio de fibra de cabuya, fibra de cabuya-Grafito y Fibra de carbono.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs).

Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno). Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Pant et al., 2010, p.1533) y ha sido estudiado ampliamente en CCMs de cátodo abiótico, con la generación de energía eléctrica a pequeña escala (Du, et al, 2007, pp.464-482). Existen diferentes tipos de diseños de una CCM, una de esas es la de cámara doble donde los sistemas están separados en diferentes compartimientos, a través una membrana semipermeable conocido como MIP (membrana de intercambio protónico) y la celda de combustible microbiana de cámara simple (CCMS) se incluye la cámara catódica en la parte superior y la cámara anódica en la parte inferior separadas a una distancia por la MIP(membrana de intercambio protónico) (Du, Li y Gu, 2007, pp.482-486).

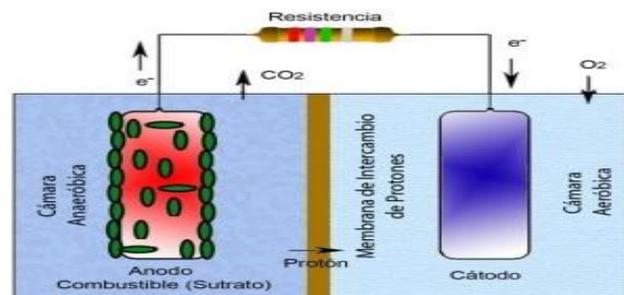


Figura 1-2: Esquema de una CCM de cámara simple

Fuente: Du, Li y Gu, 2007, p.465.

2.2. Comportamiento de una CCM

El comportamiento que se analizara de los electrodos en las CCMs es sumamente importante ya que se distingue los diferentes valores mediante parámetros tales como: la densidad de corriente (A/m^2), la diferencia de potencia (W/m^2), la diferencia de potencial (ΔV), todas relacionadas al área superficial de los electrodos (Valdivieso, 2017, pp.7-8). Las curvas de polarización las cuales ayudan ver el potencial y la intensidad, teniendo en cuenta la estabilidad en estos sistemas de acuerdo a su configuración de diseño (Valdivieso, 2017, pp.7-8).

2.3. Sustrato para una CCM

En la generación de bioelectricidad en un CCM debemos tomar en cuenta el tipo de sustrato a ser utilizado, ya que existen sustratos desde sustancias químicamente puras como la glucosa y acetato hasta mezclas compuestas como residuos orgánicos e inorgánicos y lodos residuales (Revelo & Hurtado, 2013). A continuación, podemos observar diferentes sustratos utilizados en diferentes investigaciones (Zhou et al., 2014, pp.152-154).

Tabla 1-2: Sustratos Utilizados en CCMs.

SUSTRATO	TIPO DE CCM	P_{max} (m W/m ²)	REFERENCIA
Efluente del molino de aceite de palma con acetato	Cámara doble	622	(Jong et al., 2011)
Glucosa	Cámara doble	283	(Rahimnejad et al., 2011)
Suero de queso	Cámara doble	42	(Stamatelatou et al., 2011)
Las aguas residuales Lácteos	Cámara simple	5,7	(Ayyaru and Dharmalingam, 2011)
Desperdicios de alimentos	Cámara simple	207,2**	(Kannaiah Goud and Venkata Mohan, 2011)
Aguas residuales de heces humanas	Cámara doble	70,8	(Fangzhou et al., 2011)
Tinte azo	Cámara simple	-	(Sun, Hu and Hou, 2011)
Lixiviados	Cámara simple	20,9	(Vázquez-Larios et al., 2011)
Aguas residuales farmacéuticas	Cámara simple	177,36	(Velvizhi and Venkata Mohan, 2011)
Residuos de alimentos compuestos	Cámara simple	107,87	(Goud, Babu and Mohan, 2011)
Vino descompuesto	Cámara doble	3,82*	(Rengasamy and Berchmans, 2012)
Destilería de alcohol aguas residuales	Cámara doble	1000	(Ha et al., 2012)
Efluente clarificador primario	Cámara simple	13	(Ishii et al., 2012)
Lodos de depuradora	MFC Tubular	73	(Yuan et al., 2012)
Aguas residuales de destilería	Cámara simple	245,34	(Mohanakrishna, Krishna Mohan and Venkata Mohan, 2012)
Aguas residuales de papel	Cámara simple	125***	(Velasquez-Orta et al., 2011)
Aguas residuales penicilina sintético con glucosa.	Cámara simple	101,2*	(Wen et al., 2011)
* Wm-3 ** Calculado a partir de la energía y las densidades de corriente. ***mA/m-2.			

Fuente: Valdivieso, 2017, p.9

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

2.4. Material y propiedades de los electrodos.

Para un mayor rendimiento de las CCM tenemos que hacer una selección de materiales para el electrodo, ya que el electrodo necesita requisitos previos como la transferencia de electrones, adhesión bacteriana, y eficiencia electroquímica. Existen varios estudios sobre electrodos basados en materiales de carbono tales como: papel de carbón, fibra de carbono, fieltro de carbono, materiales compuestos en nanotubos de carbono(CNT), pero en la mayoría de las veces se utilizan materiales de las mismas propiedades para ánodo como para el cátodo (Kumari, et al., 2018, pp.125-126).

2.4.1. Conductividad

Una de propiedades de los electrodos es la alta conductividad la cual hace que cree menos resistencia en la conductancia de los electrones liberados del sustrato los cuales tienen que viajar a la cámara catódica desde la cámara anódica (Kumari, et al., 2018a, p.126).

2.4.2. Estabilidad y durabilidad

Los fenómenos oxidantes y reductores en las CCM, específicamente en el electrodo pueden provocar una expansión y descomposición del material de dicho electrodo, en cambio la rugosidad de la superficie del electrodo aumentará la durabilidad del material, pero también puede provocar incrustaciones, lo que minimiza el rendimiento a largo plazo de los electrodos en los CCM. Debemos tener bien claro que el material del electrodo debe ser duradero y estable en el entorno ácido y básico de los electrolitos en las CCM (Kumari, et al., 2018b, p.126).

2.4.3. Superficie y Porosidad

El área de los electrodos juega un papel muy importante ya que está directamente relacionado a su rendimiento, dándonos una mayor eficiencia de los CCM, la resistencia en el electrodo es directamente proporcional a las pérdidas óhmicas, teniendo en cuenta el método más conveniente para disminuir la resistencia es aumentar el área de superficie efectiva, manteniendo el volumen igual (Kumari, et al., 2018c, p.127).

2.4.4. Naturaleza biocompatible

Para un mejor rendimiento de las CCM tenemos que elegir el mejor material biocompatible que aumente la adhesión bacteriana, la naturaleza biocompatible es una característica específica de un electrodo anódico (Kumari et al., 2018d, p.127).

2.4.5. Tipo de materiales del electrodo

La formación de la biopelícula alrededor del ánodo del electrodo juegan un papel muy importante, entre los materiales para un electrodo en una CCM tenemos: materiales a base de carbono, metales, y materiales compuestos (Kumari, et al., 2018e, p.127).

2.4.6. Electrodo a base de carbono

Los electrodos a base de carbono deben poseer ciertas características tales como la alta conductividad, buena biocompatibilidad, excelentes superficies específicas y un costo relativamente bajo, a continuación mostraremos algunos electrodos de carbono de bajo costo que se muestran en la figura 2-2 (papel carbón (A); placa de grafito (B); tela de carbono (C); malla de carbono (D)) y figura 3-2 (grafito granular (E); carbón activado granular (F); fieltro de carbono (G); carbono vitrificado reticulado (H); cepillo de carbón (I); malla de acero inoxidable (J)) (Kumari, et al., 2018, p.127). El grafito (carbono) se encuentra en forma de carbonos híbridos-sp², dichos materiales se usan ampliamente como electrodos en la CCM (Picot et al., 2011).

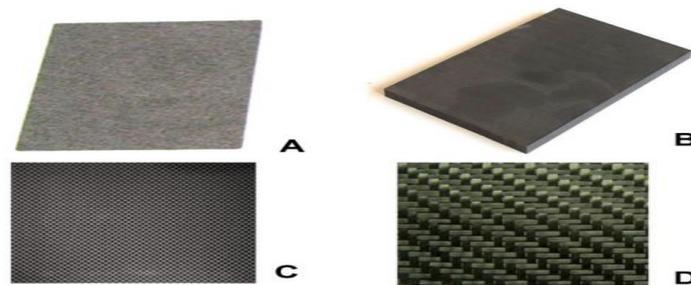


Figura 2-2: Materiales de electrodos utilizados para MFC.

Fuente: Wei, et al., 2011, p.9336.

Los diferentes tipos de material en este caso del grafito tales como las varillas, fieltro, espuma, tela de carbono, malla de carbono, etc., muestran diferentes rendimientos debido a su diferente área de superficie específica.

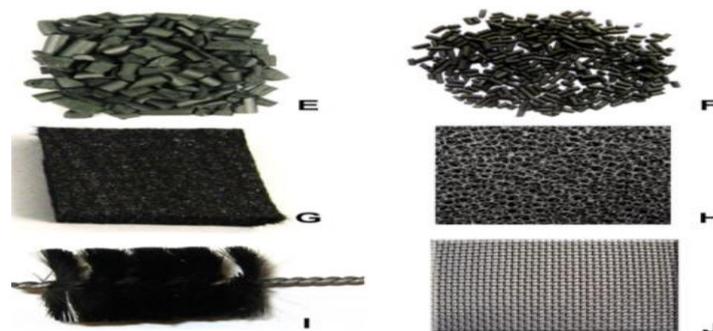


Figura 3-2: Materiales de superficie específica para MFC.

Fuente: Wei, et al., 2011, p.9396.

Chaudhuri y Lovley estudiaron los efectos del área de superficie, la morfología y la porosidad de los materiales anódicos con salida de voltaje utilizando una varilla de grafito, fieltro de grafito y espuma de grafito como electrodos (Chaudhuri & Lovley, 2003, p.1229). En la tabla (2 -1) se resume los diferentes ánodos basados en carbono y el rendimiento de las CCM.

Tabla 2-2: Diferentes materiales, potencia MFC, fuente de bacterias y tipo CCM.

Material	Tamaño	Fuente bacteriana	Tipo CCM	Salida de potencia	Referencia
Placa de grafito	155 cm ²	Shewanella oneidensis (MR-1)	Cátodo de aire de dos cámaras	1410 mW/m ²	(Dewan, Beyenal y Lewandowski, 2008)
Papel carbón	-	Bacterias preacumuladas de un CCM activo	Cátodo de aire de cubo de una sola cámara	600 mW/m ²	(Liu, Cheng y Logan, 2005)
Brocha de carbón	3cm_4cm dia.	Bacterias preacumuladas de un CCM activo	Cátodo de aire de cubo	2400 mW/m ²	(Liu, Cheng y Logan, 2005)
Tela de carbón activado de alta superficie	1.5 cm ²	Cepa D. desulfuricans	Cepa D. desulfuricans	0.51 mW/m ²	(Zhao et al., 2008)
Malla de carbono	7cm ²	Bacterias preacumuladas de un CCM activo	Cátodo de aire de cubo de una sola cámara	893 mW/m ²	(Wang et al., 2009)
Filtro de carbono-PANI	0.5cm × 0.5cm × 0.2cm	Cultivo mixto	Doble cámara CCM	27.4 mW/m ²	(Li et al., 2011)
Carbono reticulado vitrificado	1 × 1cm ²	Cultivo mixto	Doble cámara CCM	18.7 mA/cm ³	(Chen et al., 2012)
Placa de grafito	-	Efluente clarificador primario	CCM de una sola cámara	26mW/m ²	(Liu, Ramnarayanan y Logan, 2004)
Filtro de carbón	-	Bacterias pre aclimatadas de un MFC activo	CCM de dos cámaras	356mW/m ²	(Aelterman et al., 2008)

Fuente: Kumari, et al., 2018, p.129.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

2.4.7. Electrodo de metal

Los electrodos de metal resisten a la corrosión, son mejores conductores por sus características metálicas, pero la adhesión de bacterias en la superficie metálicas lisas no son muy fiables, no logran mayores densidades de potencia en comparación con los materiales de carbono, dependiendo del metal que se va a utilizar estos pueden ser baratos o caros, normalmente el material más utilizado para el ánodo es el acero inoxidable y el titanio, pero estos no se usan con

tanta frecuencia en las CCM en comparación con el carbono no logran mayores densidades de potencia (Wei, et al., 2011, p.128).

2.4.8. *Agave Americana.*

El género *Agave* (sensu stricto) es endémico de América que posee 150 especies en México, (García Mendoza, 2002, p.19). El agave y las especies son un grupo de monocotiledóneas americanas de la familia Asparagaceae, de la subfamilia Agavoideae, del grupo Agaveae: ex Agavaceae s.s , consta de 10 géneros y 340 especies (Eguiarte & Silva, 2017) (De La Torre, et al., 2018, p.247). En la figura 4-2 podemos observar variedad americana (A); variedad margarita (B) y la variedad medio picta(C).

En la actualidad el agave es utilizado para la elaboración de bebidas alcohólicas, aguamiel sin olvidar la obtención de fibras, alimento, en la construcción, ornamentales, entre otros (García Mendoza, 2002).

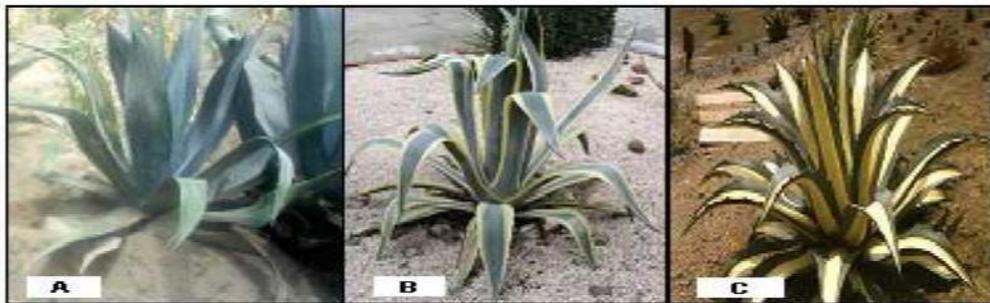


Figura 4-2: Principales variedades del Agave americana.

Fuente: Jurado & Sarzosa, 2009, p.3.



Figura 5-2: Agave americana Salasaca -Andes centrales del Ecuador.

Fuente: De La Torre, et al., 2018, p.254.

La producción de Agave en el Ecuador ha disminuido y solo se han identificado 53 iniciativas productivas en los Andes ecuatorianos como se muestra en la (figura 6-2), se han desarrollado en las subregiones norte (26) y sur (17) y central (10). Lo que se comercializa con mayor frecuencia son mishki (duce) y sus subproductos como el arroz de cebada con mishki, jarabe y licor, la producción de fibra y artesanías es considerablemente menor e involucra menos actores.

Ciertos productores consideraron que existe una escasez de plantas de Agave americana debido a bajas tasas de replantación de plantas cosechadas; la construcción de caminos que han destruido los hábitats de esta planta; y la pérdida del conocimiento tradicional y los usos de la especie.

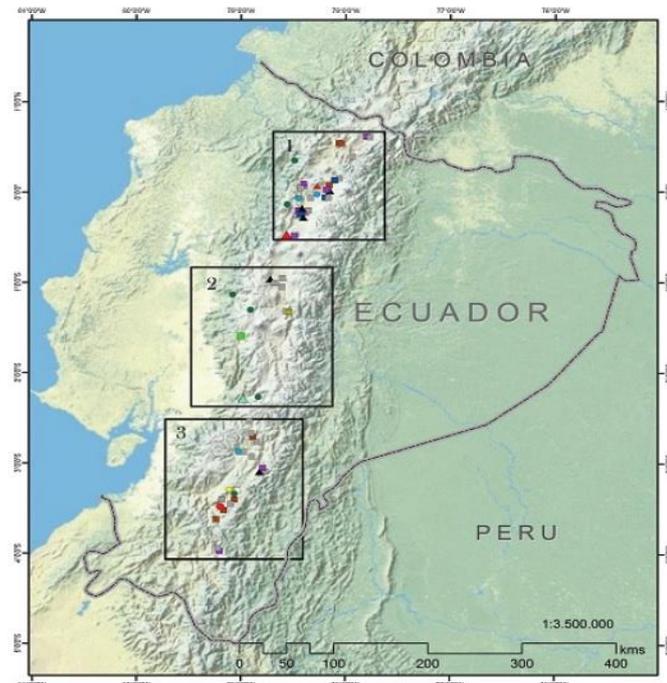


Figura 6-2: Iniciativas productivas del agave.

Fuente: De La Torre, Cummins y Logan-Hines, 2018, p.256.

2.4.9. Pretratamiento de los electrodos

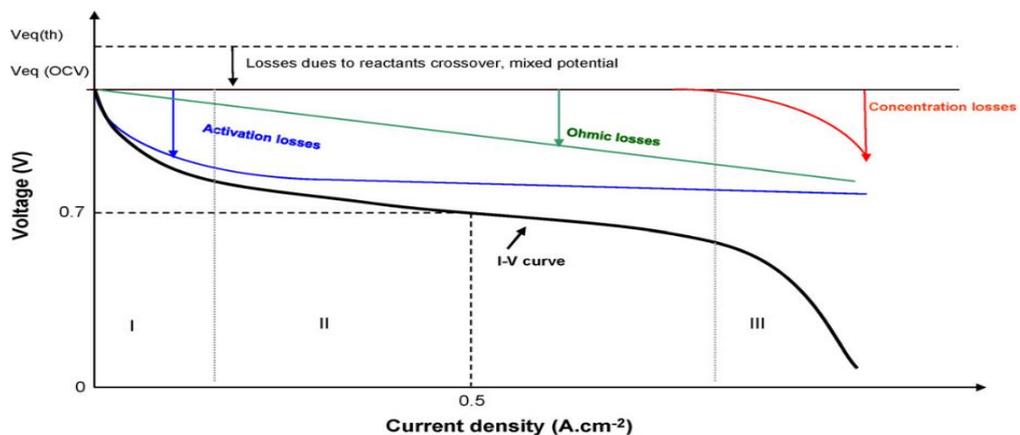
Los electrodos de carbono pueden proporcionar una mayor potencia de salida en condiciones térmicas o termoquímicas, destacando que pueden eliminar impurezas y mejorar la porosidad de los materiales, mejorando la conductividad eléctrica y la generación de energía, entre los pretratamientos tenemos: el uso de amoníaco o ácido, el recubrimiento con óxidos metálicos, materiales poliméricos, nanomateriales y materiales compuestos. (Kumari, et al., 2018, p.132). El uso de amoníaco por parte de Cheng y Logan señalaron que la tasa de adhesión entre bacterias y la superficie del electrodo aumentó en un 48% la generación de energía además de reducir el tiempo de activación de 150h a 60h (Cheng & Logan, 2007, p.493). En un pretratamiento la malla de carbón hecha por Wang señalaron el rendimiento energético de 893 mW/m^2 a 1015 mW/m^2 (Wang et al., 2009). El pretratamiento con ácidos inorgánicos mostro un acumulamiento de múltiples grupos funcionales en la superficie del electrodo lo que mejoro el número de cargas positivas en la superficie del electrodo, además de la formación de grietas lo que mejoro así la velocidad de transferencia y los electrones libres de la solución al ánodo, como un referente Feng estudio que el uso simultaneo de tratamiento térmico y ácido para electrodos pueden mejorar la producción de energía en un 25% (Feng et al., 2010).

2.5. Desempeño de una CCM.

El desempeño de una CCM se lo realiza en forma de curva corriente-potencial, existiendo varios problemas como la resistencia interna, la distribución de los sustratos en este caso (lodos de una textilería) (Vante, 2003, pp.22-23). Además, la curva de corriente potencial también llamada curva de polarización, pero bajo condiciones de corriente continua en el experimento. En la figura 2-2 observamos la curva de polarización con caídas de voltaje por irreversibilidades, y la presencia de una curva de proceso termodinámico reversible; en la cual se observa que el potencial a circuito abierto es mucho menor al teórico, las pérdidas de potencial son llamadas sobrepotenciales, polarización o sobrevoltaje (η) entre las cuales tenemos:

- **Polarización por activación (η_{act}).** - Sucede cuando la lenta cinética controla la velocidad de una reacción electroquímica en la superficie de un electrodo, lo cual la polarización por activación está directamente relacionada con las velocidades de las reacciones electroquímicas. Para una electroquímica con $\eta_{act} \geq 50 - 100$ mV, η_{act} está dado por la ecuación de Tafel (EG & G Services, 1989, pp.2-5 2-8). La curva de polarización prácticamente coincide con la curva para el cátodo, teniendo en cuenta que en una celda que opera con H_2O_2 , el sobrepotencial de la reacción de oxidación es muy pequeño entre 20-30 mV en cambio para la reacción de reducción del oxígeno es de 500mV o superiores.

Figura 7-2: Curva de polarización teórica y experimental de una celda de combustible.



Fuente: Yousfi-Steiner et al., 2008, p.263.

- **Polarización óhmica (η_{ohm}).** - Este fenómeno se debe a la resistencia del material, al flujo de iones en el electrodo y a las variaciones de interconexiones, estos electrodos obedecen a la ley de Ohm (Meng & Wang, 2004, p.361).
- **Polarización por concentración (η_{conc}).** - Mediante el reactivo se consume el potencial de la celda empieza a caer debido a la concentración de gas en la zona, este gradiente de concentración puede originarse por una lenta difusión del gas en los poros del electrodo

(EG & GServices, 2000, p. 2-6). Entonces el sobrepotencial de debería escribir de la siguiente forma:

$$E_{celda} = E - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (1)$$

Siendo E , el potencial termodinámico de la celda calculando mediante la ecuación de Nernst.

2.6. Sistemas de ecuaciones

Para hacer una descripción de los fenómenos físicos que ocurren dentro de una celda de combustible realizamos la solución de las ecuaciones de conservación de materia, energía, momento, especies y transporte de corriente, las ecuaciones de variación que se usen serán utilizadas para nuestra modelación las que nos interesen. Si necesitamos comparar el movimiento de un fluido, solo necesitaremos resolver la ecuación de **Navier-Stokes**, y si nos interesaría ver lo que sucede en la zona electrocatalítica, teniendo en cuenta el balance de especies y fenómenos de difusión, se nos hace un poco complicado resolverlos y tenemos que tomar ecuaciones específicas para resolverlo, entre las cuales tenemos:

- Ecuaciones para el flujo en medios porosos.
- Ecuación de Stefan-Maxwell para la difusión en mezclas.
- Ley de Fick para la difusión.
- Ecuación de Butler-Volmer (o Tafel) para la relación entre la corriente eléctrica y el potencial.
- Ley de Fourier para la conducción de calor.
- Ley de Ohm para la conducción de la corriente eléctrica.
- Ley de Faraday para la relación entre corriente eléctrica y consumo de reactivos en una reacción electroquímica.

Pero debemos tomar en cuenta ciertas consideraciones al momento de resolver un modelo, tales como:

- Flujo laminar.
- Gases ideales.
- Caída óhmica del potencial despreciable en los componentes.
- Flujo incompresible.
- El transporte de energía y materia a través de estructuras porosas (ϵ).

Siegel(Siegel, 2008, pp. 1332-1335) nos da a conocer un resumen de las consideraciones de las regiones de estudio.

2.7. Ecuación de conservación.

2.7.1. Ecuación de materia

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\rho v_x + \frac{\partial}{\partial y}\rho v_y + \frac{\partial}{\partial z}\rho v_z\right) \quad (2)$$

La variación de la densidad para un punto fijo está siendo descrita en esta ecuación, como consecuencia de las variaciones del vector de la velocidad másica ρv . Escrita en forma vectorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad (3)$$

Al ser escrita en forma vectorial la ecuación anterior nos muestra que la velocidad con que aumenta la densidad en el interior de un elemento pequeño de volumen fijo en el espacio, es igual a la velocidad neta de entrada de densidad de flujo de materia en el elemento dividida por el volumen (Sandra & Rivas, 2009, p.158). Realizamos diferenciación indicada y reuniendo las derivadas de ρ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot v) \quad (5)$$

$-\rho(\nabla \cdot v)$ = Representa la derivada con respecto al tiempo para un fluido en movimiento que realiza un recorrido. Si tenemos una densidad constante $\frac{D\rho}{Dt} = 0$.

$$(\nabla \cdot v) = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0 \quad (6)$$

2.7.2. Ecuación de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (7)$$

La ecuación (7) representa un balance aplicado a un elemento de volumen fijo en el espacio.

Donde:

g = es el vector de aceleración gravitacional con componentes x, y, z.

ρv = es el vector velocidad másica con componentes x, y, z.

$\rho v v$ = es la densidad de flujo convectivo de cantidad de movimiento.

τ = es el tensor esfuerzo con nueve componentes.

$[\nabla \cdot \rho v v]$ es la velocidad de pérdida de cantidad de movimiento por unidad de volumen debido al flujo del fluido (Sandra & Rivas, 2009, p.159).

Expresando como derivada substancial la ecuación (7) tenemos:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (8)$$

La ecuación (8) establece que un pequeño elemento de volumen que se mueve con el fluido es acelerado por las fuerzas que actúan sobre el (fuerza de presión, fuerza gravitacional y fuerza viscosa), o en otras palabras hace una descripción de las variaciones que tienen lugar en un elemento que sigue el movimiento del fluido (Sandra & Rivas, 2009a, p.159).

Bueno, para utilizar estas ecuaciones debemos expresarlas los distintos esfuerzos en función de las propiedades del fluido (μ) y en función de los gradientes de velocidad, para determinar las distribuciones de velocidad. Para fluidos newtonianos se establece:

$$\tau_{xx} = -2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot v) \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (10)$$

A partir del tensor (τ) el resto de las expresiones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Integrando cada expresión de τ se obtienen las ecuaciones de movimiento para un fluido newtoniano con la variación de la densidad y la viscosidad, como la viscosidad y la densidad son constantes la expresión final nos lleva a la ecuación de **Navier-Stokes** (BIRD et al., 1987, p.3-11)

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (12)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (13)$$

2.7.3. Ecuación de Nernst.

La relación matemática existente entre potencial de la celda o también llama “fem” y la concentración de reactivos y productos de una reacción de óxido-reducción, dicha ecuación es conocida como la ecuación de Nernst (Guevara, 2017, p.34).

$$E_{eq} = E_{eq,ref}(T) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_R}{C_O} \quad (14)$$

Donde:

E_{eq} = Potencial de celda

R= constante de los gases ideales (8.314 J/ (mol K))

T= temperatura absoluta en K

n= Moles de electrones que se transfieren en la reacción o semirreacción

F= constante de Faraday (96500 Columbs/mol)

C_R y C_O = Concentraciones del ion.

2.7.4. Ecuación De Butler-Volmer.

Si la fuente de voltaje polariza de tal manera que impulsa a los electrones hacia el electrodo de trabajo sacándolos del electrodo auxiliar, se lleva a cabo reacciones de reducción sobre el electrodo de trabajo. Si en caso contrario saca los electrones para enviarlos al electrodo auxiliar, la reacción predominante es la de oxidación (Alvarez, 2015, p:21-22).

$$i = i_o \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} n \right) - \left(\frac{\alpha_c F}{RT} n \right) \right] \quad (15)$$

Donde:

i= Densidad de Corriente (A/m²)

i_0 = Densidad de corriente de intercambio (A/m²)

α_a , α_c = Coeficientes de transferencia de carga anódico y catódico

n= Sobre potencial (V)

R=Constante de los gases Constante de los gases (8.314 J/(mol K))

T=Temperatura Absoluta en K

2.7.5. Ecuación de energía.

Al realizar el balance de energía para un elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$ se deduce dicha ecuación de energía.

Velocidad de acumulación de energía cinética e interna	=	Velocidad de entrada de energía cinética e interna por convección.	-	Velocidad de salida de energía cinética e interna por convección.	+	Velocidad de neta de adición de calor por conducción.	-	Velocidad neta de trabajo comunicado por el sistema a los alrededores.
--	---	---	---	--	---	---	---	--

Donde:

La energía cinética = corresponde a la energía relacionada con el movimiento observable del fluido.

La energía interna = corresponde a la energía relacionada con los movimientos de translación e internos de las moléculas y la interacción entre ellas.

El trabajo realizado por el elemento del fluido contra los alrededores consta de: el trabajo contra las fuerzas de superficies y contra las fuerzas de volumen, es decir, gravedad, presión y fuerza viscosas. (Sandra & Rivas, 2009b, p.160).

Realizando una versión compacta en forma de notación vectorial-tensorial del balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\hat{U} + \frac{1}{2} v^2 \right) = - \left(\nabla \cdot \rho v \left(\hat{U} + \frac{1}{2} v^2 \right) \right) - (\nabla \cdot q) + \rho(v \cdot g) - (\nabla \cdot \rho v) - (\nabla[\tau \cdot v]) \quad (16)$$

La ecuación de energía al ser utilizado las ecuaciones de movimiento y materia o continuidad y simplificando nos queda de la siguiente manera:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\hat{U} + \frac{1}{2} v^2 \right) = -(\nabla \cdot q) + \rho(v \cdot g) - (\nabla \cdot \rho v) - (\nabla[\tau \cdot v]) \quad (17)$$

Al separar la energía mecánica de la siguiente ecuación (16) tendremos la energía interna (17).

Donde:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) = p(\nabla \cdot v) - (\nabla \cdot \rho v) + \rho(v \cdot g) - (\nabla[\tau \cdot v]) + (\tau : \nabla v) \quad (18)$$

$$\rho \frac{D\hat{U}}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - \rho(\nabla \cdot v) - (\tau : \nabla v) \quad (19)$$

$p(\nabla \cdot v)$ = según el fluido se expanda o se comprima puede ser negativo o positivo, siendo una forma reversible de intercambio de energía (BIRD et al., 1987a, p.3-13).

$(-\tau : \nabla v)$ = representa la degradación de energía mecánica a energía calorífica debido a efectos de viscosidad (BIRD et al., 1987b, p.3-13).

La ecuación para un fluido newtoniano con una conductividad térmica K sería la siguiente, teniendo en cuenta que la energía interna la podemos expresar en función de la temperatura del fluido y de la capacidad calorífica (Geankoplis & Christie, 1998).

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = K \nabla^2 T - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho (\nabla \cdot v) + \mu \Phi \quad (20)$$

Donde:

$K\nabla^2 T$ = Ley de Fourier con componentes x , y y z .

$\mu\phi$ = disipación viscosa.

Se toma esta consideración cuando hay generación de calor por reacción o por medios eléctricos.

2.7.6. Especies

Si a una especie A se le aplica la conservación de la materia en un elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$, fijo en el espacio, en el cual la especie A puede darse una reacción química por reacción química con una velocidad r_A ($g/cm^3 s$), de la cual obtenemos la ecuación de continuidad para la componente A (Sandra & Rivas, 2009c, p.162).

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \left(\frac{\partial n_{Ax}}{\partial x} + \frac{\partial n_{Ay}}{\partial y} + \frac{\partial n_{Az}}{\partial z} \right) = r_A \quad (21)$$

Si a la ecuación de continuidad para la componente A le expresamos en notación vectorial sería de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + (\nabla \cdot n_A) = r_A \quad (22)$$

Si un componente B , estuviese mezclado con el componente A , B tendría una ecuación de continuidad como A , si sumamos $A+B$ nos conduce a la ecuación.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v) = 0 \quad (23)$$

Para obtener perfiles de concentración necesitamos expresarla en función de la difusión binaria la cual describe los perfiles de concentración restringiendo de ausencia de difusión térmica, de presión y forzada.

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho_A v) = (\nabla \cdot \rho D_{AB} \nabla \omega_A) + r_A \quad (24)$$

La ecuación (24) es general y es válida para la difusividad variable y densidad total variable, suponiendo que D_{AB} y ρ son constantes, tenemos la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} + (v \cdot \nabla c_A) = D_{AB} \nabla^2 c_A + R_A \quad (25)$$

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} + \left(v_x \frac{\partial c_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial c_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial c_A}{\partial z} \right) = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 c_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_A}{\partial z^2} \right) + R_A \quad (26)$$

Donde:

R= función de densidad de corriente y del número de electrones transferido $mol/s\ cm^2$ (sistema electroquímico) (Bard & Faulkner, 2001).

2.8. Energía libre de Gibbs

Partiendo del criterio de espontaneidad $\Delta S_{univ} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{alrd} > 0$ para la cual al evaluar la variación de entropía total ΔS_{univ} siempre debemos evaluar ΔS para los alrededores, pero nos damos cuenta que es difícil de resolver porque no podemos describir todas las interacciones en un sistema y menos en sus alrededores por lo cual debemos hacer ciertas consideraciones para no tener imprevistos de los cambios que se den en los alrededores (Petrucci et al., 2011, p.833). Realizamos un proceso hipotético para la consideración que se producen a temperatura y presión constante además con el trabajo limitado a trabajo presión volumen (Jaque, 2019, p.30). Un efecto calorífico (q_p) va acompañado a este proceso, y para un sistema ΔH_{sis} es igual a ΔH . En los alrededores se experimenta el efecto calorífico y cual es opuesto al del sistema $q_{alr} = -q_p = -\Delta H_{sis}$, en el proceso en la cual el calor entra o sale de los alrededores (grandes) hipotéticos puede hacerse reversible en este caso, dando como consecuencia que la cantidad de calor producida a los alrededores sea tan solo un cambio infinitesimal en la temperatura (Petrucci et al., 2011, p.833).

Por consiguiente, tenemos la siguiente ecuación:

$$\Delta S = \frac{q_{rev}}{T} \quad (27)$$

Sabiendo que la variación de la entropía en los alrededores es:

$$\Delta S_{arl} = - \frac{\Delta H_{sis}}{T} \quad (28)$$

$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{alrd} > 0$$

Sustituyendo ΔS_{arl} y multiplicando por T en la expresión tenemos:

$$\Delta S_{arl} = - \frac{\Delta H_{sis}}{T}$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores}$$

$$T\Delta S_{universo} = T\Delta S_{sistema} + T\left(- \frac{\Delta H_{sis}}{T}\right)$$

$$T\Delta S_{universo} = T\Delta S_{sistema} - \Delta H_{sis}$$

$$T\Delta S_{universo} = -(\Delta H_{sis} - T\Delta S_{sistema}) \quad (29)$$

Multiplicando por (-1) la ecuación (29) tenemos:

$$-T\Delta S_{universo} = \Delta H_{sis} - T\Delta S_{sistema} \quad (30)$$

Donde:

$\Delta H_{sis} - T\Delta S_{sistema}$ = Hace referencia únicamente al sistema.

$\Delta S_{universo}$ = criterio de cambio espontaneo.

Sabiendo:

$$\Delta S_{universo} > 0 \text{ (Petrucci et al., 2011, p.834)}$$

Teniendo ya la ecuación (30) generalmente se la representa de diferente manera, en la cual se requiere introducir una nueva función termodinámica denominada energía Gibbs, entonces la energía Gibbs, para un sistema se la define (Petrucci et al., 2011, p.834).

$$G = H - TS \quad (31)$$

Y para la variación de la energía Gibbs (energía libre) para un proceso a T constante se define

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (32)$$

Si hacemos una comparación entre las ecuaciones (30) y (31) tenemos:

$$\Delta G = -T\Delta S_{universo} \quad (33)$$

2.9. Descripción del programa COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un software de modelado desarrollado por el Grupo COMSOL fundado por Svante Littmarck y Farhad Saeidi (Littmarck & Saeidi, 1986). COMSOL Multiphysics es un software basado en el método de elementos finitos en la cual podemos simular o modelar diferentes aplicaciones, prototipos virtuales, tales como científicas y de ingeniería, mediante la resolución de ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) que fácilmente pueda ser interpretada por un físico o un ingeniero, proporcionando detalles del fenómeno físico, como transporte de especies a través del electrodo, transferencia de calor, movimiento de fluidos y los sobrepotenciales de corriente y finalmente visualizar los resultados (Sousa et al., 2008, p.1).

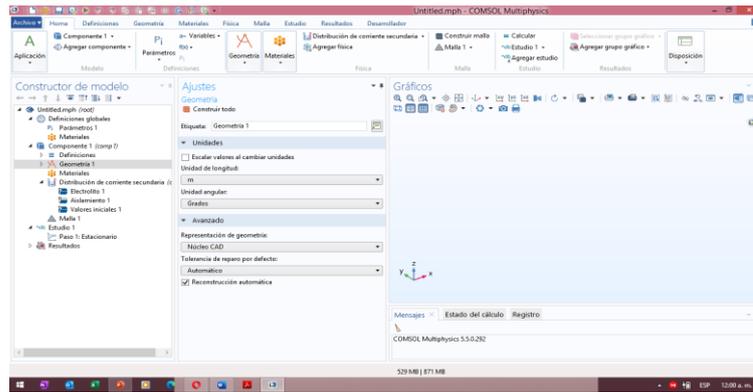


Gráfico 1-2: Ventana principal de COMSOL Multiphysics.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

2.9.1. Ventana de configuración.

Esta es la ventana principal para ingresar todas las especificaciones del modelo, incluidas las dimensiones de la geometría, las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales y las condiciones iniciales, y cualquier otra información que el solucionador necesitará para realizar la simulación (Zimmerman, 2006a, p.9).

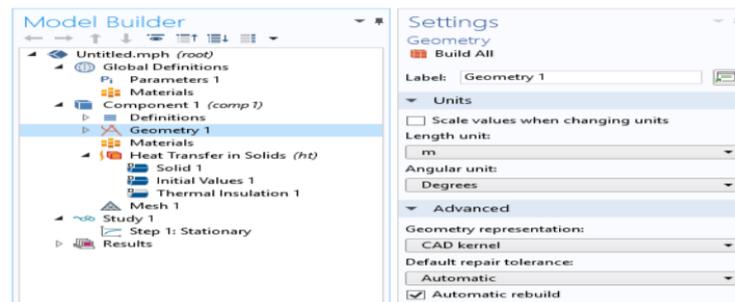


Figura 8-2: Ventana de configuración COMSOL Multiphysics.

Fuente: Zimmerman, 2006b, p.9.

2.9.2. La cinta de opciones y la barra de herramientas de acceso rápido.

Las pestañas de la cinta en el entorno COMSOL Desktop reflejan el flujo de trabajo de modelado y brindan una descripción general de la funcionalidad disponible para cada paso de modelado, incluidas las aplicaciones de simulación de construcción a partir de sus modelos (Zimmerman, 2006c, p.17).



Gráfico 2-2: Barra de herramientas de acceso rápido.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

2.9.3. Las bibliotecas de aplicaciones.

Son colecciones de archivos MPH que contienen modelos de tutoriales y aplicaciones ejecutables con documentación adjunta. Los modelos de tutoriales muestran cómo utilizar Model Builder y tienen documentación que incluye antecedentes teóricos e instrucciones paso a paso, dicho módulo adicional basado en la física viene con su propia biblioteca de aplicaciones con ejemplos específicos para sus aplicaciones y área de física (Zimmerman, 2006d, p.28).

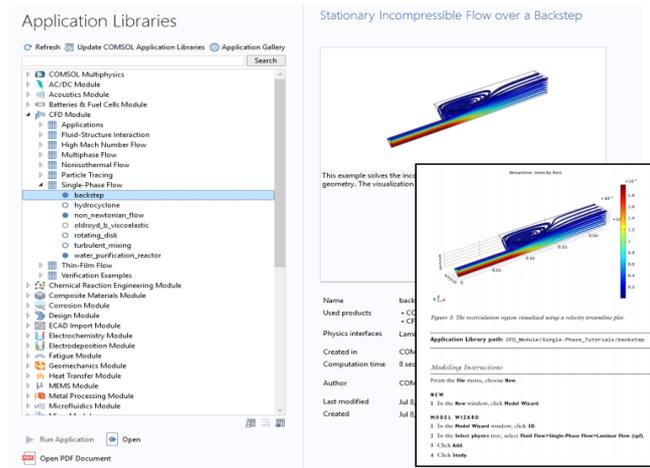


Figura 9-2: biblioteca de aplicación.

Fuente: Zimmerman, 2006e, p.29.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO.

3.1. Tipo de estudio

El tipo de estudio que se realizó es cuasi experimental; de acuerdo a la naturaleza de los datos y la recuperación bibliográfica, ya que se tomara datos conocidos de artículos científicos, tesis, proyectos etc., donde se desarrolló simulación y/o desarrollo de electrodos, así como los fenómenos electroquímicos dentro de una celda de combustible microbiana. En COMSOL Multiphysics, se aplica el método deductivo-inductivo, donde se establecerá los parámetros básicos del mismo programa, además técnicas exploratorias para los programas computacionales permitiendo simular los electrodos, donde se podrá interpretar los datos acerca de la producción y eficiencia de bioelectricidad así dando cumplimiento a los objetivos planteados.

3.2. Métodos

Mediante las técnicas de proceso de investigación científica el método que se usará en el siguiente trabajo de titulación es el deductivo, inductivo y experimental que nos ayudará y facilitara en las ideas, redacción y experimentación de nuestro trabajo para obtener resultados de la comparación de producción electroquímicas de ánodos de fibra de carbono y grafito-cabuya de celdas de combustible microbiana, así demostrando la hipótesis planteada y posteriormente poder plasmarla en medios digitales, físicos para una posterior base de trabajo en el futuro.

3.2.1. Método Inductivo

Mediante la revisión bibliográfica se identificó las ecuaciones necesarias que nos permite resolver la producción de bioelectricidad, la configuración geométrica de los ánodos (fibra de carbono y grafito-cabuya (*agave americana*)), el sustrato utilizado se utilizó en proporciones iguales y de igual manera la homogenización, pudiendo experimentar y comparar la producción de bioelectricidad de sustratos de textilerías con diferentes electrodos.

Pudimos ir mejorando el sellado de las celdas como el diseño de los mismos para evitar fugas e ir mejorando su rendimiento además de utilizar un área de igual proporción para los electrodos para su mejor adhesión de las bacterias, posterior a eso se analizó e interpretaron los datos obtenidos de las celdas de combustible microbiana.

3.2.2. Método deductivo

Identificamos varios problemas ya existentes al momento de la realización de los electrodos tanto la resistencia interna como el área del mismo, mejorando prácticamente todo lo expuesto para

mejorar el rendimiento de las celdas de combustible al momento de la generación de bioelectricidad dándole diferentes condiciones al experimento, dándole una resolución a dicha hipótesis, además con la ayuda de las revisiones bibliográficas determinamos las óptimas condiciones para la generación de bioelectricidad al momento de hacer la comparación de distintos materiales en ánodos.

3.2.3. Método experimental

Se realizó varias mejoras en las celdas de combustible microbiana utilizadas en el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA), para lo cual fue necesaria la recopilación de información mediante revisión bibliográfica, parámetros etc. La recolección de la materia prima “hojas de agave” se las realizo en campo abierto en los alrededores de la ESPOCH con una edad del agave de 2 a 3 años propicias para los cortes, utilizando un des hilador casero dejándolos varios días a la intemperie para su secado y posterior tratamiento en la cual mediante la activación química se transformó la fibra de cabuya en carbón activado, dicha activación lo realizamos en una sola etapa; usamos un agente químico (H_3PO_4) al 40% calentándolos junto a la materia prima a temperatura atmosférica. Mediante la deshidratación química se obtuvo la porosidad en el carbón activado, haciendo que el ácido fosfórico luego de ser absorbido por el carbón elimine o reduzca materia como alquitranes y materia volátil. Se experimentó en la Facultad de Ciencias – ESPOCH, junto al diseño y la realización de los electrodos los cuales se utilizó en parafilm con la impregnación del carbón a presión; medimos su conductividad mediante parámetros establecidos por el equipo multiparámetro Thermo Scientific Orion Versa Star Pro con valores de aproximados de 69×10^{-3} S/m en su conductividad eléctrica (Prías et al., 2015) revisados en literaturas además de analizar los grupos funcionales del carbón activado mediante técnica de espectroscopia infrarroja en la cual observamos la longitud de onda vs la transmitancia del análisis del carbón activado de fibra de cabuya. En el caso de la simulación se utilizó el software COMSOL Multiphysics versión 5.5, los balances de corriente electrónicos e iónicos se modelan utilizando una interfaz de distribución de corriente secundaria, resolviendo los potenciales en las fases del electrodo y electrolito, respectivamente, para el ánodo, la cinética es tan rápida que se usó una expresión de Butler-Volmer linealizada en el límite del ánodo.

3.3. Diseño de la Investigación

En cuanto al diseño se trata de una investigación experimental pues se requiere comprobar la hipótesis planteada mediante una serie de simulación.

3.3.1. Diseño Experimental

3.3.1.1. Identificación de variables.

Independiente: Materiales de los electrodos.

Dependiente: Producción de densidad de potencia.

3.3.1.2. Planteamiento de la hipótesis

¿El material de dicho electrodo influye en la producción de densidad de potencia?

3.4. Materiales y Métodos.

3.4.1. Electrodo de Cabuya

3.4.1.1. Obtención de las Hojas de cabuya (Agave americana).

Los materiales utilizados para la recolección de la materia prima son:

Tabla 1-3: Materia prima (hojas de cabuya).

Material	Cantidad
Cuchillo	1
Fundas	1

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

La materia prima fue obtenida a las cercanías de la ESPOCH sector “Juan Montalvo” cuyas coordenadas son latitud -1.662916 y longitud -78.682157 en la cual se obtuvo 3 hojas de agave (ver gráfico 3-3) de una penca de alrededor de 3 años.



Gráfico 1-3: Recolección de las hojas del agave.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.2. Fabricación de Fibra de cabuya

Los materiales utilizados para la fabricación de Fibra de cabuya son:

Tabla 2-3: Fibra de cabuya.

Material	Cantidad
Hojas de agave	3
Fundas	1
Des hilador casero	1
Agua	10 litros

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Cuyo procedimiento es:

1. Sostener con firmeza la hoja de agave.
2. Con el des hilador casero pasar con firmeza en las hojas de agave.
3. Retirar la pulpa de las hojas del agave hasta dejar solo en hilos.
4. Repetir el mismo procedimiento varias veces hasta obtener fibra de cabuya considerable.
5. La cantidad de fibra de cabuya que se obtuvo fue 100 gr.



Gráfico 2-3: Fibra de Cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.3. Secado de la fibra de cabuya.

Los materiales utilizados para el secado:

Tabla 3-3: Materiales para el secado de la fibra.

Materiales	Cantidad
Fibra de cabuya	100 gr
Alambre	½ m

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Luego de haber obtenido los 100 gr de la materia prima se dejó por 48 horas a secar, colocando la fibra de cabuya atada con el alambre (ver gráfico 4-2). Posterior al secado se obtuvo una pérdida del peso de la fibra de cabuya por efecto de la luz solar dándonos una pérdida de 8gr y quedándonos 92 gr de la fibra.



Gráfico 3-3: Secado de la fibra de Cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.4. Corte de la fibra de cabuya.

Para el corte de la fibra se necesitó los siguientes materiales:

Tabla 4-3: Materiales para la molienda de la fibra de Cabuya.

Materiales	Cantidad
Fibra de cabuya	92gr
Tijeras (medianas)	2
Fundas	2
Recipiente	1
mascarilla	1
Balanza analítica	-

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.



Gráfico 4-3: Corte de la fibra de Cabuya

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Se cortó la fibra de cabuya en tamaños de 2 a 3 mm. en la Facultad de Ciencias con las tijeras, y sobre una cartulina limpia, para evitar la pérdida del material, este método se realizó ya que no tenía la facilidad de un molino o algún equipo que corte el material en pequeñas dimensiones.



Gráfico 5-3: Materia prima final

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Luego de cortar la fibra en tamaños de 2 a 3mm se procedió a pesar y obtuvimos 90 gr de la materia prima, perdiendo aproximadamente 2gr por el entorno, el viento, etc., finalmente la materia prima se colocó en fundas para su posterior tratamiento.

3.4.1.5. Procedimiento para obtener el carbón activado a partir de la fibra de cabuya al 40%.

Los materiales utilizados para este procedimiento:

Tabla 5-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.

Materiales	Cantidad
Fibra de Cabuya	90gr
Bandeja de aluminio pequeña	2
Pinza metálica	1
Probeta (250ml)	1
Varilla	1
Vaso de precipitación (1000 ml)	1

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Dicha metodología se llevó a cabo en el laboratorio de investigación de la facultad de ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en el cual se realizó la activación química del carbón a una concentración del 40% y a una temperatura de 500°C.

Tabla 6-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.

Reactivos	Cantidad
Ácido Fosfórico 40%	720 ml
Agua destilada	380 ml

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 7-3: Activación química del carbón al 40% de ácido fosfórico.

Equipo	Marca
Mufla	Thermo scientific- 1415M
Estufa	Esco-OFA.54.8
Balanza analítica	-

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Se obtuvo un frasco de ácido fosfórico al 85% de concentración, pero teníamos que bajar su concentración al 40% para eso se realizó una disolución del ácido a razón de 1:2 (90gr de materia con 180 ml de ácido fosfórico al 40%) y para ello utilizamos la siguiente ecuación.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (33)$$

Donde:

C_1 : Concentración inicial.

$$85\% \times V_1 = 40\% \times 180 \text{ ml}$$

C_2 : Concentración final.

$$V_1 = 84.70 \text{ ml}$$

V_1 : Volumen inicial

V_2 : Volumen final

Se obtuvo un volumen ≈ 85 ml de ácido fosfórico al 85 % de concentración el cual disolví en 95ml de agua destilada para obtener 180ml de una disolución de ácido fosfórico al 40%.

Descripción del método.

1. Colocamos los 90 gr de la fibra de cabuya en un vaso de precipitación (1000ml).
2. La razón de ácido fosfórico fue de 1:2. Se colocó los 90 gr de la fibra de cabuya con 180 ml de ácido fosfórico al 40%.
3. Se puso 4 veces la cantidad de 180ml de disolución de ácido fosfórico al 40% en el vaso de precipitación con la cabuya ya adicionada.



Gráfico 6-3: Fibra de cabuya con ácido fosfórico al 40%.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

4. Utilizamos una varilla para sumergir la fibra de cabuya, agitamos hasta estar a nivel y dejamos reposar 24 horas en la Sorbona.
5. Luego de haber transcurrido las 24 horas se sacó de la Sorbona, y se traspasó a dos bandejas de aluminio con la menor cantidad de ácido para ponerlas en una estufa durante 1 hora haciéndola secar a una temperatura de 105°C.



Gráfico 7-3: Bandeja de aluminio con fibra de cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.



Gráfico 8-3: Secado de la fibra de cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

6. La mufla se inició a 250°C y se introdujo la fibra media hora después y se fue elevando la temperatura de la mufla a 310°C luego a 360°C comprobando si no se quema la fibra con las pinzas metálicas y finalmente a 500°C por 1 hora.



Gráfico 9-3: Mufla a 500°C con la fibra de cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

7. Con las pinzas metálicas se saca la bandeja con el material de la mufla con mucho cuidado y se las deja enfría hasta que llegue a temperatura ambiente.



Gráfico 10-3: Carbón activado final de fibra de carbono.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.6. Lavado del carbón activado de fibra de cabuya.

Los materiales utilizados para este procedimiento:

Tabla 8-3: Materiales para el lavado de carbón activado.

Materiales	Cantidad
Carbón activado	55 gr
Reverbero	1
Papel filtro	½ metro
Embudo büchner	1
Termómetro manual	1
Varilla	1
Vaso de precipitación 1000 ml	1
Matraz (1000 ml)	1
Malla metálica	1

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 9-3: Reactivos

Reactivo	Cantidad
Hidróxido de sodio 0.1 N	4gr
Agua destilada	1l

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 10-3: Equipos utilizados para el lavado del carbón activado.

Equipos	Marca
pH metro	Fisher scientific

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Descripción del método.

1. Se agregó 4gr de Hidróxido de Sodio a 0.1 mol/L en un litro de agua destilada y se calentó en un vaso de precipitación de 1000 ml a una temperatura de 80°C.
2. Se cortó el papel filtro según al tamaño del embudo y se colocó el carbón el cual se lavó varias veces comprobando su pH (neutro).



Gráfico 11-3: Agua destilada con NaOH a 80°C

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.



Gráfico 12-3: Lavado del carbón activado.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.



Gráfico 13-3: pH Neutro del carbón activado.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.7. Secado del carbón activado de fibra de cabuya.

Tabla 11-3: Secado del carbón activado al 40%.

Equipos	Marca
Estufa	Esco-OFA.54.8
Balanza analítica	-

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Descripción del método.

1. Se retiró el carbón activado del embudo y se colocó en una bandeja de aluminio.
2. Se colocó la bandeja de aluminio con el carbón activado en una estufa a 110°C durante 48 horas.
3. Después de haber transcurrido el tiempo en la estufa se retiró y se procedió a pesar.



Gráfico 14-3: Carbón activado de fibra de cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.8. Caracterización del carbón activado de fibra de cabuya.

Una vez obtenido el carbón activa de fibra de cabuya se procedió a la caracterización de algunos parámetros el porcentaje de rendimiento, la conductividad eléctrica y el pH.

Porcentaje de Rendimiento del carbón activado de fibra de cabuya:

Para determinar el porcentaje de rendimiento del carbón activado de la fibra de carbono se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{\text{rendimiento real}}{\text{Rendimiento teórico}} \times 100 \quad (34)$$

Densidad del carbón activado de fibra de cabuya:

En una probeta de 10ml se puso 8ml de carbón activado y la densidad se calculó su densidad con la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (35)$$

Conductividad eléctrica del carbón activado de fibra de cabuya:

Los materiales utilizados para este procedimiento:

Tabla 12-3: Materiales para la conductividad del carbón activado.

Materiales	Cantidad
Carbón activado de fibra de carbono	5 gr
Agua destilada	50 ml
Envase esterilizado 125 ml	1
Probeta 25 ml	1
Mortero y pistilo	1

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 13-3: Equipos utilizados para calcular la conductividad eléctrica.

Equipo	Marca
Agitador Universal shaker orbital Psu-10i	BOECO
Multiparámetros pH y CE	Thermo Scientific ORION VERSA STAR PRO.
Balanza analítica	-

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Descripción del método para analizar la conductividad eléctrica:

1. Se procedió a poner 5gr de carbón activado y se pulverizo en un mortero.



Gráfico 15-3: Pulverizado del carbón activado

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

2. Se adiciono 50 ml de agua destilada con el carbón pulverizado en la el envase esterilizado, lo tapamos bien y se puso en el agitador por ½ hora a 200rpm.



Gráfico 16-3: Agitación de carbón activado de cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3. Introducimos los electrodos del multiparámetro en la probeta con la solución de agua destilada y carbón pulverizado para encontrar la conductividad eléctrica y además su pH en la solución.



Gráfico 17-3: Conductividad eléctrica.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.



Gráfico 18-3: pH de la solución.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.1.9. Caracterización de los grupos funcionales

Se caracterizar la muestra sólida y líquida del carbón activado de fibra de cabuya y el grafito mediante el espectrofotómetro de infrarrojo JASCO FT/IR4100 para obtener espectros que servirá para determinar los grupos funcionales correspondientes.



Gráfico 19-3: Espectrofotómetro de infrarrojo.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.2. Electrodo del ánodo (carbón activado de fibra de cabuya).

Tabla 14-3: Construcción de electrodo de carbón activado de fibra de cabuya.

Materiales	Descripción
Tijera	----
Parafilm	1m
Regla de medición	30 cm
Carbón activado de fibra de cabuya	2gr
2 amarras	3''
2 maderas pequeñas	(30cm * 7cm)
Plástico grueso	----
Tubo PVC	30 cm
Multímetro	-----

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento.

1. Dimensionamos el Parafilm (4cm * 6cm) con la regla y cortamos el área seleccionada.
2. Se recubrió cada una de las maderas con el plástico, encima de éste se colocó los materiales en capas y en orden, primero 1gr de carbón activado de fibra de cabuya seguido del parafilm y 1 gr de carbón activado de fibra de cabuya y por último la otra madera recubriéndolo todo como se muestra en la fotografía 19-2.



Gráfico 20-3: Recubrimiento del parafilm.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3. Se procedió a colocar las amarras para tener una mejor presión de las caras del parafilm con el carbón activado, dejándolas por una hora.



Gráfico 21-3: Colocación de las amarras.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

4. Luego del transcurso de una hora se retiró las amarras y se sacó el parafilm impregnado con el carbón activado.
5. Posterior a retirar el parafilm utilizamos el tubo de PVC para “amasar” uniformemente de cada lado del electrodo (carbón activado de fibra de cabuya impregnado a cada lado del parafilm).



Gráfico 22-3: Electrodo uniformemente

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

6. Pesamos el electrodo y verificamos que este del mismo peso o similar a los demás electrodos.
7. Medidos con el multímetro la resistencia del electrodo.
8. Dimensionamos los electrodos para tener similares áreas con los demás electrodos.
9. Se realizó 2 veces el mismo procedimiento para obtener 2 electrodos de fibra de cabuya.



Gráfico 23-3: Electrodos de Fibra de Cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.3. Electrodo del ánodo (grafito en polvo y carbón activado de fibra de cabuya).

Tabla 15-3: Construcción de electrodo Grafito-Cabuya

Materiales	Descripción
Grafito en polvo	1 gr
Carbón activado de fibra de cabuya	1 gr
Parafilm	1m
Tijera	----
Tubo PVC	30 cm
2 maderas pequeñas	(30 cm * 7cm)
2 amarras	3''
Plástico grueso	---
Regla de medición	30 cm

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento:

1. Dimensionamos el Parafilm (4cm * 6cm) con la regla y cortamos el área seleccionada.
2. Mezclamos homogéneamente 1gr de grafito en polvo y 1gr de carbón activado de fibra de cabuya.
3. Se recubrió cada una de las maderas con el plástico, encima de éste se colocó los materiales en capas y en orden, primero 1gr de la mezcla seguido del parafilm y el gramo de la mezcla restante y por último la otra madera recubriéndolo todo.
4. Se procedió a colocar las amarras a las maderas con la mezcla y el parafilm, para tener una mejor presión de las caras, dejándolas por una hora.
5. Luego del transcurso de una hora se retiró las amarras y se sacó el parafilm impregnado con la mezcla.
6. Posterior a retirar el parafilm utilizamos el tubo de PVC para “amasar” uniformemente de cada lado del electrodo (mezcla de carbón activado de fibra de cabuya y grafito en polvo).
7. Pesamos el electrodo y verificamos que este del mismo peso o similar a los demás electrodos.
8. Medidos con el multímetro la resistencia del electrodo.
9. Dimensionamos los electrodos para tener similares áreas con los demás electrodos.
10. Se realizó 2 veces el mismo procedimiento para obtener 2 electrodos de la mezcla de carbón activado de fibra de cabuya y grafito en polvo.



Gráfico 24-3: Electrodo de Grafito-Cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.4. Electrodo del ánodo (fibra de carbono).

Tabla 16-3: Construcción del ánodo de fibra de carbono.

Materiales	Descripción
Tijera	---
Regla de medición	30 cm
Fibra de carbono	Tela 1m
Balanza	---

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento.

1. Dimensionamos la tela de fibra de carbono ($4\text{cm} * 6\text{cm}$) con la regla y cortamos el área seleccionada.
2. Pesamos el electrodo y verificamos que este del mismo peso o similar a los demás electrodos.
3. Medidos con el multímetro la resistencia del electrodo.
4. Dimensionamos los electrodos para tener similares áreas a los demás electrodos.
5. Se realizó 2 veces el mismo procedimiento para obtener 2 electrodos de fibra de carbono.



Gráfico 25-3: Electrodo de fibra de carbono.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.5. *Electrodo cátodo (fibra de carbono).*

Se utilizó fibra de carbono en tela, en seis tamaños iguales de (6cm*4cm) que poseía el Grupo de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente (ESPOCH) en estudios anteriores.



Gráfico 26-3: Fibra de carbono en tela.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.4.6. *Membrana de intercambio protónico.*

Para la selección de la membrana de intercambio protónico (PEM), se tomó en cuenta varias consideraciones para el mejor rendimiento el cual depende del tipo de microorganismos, pH, la temperatura, configuración de la celda, el tipo de concentración como se vio en el capítulo I.

Tabla 17-3: Membrana de intercambio protónico.

Materiales	Descripción
Parafilm	4m
Regla de medición	30 cm
Tijera	---
Rapidógrafo	---

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento.

1. Dimensionamos el parafilm (6* 4 cm) y marcamos con el rapidógrafo y cortamos.
2. Repetimos 6 veces el mismo procedimiento para nuestras 6 CCMs.



Gráfico 27-3: Corte del Parafilm.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.5. Simulación en el software COMSOL Multiphysics versión 5.5

Para realizar la simulación es necesario establecer las dimensiones del electrodo:

Tabla 18-3: Dimensiones del modelo

Electrodo	Magnitud
Ánodo	6 cm x4 cm
Cátodo	6cm x 4 cm
Electrolito	6cm x 4cm
Espesor	0.1 cm
Área proyectada	50cm ²

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.5.1. Interfaz física

Posterior a definir las dimensiones de nuestro modelo para la simulación, definimos la interfaz física, la cual será una distribución secundaria, esta distribución pertenece al módulo de electroquímica, donde se modela corrientes electroquímicas, esta corriente es función del sobrepotencial, las ecuaciones que ocuparemos para el modelo será la ecuación de Nernst y la ecuación de Butler-volmer.

Tabla 19-3: Parámetros del modelo COMSOL Multiphysics.

Av	1e9[1/m]	Area específica
T	80 [degC]	Temperatura
p_atm	1[atm]	Presión del ambiente.
perm	1e-13[m ²]	Permeabilidad
mu	3e-5[Pa*s]	Viscosidad
k_d	3.16e-8[Pa*m ² /s]	Pre factor de expresión de difusividad empírica de EM
v_O2	16.6e-6	"Volumen de difusión, O2 (Fuller, Schettler, relación de Giddings)"
v_H2O	12.7e-6	Volumen de difusión, H2O (relación de Fuller, Schettler, Giddings)
v_N2	17.9e-6	Volumen de difusión, N2 (relación de Fuller, Schettler, Giddings)
M_O2	32[g/mol]	Masa Molar, O2
M_N2	28[g/mol]	Masa Molar, N2
M_H2O	18[g/mol]	Masa Molar, H2O

D_O2N2	$k_d*(T[1/K])^{1.75}/(p_{atm}*(v_{O2}^{1/3}+v_{N2}^{1/3})^2)*(1[kg/mol]/M_{O2}+1[kg/mol]/M_{N2})^{0.5}$	Difusividad de Maxwell-Stefan
D_O2N2_eff	$D_{O2N2}*(eps_{gas}^{1.5})$	Difusividad eficaz de la EM
D_O2H2O	$k_d*(T[1/K])^{1.75}/(p_{atm}*(v_{O2}^{1/3}+v_{H2O}^{1/3})^2)*(1[kg/mol]/M_{O2}+1[kg/mol]/M_{H2O})^{0.5}$	Difusividad de Maxwell-Stefan
D_O2H2O_eff	$D_{O2H2O}*(eps_{gas}^{1.5})$	Difusividad eficaz de la EM
D_N2H2O	$k_d*(T[1/K])^{1.75}/(p_{atm}*(v_{H2O}^{1/3}+v_{N2}^{1/3})^2)*(1[kg/mol]/M_{H2O}+1[kg/mol]/M_{N2})^{0.5}$	Difusividad de Maxwell-Stefan
D_N2H2O_eff	$D_{N2H2O}*(eps_{gas}^{1.5})$	Difusividad eficaz de la EM
E_cell	0.7[V]	Voltage de la celda.
Eeq_ref_H2	$-(0-(T-25[degC])*131[J/(K*mol)])/(2*F_{const})$	Potencial de equilibrio de referencia, ánodo
Eeq_ref_O2	$O2-(-2*229[kJ/mol]-(T-25[degC] *(2*189[J/(K*mol)]-205[J/(K*mol)])))/(4*F_{const})$	Potencial de equilibrio de referencia, cátodo"
Eeq_ref	$Eeq_{ref_O2}-Eeq_{ref_H2}$	Potencial de equilibrio de referencia celular.
p_vapor	$0.61121*exp((18.678-(T-0[degC])/234.5[K])*((T-0[degC])/(257.14+T-0[degC])))$ [kPa]	Presión de vapor de agua
RH	90[%]	Humedad relativa
x_H2O_in	$RH*p_{vapor}/p_{ref}$	Fracción molar de agua de entrada
x_O2_in	$0.21*(1-x_{H2O_in})$	Fracción molar de oxígeno de entrada
x_H2	$RH*p_{vapor}/p_{ref}$	Fracción molar de hidrógeno en el lado del ánodo (asumiendo la misma humedad relativa que en el lado del cátodo)
i0_ref_H2	1e4[A/m^2]	Densidad de corriente de intercambio de referencia, ánodo

i0_ref_O2	1e-3[A/m^2]	Densidad de corriente de intercambio de referencia, cátodo.
alpha_a_H2	0.5	Coefficiente de transferencia.
alpha_a_O2	3.5	Coefficiente de transferencia.
p_ref	p_atm	Presión de referencia.
eps_l 0.3	0.3	Fracción de volumen de electrolito en electrodo poroso.
eps_s	0.3	Fracción de volumen de electrodo en electrodo poroso.
eps_gas	0.4	Fracción volumétrica de fase gaseosa en electrodo poroso.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Fuente: (Littmarck & Saeidi , 1986)

3.5.2. Distribución de corriente secundaria

Procedimiento para la geometría.

1. Configuramos la geometría y el mallado del modelo, utilizando bloques para el electrodo (ánodo)- electrolito y el electrodo (cátodo).

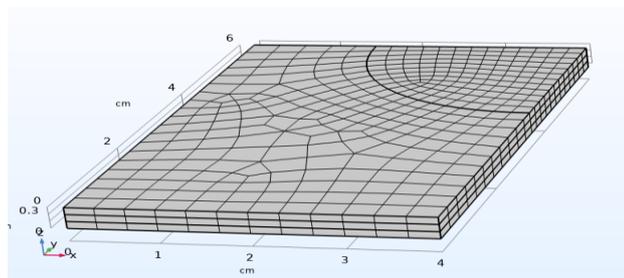


Gráfico 28-3: Mallado del modelo

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

La zona de reacción tiene un espesor de 0,1 cm, al igual que la capa de electrolito. La celda unitaria tiene una superficie de 6cm por 4 cm y el orificio de entrada de gas tiene un radio de 2,5 en donde tendrá reacción del electrodo.

Procedimiento para el electrodo ánodo.

1. En la ventana de constructor de modelos, hacemos clic con el botón derecho en Distribución de corriente secundaria (cd) y seleccionamos Electrodo.
2. En la ventana Configuración de Superficie del electrodo, escribimos Electrodo – Ánodo.
3. Escogemos los límites del electrodo ánodo de modo manual.

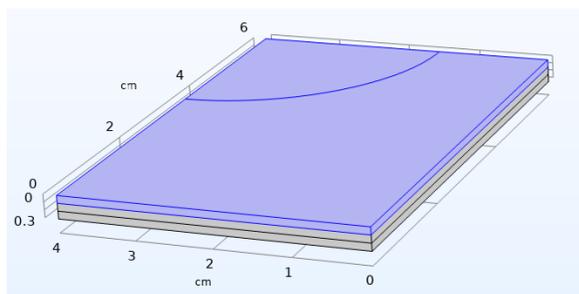


Gráfico 29-3: Electrodo Ánodo.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

4. Configuramos el potencial de equilibrio y la cinética del electrodo ánodo, utilizamos la ecuación de Nernst y la ecuación de Butler Volmer respectivamente.

Tabla 20-3: Valores para el potencial y la cinética del electrodo ánodo.

Potencial de equilibrio de referencia	Eeq_ref_H2
Expresión de especies reducidas	x_H2
Referencia de densidad de corriente de intercambio	i0_ref_H2
Coefficiente de transferencia anódica	alpha_a_H2

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento para el electrodo cátodo.

1. En la ventana de constructor de modelos, hacemos clic con el botón derecho en Distribución de corriente secundaria (cd) y seleccione Electrodo.
2. En la ventana Configuración de Superficie del electrodo, escribimos Electrodo – Cátodo.
3. Escogemos los límites del electrodo cátodo manualmente.

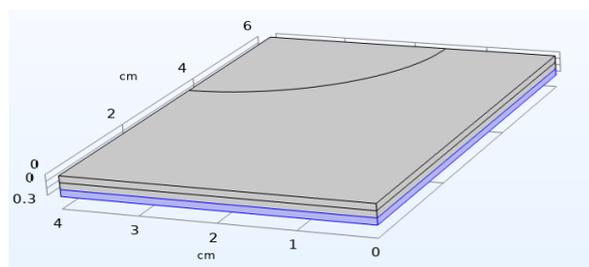


Gráfico 30-3: Electrodo Cátodo.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

4. Configuramos la reacción del electrodo para el potencial de equilibrio y la cinética del cátodo, utilizamos la ecuación de Nernst y la ecuación de Butler Volmer respectivamente.

Tabla 21-3: Valores para el potencial y la cinética del electrodo Cátodo.

Potencial de equilibrio de referencia	Eeq_ref_O2
Expresión de especies reducidas	x_H2O_in^2
Expresión de especies oxidadas.	x_O2_in
Referencia de densidad de corriente de intercambio	i0_ref_O2
Coefficiente de transferencia anódica	alpha_a_O2

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Procedimiento para el Colector de corriente.

1. En la barra de herramientas Física, escogemos Límites y elegimos el Potencial eléctrico.
2. Seleccionamos los límites del colector de corriente.

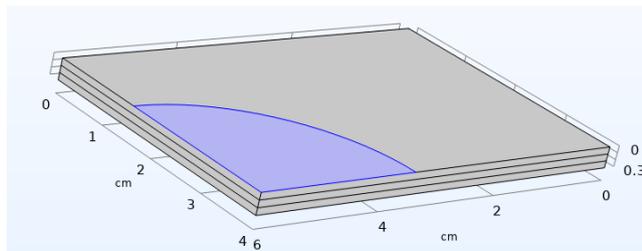


Gráfico 31-3: Colector de corriente

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

3.5.3. Materiales de los electrodos en COMSOL.

1. En la ventana Componente 1 (comp1), hacemos clic derecho y escogemos un material en blanco para cada electrodo.
2. En la ventana de configuración de material, buscamos la sección contenido del material e ingresamos los valore siguientes:

Tabla 22-3: Valores para electrodo de Fibra de cabuya en COMSOL.

Material	Valor	Referencia
Conductividad eléctrica del ánodo	0.297 S/m	Propia
Conductividad del electrolito	5 S/m	Básica del COMSOL
Conductividad eléctrica del cátodo	106 S/m	(Zhao et al., 2019 p.1)

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 23-3: Valores para electrodo de Fibra de cabuya-Grafito en COMSOL

Material	Valor	Referencia
Conductividad eléctrica del ánodo	1,5735 S/m	-----
Conductividad del electrolito	5 S/m	Básica del COMSOL
Conductividad eléctrica del cátodo	106 S/m	(Zhao et al., 2019 p.1)

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 24-3: Valores para electrodo de Fibra de carbono en COMSOL

Material	Valor	Referencia
Conductividad eléctrica del ánodo	106 S/m	(Zhao et al., 2019 p.1)
Conductividad del electrolito	5 S/m	Básica del COMSOL
Conductividad eléctrica del cátodo	106 S/m	(Zhao et al., 2019 p.1)

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Identificación de los grupos funcionales

4.1.1. Espectrofotometría Infra Roja del carbón activado de fibra cabuya.

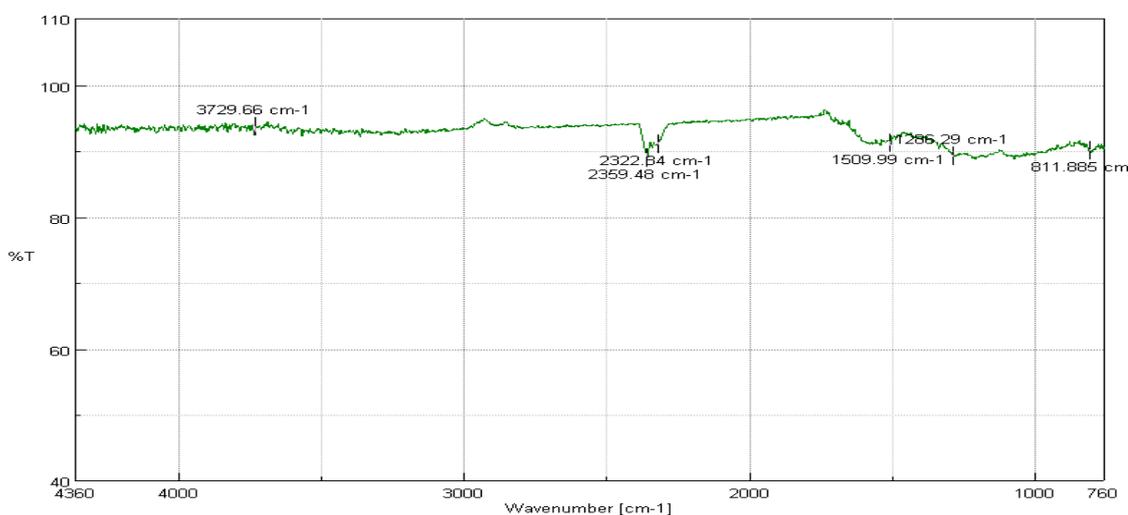


Gráfico 1-4: Espectrofotometría Infra Roja del carbón activado de fibra cabuya.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 1-4: Espectrofotometría IR muestra sólida (carbón activado).

Wavenumber [cm-1]	%T	Grupo y clase	Asignación y observaciones
3729.66	93.6796	-OH en alcoholes y fenoles	OH estiramiento; (solución diluída)
2359.48	88.9386	-NH3+ C en amina hidroháluros	NH modos de estiramiento
2322.84	90.9895	-PH en fosfinas	Estiramiento P - H; pico agudo
1509.99	91.1649	Anillo de benceno en compuestos aromáticos Compuestos de triazina	Anillo elástico, banda afilada Anillo de estiramiento; banda afilada
1286.29	89.2416	N = N - O en compuestos azoxi	N = N - O estiramiento simétrico
811.885	89.9992	CH = CH2 en vinil éteres	CH2 Fuera del plano de movimiento

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En la gráfica 32-4 se observa los picos de transmitancia en función del número de onda en cm^{-1} en el cual hay presencia de alcohol como grupo funcional más relevante (ver tabla 27-4).

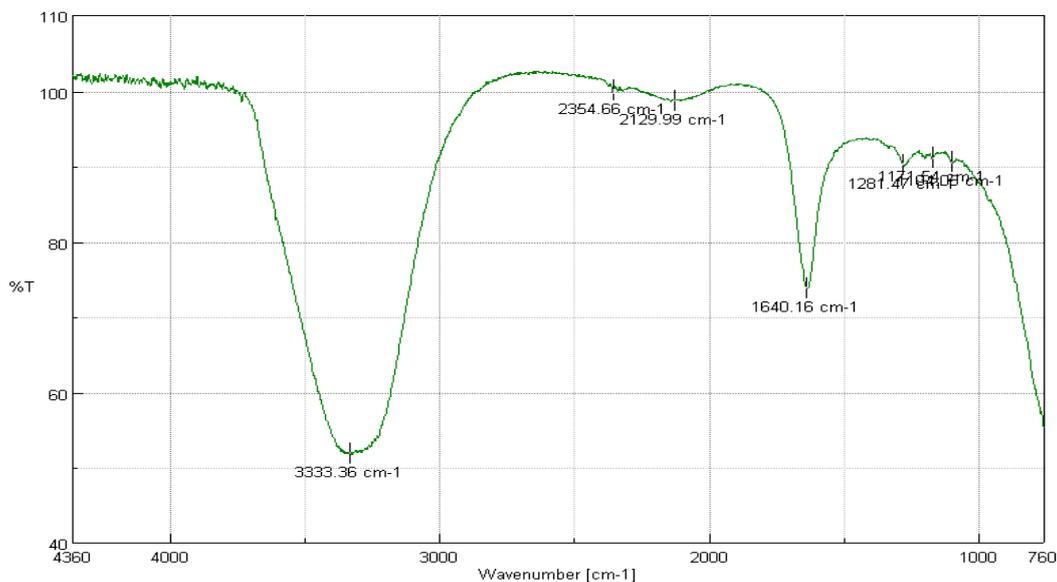


Gráfico 2-4: Espectrofotometría IR muestra líquida (carbón activado).

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 2-4: Espectrofotometría IR muestra líquida (carbón activado).

Wavenumber [cm-1]	%T	Grupo y clase	Asignación y observaciones
3333.36	51.9381	-NH ₂ en aminas aromáticas, aminas primarias y amidas	Tramo NH; (solución diluída)
2354.66	100.088	-PH en fosfinas	Estiramiento P - H; pico agudo
2129.99	98.7299	-N C en isonitriles	N =C estiramiento
1640.16	73.8514	C = C en alquenos	Estiramiento de C=C
1281.47	90.1036	N = N - O en compuestos azoxi	N = N - O estiramiento simétrico
1171.54	91.1184	SO ₂ Cl en cloruros de sulfonilo	Estiramiento simétrico de SO ₂
1104.05	90.5635	C - OH en alcoholes secundarios o terciarios	Estiramiento C - O

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En la gráfica 33-4 se observa los picos de transmitancia en función del número de onda en cm^{-1} en el cual hay presencia de aminas aromáticas, aminas primarias y amidas como grupo funcional más relevante (ver tabla 28-4).

4.1.2. Espectrofotometría Infra Roja del grafito.

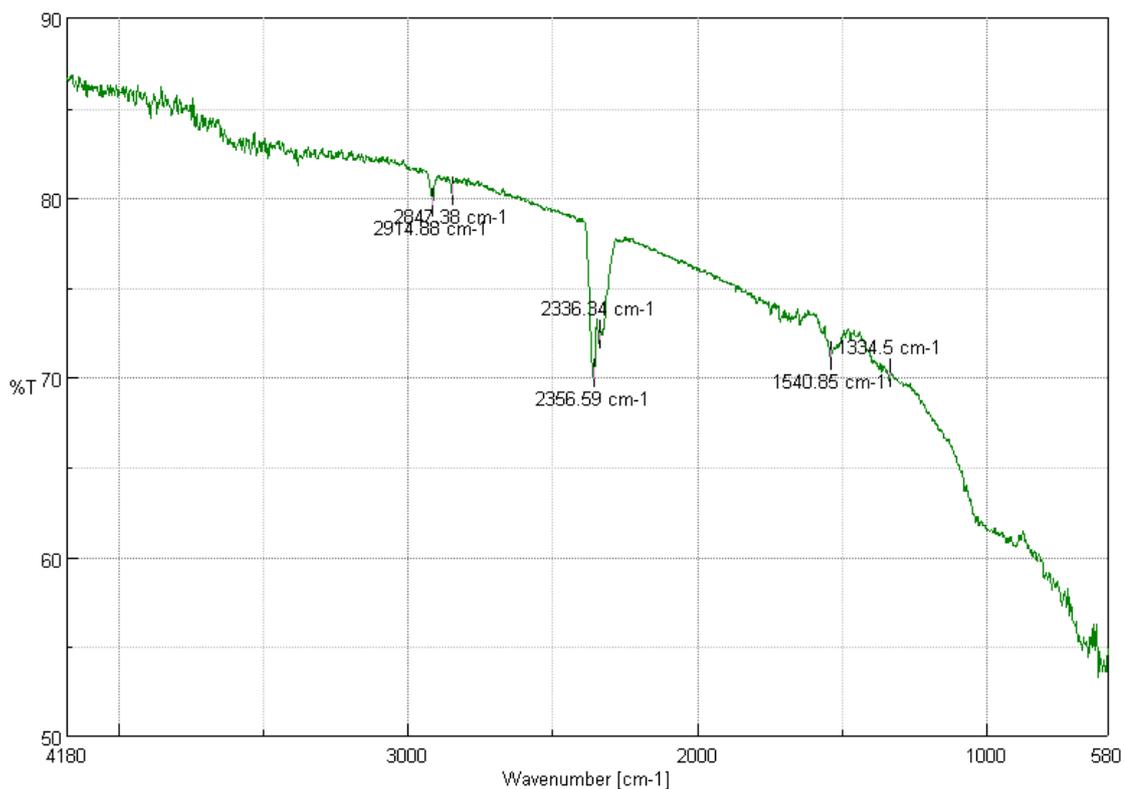


Gráfico 3-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito en muestra sólida

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 3-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito-muestra sólida.

Wavenumber [cm-1]	%T	Grupo y clase	Asignación y observaciones
2914.88	79.7269	-CH ₃ y -CH ₂ - en compuestos alifáticos	CH estiramiento antisimétrico y simétrico
2847.38	80.3254	-CH ₃ unido a O o N	CH modos de estiramiento
2356.59	70.1636	-PH en fosfinas	Estiramiento P - H; pico agudo
2336.34	72.3875	-PH en fosfinas	Estiramiento P - H; pico agudo
1540.85	71.1201	Compuestos de triazina	Anillo de estiramiento; banda afilada
1334.5	70.2006	SO ₂ en sulfonas	Estiramiento antisimétrico de SO ₂

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En la gráfica 34-4 se observa los picos de transmitancia en función del número de onda en cm^{-1} en el cual hay presencia de compuestos alifáticos como grupo funcional más relevante (ver tabla 29-4).

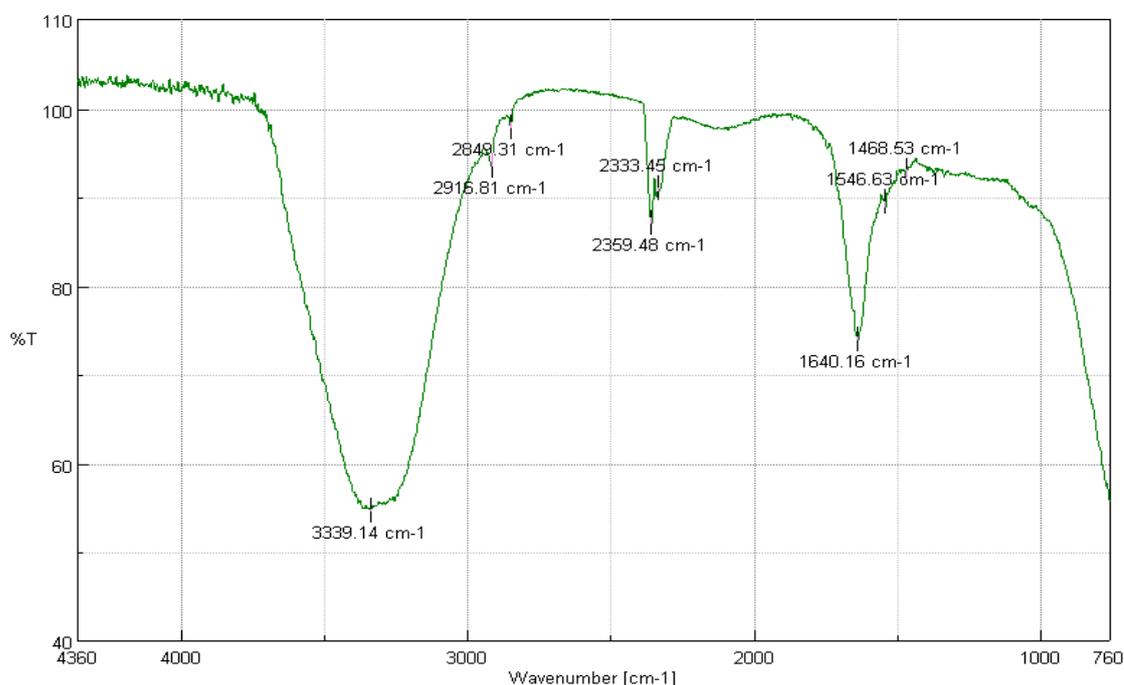


Gráfico 4-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito en muestra líquida

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

Tabla 4-4: Espectrofotometría Infra Roja del grafito-muestra líquida.

Numero de onda [cm ⁻¹]	%T	Grupo y clase	Asignación y observaciones
3339.14	54.6877	-OO - H en hidroperóxidos	Estiramiento OO-H unido a hidrógeno
2916.81	93.5765	-CH ₃ y -CH ₂ - en compuestos alifáticos	CH estiramiento antisimétrico y simétrico.
2849.31	97.8784	-CH ₃ unido a O o N	CH modos de estiramiento.
2359.48	87.0217	-NH ₃ ⁺ en hidrohaluros de amina	NH modos de estiramiento
2333.45	90.953	-PH en fosfinas	Estiramiento P-H; pico agudo
1640.16	73.9256	C = O en β-ceto Ésteres	C = O estiramiento; forma enol
1546.63	89.3933	NO ₂ en compuestos nitro aromáticos	Estiramiento antisimétrico NO ₂
1468.53	92.9719	CH ₂ en compuestos alifáticos	Vibración de flexión de CH ₂ (tijeras)

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En la gráfica 35-4 se observa los picos de transmitancia en función del número de onda en cm^{-1} en el cual hay presencia de hidroperóxidos como grupo funcional más relevante (ver tabla 30-4).

4.2. Resultados del software COMSOL.

4.2.1. Electrodo de Fibra de Cabuya

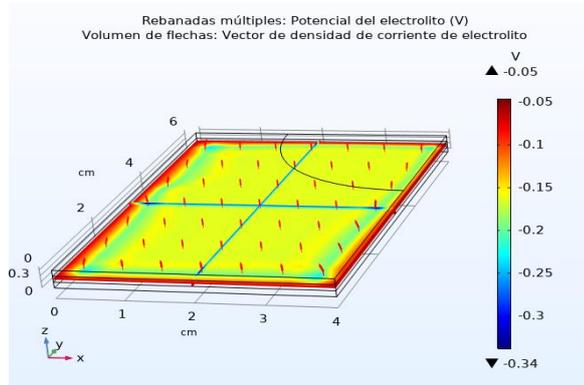


Gráfico 5-4: Potencial del Electrolito

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 36-4 se determina que el potencial del electrolito varía de $-0.34V$ a $-0.05 V$, debido al paso de protones desde el ánodo y hacia el cátodo,

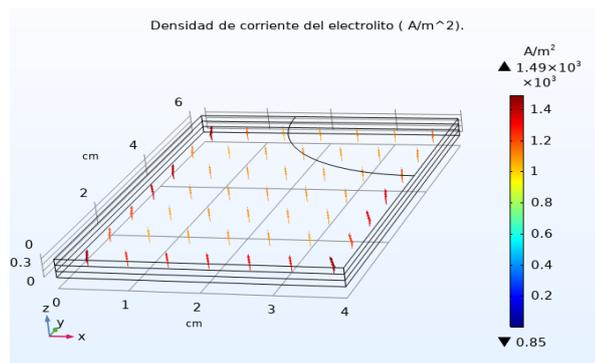


Gráfico 6-4: Densidad de corriente del electrolito

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 37-4 indica la dirección de la densidad de corriente en función del electrolito que varía de 0.05 a $1.49 \times 10^3 A/m^2$ y este se dirige hacia el electrodo cátodo.

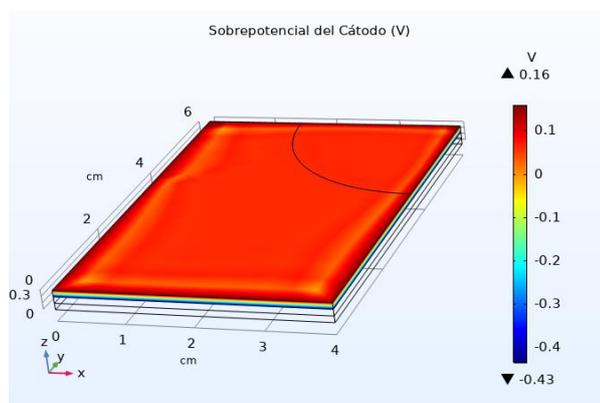


Gráfico 7-4: Sobrepotencial del cátodo.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 38-4 se determina el sobrepotencial del electrodo cátodo que varía de -0.43 a 0.16 V y se concentra en la parte superior del cátodo.

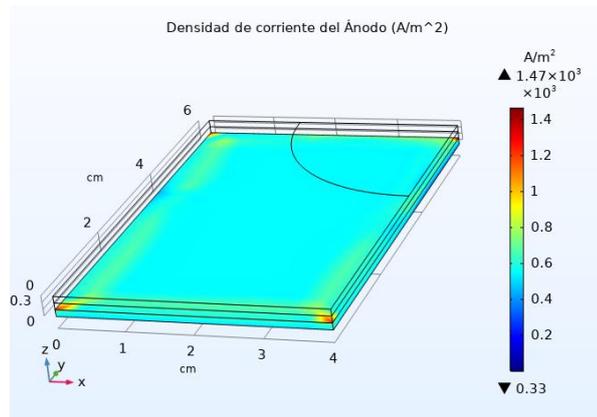


Gráfico 8-4: Densidad de corriente del Ánodo

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 39-4 se determina la corriente eléctrica que circula en la celda de combustible microbiana por unidad de área del electrodo ánodo el cual varía de 0.33 a $1.47 \times 10^3 A/m^2$.

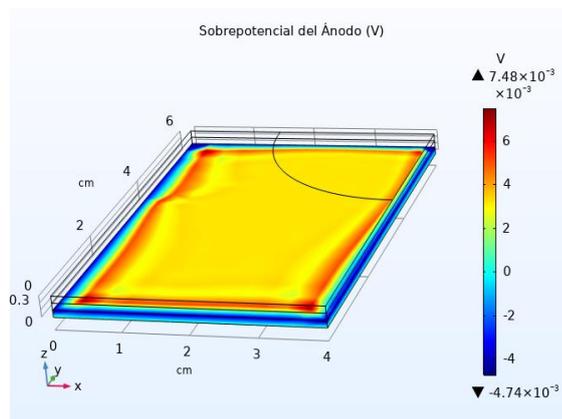


Gráfico 9-4: Sobrepotencial del Ánodo

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 40-4 se determina el sobrepotencial del electrodo ánodo el cual varía de -4.74×10^{-3} a 7.48×10^{-3} V la energía faltante se pierde en forma de calor, teniendo en su franja amarilla un sobrepotencial cuasi uniforme que va en un rango de 2 a 4V y en la parte más externa un sobrepotencial bajo -4V.

4.2.2. Electrodo Fibra de Cabuya-Grafito.

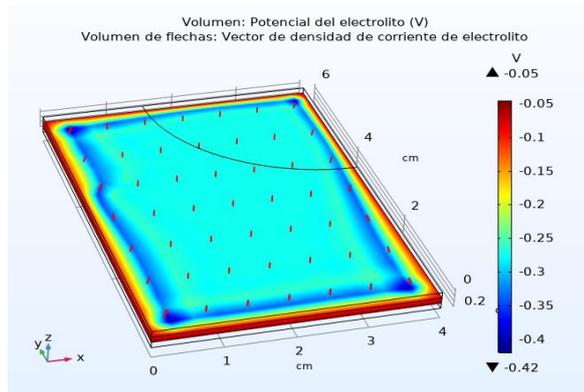


Gráfico 10-4: Potencial del electrolito.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 42-4 se determina que el potencial del electrolito varía de $-0.42V$ a -0.05 , debido al paso de protones desde el ánodo y hacia el cátodo.

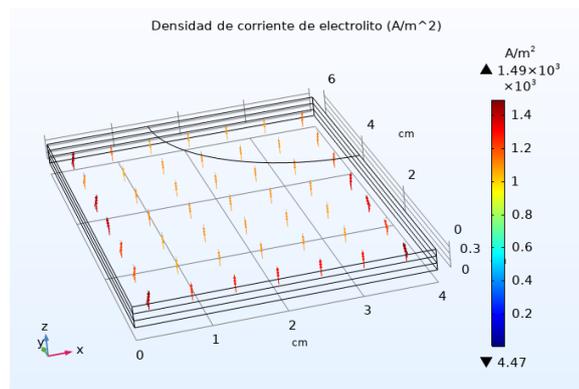


Gráfico 11-4: Densidad de corriente del electrolito

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el grafico 42-4 indica la dirección de la densidad de corriente en función del electrolito que varía de 74.47 a $1.49 \times 10^3 A/m^2$ y este se dirige hacia el electrodo cátodo.

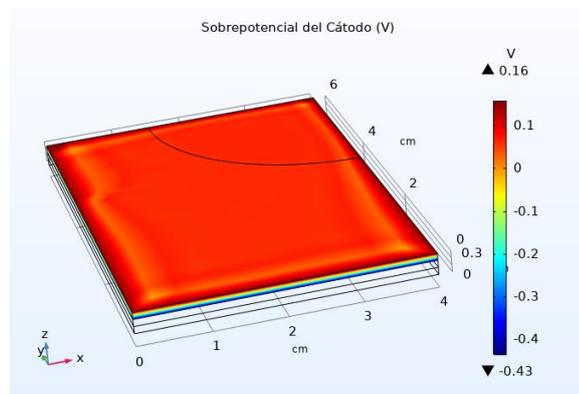


Gráfico 12-4: Sobrepotencial del Cátodo

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 45-4 se determina el sobrepotencial del electrodo cátodo que varía de -0.43 a 0.16 V y esta se concentra en la parte superior del cátodo.

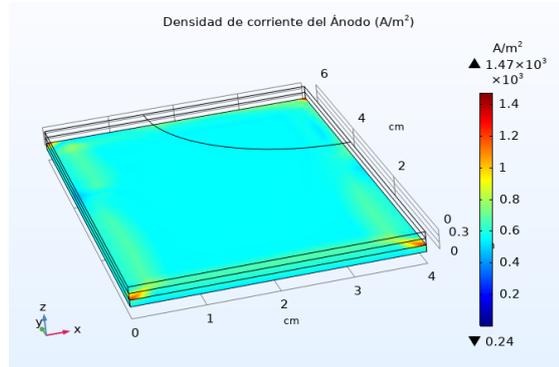


Gráfico 13-4: Densidad de corriente del Ánodo

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 46-4 se determina la corriente eléctrica que circula en la celda de combustible microbiana por unidad de área del electrodo ánodo el cual varía de 0.24 a $1.47 \times 10^3 \text{ A/m}^2$.

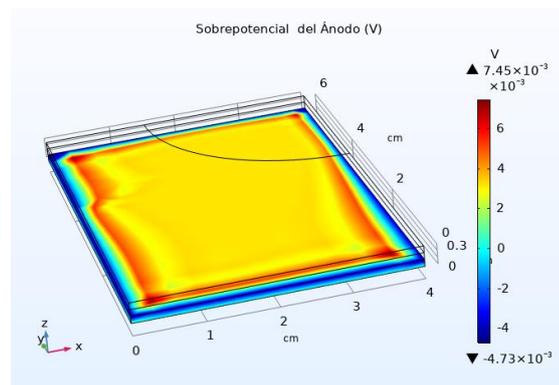


Gráfico 14-4: Sobrepotencial de Ánodo.

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 47-4 se determina el sobrepotencial del electrodo ánodo el cual varía de -4.73×10^{-3} a $7.45 \times 10^{-3} \text{ V}$ la energía faltante se pierde en forma de calor, teniendo en su parte interna un sobrepotencial casi uniforme de 2 a 4V y en la parte más externa un sobrepotencial bajo.

4.2.3. Electrodo de Fibra de carbono.

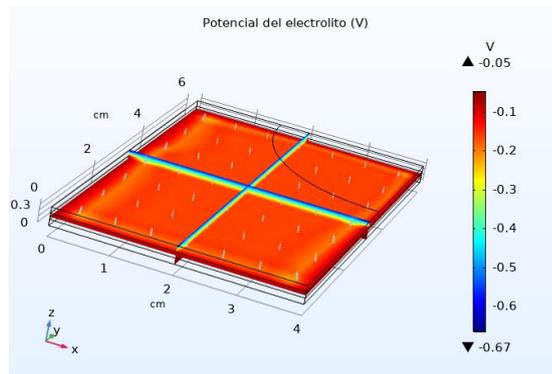


Gráfico 15-4: Potencial del electrolito.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 48-4 se determina que el potencial del electrolito varía de $-0.67V$ a -0.05 , debido al paso de protones desde el ánodo y hacia el cátodo.

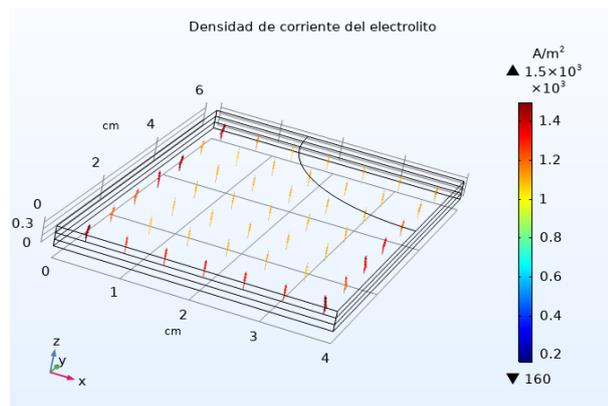


Gráfico 16-4: Densidad de corriente del electrolito.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 49-4 indica la dirección de la densidad de corriente en función del electrolito que varía de 160 a $1.5 \times 10^3 A/m^2$ y este se dirige hacia el electrodo cátodo.

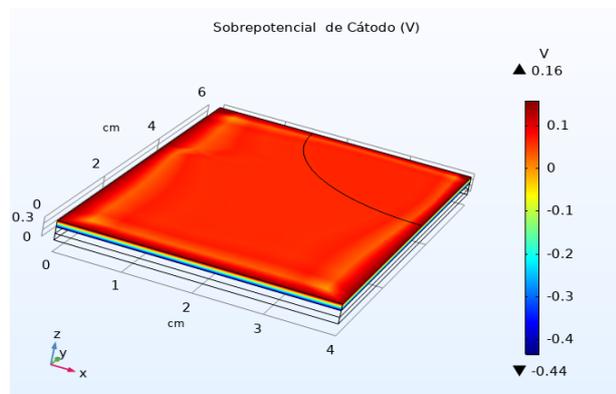


Gráfico 17-4: Sobrepotencial del Cátodo.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 50-4 se determina el sobrepotencial del electrodo cátodo que varía de -0.44 a 0.16 V y esta se concentra en la parte superior del cátodo.

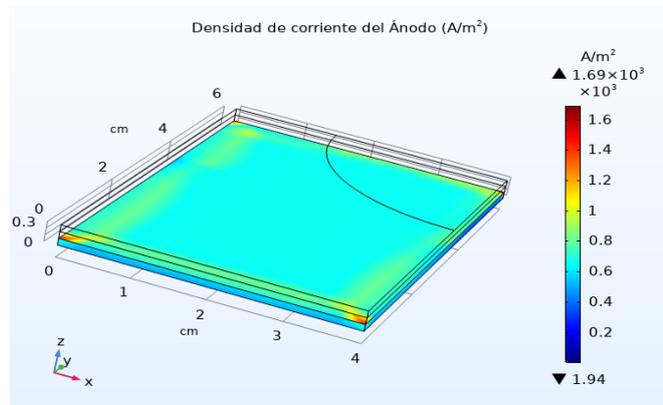


Gráfico 18-4: Densidad de corriente del Ánodo.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 51-4 se determina la corriente eléctrica que circula en la celda de combustible microbiana por unidad de área del electrodo ánodo el cual varía de 1.94 a $1.69 \times 10^3 A/m^2$.

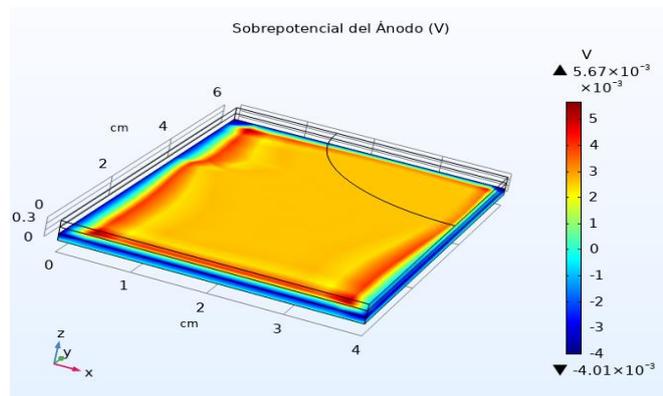


Gráfico 19-4: Sobrepotencial del Ánodo.

Realizado por: Ibay Telenchano, Alcivar, 2020.

En el gráfico 52-4 se determina el sobrepotencial del electrodo ánodo el cual varía de -4.01×10^{-3} a $5.67 \times 10^{-3} V$ la energía faltante se pierde en forma de calor, teniendo en su parte interna un sobrepotencial casi uniforme de 2 a 3V y en la parte más externa un sobrepotencial bajo.

Tabla 5-4: Comparación de resultados obtenidos en COMSOL Multiphysics.

Material	Densidad de corriente del Ánodo (A/m^2)	Sobre potencial del Ánodo $\times 10^{-3}$ (V)	Sobre potencial del Cátodo (V)	Densidad de corriente del Electrolito (A/m^2)	Potencial del electrolito (V)
Fibra de Cabuya	0.33 a 1.47 $\times 10^3$	-4.74 a 7.48	-0.43 a 0.16	0.85 a 1.49 $\times 10^3$	-0.34 a -0.05
Fibra de Cabuya-Grafito	0.24 a 1.47 $\times 10^3$	-4.73 a 7.45	-0.43 a 0.16	4.47 a 1.49 $\times 10^3$	-0.42 a -0.05
Fibra de carbono	1.49 a 1.69 $\times 10^3$	-4.01 a 5.67	-0.44 a 0.16	160 a 1.5 $\times 10^3$	-0.67 a -0.05

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

En la tabla 31-4 se puede ver un resumen de la comparación de los resultados obtenidos por el software COMSOL Multiphysics de los electrodos de Fibra de Cabuya, Fibra de Cabuya- Grafito y Fibra de carbono.

Para obtener la densidad de potencia de nuestra simulación con los diferentes electros se toma como referencias.

4.2.4. *Potencial del electrolito y densidad de potencia de la Fibra de Cabuya.*

El potencial del electrolito variará desde un valor de -0.34 V a -0.05V valores que corresponden a los potenciales del ánodo y del cátodo como se puede observar en el Grafico 36-3, entonces el potencial de la pila viene dado por la ecuación.

$$E_{emf} = E_{cat}^0 - E_{and}^0$$

$$E_{cell} = (-0.05 + 0.34)V$$

Nuestro potencial será:

$$E_{cell} = 0.29V$$

El resultado nos servirá para calcular la densidad de potencia que viene definido en función de la resistencia externa (50Ω)(Pasternak, Greenman y Ieropoulos, 2018, p.329) revisada en literatura y del área de nuestro ánodo ($A = 50 \text{ cm}^2$), entonces la densidad de potencia de la pila viene dada por la ecuación.

$$P_{an} = \frac{E_{cell}^2}{A_{an}R_{ext}}$$

$$P_{an} = \frac{(0.29V)^2}{50\text{cm}^2 \times 50\Omega}$$

Nuestra potencia será:

$$P_{an} = 336.4 \frac{mW}{m^2}$$

4.2.5. *Potencial del electrolito y densidad de potencia de la Fibra de Cabuya-Grafito.*

El potencial del electrolito variará desde un valor de -0.42 V a -0.05V valores que corresponden a los potenciales del ánodo y del cátodo como se puede observar en el Grafico 36-3, entonces el potencial de la pila viene dado por la ecuación.

$$E_{emf} = E_{cat}^0 - E_{and}^0$$

$$E_{cell} = (-0.05 + 0.42)V$$

Nuestro potencial será:

$$E_{cell} = 0.37V$$

El resultado del potencial nos servirá para calcular la densidad de potencia que viene definido en función de la resistencia externa (50Ω)(Pasternak, Greenman y Ieropoulos, 2018, p.329) revisada en literatura y del área de nuestro ánodo ($A = 50 \text{ cm}^2$), entonces la densidad de potencia de la pila viene dada por la ecuación.

$$P_{an} = \frac{E_{cell}^2}{A_{an}R_{ext}}$$

$$P_{an} = \frac{(0.37V)^2}{50\text{cm}^2 \times 50\Omega}$$

Nuestra potencia será:

$$P_{an} = 547.6 \frac{mW}{m^2}$$

4.2.6. *Potencial del electrolito Fibra de Carbono.*

El potencial del electrolito variará desde un valor de -0.67 V a -0.05V valores que corresponden a los potenciales del ánodo y del cátodo como podemos observar en el Grafico 36-3, entonces el potencial de la pila viene dado por la ecuación.

$$E_{emf} = E_{cat}^0 - E_{and}^0$$

$$E_{cell} = (-0.05 + 0.67)V$$

Nuestro potencial será:

$$E_{cell} = 0.62V$$

El resultado del potencial nos servirá para calcular la densidad de potencia que viene definido en función de la resistencia externa (50Ω)(Pasternak, Greenman y Ieropoulos, 2018, p.329) revisada en literatura y del área de nuestro ánodo ($A = 50 \text{ cm}^2$), entonces la densidad de potencia de la pila viene dada por la ecuación.

$$P_{an} = \frac{E_{cell}^2}{A_{an}R_{ext}}$$

$$P_{an} = \frac{(0.62V)^2}{50cm^2 \times 50\Omega}$$

Nuestro potencial será:

$$P_{an} = 1537.6 \frac{mW}{m^2}$$

Los resultados de la densidad de potencia son $336.4 \frac{mW}{m^2}$, $547.6 \frac{mW}{m^2}$ y $1537.6 \frac{mW}{m^2}$ que corresponden a la fibra de cabuya, fibra de cabuya-grafito y fibra de carbono respectivamente.

4.3. Validación de resultados

Tabla 6-4: Validación de resultado.

Características de la MFC	Bacteria	Sustrato	Electrodo	P_a (mW/m^2)	Referencia
CCM de dos cámaras	Bacterias pre aclimatadas de un MFC activo	-----	Filtro de carbón	356	(Aelterman et al., 2008)
Uní cámara con membrana	Shewanella Oneidensis	Acetato	Papel de carbón	506	
Uní cámara con cátodo expuesto al aire	Geobacter	Acetado	Cepillo grafito tratado con gas amonio	1370	(Logan et al., 2007)
Uní cámara con cátodo expuesto al aire	Geobacter	Acetado	Tela de carbón tratado con gas amonio	788	(Logan et al., 2007)
Uní cámara con cátodo expuesto al aire	Preacclimated bacteria	Acetato	Brocha de carbón	2400	(Logan et al., 2007)
Uní cámara con cátodo expuesto al aire	Cultivo mixto	Glucosa	Tela de carbón	766	(Cheng, Liu y Logan, 2006)
Uní cámara Nafion 115	Lodo de digestor anaeróbico	Glucosa y Acetado	Filtro de carbón.	3650	(Borole et al., 2009).

Fuente: Garrido, 2016 p.82

Realizado por: Ilbay Telenchano, Alcivar, 2020.

El valor de $1537.6 \frac{mW}{m^2}$ del presente estudio en comparación con estudios similares se encuentra dentro del rango de las celdas de combustible microbiana por tal motivo se considera valido, al mismo tiempo los valores de $336.4 \frac{mW}{m^2}$, $547.6 \frac{mW}{m^2}$ que corresponden a la fibra de cabuya, fibra de cabuya-grafito, respectivamente están dentro del mismo rango.

CONCLUSIONES

Mediante pruebas preliminares se concluye que el electrodo de Fibra de Cabuya-Grafito tubo mayor resistividad a diferencia del electrodo de Fibra de Cabuya.

Se puede observar el comportamiento electroquímico mediante las ecuaciones de Nernst y Butler-Volmer, en el sobrepotencial del cátodo (en magnitud), ya que es la fuerza impulsora de las reacciones electroquímicas, esta es la región donde podemos esperar velocidades de reacción más altas, llegando a la conclusión de que la fibra de carbono produce mayor sobrepotencial a diferencia de la fibra de Cabuya- Grafito.

En comparación con las densidades de potencia se pudo estimar valores en el cual la fibra de carbono produce mayor densidad de potencia seguido del electrodo de fibra de cabuya-grafito y el electrodo de Fibra de Cabuya, llegando a la conclusión que se puede obtener resultados favorables con bajo costo y de manera renovable.

RECOMENDACIONES

Se recomienda futuras mejoras en cuanto al diseño del modelo, parámetro o cambios de sustratos, dimensiones, de manera que pueda incrementar la densidad de potencia de la celda.

Se recomienda poner en funcionamiento la celda mediante la utilización de los electrodos para corroborar el estudio.

Se recomienda realizar un modelo de difusión y convección mediante ecuaciones de Maxwell-Stefan para determinar el transporte de masa.

GLOSARIO

ARS: Agua residual sintética.

CA: Carbón Activado.

CCM o MFC: celdas de combustible microbiana.

CE: eficiencia columbina.

DQO: Oxígeno químico.

Filtro: textil no tejido en forma de lámina.

Geobacter: genero de proteobacterias anaeróbicas útiles en biorremediación.

Inóculo: Los microorganismos que se utilizan en la inoculación.

Inoculación: Ubicar algo que crecerá y se reproducirá, y comúnmente se utiliza esta con respecto a la introducción de suero sanguíneo, una vacuna o sustancia dentro del cuerpo de un humano o de un animal, especialmente para producir inmunidad a una enfermedad específica.

Metanogénesis: Formación de metano por parte de los seres vivos. Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendida, en la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa.

PD: densidad de potencia.

PEM: Membrana de intercambio protónico.

Proteus vulgaris: bacteria Gram-negativa, facultativamente anaeróbico en forma de bacilo que habita en el tracto intestinal de varios animales.

Xenobióticos: Compuestos sintéticos creados por el ser humano como pesticidas, fármacos etc.

BIBLIOGRAFÍA

AELTERMAN, P. et al., 2008. Loading rate and external resistance control the electricity generation of microbial fuel cells with different three-dimensional anodes. *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 18, pp. 8895–8902. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2008.04.061.

ALVAREZ LEMUS, N.R., 2015. *Análisis Electroquímico del Proceso de Corrosión del Compósito TiC/Alx-Cuy*. S.l.: s.n.

AYYARU, S. & DHARMALINGAM, S., 2011. Development of MFC using sulphonated polyether ether ketone (SPEEK) membrane for electricity generation from waste water. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 102, no. 24, pp. 11167–11171. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2011.09.021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.021>.

BARD, A.J. & FAULKNER, L.R., 2001. *Electrochemical methods Fundamentals and Applications*. Segunda Ed. U.S.A: s.n.

BIRD BYRON R., STEWART WARREN E., L.E.N., 1987. *Fenómenos de Transporte*. S.l.: s.n.

BONILLA, J., 2015. *Valoración de sustratos vegetales, nitratos y plomo para maximizar la producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano*. S.l.: s.n. ISBN 0603553249.

BOROLE, A.P. et al., 2009. Investigating microbial fuel cell bioanode performance under different cathode conditions. *Biotechnology Progress*, vol. 25, no. 6, pp. 1630–1636. ISSN 87567938. DOI 10.1002/btpr.273.

CHAUDHURI, S.K. & LOVLEY, D.R., 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, vol. 21, no. 10, pp. 1229–1232. ISSN 10870156. DOI 10.1038/nbt867.

CHEN, S. et al., 2012. Reticulated carbon foam derived from a sponge-like natural product as a high-performance anode in microbial fuel cells. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 22, no. 35, pp. 18609–18613. ISSN 09599428. DOI 10.1039/c2jm33733a.

CHENG, S., LIU, H. & LOGAN, B.E., 2006. Increased performance of single-chamber microbial

fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications*, vol. 8, no. 3, pp. 489–494. ISSN 13882481. DOI 10.1016/j.elecom.2006.01.010.

CHENG, S. & LOGAN, B.E., 2007. Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 492–496. ISSN 13882481. DOI 10.1016/j.elecom.2006.10.023.

DE LA TORRE, L., CUMMINS, I. & LOGAN-HINES, E., 2018. Agave americana and Furcraea andina: Key Species to Andean Cultures in Ecuador. *Botanical Sciences*, vol. 96, no. 2, pp. 246–266. ISSN 20074476. DOI 10.17129/botsci.1813.

DEWAN, A., BEYENAL, H. and LEWANDOWSKI, Z., 2008. Scaling up microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, vol. 42, no. 20, pp. 7643–7648. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es800775d.

DU, Z., LI, H. & GU, T., 2007. *A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy* [en línea]. 1 September 2007. S.l.: Elsevier. [Consulta: 22 February 2019]. ISBN 0734-9750. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975007000547?via%3Dihub>.

DUMAS, C. et al., 2007. Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 2, pp. 468–473. ISSN 00134686. DOI 10.1016/j.electacta.2007.06.069.

DUMAS, C., & BASSEGUY, R., 2008. Electrochemical activity of *Geobacter sulfurreducens* biofilms on stainless steel anodes. *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 16, pp. 5235–5241. ISSN 00134686. DOI 10.1016/j.electacta.2008.02.056.

EG&GSERVICES PARSONS, I., 1989. *Fuel cell handbook*. S.l.: s.n.

EG&GSERVICES PARSONS, I., 2000. *Fuel Cell Handbook* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 9 May 2017]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/24860/1/22081-75793-1-PB.PDF>.

EGUIARTE, L.E., & SOUZA, V., 2017. Evolución de la familia Agavaceae: Filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones. *Botanical Sciences*, vol. 150, no. 66, pp. 131. ISSN 2007-4298. DOI 10.17129/botsci.1618.

FANGZHOU, D. et al., 2011. Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system. *Acta Astronautica* [en línea], vol. 68, no. 9–10, pp. 1537–1547. ISSN 00945765. DOI 10.1016/j.actaastro.2009.12.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.12.013>.

FENG, Y. et al., 2010. Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 7, pp. 1841–1844. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2009.10.030.

FUENTES, C., & ALZATE, L., 2008. Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Jul*, vol. 33, no. 7.

GARCÍA MENDOZA, A.J., 2002. Los agaves de México. , pp. 14–23.

GARRIDO, L.M., 2016. Simulación de la operación de una Microbial Fuel Cell para aplicación en sistemas aislados de la red. , pp. 108.

GEANKOPLIS, CHRISTIE, J., 1998. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. S.l.: s.n.

GOUD, R.K., & MOHAN, S.V., 2011. Canteen based composite food waste as potential anodic fuel for bioelectricity generation in single chambered microbial fuel cell (MFC): Bio-electrochemical evaluation under increasing substrate loading condition. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 36, no. 10, pp. 6210–6218. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2011.02.056. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.056>.

GUAMBO, A. & ALLAUCA, G., 2016. Estudio de la influencia de la demanda bioquímica de oxígeno de aguas residuales en la producción de bioelectricidad de una celda de combustible microbiano. ,

GUEVARA, W., 2017. *La electroquímica y su relación con las ciencias de la tierra*. S.l.: s.n.

HA, P.T. et al., 2012. Treatment of alcohol distillery wastewater using a bacteroidetes-dominant Thermophilic Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 5, pp. 3022–3030. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es203861v.

ISHII, S. et al., 2012. Functionally stable and phylogenetically diverse microbial enrichments

from microbial fuel cells during wastewater treatment. *PLoS ONE*, vol. 7, no. 2. ISSN 19326203. DOI 10.1371/journal.pone.0030495.

JAUQUE, E.S., 2019. *Diseño de un reactor prototipo de fermentación oscura para el tratamiento de lodos residuales de textilerías*. S.l.: s.n.

JONG, B.C. et al., 2011. Performance and microbial diversity of palm oil mill effluent microbial fuel cell. *Letters in Applied Microbiology*, vol. 53, no. 6, pp. 660–667. ISSN 02668254. DOI 10.1111/j.1472-765X.2011.03159.x.

JURADO L. et al., 2009. Estudio de la cadena agroindustrial de la cabuya n la producción de miel y licor de cabuya. [en línea], pp. 179. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1693/1/CD-2305.pdf>.

KANNIAIAH G. et al., 2011. Pre-fermentation of waste as a strategy to enhance the performance of single chambered microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 36, no. 21, pp. 13753–13762. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2011.07.128. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.128>.

KUMARI, U., et al., 2018. Electrodes for microbial fuel cells. *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* [en línea]. S.l.: Elsevier B.V., pp. 125–141. ISBN 9780444640178. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-64017-8.00008-7>.

LI, C. et al., 2011. Effect of conductive polymers coated anode on the performance of microbial fuel cells (MFCs) and its biodiversity analysis. *Biosensors and Bioelectronics* [en línea], vol. 26, no. 10, pp. 4169–4176. ISSN 09565663. DOI 10.1016/j.bios.2011.04.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2011.04.018>.

LITTMARCK SVANTE & SAEIDI FARHAD, 1986. About COMSOL - Multiphysics Simulation Software Provider. [en línea]. [Consulta: 10 August 2020]. Disponible en: <https://www.comsol.com>.

LIU, H., RAMNARAYANAN, R. & LOGAN, B.E., 2004. Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 2281–2285. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es034923g.

LIU, H. & LOGAN, B.E., 2005. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function

of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environmental Science and Technology*, vol. 39, no. 14, pp. 5488–5493. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es050316c.

LOGAN, B. et al., 2007. Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 3341–3346. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es062644y.

MARTA CAZORLA SOULT, 2015. Estudio de Celdas de Combustible Microbianas como sistema LCE aplicado a plantas de tratamiento de residuos. [en línea], pp. 135. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90270/fichero/MEMORIA.pdf>.

MENG, H. & WANG, C.-Y., 2004. Electron Transport in PEFCs. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 151, no. 3, pp. A358. ISSN 00134651. DOI 10.1149/1.1641036.

MICHAELIDOU, U. et al., 2011. Microbial communities and electrochemical performance of titanium-based anodic electrodes in a microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 77, no. 3, pp. 1069–1075. ISSN 00992240. DOI 10.1128/AEM.02912-09.

MOHANAKRISHNA, G. & VENKATA M., 2012. Carbon based nanotubes and nanopowder as impregnated electrode structures for enhanced power generation: Evaluation with real field wastewater. *Applied Energy* [en línea], vol. 95, pp. 31–37. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2012.01.058. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.058>.

PANT, D. et al., 2010. *A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production* [en línea]. 1 March 2010. S.l.: Elsevier. [Consulta: 20 February 2019]. ISBN 0960-8524. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409013595?via%3Dihub>.

PASTERNAK, G. & IEROPOULOS, I., 2018. Dynamic evolution of anodic biofilm when maturing under different external resistive loads in microbial fuel cells. Electrochemical perspective. *Journal of Power Sources* [en línea], vol. 400, no. March, pp. 392–401. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2018.08.031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.031>.

PETRUCCI, R.H. et al., 2011. *Química General. Décima edición*. S.l.: s.n. ISBN 9788429170436.

PICOT, M. et al., 2011. Graphite anode surface modification with controlled reduction of specific aryl diazonium salts for improved microbial fuel cells power output. *Biosensors and Bioelectronics* [en línea], vol. 28, no. 1, pp. 181–188. ISSN 09565663. DOI 10.1016/j.bios.2011.07.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2011.07.017>.

PRÍAS-BARRAGÁN, J., & ARIZA-CALDERÓN, H., 2015. Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de *Guadua angustifolia* Kunth para aplicaciones en electrónica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 39, no. 153, pp. 444. ISSN 0370-3908. DOI 10.18257/raccefyn.139.

RAHIMNEJAD, M. et al., 2011. Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Applied Energy* [en línea], vol. 88, no. 11, pp. 3999–4004. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.04.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.017>.

RENGASAMY, K. & BERCHMANS, S., 2012. Simultaneous degradation of bad wine and electricity generation with the aid of the coexisting biocatalysts *Acetobacter acetii* and *Gluconobacter roseus*. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 104, pp. 388–393. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2011.10.092. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.092>.

REVELO, D.M. & HURTADO, N.H., 2013. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica Microbial Fuel Cells (MFCs): A Challenge for the Removal of Organic Matter and Electricity Generation. *Información Tecnológica*, vol. 24, no. 6, pp. 17–28. ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642013000600004.

RICHTER, H. et al., 2008. Electricity generation by *Geobacter sulfurreducens* attached to gold electrodes. *Langmuir*, vol. 24, no. 8, pp. 4376–4379. ISSN 07437463. DOI 10.1021/la703469y.

SAMSUDEEN, N. et al., 2016. Performance of microbial fuel cell using chemically synthesized activated carbon coated anode. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* [en línea], vol. 8, no. 4, pp. 4–14. ISSN 19417012. DOI 10.1063/1.4955110. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4955110>.

SANDRA, M. & RIVAS, V., 2009. “ Estudio de materiales metálicos y diseños de placas de flujo

para celdas de combustible de membrana protónica” Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. ,

SIEGEL, C., 2008. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells. *Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 1331–1352. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2008.04.015.

SOUSA, R. et al., 2008. Modeling and simulation of the anode in direct ethanol fuels cells. *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 283–293. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2008.01.058.

STAMATELATOU, K. et al., 2011. Production of gaseous biofuels and electricity from cheese whey. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 2, pp. 639–644. ISSN 08885885. DOI 10.1021/ie1002262.

SUN, J. & HOU, B., 2011. Electrochemical characterization of the bioanode during simultaneous azo dye decolorization and bioelectricity generation in an air-cathode single chambered microbial fuel cell. *Electrochimica Acta* [en línea], vol. 56, no. 19, pp. 6874–6879. ISSN 00134686. DOI 10.1016/j.electacta.2011.05.111. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2011.05.111>.

TER HEIJNE, A. et al., 2008. Performance of non-porous graphite and titanium-based anodes in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 18, pp. 5697–5703. ISSN 00134686. DOI 10.1016/j.electacta.2008.03.032.

VALDIVIESO, L.N., 2017. ‘*Evaluación de mecanismos de reactivación en celdas de combustible microbianas por la producción de bioelectricidad*’. S.l.: s.n.

VANTE, N.A., 2003. Polímeros Conductores. *Electroquímica y electrocatálisis. Materiales: aspectos fundamentales y aplicaciones Vol. 1a*. S.l.: s.n., pp. 238–316. ISBN 1-4135-0102-8.

VÁZQUEZ-LARIOS, A.L. et al., 2011. Effects of architectural changes and inoculum type on internal resistance of a microbial fuel cell designed for the treatment of leachates from the dark hydrogenogenic fermentation of organic solid wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6199–6209. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2011.01.006.

VELASQUEZ-ORTA, S.B. et al., 2011. Factors affecting current production in microbial fuel

cells using different industrial wastewaters. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 102, no. 8, pp. 5105–5112. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2011.01.059. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.059>.

VELVIZHI, G. & VENKATA M., 2011. Biocatalyst behavior under self-induced electrogenic microenvironment in comparison with anaerobic treatment: Evaluation with pharmaceutical wastewater for multi-pollutant removal. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 102, no. 23, pp. 10784–10793. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2011.08.061. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.061>.

WANG, X. et al., 2009. Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 17, pp. 6870–6874. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es900997w.

WEI, J. & HUANG, X., 2011. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource technology* [en línea], vol. 102, no. 20, pp. 9335–44. ISSN 1873-2976. DOI 10.1016/j.biortech.2011.07.019. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21855328>.

WEN, Q. et al., 2011. Electricity generation from synthetic penicillin wastewater in an air-cathode single chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 168, no. 2, pp. 572–576. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2011.01.025. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.025>.

YOUSFI-STEINER, N. et al., 2008. A review on PEM voltage degradation associated with water management: Impacts, influent factors and characterization. *Journal of Power Sources*, vol. 183, no. 1, pp. 260–274. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2008.04.037.

YUAN, Y. et al., 2012. Improved electricity production from sewage sludge under alkaline conditions in an insert-type air-cathode microbial fuel cell. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 87, no. 1, pp. 80–86. ISSN 02682575. DOI 10.1002/jctb.2686.

ZHAO, F. et al., 2008. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, vol. 42, no. 13, pp. 4971–4976. ISSN 0013936X. DOI 10.1021/es8003766.

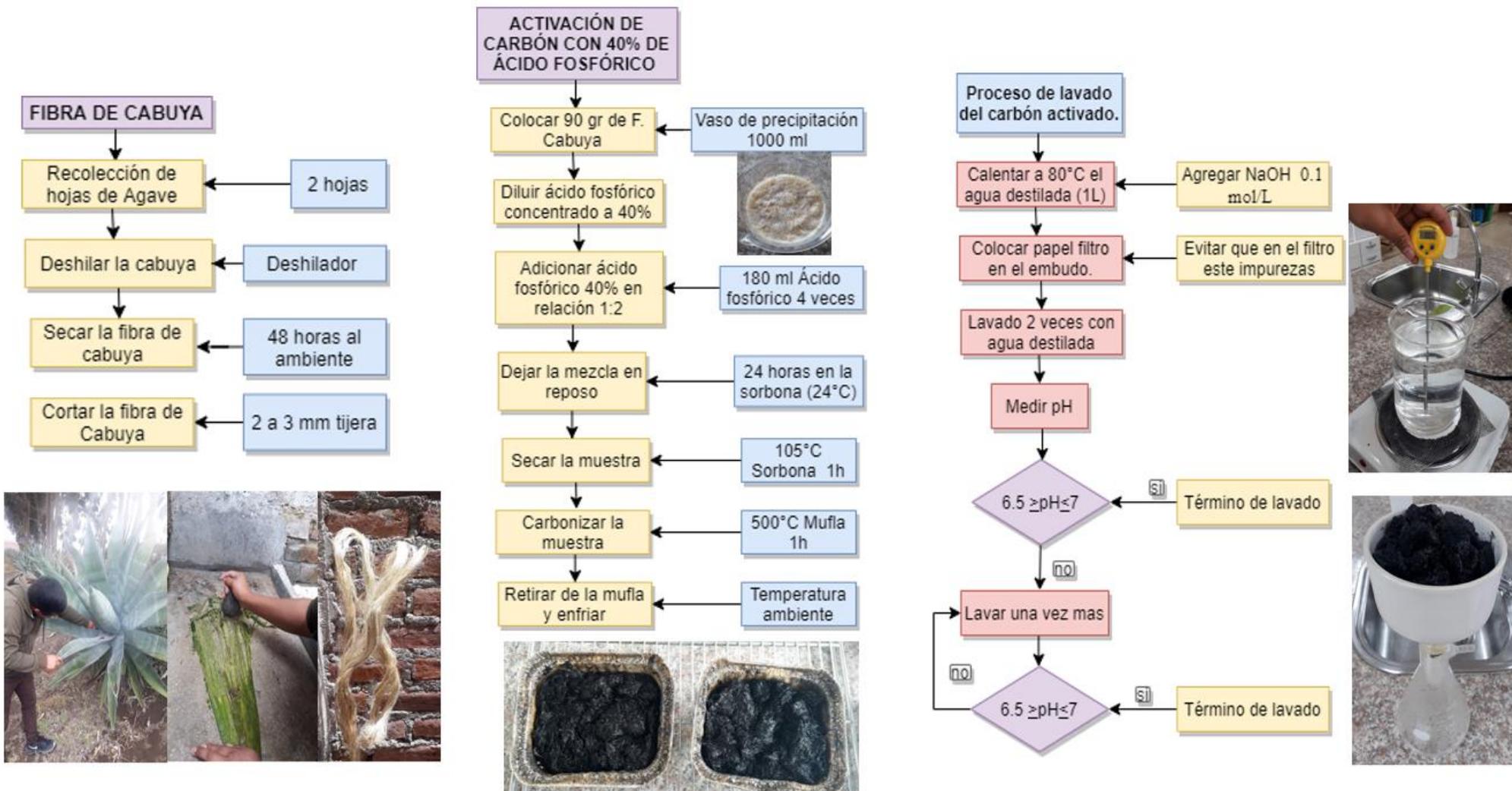
ZHAO, Q. et al., 2019. *Review on the electrical resistance/conductivity of carbon fiber reinforced polymer*. 2019. S.l.: s.n.

ZHOU, M. et al., 2014. *Bioelectrochemistry of Microbial Fuel Cells and their Potential Applications in Bioenergy* [en línea]. S.l.: Elsevier. ISBN 9780444595614. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59561-4.00009-7>.

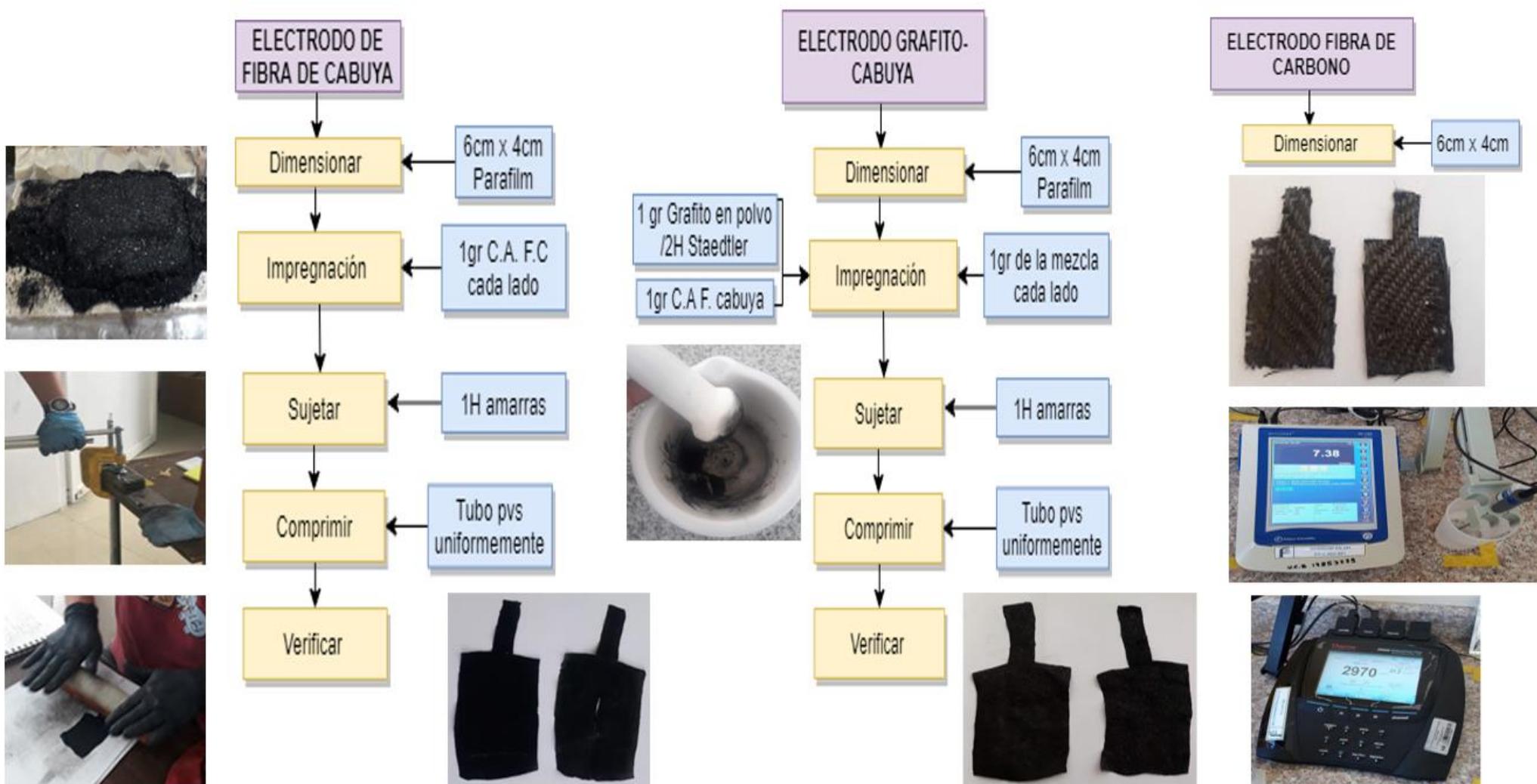
ZIMMERMAN, W., 2006. Introduction To Comsol Multiphysics. , pp. 1–26. DOI 10.1142/9789812773302_0001.

ANEXOS

Anexo A: Obtención del carbón activado de a partir de la fibra de cabuya.



Anexo B: Construcción de los Electroodos.



Anexo C: Simulación en el software COMSOL Multiphysics.

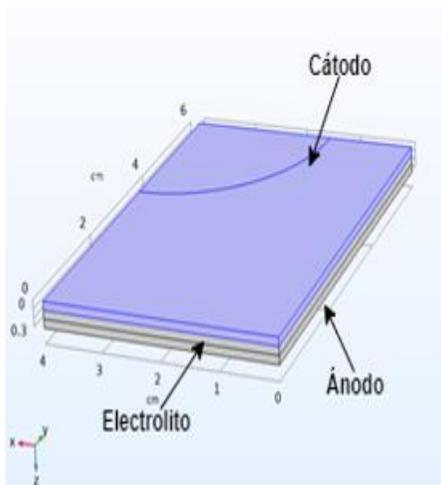


Figura 5: Geometría de los electrodo

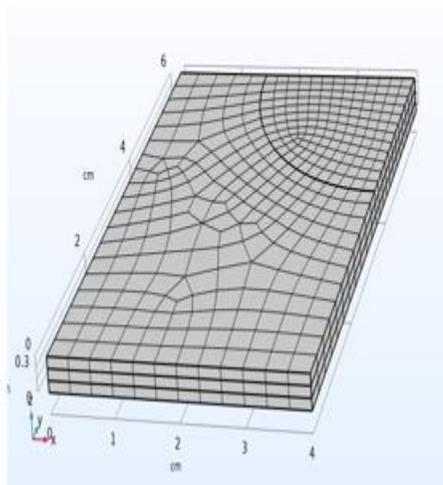


Figura6: Mallado de nuestro estudio

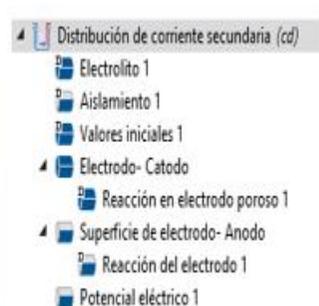


Figura 7: Distribución de corriente secundaria

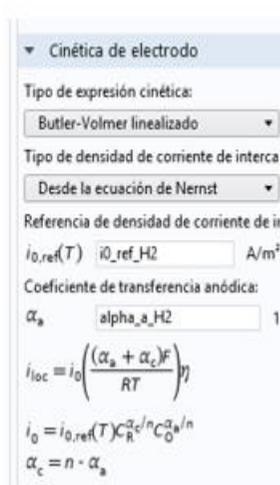


Figura 8: Cinética de electrodo ánodo

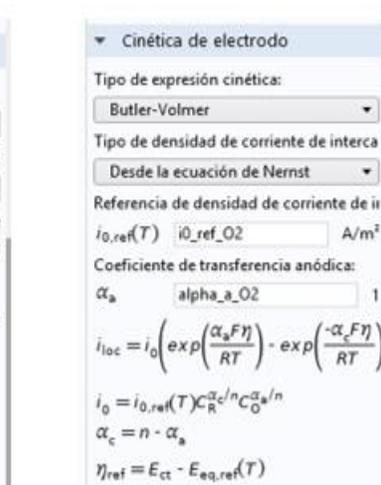


Figura 9: Cinética de electrodo cátodo.

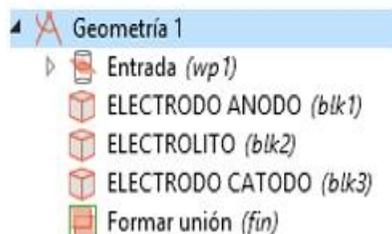


Tabla 3: Conductividad de los materiales

Material	Valor S/m	Referencia
Conductividad eléctrica del ánodo	a) 0.297 b) 1.573 (2.850S/m) c) 106	a) Propia b) LOGAN, B., CHENG, S., WATSON, V. y ESTADT, G., 2007 c) (Zhao et al., 2019 p.1)
Conductividad del electrolito	5	Básica de COMSOL
Conductividad eléctrica del cátodo	106	(Zhao et al., 2019 p.1)

Realizado por: Ilbay A., 2020.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
T	80[degC]	353.15 K	Temperature
p_atm	1[atm]	1.0133E5 Pa	Ambient pressure
perm	1e-13[m^2]	1E-13 m ²	Permeability
mu	3e-5[Pa*s]	3E-5 Pa*s	Viscosity
Eeq_ref_H2	-(0-(T-25[degC])*131J)/(K*m...	0.037337 V	Reference equilibrium po...
Eeq_ref_O2	-(-2*229[kJ/mol]-(T-25[degC]...	1.2114 V	Reference equilibrium po...
Eeq_ref	Eeq_ref_O2-Eeq_ref_H2	1.174 V	Cell reference equilibriu...
p_vapor	0.61121*exp((18.678-(T-0)[deg...	47410 Pa	Water vapor pressure
RH	90[%]	0.9	Relative humidity
x_H2O_in	RH*p_vapor/p_ref	0.42111	Inlet water molar fraction
x_O2_in	0.21*(1-x_H2O_in)	0.12157	Inlet oxygen molar fraction
x_H2	RH*p_vapor/p_ref	0.42111	Hydrogen molar fraction...
i0_ref_H2	1e4[A/m^2]	10000 A/m ²	Reference exchange curr...
i0_ref_O2	1e-3[A/m^2]	0.001 A/m ²	Reference exchange curr...
alpha_a_H2	0.5	0.5	Transfer coefficient
alpha_a_O2	3.5	3.5	Transfer coefficient
p_ref	p_atm	1.0133E5 Pa	Reference pressure
eps_l	0.3	0.3	Electrolyte volume fracti...
eps_s	0.3	0.3	Electrode volume fractio...
eps_gas	0.4	0.4	Gas phase volume fractio...

Fuente: (Littmarck Svante y Saeidi Farhad, 1986)

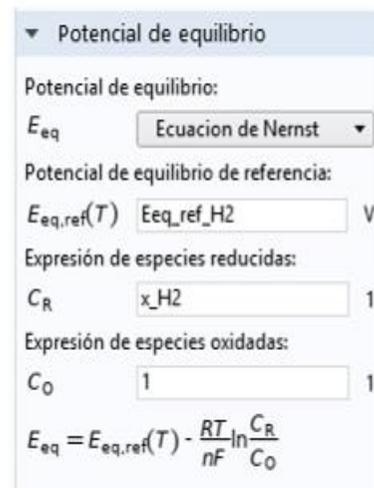


Figura 10: Potencial de equilibrio-ánodo.

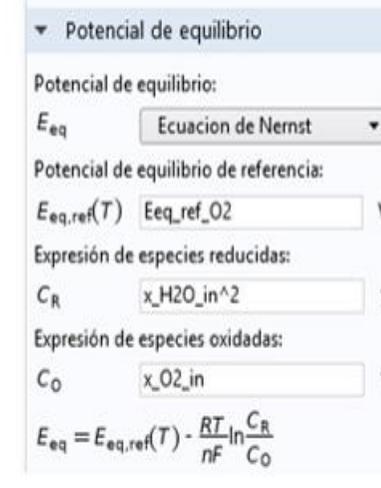
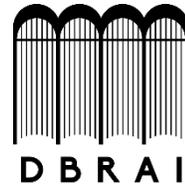


Figura11: Potencial de equilibrio-cátodo.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL
APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 04 / 02 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Alcivar Bladimir Ilbay Telenchano
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Biofísica
Título a optar: Biofísico
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**



0588-DBRAI-UPT-2021