

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**TESIS**

**GENERACIÓN ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL CON  
BIOTECNOLOGÍA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS**

**PRESENTADO POR:**

Br. GLENDY ARIANA PALOMINO  
VARGAS

**PARA OPTAR AL TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRICISTA**

**ASESOR:**

Dr. JOSE WILFREDO CALLASI  
QUISPE

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: GENERACIÓN ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL CON BIOTECNOLOGÍA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS

presentado por: GLENDY ARIANA PALOMINO VARGAS con DNI Nro.: 47202727 presentado por: ..... con DNI Nro.: ..... para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6%.

**Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis**

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 18 de JULIO de 2024



Firma

Post firma JOSE WILFREDO CALLASI QUISPE

Nro. de DNI 23812797

ORCID del Asesor 0000-0003-0714-4499

**Se adjunta:**

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:368823521

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS GENERACION DE ENERGIA ELECT  
RICA CON PCM- Glendy Palomino\_17-07  
-24\_rev.pdf**

AUTOR

**Glendy Palomino Final**

RECUENTO DE PALABRAS

**29150 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**149707 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**184 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**17.4MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 17, 2024 6:46 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jul 17, 2024 6:48 PM GMT-5**

### ● 6% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

## **AGRADECIMIENTO**

A los docentes de la carrera profesional de Ingeniería Eléctrica, quienes durante toda la etapa universitaria me brindaron conocimiento, consejos y su amistad tan preciada y valorada; siempre llevaré conmigo todo lo impartido y los recordaré con mucho cariño.

A mi Asesor Dr. Jose Wilfredo, por ser guía y mentor durante este proceso académico, agradezco el apoyo invaluable para la obtención de este logro académico; la admiración hacia su persona, me motiva a continuar superándome.

## **DEDICATORIA**

A Dios, quien no da vida, salud y sapiencia para poder cumplir nuestras metas y objetivos.

A mis padres Jaime y Marizol, por el infinito amor y sacrificio que realizan día a día por sus hijos; a mis hermanos Jimmy y Diego, por su apoyo incondicional como familia; son el generador eléctrico de este título, tan importante para mí.

A mi sobrina Luana, por ser inspiración para lograr todos mis objetivos y procurando siempre ser el mejor ejemplo para ti.

## **IN MEMORIAM**

En honor a mis abuelos Feliciano y Mauro,  
aunque ya no estén físicamente conmigo,  
vuestro espíritu y amor infinito continúan  
guiándome en cada paso de este camino. Este  
logro es tributo a su legado, y a la eterna  
gratitud que siento en mi corazón.

## **PRESENTACIÓN**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Señores Docentes miembros del Jurado de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.

En concordancia y cumplimiento con las disposiciones del Reglamento De Grados y Títulos Vigentes, y con el objeto de optar al título profesional de Ingeniero Electricista, presento ante ustedes la tesis intitulada: “GENERACIÓN ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL CON BIOTECNOLOGIA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”, trabajo de investigación que permite ampliar los estudios sobre la aplicación de esta fuente energética, como una alternativa de generación eléctrica no convencional para uso domiciliario.

El presente trabajo por su naturaleza, está en proceso de desarrollo, ello acorde al avance de la tecnología, por lo que, el objetivo es brindar la información necesaria para que se continúe investigando y sea de aplicación óptima para las necesidades de nuestra sociedad.

Glendy Ariana Palomino Vargas.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de tesis, ha sido motivado por las necesidades de satisfacer la dotación de energía eléctrica en viviendas rurales y urbanas, que en la actualidad no puedan acceder a la energía convencional; motivo por el cual se ha profundizado la investigación y los estudios de la biotecnología de pilas microbianas, para de esta manera ser una opción más eficiente y rentable para dotar de energía eléctrica a beneficiarios.

El desarrollo de este proyecto de investigación servirá de referencia e inicio de los estudios básicos para la continuación de la investigación sobre la generación de energía eléctrica microbiana, y así poder completar los estudios y en el futuro forme parte de la generación distribuida, como una alternativa, junto a las demás fuentes de generación como son: hidráulica, eólica, solar y biomasa.

En el primer capítulo denominado **Generalidades**, detalla el planteamiento y la formulación del problema, seguidamente se traza los objetivos, las hipótesis y la metodología de la investigación en general.

El segundo capítulo denominado **Marco teórico**, realiza la descripción de los principales conceptos teóricos a utilizar en el desarrollo de la tesis, se define a la Celda de Combustible microbiana, su modelamiento, funcionamiento y la agrupación de celdas definen a la pila de combustible microbiana. Todas estas definiciones permiten entender su funcionamiento, las cuales son importantes para la aplicación en la etapa experimental del desarrollo del presente proyecto de investigación.

En el tercer capítulo denominado **Modelamiento del Sistema de Generación Alterna con pilas de combustible microbianas**, desarrolla el modelamiento de la Celda de Combustible Microbiana, así como las simulaciones mediante el software Matlab y se procesarán los datos obtenidos.

El cuarto capítulo cuya denominación es **Diseño e Implementación del Sistema de Pila de Combustible Microbiana**, describe el proceso del diseño y elaboración de la Celda de Combustible Microbiana, Pila de Combustible Microbiana y del Sistema de Pila de Combustible Microbiana.

El quinto capítulo **Procesamiento y comparación de datos obtenidos**, realiza la comparación de datos obtenidos en el programa Matlab y lo obtenido en el experimento de la Pila de Combustible Microbiana. Del mismo modo realiza una evaluación económica de la implementación del módulo experimental.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones, sobre la experimentación realizada considerando las limitaciones que se presentaron en el desarrollo del proyecto de investigación.



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación; se realiza una exploración por diferentes ramas de la ciencia; principalmente del campo de la electricidad y electroquímica. De igual forma se evalúa la reacción de bacterias presentes en la materia orgánica y su maravilloso potencial como recurso energético.

La aplicación de los conceptos teóricos de las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), y su agrupación en Pilas de Combustible Microbianas (PCM); se traslada a las herramientas computacionales del Matlab/ Simulink. De los resultados obtenidos, se eligen los materiales que obtuvieron mejores indicadores, para así poder ser aplicables en la etapa experimental.

En la implementación del módulo físico de la Pila de Combustible Microbiana (PCM), el material de los electrodos se consigue en el mercado local, el cual guarda concordancia con los resultados de las simulaciones. Para complementar el sistema, se adquiere equipos electrónicos para transformar a energía alterna utilizable.

Finalmente, la energía obtenida mediante el Sistema de Pila de combustible Microbiana (SPCM), puede ser utilizable en una vivienda rural, y quizá en un futuro formar parte de la generación distribuida de energías limpias.

Palabras clave: Celda combustible microbiana, generación eléctrica, agua residual, electrodos.

## **ABSTRACT**

This research explores various branches of science, focusing primarily on electricity and electrochemistry. Additionally, it evaluates the reaction of bacteria found in organic matter and their remarkable potential as an energy resource.

The theoretical concepts of Microbial Fuel Cells (MFCs) are applied, with a focus on assembling them into Microbial Fuel Cell Stacks (MFCS), and integrated into Matlab/Simulink computational tools. Based on the results obtained, materials showing the best performance indicators are selected for experimental phases.

In the physical implementation of the Microbial Fuel Cell Stack (MFCS) module, electrode materials are sourced locally to align with simulation outcomes. Supplementary electronic equipment is acquired to convert the generated energy into usable alternating current.

Finally, the energy obtained from the Microbial Fuel Cell System (MFCS) can be used in a rural household and potentially integrated into distributed generation of clean energy in the future.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
INDICE GENERAL .....	ix
INDICE DE TABLAS .....	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	xv
GLOSARIO DE ABREVIATURAS .....	xxi
CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	1
1.1. Ubicación geográfica.....	1
1.2. Problemática.....	1
1.2.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2.2. Formulación del Problema .....	4
1.2.2.1. Problema General.....	4
1.2.2.2. Problemas Específicos .....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.3.1. Objetivo general .....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Justificación de la Investigación .....	5
1.5. Hipótesis.....	9
1.5.1. Hipótesis general .....	9
1.5.2 Hipótesis específicas.....	10

1.6.	Operacionalización de variables de estudio. ....	10
	Variable dependiente: .....	10
	Variable independiente: .....	11
1.7.	Alcances y limitaciones.....	13
1.8.	Metodología .....	13
1.8.1.	Tipo de Investigación .....	13
1.8.2.	Población y Muestra.....	13
1.8.3.	Diseño de investigación .....	14
	<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1.	Antecedentes del Estudio .....	15
2.2.	Marco Teórico .....	18
2.2.1.	Celdas de combustible microbianas (CCM).....	18
2.2.2.	Modelamiento matemático de una celda de combustible microbiana (CCM).....	22
2.2.2.1.	Termodinámica de la celda de combustible microbiana (CCM).....	24
2.2.2.2.	Potenciales de electrodos .....	26
2.2.3.	Polarización en electrodos.....	30
2.2.3.1.	Polarización por activación .....	30
2.2.3.2.	Polarización por concentración o transporte de masa .....	33
2.1.1.1.	Polarización óhmica o pérdidas óhmicas .....	37
2.2.4.	Agrupamiento de Celdas de Combustible Microbianas.....	39
2.2.4.1.	Apilamiento de Celdas de Combustible Microbiana en Serie.....	39
2.2.4.2.	Apilamiento de Celdas de Combustible Microbiana en Paralelo.....	40
2.2.5.	Densidad de Potencia de Celda Microbiana.....	40

2.2.6.	Módulo de Suministro de energía con Pila de Combustible Microbiana.....	41
2.2.6.1.	Regulador de Carga.....	41
2.2.6.2.	Batería .....	42
2.2.6.3.	Inversor.....	44
CAPITULO III: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN ELECTRICA CON PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS .....		46
3.1.	Modelamiento de una Celda de Combustible Microbiana (CCM) .....	46
3.2.	Simulación de Sistemas de Pilas de Combustible Microbiana .....	59
3.2.1.	Modelamiento y Simulación de un Sistema De Generación Monofásica con Pilas de Combustible Microbianas (PCM).....	59
3.2.2.	Modelamiento de Sistemas de Generación Trifásica con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) 70	
3.2.2.1.	Modelamiento de Sistema de Generación Trifásica 380-220 V con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) .....	70
3.2.2.2.	Modelamiento De Sistema De Generación Trifásica 220 V Con Pilas De Combustible Microbianas (PCM) .....	74
CAPITULO IV: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO FÍSICO DEL SISTEMA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (SPCM).....		78
4.1.	Evaluación experimental de Celdas de Combustibles Microbianas (CCM) .....	78
4.1.1.	Diseño y construcción de Celdas Unitarias Microbianas.....	78
4.1.2.	Pruebas eléctricas de CCM unitarias.....	95
4.3.	Implementación de un Sistema De Pilas De Combustible Microbianas .....	118
4.3.1.	Cálculos justificativos para la Implementación de un SPCM demostrativo .....	121

4.3.1.1. Cálculo de la Tensión Total de la PCM .....	121
4.3.1.2. Cálculo de la corriente total de la PCM .....	122
4.3.2. Especificaciones técnicas de equipos para implementar un Sistema de Pilas de Combustible Microbianas (SPCM).....	123
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	137
5.1. Análisis y comparación de resultados de las CCM .....	137
5.2. Análisis y Comparación de Resultados de los SPCM .....	148
5.3. Mejoras al Sistema de la Pila de Combustible Microbiana en la etapa experimental..	151
5.4. Evaluación económica.....	155
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	157
BIBLIOGRAFÍA .....	159

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Carga eléctrica de una vivienda rural vulnerable</i> .....	6
Tabla 2 <i>Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, según departamento, 2014-2020 (M3)</i> .....	7
Tabla 3 <i>Potencial redox estándar y teórico para reacciones y condiciones típicas de celdas de combustible microbiológicas a 25 °C de temperatura</i> .....	22
Tabla 4 <i>Potenciales Estándar de Reducción a 25 °C</i> .....	29
Tabla 5 <i>Densidad de corriente de intercambio característica de algunos metales</i> .....	32
Tabla 6 <i>Conjugación de pares de materiales para una CCM y datos de entrada para el modelamiento matemático en Simulink</i> .....	49
Tabla 7 <i>Semirreacciones en cátodo y ánodo en una CCM y datos de entrada para el modelamiento matemático en Simulink</i> .....	49
Tabla 8 <i>Variables de entrada CCM modelo Simulink</i> .....	50
Tabla 9 <i>Resultados de Simulación en el Simulink- Matlab de las celdas unitarias con diferentes pares de electrodos</i> .....	52
Tabla 10 <i>Variables de entrada del Sistema de Generación Monofásica con PCM</i> .....	63
Tabla 11 <i>Conjugaciones de electrodos por el tipo material</i> .....	78
Tabla 12 <i>Resultados de pruebas experimentales de las celdas unitarias con diferentes pares de electrodos</i> .....	115
Tabla 13 <i>Especiaciones técnicas del Regulador de carga</i> .....	125
Tabla 14 <i>Especiaciones técnicas de la batería</i> .....	126
Tabla 15 <i>Diagrama de características técnicas de la batería</i> .....	127
Tabla 16 <i>Especiaciones técnicas del inversor</i> .....	129

Tabla 17 <i>Resultados de la simulación en Simulink- Matlab de las Celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.</i> .....	138
Tabla 18 <i>Resultados de las pruebas experimentales de las Celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.</i> .....	143
Tabla 19 <i>Comparación de resultados de la CCM unitarias simulados en Simulink Matlab y mediante las pruebas experimentales.</i> .....	146
Tabla 20 <i>Comparación de resultados PCM y SPCM simulados y experimentales.</i> .....	150
Tabla 21 <i>Metrado y presupuesto referencial del proyecto de investigación.</i> .....	156



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ubicación geográfica de aplicación del proyecto.</i> .....	1
Figura 2 <i>Esquema del planteamiento del problema.</i> .....	3
Figura 3 <i>Esquematación del funcionamiento de la pila de combustible microbiana</i> .....	8
Figura 4 <i>Sistema de Pila de Combustible Microbiana Domiciliario</i> .....	9
Figura 5 <i>Acción de la Membrana polimérica de intercambio protónico.</i> .....	19
Figura 6 <i>Esquema de una celda de combustible microbiana (CCM); 1) Semirreacción en el ánodo, 2) Carga y 3) Semirreacción en el cátodo.</i> .....	20
Figura 7 <i>Circuito equivalente simplificado de una celda de combustible microbiana con carga.</i> .....	22
Figura 8 <i>Ejemplo de una gráfica de Tafel.</i> .....	32
Figura 9 <i>Curva característica ideal de las pilas de combustible.</i> .....	38
Figura 10 <i>Apilamiento de Celda de Combustible Microbiana en serie.</i> .....	39
Figura 11 <i>Apilamiento de Celda de Combustible Microbiana en paralelo.</i> .....	40
Figura 12 <i>Esquema de un módulo con PCM para el suministro de energía utilizable.</i> .....	41
Figura 13 <i>Regulador o controlador de carga</i> .....	42
Figura 14 <i>Batería o acumulador tipo seco.</i> .....	43
Figura 15 <i>Inversor DC-AC</i> .....	45
Figura 16 <i>Circuito equivalente simplificado de una celda de combustible microbiana con carga.</i> .....	46
Figura 17 <i>Curva característica ideal de las pilas de combustible.</i> .....	48
Figura 18 <i>Modelo de una CCM en Simulink/ Matlab.</i> .....	51

Figura 19 <i>Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink/ Matlab.</i> .....	57
Figura 20 <i>Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink/ Matlab.</i> .....	58
Figura 21 <i>Esquema de un módulo con PCM para el suministro de energía utilizable</i> .....	60
Figura 22 <i>Modelo en Simulink de un Sistema monofásico 220 V. con PCM</i> .....	61
Figura 23 <i>Etapa pila de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo matemático en Software Simulink De Matlab.</i> .....	62
Figura 24 <i>Voltaje DC de salida de la PCM.</i> .....	63
Figura 25 <i>Etapa Controlador o Regulador de Carga – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.</i> .....	64
Figura 26 <i>Voltaje DC de salida del controlador de carga.</i> .....	65
Figura 27 <i>Etapa Batería o acumulador – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.</i> .....	66
Figura 28 <i>Voltaje DC, Corriente DC y porcentaje de carga de la batería.</i> .....	67
Figura 29 <i>Etapa Inversor Monofásico DC-AC – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab</i> .....	68
Figura 30 <i>Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del inversor a la carga.</i> .....	69
Figura 31 <i>Sistema de Generación Trifásica 380-220 V, con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo Matemático En Software Simulink de Matlab.</i> .....	71
Figura 32 <i>Etapa Inversor Trifásico (DC- AC) y Carga Trifásica Conectada – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.</i> .....	72
Figura 33 <i>Voltaje de línea y fase AC (Sistema 380/220 V – 3F) de salida trifásica del inversor a la carga.</i> .....	73

Figura 34 <i>Sistema de Generación Trifásica 220 V, con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.</i> .....	75
Figura 35 <i>Etapa Inversor Trifásico 220 V (DC- AC) y carga trifásica conectada – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.</i> .....	76
Figura 36 <i>Voltaje de fase y corriente AC (sistema 220 V – 3F) de salida trifásica del inversor a la carga.</i> .....	77
Figura 37 <i>Esquema de una celda de combustible microbiana (CCM); 1) Semirreacción en el ánodo, 2) Carga y 3) Semirreacción en el cátodo.</i> .....	79
Figura 38 <i>Electrodo positivo de óxido de plomo PbO<sub>2</sub>.</i> .....	80
Figura 39 <i>Electrodo negativo de plomo Pb.</i> .....	81
Figura 40 <i>Electrodo negativo de Aluzinc.</i> .....	82
Figura 41 <i>Electrodo negativo de Aluminio Al.</i> .....	83
Figura 42 <i>Membrana de intercambio protónico o electronic polymer membrane (PEM).</i> .....	85
Figura 43 <i>Fusión solidaria de la PEM con el cátodo.</i> .....	86
Figura 44 <i>Proceso de cortado del acrílico en diversos componentes de la estructura de la cuba.</i> .....	87
Figura 45 <i>Cuba de una CCM.</i> .....	89
Figura 46 <i>Vista frontal del diseño de cuba de una CCM, dimensiones en mm.</i> .....	90
Figura 47 <i>Vista lateral e isométrica del diseño de cuba de una CCM, dimensiones en mm.</i> .....	91
Figura 48 <i>CCM unitaria PbO<sub>2</sub>-Pb.</i> .....	92
Figura 49 <i>CCM unitaria PbO<sub>2</sub>-Aluzinc.</i> .....	92
Figura 50 <i>CCM unitaria PbO<sub>2</sub>-Al.</i> .....	93
Figura 51 <i>Extracción de aguas residuales del rio Huatanay.</i> .....	94

Figura 52 <i>Esquema de pruebas de una CCM.</i> .....	95
Figura 53 <i>Instalación de mesa de trabajo.</i> .....	96
Figura 54 <i>Distribución de instrumentos y componentes de pruebas.</i> .....	96
Figura 55 <i>Prueba 01: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a circuito abierto.</i> .....	97
Figura 56 <i>Prueba 02: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 405 Kohm.</i> .....	97
Figura 57 <i>Prueba 03: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 305 Kohm.</i> .....	98
Figura 58 <i>Prueba 04: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 205 Kohm.</i> .....	98
Figura 59 <i>Prueba 05: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 105 Kohm.</i> .....	99
Figura 60 <i>Prueba 06: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 5 Kohm.</i> .....	99
Figura 61 <i>Prueba 07: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 4 Kohm.</i> .....	100
Figura 62 <i>Prueba 08: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 3 Kohm.</i> .....	100
Figura 63 <i>Prueba 09: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 2 Kohm.</i> .....	101
Figura 64 <i>Prueba 10: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 1 Kohm.</i> .....	101
Figura 65 <i>Prueba 11: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a corto circuito.</i> .....	102
Figura 66 <i>Prueba 01: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a circuito abierto.</i> .....	103
Figura 67 <i>Prueba 02: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 405 Kohm.</i> .....	103
Figura 68 <i>Prueba 03: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 305 Kohm.</i> .....	104
Figura 69 <i>Prueba 04: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 205 Kohm.</i> .....	104
Figura 70 <i>Prueba 05: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 105 Kohm.</i> .....	105
Figura 71 <i>Prueba 06: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 5 Kohm.</i> .....	105
Figura 72 <i>Prueba 07: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 4 Kohm.</i> .....	106
Figura 73 <i>Prueba 08: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 3 Kohm.</i> .....	106
Figura 74 <i>Prueba 09: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 2 Kohm.</i> .....	107

Figura 75 Prueba 10: CCM PbO <sub>2</sub> -Aluzinc a 1 Kohm. ....	107
Figura 76 Prueba 11: CCM PbO <sub>2</sub> -Aluzinc a corto circuito. ....	108
Figura 77 Prueba 01: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a circuito abierto. ....	109
Figura 78 Prueba 02: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 405 Kohm. ....	109
Figura 79 Prueba 03: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 305 Kohm. ....	110
Figura 80 Prueba 04: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 205 Kohm. ....	110
Figura 81 Prueba 05: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 105 Kohm. ....	111
Figura 82 Prueba 06: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 5 Kohm. ....	111
Figura 83 Prueba 07: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 4 Kohm. ....	112
Figura 84 Prueba 08: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 3 Kohm. ....	112
Figura 85 Prueba 09: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 2 Kohm. ....	113
Figura 86 Prueba 10: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a 1 Kohm. ....	113
Figura 87 Prueba 11: CCM PbO <sub>2</sub> -Al a corto circuito. ....	114
Figura 88 Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas – Pruebas experimentales. ....	116
Figura 89 Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas – Pruebas experimentales. ....	117
Figura 90 Construcción de la PCM- Cortado del acrílico. ....	119
Figura 91 Construcción de la PCM- Pegado del acrílico. ....	119
Figura 92 Construcción de la PCM- Armado de la estructura de la celda. ....	120
Figura 93 Apilamiento de CCM en serie. ....	121
Figura 94 Apilamiento de CCM en paralelo. ....	122
Figura 95 Regulador de carga. ....	124

Figura 96 <i>Batería o Acumulador.</i> .....	128
Figura 97 <i>Inversor.</i> .....	129
Figura 98 <i>Esquema de un módulo con PCM (SPCM) para el suministro de energía utilizable.</i> .....	130
Figura 99 <i>Apilamiento de las Celdas de Combustible Microbianas en serie.</i> .....	131
Figura 100 <i>Apilamiento de las Celdas de Combustible Microbianas en serie y paralelo.</i> .....	132
Figura 101 <i>Montaje del apilamiento de CCM serie- paralelo.</i> .....	133
Figura 102 <i>Medición de Voltaje y Corriente de la PCM.</i> .....	134
Figura 103 <i>Voltaje DC entregado por el regulador de carga al inversor.</i> .....	134
Figura 104 <i>Voltaje AC y forma de Onda a la salida del Inversor.</i> .....	135
Figura 105 <i>Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink- Matlab.</i> .....	144
Figura 106 <i>Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en pruebas experimentales.</i> .....	145
Figura 107 <i>Voltaje DC de entrada al SPCM simulación.</i> .....	148
Figura 108 <i>Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del SPCM simulación.</i> .....	149
Figura 109 <i>Voltaje DC de entrada al SPCM prueba experimental.</i> .....	149
Figura 110 <i>Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del SPCM prueba experimental.</i>	150
Figura 111 <i>Apilamiento de 10 placas de Aluminio en paralelo.</i> .....	151
Figura 112 <i>Apilamiento de 10 placas de Aluminio en paralelo.</i> .....	152
Figura 113 <i>Resultados de la tensión a la salida de la PCM en CC.</i> .....	153
Figura 114 <i>Resultados de la tensión a la salida del SPCM en CA.</i> .....	154
Figura 115 <i>Resultados a la salida del SPCM forma de onda alterna.</i> .....	154

## **GLOSARIO DE ABREVIATURAS**

CCM: Celda de Combustible Microbiana.

PCM: Pila de Combustible Microbiana.

SPCM: Sistema de Pila de Combustible Microbiana.

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES

### 1.1. Ubicación geográfica

El estudio e investigación del presente trabajo se desarrollará de manera experimental y está aplicado a zonas rurales.

**Figura 1** *Ubicación geográfica de aplicación del proyecto.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

### 1.2. Problemática

#### 1.2.1. Planteamiento del problema

La energía eléctrica es la fuerza vital del mundo y de nuestra sociedad. De ella dependen la iluminación, la calefacción y refrigeración de los hogares, el uso de electrodomésticos y a su vez ésta puede ser transformada en otros tipos de energía; es decir el hombre desde siempre tuvo la necesidad de usar la energía para brindarle calidad de vida.



Una necesidad esencial en los últimos tiempos es la demanda de generación de energía eléctrica debido al crecimiento de la población, y la preocupación como sociedad de la contaminación ambiental por la emisión de gases contaminantes de las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles. Estos aspectos motivan a la obtención de energía eléctrica mediante las denominadas Energías Limpias como son: la Energía Eólica, Energía Solar y otras que permitan satisfacer las necesidades de nuestra sociedad.

Es así que en nuestro país y región ya se está aplicando el uso de estas alternativas de generación de energía renovables; sin embargo, son aún limitadas, económica y tecnológicamente, otro factor que contribuye a esta limitación es nuestra accidentada geografía.

Teniendo esta perspectiva, resumimos para el estudio de este trabajo, identificando el problema y sus niveles cuestionables o sub- problemas, los cuales se pueden esquematizar de la siguiente manera:

**Figura 2** Esquema del planteamiento del problema.



*Nota. Elaboración Propia*

En la última década los sistemas bioelectroquímicos han atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica, esta tecnología son las pilas de combustible microbianas (PCM); pudiéndose lograr generar energía eléctrica con residuos orgánicos de residuos domésticos y aguas residuales.

Las aguas residuales y residuos domésticos, contienen materia orgánica y bacterias, el proceso de tratamiento comienza cuando estas últimas comienzan a degradar la materia orgánica. Al hacer esto, la energía eléctrica se genera directamente y es capturada por un electrodo que actúa como ánodo sumergido en el agua residual o sustrato de residuos; durante este proceso, las bacterias forman un biófilo en los electrodos superficiales, esto ayuda a limpiar el material orgánico presente

en el agua sucia, reduce la carga orgánica y cuando esto sucede está generando energía eléctrica directamente con la ayuda de la actividad de un biocatalizador.

Es así que para esta investigación se plantea la generación de energía eléctrica limpia y renovable con la tecnología de las pilas de combustible microbianas para la obtención de energía eléctrica.

## **1.2.2. Formulación del Problema**

### **1.2.2.1. Problema General**

¿En qué medida se puede generar energía eléctrica no convencional con el diseño de la biotecnología de pilas de combustible microbianas para el uso en viviendas rurales en la región del Cusco?

### **1.2.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Es posible analizar la reacción de las bacterias contenidas en el agua residual en contacto con el material de los electrodos que se encuentran en la región del Cusco para aplicarlos en una pila de combustible microbiana?
- ¿Se podrá modelar una Celda de Combustible Microbiana (CCM) y por ende un sistema de Pila de combustible microbiana (PCM), utilizando herramientas computacionales como el MATLAB – SIMULINK para generar energía eléctrica monofásica y trifásica no convencional?
- ¿Será posible diseñar y construir un prototipo físico funcional y aplicable a viviendas rurales de la región del Cusco, con el sistema de generación de energía eléctrica monofásico con Pilas de Combustible Microbianas?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Modelar, diseñar y construir un Sistema de Pila de Combustible Microbiana para generar energía eléctrica no convencional para el uso en viviendas rurales.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar y evaluar la reacción de los componentes de los electrodos con el metabolismo de las bacterias contenidas en el agua residual para incrementar la generación de energía eléctrica. Identificar los materiales de los electrodos que se puedan obtener en el mercado regional, para la implementación de Celdas Combustible Microbianas (CCM).
- Modelar una Celda de Combustible Microbiana (CCM) y por ende una pila de combustible microbiana (PCM), utilizando herramientas computacionales como el Matlab – Simulink para generar energía eléctrica monofásica y trifásica no convencional. Implementar y/o construir un módulo físico de sistema de generación de energía eléctrica monofásica alterna con Pilas de Combustible Microbianas.
- Comprobar y analizar los resultados obtenidos en el modelamiento del Matlab y del prototipo físico experimental.

### **1.4. Justificación de la Investigación**

El presente trabajo de investigación se sustenta en plantear nuevas alternativas de solución a problemas y necesidades actuales de la sociedad, como es el caso la generación de energía eléctrica, que si bien es cierto tenemos un potencial muy importante en las centrales hidroeléctricas; pero el crecimiento acelerado de la población requiere emplear sistemas alternativos.

Otra razón importante de esta investigación es el impacto ambiental que en mayor o menor grado es consecuencia de generar energía eléctrica. Actualmente se ve que las formas de generar

energía eléctrica basados en la quema de combustibles de hidrocarburos dañan potencialmente el ambiente en que vivimos; ya se dio un gran paso con el uso de las energías renovables (solar, eólica, etc.) que no contaminan nuestro ambiente, necesitamos intensificar estas formas de generar energía eléctrica dando nuevas alternativas. La propuesta de esta investigación es producir energía eléctrica alterna con recursos que la misma naturaleza nos proporciona y compensarla con un beneficio ambiental.

Considerando que actualmente nuestro país se encuentra en una transición energética, con el fin de promover el uso intensivo y eficiente de las fuentes de energías renovables convencionales y no convencionales, así como la generación distribuida; con esta alternativa de generación que se viene investigando, se planifica contribuir a la matriz energética con energías alternativas, y formar parte del desarrollo tecnológico y económico de las naciones.

Por lo anterior, consideramos que existe el recurso para generar energía que no está siendo utilizada como es, la materia orgánica de las aguas residuales producidas en las viviendas rurales y urbanas.

**Tabla 1** *Carga eléctrica de una vivienda rural vulnerable.*

<b>ESTUDIO DE CARGAS DE UNA VIVIENDA RURAL VULNERABLE</b>							
<b>TD-01</b>	<b>TIPOS DE EQUIPOS</b>	<b>PUNTOS DE RED</b>	<b>POTENCIA DE EQUIPOS (W)</b>	<b>POTENCIA INSTALADA (W)</b>	<b>POTENCIA DE DISEÑO (W)</b>	<b>F. D</b>	<b>DEMANDA MAXIMA (W)</b>
1	ILUMINACIÓN LED	3	3.00	9.00	9.00	0.50	4.5
2	CARGADOR DE CELULAR	2	2.00	4.00	4.00	0.50	2
3	RADIO	1	3.00	3.00	3.00	0.50	1.5
					16.00		8

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 2** Descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, según departamento, 2014-2020 (M3)

Departamento	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 P/
<b>Total</b>	<b>357 752 336</b>	<b>335 447 711</b>	<b>346 029 577</b>	<b>234 418 233</b>	<b>243 087 012</b>	<b>267 519 412</b>	<b>266 633 156</b>
Amazonas	3 740 994	3 540 970	3 695 193	4 153 054	4 332 274	4 650 460	4 768 068
Áncash	13 875 179	15 320 583	16 264 590	15 173 521	16 390 841	16 654 123	15 468 176
Apurímac	3 170 666	4 137 603	3 831 353	4 235 956	4 449 259	4 625 252	4 583 912
Arequipa	32 392 630	37 994 486	36 766 861	3 126 464	3 335 065	3 272 505	3 488 899
Ayacucho	18 682	4 836	110 993	202 053	-	10 606	43 415
Cajamarca	6 888 962	7 259 626	7 621 997	7 504 667	7 714 778	8 261 136	8 156 639
<b>Cusco</b>	<b>7 120 237</b>	<b>7 300 393</b>	<b>7 640 346</b>	<b>9 767 191</b>	<b>7 342 430</b>	<b>9 005 343</b>	<b>7 664 879</b>
Huancavelica	2 092 571	2 170 211	2 195 772	2 267 556	2 252 490	2 341 298	2 306 545
Huánuco	10 166 074	10 526 166	10 181 638	10 293 541	10 724 665	11 859 623	11 283 113
Ica	2 038 582	728 730	6 343 158	5 694 794	6 238 131	8 430 922	8 268 130
Junín	27 600 196	27 071 848	28 407 427	29 533 345	29 428 215	29 416 952	29 073 327
La Libertad	15 013 308	216 872	...	12 323 885	11 836 937	12 258 801	13 130 816
Lambayeque	2 141 599	1 125 069	13 825 332	263 962	461 193	372 204	334 065
Lima	159 221 443	156 129 386	146 851 652	69 834 095	75 927 981	88 484 252	90 155 194
Loreto	10 582 606	10 559 733	10 926 389	10 562 500	10 390 062	12 687 928	13 113 606
Madre de Dios	1 470 857	1 524 967	1 617 093	1 757 965	1 974 087	2 099 715	2 052 867
Moquegua	2 726 633	1 123 689	419 623	150 128	396 082	288 799	535 323
Pasco	1 295 385	1 285 252	1 215 262	1 263 531	1 219 562	1 392 663	1 159 551
Piura	23 392 196	15 694 554	13 053 220	10 561 269	12 261 887	15 016 165	14 907 334
Puno	6 817 084	4 994 780	7 179 415	6 297 863	6 540 805	6 971 550	6 519 745
San Martín	9 235 985	9 183 545	9 810 508	10 252 174	10 532 988	10 669 562	11 091 446
Tacna	3 232 929	3 409 016	4 093 734	4 878 084	5 482 920	5 091 173	4 884 836
Tumbes	4 149 745	4 667 660	4 241 358	3 923 571	3 686 002	3 646 967	4 563 313
Ucayali	9 367 793	9 477 736	9 736 663	10 397 064	10 168 358	10 011 411	9 079 959

*Nota.* Superintendencia nacional de servicios de saneamiento (SUNASS).

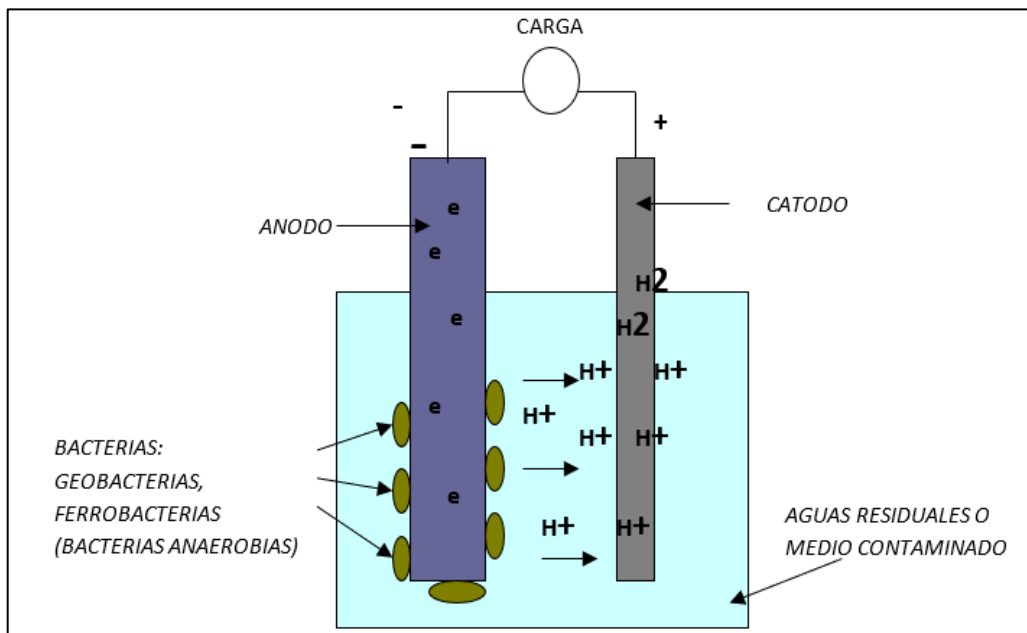
Como ejemplo del presente estudio, se considera la región del Cusco, el cual tiene una importante fuente energética de aguas residuales como se aprecia en la Tabla N° 2, el Cusco produce unos 7,664,879 m<sup>3</sup> de aguas residuales anuales sin tratar, es decir 20,999.67 m<sup>3</sup>/diarios, lo cual es medio importante donde habitan las bacterias anaerobias.

Es importante ampliar la investigación respecto al uso de aguas residuales para generar energía eléctrica, con recursos de nuestras viviendas, e insumos que podemos encontrar en el

mercado local, y así poder beneficiar a viviendas rurales más distantes de las redes eléctricas convencionales; como se aprecia en la Tabla 1, vemos que el consumo promedio de una vivienda rural vulnerable es de 8W, esta potencia puede ser aprovechada con el Sistema de Pila de Combustible Microbiana (SPCM).

Ya habiendo expuesto las motivaciones que plantea el presente trabajo de investigación, en la que aplicaremos la tecnología de pilas de combustible microbianas para la obtención de energía eléctrica; se propone emplear celdas, que estarán compuestas de dos electrodos ánodo (-) y cátodo (+) sumergidas en desechos potencialmente contaminados; en esta disposición se genera una diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo; debido al metabolismo de ciertas bacterias que desprenden electrones. Las bacterias que pueden realizar este fenómeno, principalmente son las geobacterias y ferrobacterias en el proceso llamado corrosión.

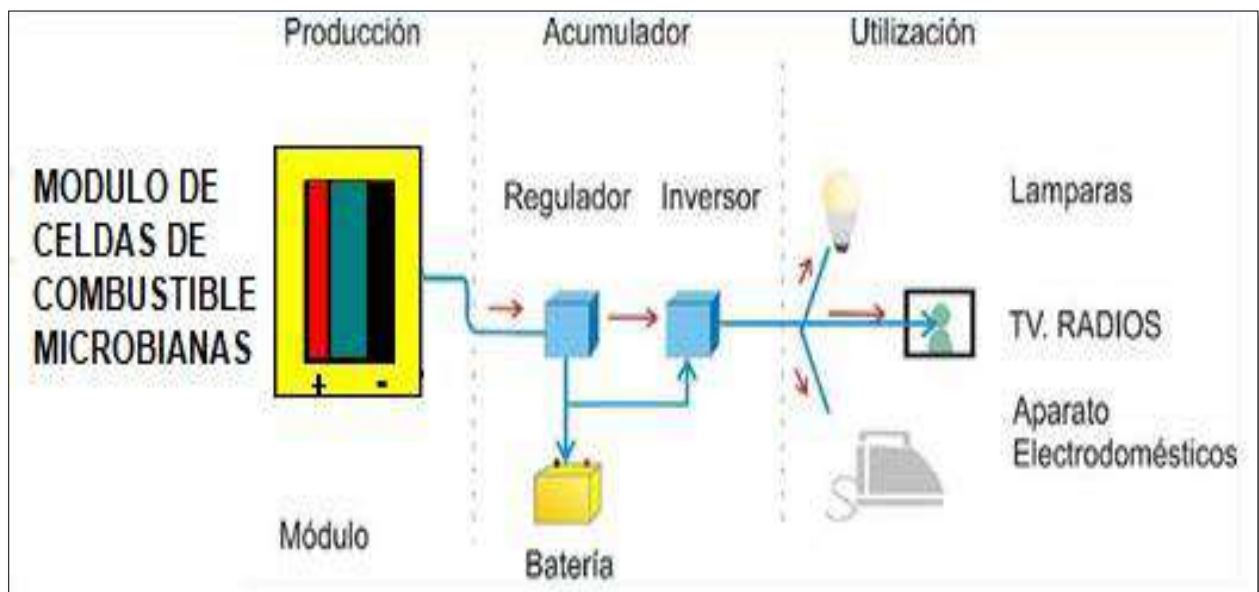
**Figura 3** Esquematización del funcionamiento de la pila de combustible microbiana



Nota. (Gonzales Delgado, 2007).

Para el prototipo de generación de energía se propone un sistema de una pila de combustible microbiana en una vivienda familiar rural de funcionamiento similar o análogo a un sistema fotovoltaico domiciliario de consumo monofásico, con la diferencia del medio de obtención de energía serán las celdas microbianas en lugar del panel fotovoltaico y como fuente de energía la materia orgánica en lugar del sol.

**Figura 4** Sistema de Pila de Combustible Microbiana Domiciliario



*Nota. Elaboración Propia.*

## 1.5. Hipótesis.

### 1.5.1. Hipótesis general

Con la utilización de la biotecnología de las celdas de combustible microbianas se modelará y construirá un generador eléctrico funcional para dotar de energía eléctrica no convencional a viviendas rurales en la región del Cusco.



### 1.5.2 Hipótesis específicas

- Se evalúa la reacción de los componentes de los electrodos con el agua residual, para mejorar los parámetros de generación energía eléctrica., considerando los materiales que se encuentran en la región del Cusco para la utilización en los electrodos, como son: Oxido de plomo, Plomo, Aluzinc y Aluminio en reacción con el metabolismo de las bacterias de las aguas residuales para la aplicación de las pilas de combustible microbianas.
- Se modela una celda de combustible microbiana (CCM) y un apilamiento de celdas de combustible microbiana (PCM), utilizando el MATLAB – SIMULINK, y se aplica al sistema de generación de energía eléctrica monofásico y trifásico, obteniendo un sistema funcional energía eléctrica no convencional. Se construye un módulo físico de sistema de generación monofásica de energía eléctrica alterna con Pila de Combustible Microbiana para aplicarlo en una vivienda rural.
- Se comprueba los resultados de los parámetros de energía eléctrica de la simulación y del experimental.

### 1.6. Operacionalización de variables de estudio.

#### **Variable dependiente:**

**Generación de energía eléctrica:** La energía eléctrica o también denominada electricidad es un tipo de energía originada por la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos determinados, cuando se les pone en contacto mediante un conductor eléctrico. (Fuente: <https://concepto.de/energia-electrica/#ixzz8aEW07q5p>).

Indicadores: Tensión (Voltios), Intensidad de Corriente (Amperios), Potencia (Watt), Resistencia (Ohmios).

**Variable independiente:**

**Pila de combustible microbiana (PCM):** La pila de combustible microbiana (PCM) o conjunto de celdas de combustible microbianas (CCM), es un sistema bio-electroquímico, que puede generar energía eléctrica a partir de la interacción de microorganismos (bacterias) presentes en un medio acuoso contaminado, por la oxidación de materia orgánica (biomasa) (metabolismo bacteriano)

(Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Celda\\_de\\_combustible\\_microbiano](https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_combustible_microbiano)).

Indicadores: Volumen de agua residual con contenido de bacterias (Porcentaje de bacterias contenidas en una celda de combustible microbiana).

**Tabla N° 1.3: Operacionalización de variables de la investigación.**

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCELTUAL O CONSTRUCTIVA	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICE O UNIDAD DE MEDICION
<p><b>Independiente</b></p> <p>Módulo de Pilas de combustible microbianas.</p>	<p>La pila de combustible microbiana (PCM) o conjunto de celdas de combustible microbianas (CCM), es un sistema bio-electroquímico, que puede generar energía eléctrica a partir de la interacción de microorganismos (bacterias) presentes en un medio acuoso contaminado, por la oxidación de materia orgánica (biomasa) (metabolismo bacteriano).</p> <p>Fuente:(<a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_combustible_microbiano">https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_combustible_microbiano</a>)</p>	<p>La Pila de Combustible Microbiana tiene como fuente principal, el metabolismo de las bacterias contenidas en la Celda de Combustible Microbiana.</p>	<p>Combustible Microbiano.</p>	<p>Volumen de agua residual con contenido de bacterias.</p>	<p>Porcentaje de bacterias contenidas en una celda de combustible microbiana.</p>
<p><b>Dependiente</b></p> <p>Generación de energía eléctrica.</p>	<p>La energía eléctrica o también denominada electricidad es un tipo de energía originada por la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos determinados, cuando se les pone en contacto mediante un conductor eléctrico.</p> <p>Fuente:(<a href="https://concepto.de/energia-electrica/#ixzz8aEW07q5p">https://concepto.de/energia-electrica/#ixzz8aEW07q5p</a>)</p>	<p>Los parámetros de la generación de energía eléctrica se dimensionan de acuerdo a los resultados registrados en el voltímetro y amperímetro.</p>	<p>Magnitudes eléctricas de medición</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia eléctrica: (P) Es el producto de la corriente eléctrica por el voltaje. La potencia eléctrica será la energía que se puede entregar a una unidad de carga por unidad de tiempo.</li> <li>- Tensión: (V) Cuando los electrones circulan entre dos puntos de un circuito eléctrico, su desplazamiento es posible gracias a la diferencia de cargas (positivas y negativas) que hay entre esos dos puntos. Esta diferencia de cargas se le llama tensión eléctrica.</li> <li>- Intensidad de corriente: (I) Cantidad de electrones que pasan en un segundo por un punto del circuito.</li> <li>- Resistencia eléctrica: (<math>\Omega</math>) Es la oposición al flujo de corriente eléctrica en un circuito eléctrico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Watts</li> <li>- Voltios</li> <li>- Amperios</li> <li>- Ohmios (<math>\Omega</math>)</li> </ul>

Nota. Elaboración Propia.

## **1.7. Alcances y limitaciones**

- Por ser un trabajo de investigación, este estudio contemplará la aplicación de esta tecnología; la cual será simulada en el programa Simulink del Matlab.
- Para la aplicación del sistema de pilas de combustible microbianas se construirá un prototipo de generación eléctrica.
- La fuente de energía principal es el agua residual, producida en las viviendas.
- Los parámetros eléctricos a obtener con la tecnología microbiana serán indicadores característicos de la energía eléctrica.

## **1.8. Metodología**

### **1.8.1. Tipo de Investigación**

Por la naturaleza del estudio, esta investigación es del tipo Explicativo, en mérito al análisis de la relación entre una o varias variables independientes y una o varias variables dependientes, y los efectos causales de las primeras sobre las segundas. En el presente trabajo de investigación profundizamos el estudio de una alternativa de generación eléctrica y se aplica el método para poner en práctica y sea de referencia para ampliar esta investigación.

### **1.8.2. Población y Muestra**

- Universo: El universo del presente trabajo de investigación son las aguas residuales y viviendas rurales.
- La Muestra (Muestreo no probabilístico): Como aplicación del presente estudio se tomará como muestra una o más viviendas rurales, con características de calificaciones eléctricas reales del tipo urbano o urbano rurales.

### **1.8.3. Diseño de investigación**

En diseño de investigación para el presente proyecto es CUASIEXPERIMENTAL; requiere la manipulación intencional una o más variables independientes (causas) para analizar sus consecuencias que tiene sobre una o más variables dependientes (efectos), dentro de una situación de control.

El análisis de Datos que se tiene para el presente proyecto de investigación es de carácter CUANTITATIVO puesto que se mide la variable dependiente con el osciloscopio y se simula la variable independiente con el software MATLAB Simulink.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del Estudio

Los antecedentes considerados para el proyecto son:

- Título de tesis: Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales utilizando Pilas de Combustible de Hidrogeno y Pilas de Combustible Microbianas.

Autor: Ing. Jean Paul Gonzales Delgado.

Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (Año 2007).

Problema objeto del estudio: falta de la aplicación de nuevas tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica utilizable.

Objetivo general: Experimentar y proponer nuevas alternativas energéticas a partir de aguas residuales, es decir evaluar las aguas servidas como fuente energética que permita diseñar construir e introducir las propuestas tecnológicas de las Pilas de Combustible de Hidrógeno (PCH) y Pilas de Combustible Microbiana (PCM, transfiriendo estas tecnologías a nuestro medio con recursos propios.

Metodología: Experimental

Conclusiones: Para la utilización de la tecnología de las pilas de combustible de Hidrogeno; la opción más favorable en cuanto a materiales, es utilizar electrodos de Latón/PbO<sub>2</sub> o Pb/PbO<sub>2</sub> con el mayor porcentaje de Níquel posible como catalizador y el electrolito H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la configuración de estos elementos es robusta y duradera frente a contaminantes y trabajos fuertes; su tecnología de construcción es tan simple y barata como los acumuladores de plomo. Técnicamente es mejor emplear una planta energética con pilas de combustible y reformado de biogás de las aguas residuales; aunque el costo inicial pueda parecer alto, este se justifica por

los beneficios económicos y ambientales que daría a futuro porque se complementa con un buen tratamiento de aguas residuales.

Para la Pila de Combustible Microbiana los electrodos más factibles son C/PbO<sub>2</sub>, Latón/PbO<sub>2</sub> y Zn/PbO<sub>2</sub>, con porcentajes de Níquel lo mayor posible; es aplicable a pequeñas centrales y al igual que las pilas de combustible de H<sub>2</sub> la tecnología de construcción es simple y barata.

En nuestro Departamento del Cusco existe el recurso y la materia prima disponible para poder aplicar estas dos nuevas tecnologías, utilizando una metodología propia, si está al alcance de nuestras economías; por lo tanto, si es factible poder realizarlas.

- Título de paper: Aplicación de la tecnología de Pilas de Combustible Microbianas en depuración de aguas de origen urbano e industrial con producción simultánea de energía eléctrica.

Autor: F. Mateo-Ramírez, F.J. Hernández-Fernández, A.P. de los Rios, H. Addi, L.J. Lozano, C. Godínez

Institución: Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Politécnica de Cartagena- Murcia.

Problema objeto del estudio: Contaminación de aguas de origen urbano e industrial y utilizarlas como un posible recurso energético

Objetivo general: Comprobar si la tecnología de las pilas de combustible microbianas podrían ser una alternativa en el tratamiento de aguas de distintas procedencias y a su vez también demostrar la producción de energía eléctrica.

Metodología: Experimental

Conclusiones: La aplicación de una membrana polimérica como componente en una celda de combustible microbiana contribuye a la depuración de aguas servidas de distinta índole.

El rendimiento energético de las celdas de combustible microbianas es mayor en aguas de origen urbano de primera instancia.

Pese a lo descrito se verifica que las aguas procedentes de mataderos tienen una predisposición muy prometedora para aplicarlas en celdas de combustible microbianas, pues se aprecia que hay una relación directa entre el tiempo y el crecimiento bacteriano.

- Título de Tesis: Biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana.

Autor: Carlos Cervantes Astorga.

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México- Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.

Problema del estudio: Tratamiento de aguas residuales con tecnologías alternativas y que a su vez como sub producto generen energía eléctrica.

Objetivo general: evaluación de la degradación de materia orgánica y generación de corriente eléctrica en una celda de combustible microbiana alimentada con agua residual.

Metodología: Experimental

Conclusiones:

De la celda de combustible microbiana propuesta en este estudio con cátodo flotante al cual se le aplicó agua residual doméstica se obtuvo una densidad de corriente eléctrica de 50 mW/m<sup>2</sup> y a su vez depuraba el 68% de materia orgánica (expresada en DQO). Lo cual demuestra que con las aguas residuales domésticas se tiene un buen rendimiento energético.

Se pudo comprobar la curva característica de las celdas de combustible las cuales tienen una etapa de valores máximos, luego empiezan a decaer hasta llegar a los valores mínimos o estables de tensión a lo largo del tiempo.



Existe una resistencia externa lo cual afecta a la degradación del sustrato aplicado a las CCM, en este caso el fenol, pero se mejora los resultados si esta resistencia se iguala a la resistencia interna de la celda

Es posible construir CCM con materiales de bajo costo como fue el caso de este estudio que se fabricó con cátodo sin catalizador el cual generó densidad de corriente hasta 9.2 mW/m<sup>2</sup> y degradó materia orgánica entre 304 mgO<sub>2</sub>/L.

## 2.2. Marco Teórico

### 2.2.1. Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos que utilizan bacterias para oxidar la materia orgánica e inorgánica y generar corriente eléctrica (Logan, 2008); en ese entender luego de un análisis de varias investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo sobre esta nueva tecnología podemos identificar las siguientes partes principales de una CCM:

- El Ánodo
- El Cátodo
- La Cámara Anódica
- Membrana de intercambio protónico

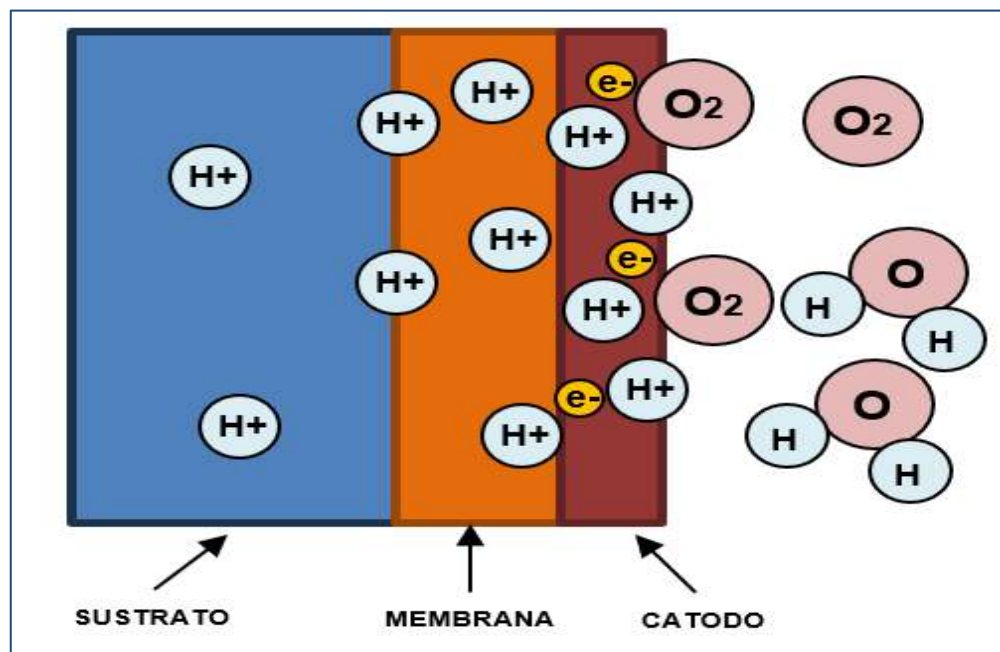
**ANODO:** El ánodo es el electrodo negativo donde suceden las reacciones del tipo Reducción; en este electrodo es donde se adhieren las bacterias sobre todo del tipo anaerobio y en ausencia de oxígeno desarrollan el proceso de metabolismo, desprendiendo electrones que serán direccionadas por este electrodo hacia una carga externa; cuando las bacterias desprenden electrones producen iones positivos de hidrogeno (H<sup>+</sup>) que emigran hacia el cátodo a través del sustrato.

**CATODO:** El Cátodo es el electrodo positivo donde se dan lugar las reacciones del tipo oxidación, los electrones que circulan por la carga emitidos por el ánodo terminan en el cátodo y con la recombinación de los  $H^+$  y el Oxígeno del aire forman moléculas de agua ( $H_2O$ ) y a su vez cierran el circuito de la corriente eléctrica generada.

**CAMARA ANODICA:** La cámara anódica es el espacio donde se deposita el sustrato en ausencia de oxígeno; este depósito contiene íntegramente al ánodo y parcialmente al cátodo para que sucedan las reacciones antes descritas.

**MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTONICO:** Este es un elemento complementario que se encuentra presente en algunas CCM, se ha comprobado que mejora bastante el rendimiento de las celdas realizando una disposición correcta, esta membrana usualmente es de NAFION, o un polímero conductor que permite el paso de protones o iones positivos hacia el cátodo, esta membrana se ubica de forma solidaria entre el cátodo y la cámara anódica.

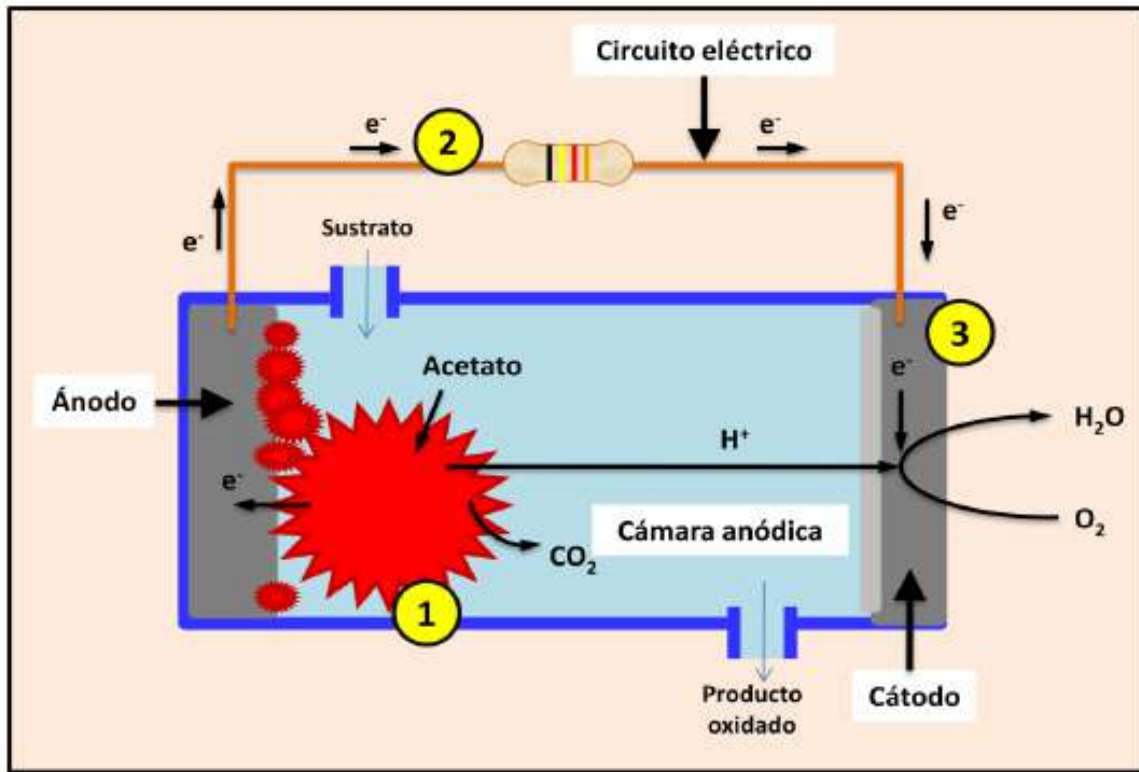
**Figura 5** Acción de la Membrana polimérica de intercambio protónico.



Nota. Elaboración Propia.

Una forma de esquematizar una CCM es como se aprecia en la siguiente figura:

**Figura 6** Esquema de una celda de combustible microbiana (CCM); 1) Semirreacción en el ánodo, 2) Carga y 3) Semirreacción en el cátodo.



Nota. (Buitrón Méndez, 2011).

Las bacterias presentes en el sustrato ingresado a la cámara anódica se adhieren al Ánodo y dependiendo a la composición del sustrato dichas bacterias realizaran su metabolismo desprendiendo electrones en este electrodo en condiciones anaerobias es decir oxidan el componente que se encuentre en el sustrato; si se conecta una carga o resistencia hacia el Cátodo habrá una circulación de corriente eléctrica. Cabe resaltar que las bacterias al realizar su metabolismo desprenden electrones en el Ánodo, pero también generan protones que emigran hacia el Cátodo en este electrodo los electrones que circularon por el circuito externo reaccionan con los protones y el aceptor final que en la mayoría de los casos es el Oxígeno externo, en condiciones

aerobias o anaerobias (reducción catódica) produce agua; cabe indicar que en algunas CCM se puede emplear una membrana de intercambio protónico la cual esta adherida sólidamente al Cátodo este tiene la función de facilitar las reacciones en este electrodo y que solo los protones o hidrogeniones ( $H^+$ ) que emigran a través del sustrato atraviesen para reaccionar con el oxígeno. Existe una variedad de sustratos producidos como desechos domésticos y aguas residuales, los cuales contienen desde compuestos puros como glucosa, acetato, sacarosa, lactosa, almidón; hasta mezclas complejas. Se sabe que los compuestos puros se pueden degradar de manera más simple lo que permite obtener mayor generación de energía e hidrógeno, por su parte los sustratos complejos requieren para su degradación una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa (BEA), cuyas poblaciones se van seleccionando dependiendo del tipo de sustrato (Trabajo de investigación experimental: Celdas de combustible microbiana: Electricidad por desechos orgánicos).

Las reacciones químicas que se dan lugar en los electrodos de una CCM de acuerdo al tipo componentes presentes en el sustrato se resume de la siguiente manera:

**Tabla 3** Potencial redox estándar y teórico para reacciones y condiciones típicas de celdas de combustible microbiológicas a 25 °C de temperatura.

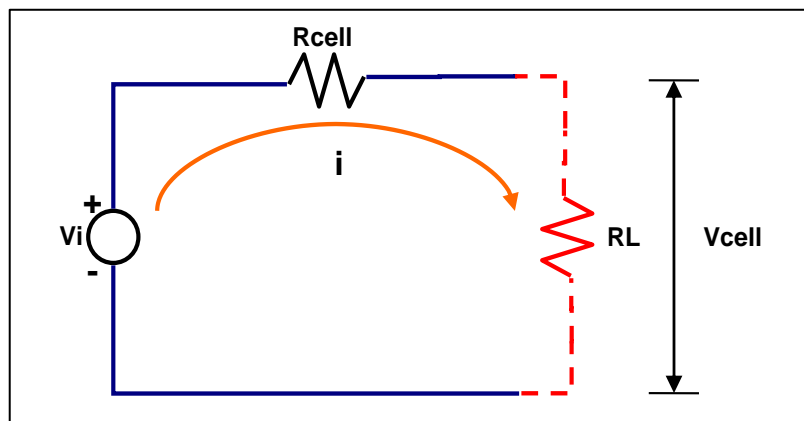
Electrodo	Semireacción	$E^0$ V vs NHE	Condiciones	$E$ V vs NHE
ánodo	$SO_4^{2-} + 8H^+ + 6e^- = S^0 + 4H_2O$	0,357	$[SO_4^{2-}] = 10\text{mM}$ pH=1,6	0,211
	$2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^- = CH_3COO^- + 4H_2O$	0,187	$[HCO_3^-] = 5\text{mM}$ $[CH_3COO^-] = 5\text{mM}$ pH=7	-0,300
	$6CO_2 + 24H^+ + 24e^- = C_6H_{12}O_6 + 6H_2O$	0,014	pH=7	-0,428
cátodo	$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	1,229	$pO_2 = 0,2$ pH=7	0,805
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	1,229	$pO_2 = 0,2$ pH=2,3	1,083
	$O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O_2$	0,695	$pO_2 = 0,2$ pH=7 $[H_2O_2] = 5\text{mM}$	0,370
	$Fe(CN)_6^{3-} + e^- = Fe(CN)_6^{4-}$	0,361	$[Fe(CN)_6^{3-}] = [Fe(CN)_6^{4-}]$	0,361
	$MnO_{2(s)} + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$	1,229	$[Mn^{2+}] = 5\text{mM}$ pH=7	0,470
	$Fe^{3+} + e^- = Fe^{2+}$	0,77	$[Fe^{3+}] = [Fe^{2+}]$ pH ácido	0,77

Nota. (Logan, 2008).

### 2.2.2. Modelamiento matemático de una celda de combustible microbiana (CCM)

El circuito equivalente simplificado de una Celda de Combustible Microbiana puede representarse como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 7** Circuito equivalente simplificado de una celda de combustible microbiana con carga.



Nota. (Gonzales Delgado, 2007).

Del circuito el voltaje en terminales de la celda de combustible o tensión en la carga será:

$$V_{cell} = V_i - iR_{cell} \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde  $R_{cell}$  es la resistencia interna de la celda en ( $\Omega$ );  $i$  es la corriente que circula por el circuito en (A);  $V_i$  representa la variación de tensión generada por el ánodo y cátodo individualmente en interacción con electrolito y los reactantes (medio contaminado) externos en (V) también se puede expresar Voltaje de la Celda como:

$$V_{cell} = V_{cátodo} - V_{ánodo} \dots\dots\dots (2.2)$$

Como parte de la teoría y de la investigación del funcionamiento de las CCM, es la búsqueda de materiales accesibles para la fabricación de los electrodos, por lo que dicha composición de materiales no son del todo inertes y éstos reaccionan químicamente con el medio en el que están sumergidos por lo cual existe un aporte de energía por los potenciales de los materiales de los electrodos y también la energía generada por las bacterias como se explicó anteriormente, en ese sentido me permito expresar el siguiente análisis matemático:

$$V_{cátodo} = E_{catM} + E_{cat} - \eta_{act}(cat) - \eta_{con}(cat) - \eta_{ohm}(cat) \dots\dots 2.3$$

$$V_{ánodo} = E_{anM} + E_{an} - \eta_{act}(an) - \eta_{con}(an) - \eta_{ohm}(an) \dots\dots 2.4$$

Donde:

$V_{ánodo}$  y  $V_{cátodo}$ : Potenciales totales de ánodo y cátodo respectivamente en (V).

$E_{catM}$   $E_{anM}$ : Potencial de ánodo y cátodo respectivamente debido al tipo de material en (V).

$E_{cat}$   $E_{an}$ : Potencial de ánodo y cátodo respectivamente producido por las bacterias en (V).

$\eta_{act}(cat)$  y  $\eta_{act}(an)$ : Polarización de ánodo y cátodo por activación respectivamente en (V) (también denominadas pérdidas por activación).

$\eta_{con}(cat)$  y  $\eta_{con}(an)$ : Polarización de ánodo y cátodo por concentración respectivamente en (V) (también denominadas pérdidas por concentración).

$\eta_{ohm}(cat)$  y  $\eta_{ohm}(an)$ : Polarización de ánodo y cátodo por resistencia ohmica en (V) (también denominadas pérdidas por resistencia interna de la celda).

### 2.2.2.1. Termodinámica de la celda de combustible microbiana (CCM)

La electricidad se genera en una CCM solo si la reacción global es termodinámicamente espontánea. La reacción puede ser evaluada en términos de la energía libre de Gibbs (expresada en Joules, J). Esta puede definirse como la medición del máximo trabajo que puede obtenerse de la reacción (Bard et al., 1985) y (Newman, 1973).

La energía libre de Gibbs se calcula como:

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln(\Pi) \dots\dots 2.5$$

Donde  $\Delta G_r$  (J) es la energía libre de Gibbs para condiciones específicas,  $\Delta G_r^0$  (J) es la energía libre de Gibbs bajo condiciones estándar, generalmente definidas como 298.15 K, 1 bar de presión, y a concentraciones 1 M para todas las especies, R (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) es la constante universal de los gases, T (K) es la temperatura absoluta, y  $\pi$  (adimensional) es la constante de equilibrio, calculado como el cociente de las actividades de los productos entre las actividades de los reactivos. La reacción estándar de la energía libre de Gibbs es calculada de las energías de formación tabuladas para compuestos orgánicos en agua, disponibles para muchas fuentes (Alberty, 2003), (Amend y Shock, 2001) y (Thaurer et al., 1977).

Para cálculos en CCM, es más conveniente evaluar la reacción en términos de la fuerza electromotriz total de la celda (fem), (V), definida como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo como se describió anteriormente. Esta se relaciona con el trabajo máximo, W (J), recuperable por la celda:

$$W = E_{emf}Q = -\Delta G_r \dots 2.6$$

Donde Q=nF es la carga transferida en la reacción, expresada en Coulomb (C), el cual se determina por medio del número de electrones transferidos en la reacción, n es el número de electrones transferidos por mol de reacción, y F es la constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol). Combinando estas dos ecuaciones, tenemos

$$E_{emf} = -\frac{\Delta G_r}{nF} \dots\dots\dots 2.7$$

Sí todas las reacciones son evaluadas bajo condiciones en que π = 1, entonces

$$E_{emf}^0 = -\frac{\Delta G_r^0}{nF} \dots\dots\dots 2.8$$

Donde E<sup>0</sup>emf (V) es la fuerza electromotriz estándar de la celda. Se puede por lo tanto emplear las ecuaciones de arriba para expresar la reacción global en términos del potencial como

$$E_{emf} = E_{emf}^0 - \frac{RT}{nF} \ln(\Pi) \dots\dots\dots 2.9$$

Esta última ecuación es el Potencial total en Voltios de una CCM, también conocida como ecuación de Nernst.



### 2.2.2.2.Potenciales de electrodos

Los potenciales individuales en los electrodos en términos de la ecuación de Nernst.

Para el caso del cátodo la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$E_{catM} = E^0_{catM} - \frac{RT}{nF} \ln (Q_{cat}) \dots\dots\dots 2.10$$

Donde:

$E_{catM}$  : Potencial del cátodo debido al material (V).

$E^0_{catM}$  : Potencial estándar del material del cátodo (V).

R: Constante universal de los gases (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

F: Constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol).

T: Temperatura absoluta (°K).

n: Numero de electrones que intervienen en las reacciones del cátodo material.

Q<sub>cat</sub>: Cociente de los moles productos entre los reactantes en el cátodo (adimensional).

Y similarmente para el ánodo se tiene:

$$E_{anM} = E^0_{anM} - \frac{RT}{nF} \ln (Q_{an}) \dots\dots\dots 2.11$$

Donde:

$E_{anM}$  : Potencial del ánodo debido al material (V)

$E^0_{anM}$  : Potencial estándar del material del ánodo (V)

R: Constante universal de los gases (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

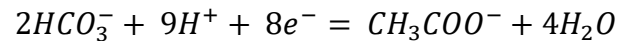
F: Constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol)

T: Temperatura absoluta (°K)

n: Numero de electrones que intervienen en las reacciones del ánodo material

Q: Cociente de los moles productos entre los reactantes en el ánodo (adimensional)

Ahora bien, los potenciales en electrodos debido a la intervención bacteriana también se deben evaluar independientemente tomando en consideración las semirreacciones que ocurren en cada electrodo (tabla 01), es así por ejemplo si en el ánodo se oxida el acetato estará dado de la siguiente manera:



$$E_{an} = E^0_{an} - \frac{RT}{8F} \ln \left( \frac{[CH_3COO^-]}{[HCO_3^-]^2 [H^+]^9} \right) \dots\dots 2.12$$

Donde:

$E_{an}$  : Potencial en el ánodo de la semirreacción bacteriana (V)

$E^0_{an}$  : Potencial estándar de la semirreacción bacteriana en el ánodo (V)

R: Constante universal de los gases (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

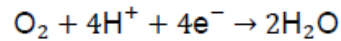
F: Constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol) (96500 para caso práctico)

T: Temperatura absoluta (°K)

n: Numero de electrones que intervienen en la semirreacción bacteriana del ánodo

Q: Cociente de los moles productos entre los reactantes en el ánodo (adimensional)

Para el caso del cátodo si como elemento aceptor es el oxígeno (reducción) entonces la semirreacción y ecuación del potencial será como sigue:



$$E_{cat} = E^0_{cat} - \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{[1]}{\text{O}_2[\text{H}^+]^4} \right) \dots\dots 2.13$$

Donde:

$E_{cat}$  : Potencial en el cátodo de la semirreacción bacteriana (V)

$E^0_{cat}$  : Potencial estándar de la semirreacción bacteriana en el cátodo (V)

R: Constante universal de los gases (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

F: Constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol) (96500 para caso práctico)

T: Temperatura absoluta (°K)

n: Numero de electrones que intervienen en la semirreacción bacteriana del cátodo

Q<sub>cat</sub>: Cociente de los moles productos entre los reactantes en el cátodo (adimensional)

Los potenciales estándar de Reducción debido al material de los electrodos, son potenciales obtenidos a una temperatura media de 25 °C en condiciones normales en la siguiente tabla se puede apreciar los potenciales estándar de diferentes tipos de elementos y soluciones químicas:

Tabla 4 Potenciales Estándar de Reducción a 25 °C.

SEMIRREACCIÓN	E°(V)
$\text{Li}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Li}(s)$	-3.05
$\text{K}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{K}(s)$	-2.93
$\text{Ba}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ba}(s)$	-2.90
$\text{Sr}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sr}(s)$	-2.89
$\text{Ca}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ca}(s)$	-2.87
$\text{Na}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Na}(s)$	-2.71
$\text{Mg}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}(s)$	-2.37
$\text{Be}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Be}(s)$	-1.85
$\text{Al}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Al}(s)$	-1.66
$\text{Mn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mn}(s)$	-1.18
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2(g) + 2\text{OH}^-(ac)$	-0.83
$\text{Zn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}(s)$	-0.76
$\text{Cr}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}(s)$	-0.74
$\text{Fe}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}(s)$	-0.44
$\text{Cd}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}(s)$	-0.40
$\text{PbSO}_4(s) + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}(s) + \text{SO}_4^{2-}(ac)$	-0.31
$\text{Co}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Co}(s)$	-0.28
$\text{Ni}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ni}(s)$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}(s)$	-0.14
$\text{Pb}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}(s)$	-0.13
$2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2(g)$	0.00
$\text{Sn}^{4+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}^{2+}(ac)$	+0.13
$\text{Cu}^{2+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Cu}^+(ac)$	+0.15
$\text{SO}_4^{2-}(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{SO}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{AgCl}(s) + e^- \longrightarrow \text{Ag}(s) + \text{Cl}^-(ac)$	+0.22
$\text{Cu}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}(s)$	+0.34
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \longrightarrow 4\text{OH}^-(ac)$	+0.40
$\text{I}_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2\text{I}^-(ac)$	+0.53
$\text{MnO}_4^-(ac) + 2\text{H}_2\text{O} + 3e^- \longrightarrow \text{MnO}_2(s) + 4\text{OH}^-(ac)$	+0.59
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2(ac)$	+0.68
$\text{Fe}^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(ac)$	+0.77
$\text{Ag}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Ag}(s)$	+0.80
$\text{Hg}_2^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Hg}(l)$	+0.85
$2\text{Hg}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Hg}_2^{2+}(ac)$	+0.92
$\text{NO}_3^-(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{NO}(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.96
$\text{Br}_2(l) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Br}^-(ac)$	+1.07
$\text{O}_2(g) + 4\text{H}^+(ac) + 4e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{MnO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(ac) + 14\text{H}^+(ac) + 6e^- \longrightarrow 2\text{Cr}^{3+}(ac) + 7\text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{Cl}_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-(ac)$	+1.36
$\text{Au}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Au}(s)$	+1.50
$\text{MnO}_4^-(ac) + 8\text{H}^+(ac) + 5e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 4\text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Ce}^{4+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Ce}^{3+}(ac)$	+1.61
$\text{PbO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + \text{SO}_4^{2-}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{PbSO}_4(s) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2(ac) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{Co}^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Co}^{2+}(ac)$	+1.82
$\text{O}_3(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{O}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l)$	+2.07
$\text{F}_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2\text{F}^-(ac)$	+2.87

Fuerza oxidante creciente

Fuerza reductora creciente

Nota. Wikipedia.

### 2.2.3. Polarización en electrodos

En la practica la tensión final o potencial de una CCM se ve afectada por la aparición de tensiones que restan en muchos casos al potencial teórico de la celda, esto sucede principalmente cuando se hace circular la corriente entre los electrodos de la celda, a estas tensiones que restan se le conoce como tensiones polarizadas o pérdidas; de las cuales las más principales e identificables son las siguientes:

- Polarización por activación.
- Polarización por concentración.
- Polarización Óhmica.

#### 2.2.3.1. Polarización por activación

La cinética de las reacciones anódica y catódica está limitada por una barrera conocida como energía de activación, la cual impide que los sustratos reducidos se conviertan a productos oxidados, en el caso del ánodo; y que los sustratos oxidados se conviertan en productos reducidos en el caso del cátodo. El voltaje empleado para vencer esta barrera es conocido como pérdidas de activación  $\eta_{act}$ , está dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_o} \dots (2.14)$$

Donde:

$\alpha$  es el coeficiente de transferencia de electrones, para una situación óptima o ideal puede ser igual a 1.

n: Es el número de electrones.

R: Constante universal de los gases (8.31447 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

F: Constante de Faraday (9.64853 x 10<sup>4</sup> C/mol) (96500 para caso práctico)

T: Temperatura (°K)

$i$  : Corriente que circula por el circuito (A) o densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>).

$i_o$  : Corriente de intercambio (A) o densidad de corriente de intercambio (mA/cm<sup>2</sup>)

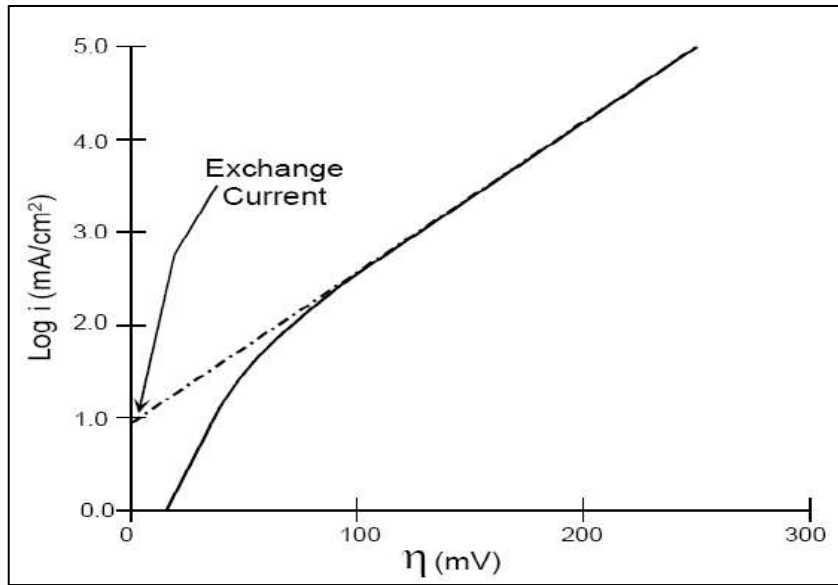
Los diagramas de Tafel proporcionan una comprensión visual de la polarización de activación de una célula de combustible. Se utilizan para medir la densidad de corriente de intercambio (dada por la intercepción extrapolada en  $\eta_{act}=0$  que es una medida de la corriente máxima que se puede extraer en la polarización) y el coeficiente de la transferencia (de la pendiente).

La forma usual de la ecuación de Tafel puede expresarse:

$$\eta_{act} = a + b \log i \quad \dots (2.15)$$

Donde  $a = (-2.3RT/\alpha nF) \log(i_o)$  y  $b = 2.3RT/\alpha nF$ . El término  $b$  es llamado pendiente de Tafel; y se obtiene de la pendiente de la gráfica  $\log(i)$  en función  $\eta_{act}$ .

**Figura 8** Ejemplo de una gráfica de Tafel.



Nota. (Gonzales Delgado, 2007).

Algunos resultados de la densidad de corriente de intercambio para ciertos metales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5** Densidad de corriente de intercambio característica de algunos metales.

Metal	$-\text{Log } I_0 \text{ (A.cm}^{-2}\text{)}$	Metal	$-\text{Log } I_0 \text{ (A.cm}^{-2}\text{)}$
Ag	5.4	Ni	5.2
Au	5.5	Pb	12.2
Cd	11.0	Pd	2.3
Co	5.2	Pt	3.6
Cr	7.4	Rh	2.8
Cu	6.7	Ru	2.1
Fe	6.0	W	7.0
Hg	12.5	Zn	10.5

Nota. (Gonzales Delgado, 2007).

Las pérdidas de activación dominan a densidades de corriente bajas y presentan una forma exponencial característica en las curvas densidad de corriente-voltaje. La magnitud de las pérdidas

de activación depende de la cinética de las reacciones anódica y catódica. La cinética de la reacción se puede mejorar incrementando la temperatura de operación y a través de la formación de una biopelícula adecuada en los electrodos (Logan, 2008).

Finalmente mencionaremos la densidad de corriente  $J$  haciendo las conversiones respectivas en ( $A/m^2$ ); estará dada por:

$$J = \frac{i}{A} = nFj \quad \dots (2.16)$$

Donde:

$J$ : Densidad de corriente ( $A/m^2$ )

$i$ : Corriente que circula por el circuito (A).

$n$ : Es el número de electrones.

$F$ : Constante de Faraday ( $9.64853 \times 10^4$  C/mol) (96500 para caso práctico)

$A$ : Área del electrodo ( $m^2$ )

$j$ : es el flujo de las especies (electrolito y gases) en la superficie del electrodo ( $mol/s \cdot m^2$ ).

### **2.2.3.2. Polarización por concentración o transporte de masa**

Las pérdidas por concentración o transporte de masa,  $\eta_{conc}$ , se presentan cuando se agotan los reactivos y se acumulan los productos en el sitio de reacción (se forma un gradiente de concentración), lo que causa que el desempeño de la CCM baje. Las pérdidas por transporte de masa se manifiestan como la caída de voltaje debido al agotamiento de los reactivos y a la acumulación de los productos en el sitio de reacción. Las pérdidas por transporte de masa dominan a densidades



de corriente altas y presentan una forma exponencial cóncava característica en las curvas densidad de corriente-voltaje.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \dots\dots 2.18$$

Donde  $i_L$  es el corriente límite (A).

El corriente límite se puede calcular experimentalmente y equivale a la siguiente fórmula:

$$i_L = 10.5n_T A \dots (2.19)$$

$n_T$  : Número de electrones totales de las reacciones de electrodo (ánodo ó cátodo).

A: Área de la superficie del electrodo ( $m^2$ )

La Corriente (i) que circula por el circuito está relacionada con el área de los electrodos; mientras más sea este; mayor será la corriente y la densidad de la misma; para que una celda de combustible mantenga la corriente esta estará dada por la ecuación:

$$i = nFAj \dots 2.20$$

Donde:

n: Número de electrones.

F: Constante de Faraday = 96500 °C

A: Área de la superficie del electrodo ( $m^2$ )

j: es el flujo de las especies (sustrato) en la superficie del electrodo ( $\text{mol/s. } m^2$ ).

El flujo j esta dado por:

$$j = -D \left( \frac{dC}{dx} \right)_{x=0} \cong D \frac{(C^* - C_{x=0})}{\Delta x} \dots\dots 2.21$$

Donde D es el coeficiente de difusión de las especies en (m<sup>2</sup>/s); (dc/dx) x=0, es el gradiente de concentración en la superficie; x es la distancia a la superficie del electrodo (m); C\* es la concentración de las especies en el seno de la solución (M = mol) y C<sub>x=0</sub> es la concentración en la superficie del electrodo.

Para nuestro modelo computarizado utilizamos como coeficiente de difusión la siguiente ecuación:

$$(D_k)_A = 9.7 \times 10^3 a \left( \frac{T}{M_A} \right)^{1/2} \dots\dots 2.22$$

Esta es una ecuación experimental que nos da el valor numérico de la difusión de líquidos y gases en superficies relacionando la masa molecular MA de la especie a difundir; y el radio de los poros de la superficie del electrodo (m.) a una temperatura T en (°K); cabe mencionar que esta ecuación solo es para obtener un valor numérico de la difusión, aunque dimensionalmente no sea correcto se sobreentenderá que el resultado está en (m<sup>2</sup>/s). También se puede aplicar otro tipo de ecuaciones.

Para calcular el radio de una lámina de electrodo se consideró la estructura cristalina del material (metales) es decir los huecos intersticiales que existen en las configuraciones metálicas; tomando en cuenta las configuraciones posibles:

$$a = 0.225r \times 10^{-10}$$

Para empaquetamiento cúbico compacto (CCP) y empaquetamiento hexagonal compacto (HCP); posición intersticial tetraédrica.

$a = 0.414r \times 10^{-10}$  Para empaquetamiento cúbico compacto (CCP) y empaquetamiento hexagonal compacto (HCP); posición intersticial octaédrica.

Donde “a” es el radio del poro o hueco intersticial de la lámina metálica (m.); r es el radio atómico del elemento en angstroms (Å); ( $1\text{Å} = 10^{-10}$  m.).

Sin embargo, es de notar que en el ánodo ocurren las reacciones químicas generadas por el metabolismo bacteriano y es aquí que el coeficiente de difusión debe estar relacionado con la masa bacteriana o microbiana; en tal sentido la última ecuación experimental con relación a las bacterias estará dada de la siguiente forma:

$$D_b = 9.7 \times 10^3 a \cdot b \cdot \left(\frac{T}{M_b}\right)^{1/2} \dots 2.23$$

Donde:

$D_b$ : Coeficiente de difusión bacteriana.

$M_b$ : Masa bacteriana en un volumen de aguas residuales o sustrato contaminado.

b: Factor de movilidad microbiana experimental ( $5 \cdot 10^{-12}$ ).

La masa bacteriana  $M_b$ , está relacionada con el número más probable (NMP) de bacterias contenidas en un medio contaminado por masa unitaria aproximada de una bacteria y este por el crecimiento bacteriano en un determinado periodo:

$$M_b = (NMP)A \cdot x \cdot Pu \cdot (exp^t) \dots 2.24$$

NMP: Numero más probable de bacterias en 1 ml de sustrato (aproximado promedio 12000 bacterias/ml).

A: Área del electrodo en m<sup>2</sup>.

x: Espaciamiento entre electrodos en m.

$exp^t$ : función exponencial de crecimiento bacteriano en un periodo de tiempo.

Pu: Peso Unitario aproximado de bacterias tipo (aproximado  $10^{-12}$ g).

Finalmente:

El flujo de las especies en el Ánodo estará dado por:

$$j = NMP \cdot A \cdot x \cdot Db \dots (2.25)$$

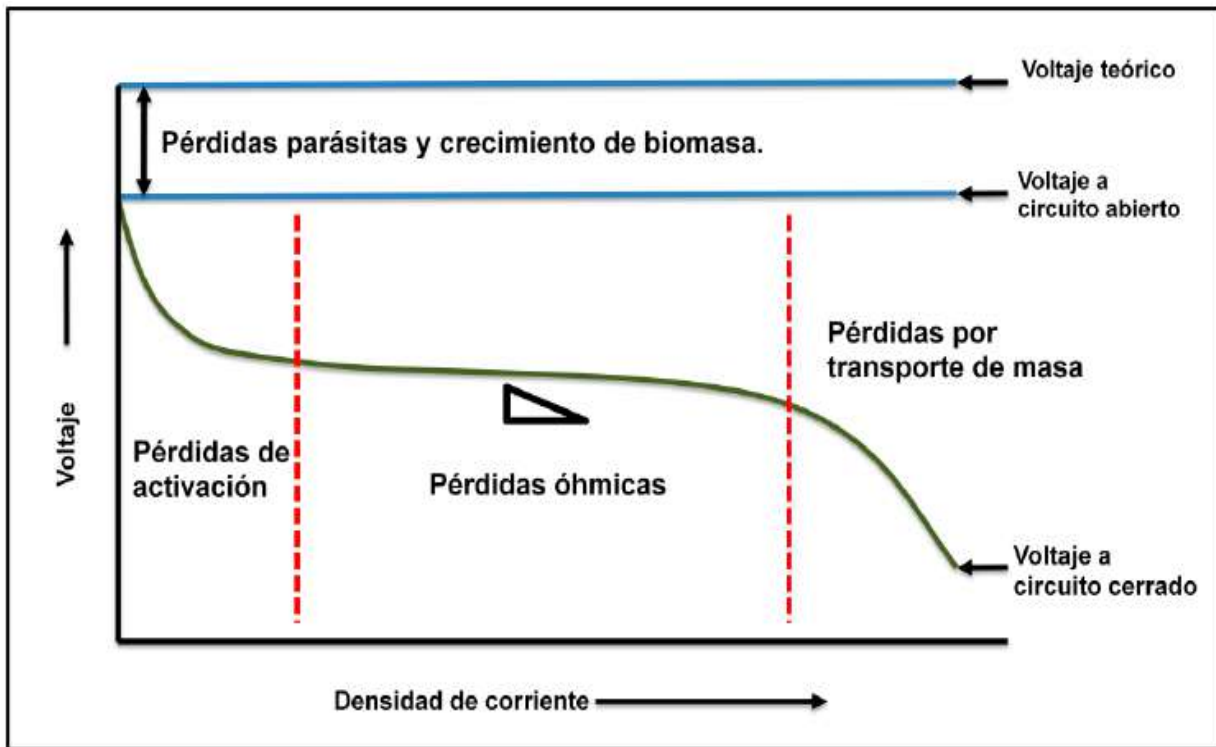
#### 2.1.1.1. Polarización óhmica o pérdidas óhmicas

Las pérdidas óhmicas,  $\eta_{ohm}$ , son causadas por la resistencia al transporte de iones a través del electrolito, medio o sustrato y la resistencia al flujo de electrones a través de los electrodos, colectores de corriente e interconexiones, y la resistencia de contacto (EG&G Technical Services, 2004). Por lo tanto, las pérdidas óhmicas representan el voltaje que se pierde cuando se transportan las cargas (es decir, los electrones, aniones y cationes) (Rismani-Yazdi et al., 2008). Las pérdidas óhmicas se pueden reducir, disminuyendo el espacio entre los electrodos, empleando electrodos de resistividad baja, disminuyendo la resistencia de contacto, e incrementando la conductividad de la solución al máximo tolerado por las bacterias (Logan, 2008). Las pérdidas óhmicas pueden ser expresadas por la Ley de Ohm como sigue:

$$\eta_{\text{óhmica}} = iR_{\text{óhmica}} \dots (2.26)$$

Para analizar las pilas de combustible; lo principal es saber la tensión y la corriente que pueden suministrar, de estos dos parámetros parten otros muy importantes como la potencia, eficiencia, consumo de bacterias, H<sub>2</sub>, etc. Este análisis se hace utilizando las curvas características o de polarización de la celda; voltaje de la celda ( $V_{cell}$ ) versus corriente o densidad de corriente ( $J_{cell}$ ) ( $V$  vs  $J$ ) que se obtienen a partir de la ecuación (2.2) voltaje total de la celda en un régimen de corriente o densidad de corriente como las ecuaciones (2.3) o (2.4). Es así que la forma general de la curva característica de una celda de combustible es como se muestra en la figura:

**Figura 9** Curva característica ideal de las pilas de combustible.



Nota. (Buitrón Méndez, 2011).

## 2.2.4. Agrupamiento de Celdas de Combustible Microbianas

Al apilamiento de varias celdas de combustible se denomina Pila de Combustible Microbiana (PCM).

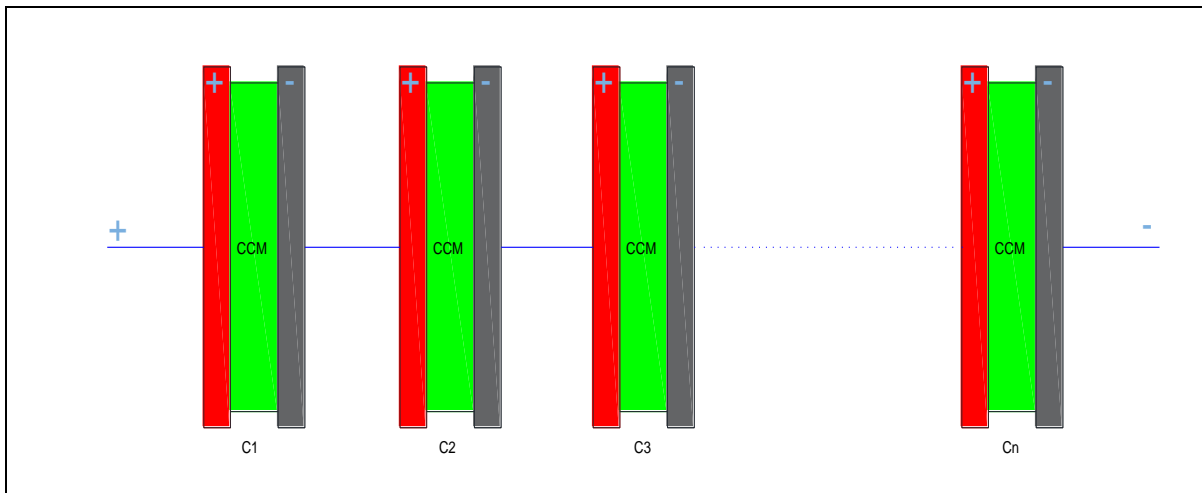
Las celdas microbianas se pueden agrupar en serie para ganar tensión, y en paralelo para sumar corriente; a este conjunto de celdas se le denomina pila; lo cual a su vez hace un sistema de pilas microbianas.

### 2.2.4.1. Apilamiento de Celdas de Combustible Microbiana en Serie

En un apilamiento en serie de CCM la tensión total estará dada de la siguiente forma:

$$V_{pcm_T} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + \dots + V_{Cn} \dots (2.27)$$

**Figura 10** Apilamiento de Celda de Combustible Microbiana en serie.



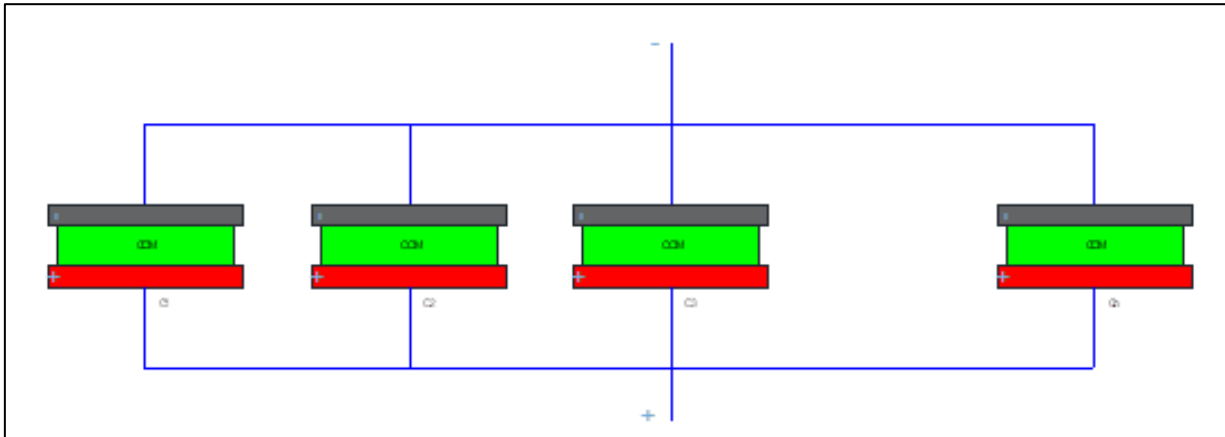
Nota. Elaboración Propia.

### 2.2.4.2. Apilamiento de Celdas de Combustible Microbiana en Paralelo

En un apilamiento en paralelo de CCM la corriente total estará dada de la siguiente forma:

$$I_{pcm_T} = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + \dots + I_{Cn} \dots (2.28)$$

**Figura 11** Apilamiento de Celda de Combustible Microbiana en paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

### 2.2.5. Densidad de Potencia de Celda Microbiana

Es importante evaluar la densidad de potencia de celdas microbianas para estimar la capacidad de energía que pueden dotar; la densidad de potencia está en función al área del electrodo negativo o ánodo que es donde se depositan las bacterias y está dada de la siguiente manera:

$$P_{An} = \frac{V_{prom} \cdot iL}{A} \dots (2.29)$$

$P_{An}$ : Densidad de potencia (W/m<sup>2</sup>)

$V_{prom}$ : Tensión promedio de celda (V)

$iL$ : Corriente límite de celda (A)

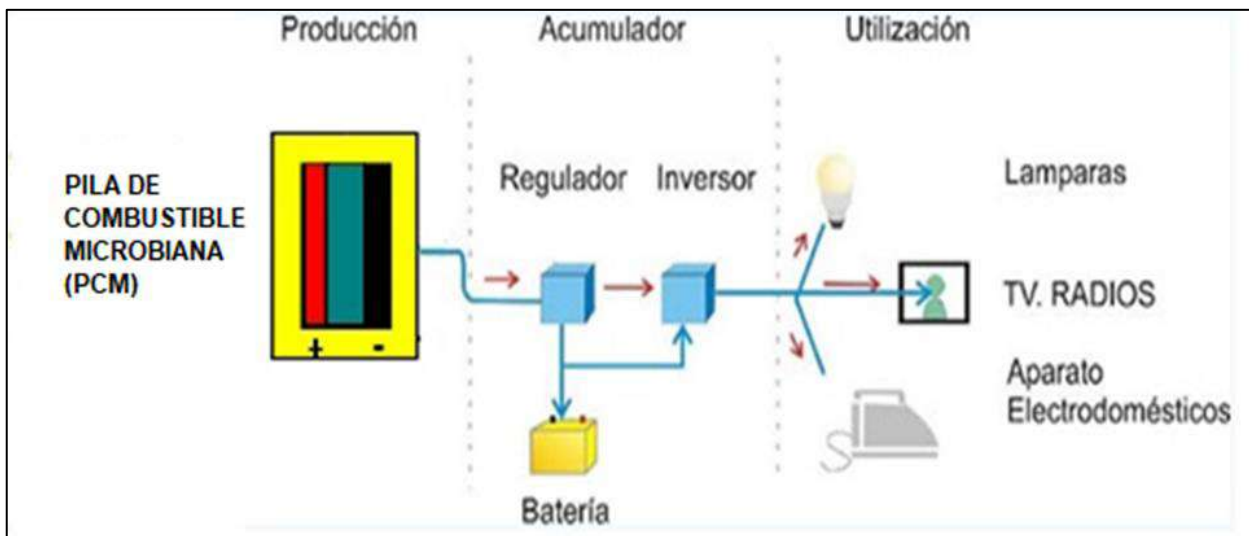
$A$ : Área del electrodo (m<sup>2</sup>)

### 2.2.6. Módulo de Suministro de energía con Pila de Combustible Microbiana

Un módulo con PCM, es la implementación de un sistema que sirve para la utilización de la energía eléctrica, generada por un agrupamiento de celdas de combustible microbianas; cuya energía se podría emplear en uso doméstico rural.

Cabe indicar que este tipo de módulo, tiene similares características que los módulos de paneles fotovoltaicos y es así que sus accesorios complementarios serían los mismos; la utilización del módulo PCM puede lograr configuraciones en los sistemas conocidos comercialmente para dotar de energía utilizable como son: sistema Monofásico 220V, trifásico 380/220V. Un módulo básico con PCM tendría la siguiente configuración.

**Figura 12** Esquema de un módulo con PCM para el suministro de energía utilizable.



*Nota. Elaboración Propia.*

#### 2.2.6.1. Regulador de Carga

El regulador de carga trabaja como un controlador de voltaje, por lo que también es conocido con el nombre de controlador de carga. La principal función es evitar que la batería sea sobrecargada



por el sistema de PCM y protegerla de una descarga al mínimo por las cargas de consumo. El controlador monitorea constantemente el voltaje de la batería, cuando las baterías están completamente cargadas, el controlador detendrá o disminuirá la cantidad de corriente que circule desde las PCM hacia las baterías. Cuando las baterías se descargan a un nivel muy bajo, desconectarán la corriente que fluye de las baterías a los aparatos conectados.

**Figura 13** *Regulador o controlador de carga*



Nota. Wikipedia.

#### **2.2.6.2. Batería**

Las baterías almacenan energía eléctrica de CD en forma química. Su función es la de acumular la energía que se produce las PCM para poder ser utilizada por las cargas conectadas al módulo. También tienen la función de proveer una intensidad de corriente sustentable en complemento con las PCMs; las más utilizadas en la actualidad son para estas aplicaciones son las del tipo seco.

Las baterías secas o baterías libre de mantenimiento, son aquellas baterías que como su propio nombre indica no requieren de un mantenimiento periódico. Se trata de baterías que facilitan

el mantenimiento de todo el módulo de PCM, ya que no debe estar pendiente de las mismas y de rellenar sus niveles de ácido con agua destilada, las tensiones que se manejan comúnmente con estos acumuladores son de: 12 V, 24 V. Y 48 V.

Los tipos de baterías secas más comerciales son las siguientes:

- Baterías AGM. En esta tipología de batería el electrolito interno se absorbe en una fibra de vidrio situado entre las placas.
- Baterías de GEL. El electrolito de estas baterías se encuentra en forma de GEL, compuesto de silicona, como una masa gelatinosa que ofrece mayor duración y cantidad de ciclos de vida a la batería.
- Acumuladores Solares OpzV o baterías estacionarias de gel: baterías selladas cuyo electrolito interno se encuentra también gelificado, pero la diferencia con las anteriores, es el formato monoblock de 2V que estas tienen.
- Baterías con tecnología de Litio, que emplean como electrolito unas sales de litio para lograr la liberación de los electrones a cabo de reacciones químicas que liberan y almacenan energía eléctrica.

**Figura 14** *Batería o acumulador tipo seco.*



Nota. Wikipedia

### **2.2.6.3. Inversor**

Las PCM generan energía de corriente directa y las baterías solo pueden almacenar la energía en forma de corriente directa. La mayoría de los aparatos y cargas operan con corriente alterna. Por su naturaleza, la CD no es compatible con la CA, por lo que se hace necesario un “puente” o inversor entre las dos. El propósito fundamental del inversor es cambiar la CD de los módulos con PCM y de las baterías a CA y finalmente posibilitar el funcionamiento de las cargas de CA.

Se basan en el empleo de dispositivos electrónicos que actúan como interruptores, permitiendo interrumpir las corrientes e invertir su polaridad.

#### **Especificaciones de inversores en PCM autónomos**

a. Potencia de salida de CA (Watt): Nos indica cuanta potencia puede brindar un inversor durante su operación. Se debe elegir un inversor que satisfaga la demanda pico del sistema. Es decir, el inversor debe ser capaz de manejar todas las cargas de CA que puedan estar encendidos al mismo tiempo.

b. Voltaje de entrada de CD desde la batería: El inversor especificará que salida de voltaje nominal CD se permite desde las baterías. Los voltajes típicos son 12V, 24V y 48V.

c. Voltaje de salida: El inversor especificará el voltaje de salida de CA. El valor típico es de 220V.

d. Frecuencia: Un inversor debe mantener una salida de 50 a 60Hz. Las características deseables en un inversor son:

- Alta eficiencia, la mayoría de los inversores actualmente convierten un 90% o más de la CD de entrada en CA de salida.
- Baja pérdida de espera, el inversor debe mantener 50 a 60Hz en la salida a pesar de que varíen las condiciones de entrada.
- Distorsión armónica, el inversor debe suavizar los picos de salida indeseables para minimizar efectos de calentamiento dañinos en los aparatos conectados.
- Fiabilidad, el inversor debe brindar la confianza de un bajo mantenimiento largo plazo.

**Figura 15** *Inversor DC-AC.*



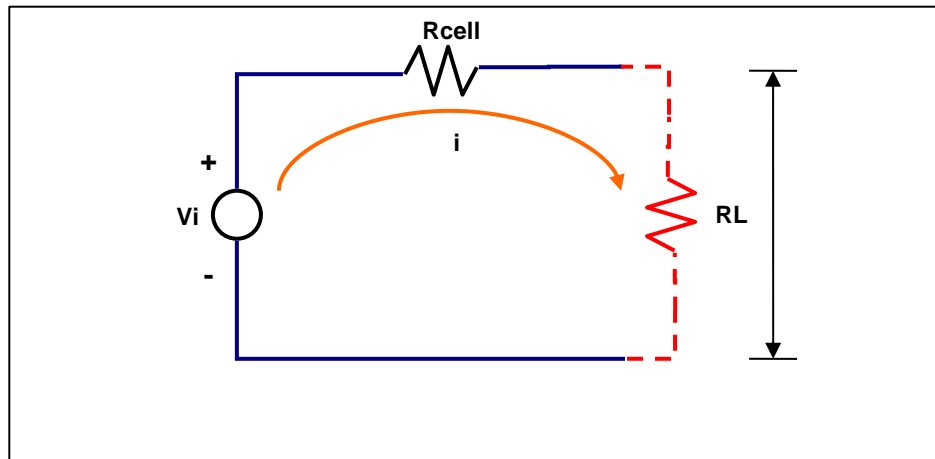
Nota. Wikipedia.

### CAPITULO III: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN ELECTRICA CON PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS

#### 3.1. Modelamiento de una Celda de Combustible Microbiana (CCM)

El circuito equivalente simplificado de una Celda de Combustible Microbiana puede representarse como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 16** Circuito equivalente simplificado de una celda de combustible microbiana con carga.



Nota. (Gonzales Delgado, 2007).

Del circuito el voltaje en terminales de la celda de combustible o tensión en la carga será:

$$V_{cell} = V_i - iR_{cell} \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde  $R_{cell}$  es la resistencia interna de la celda en ( $\Omega$ );  $i$  es la corriente que circula por el circuito en (A);  $V_i$  representa la variación de tensión generada por el ánodo y cátodo individualmente en interacción con electrolito y los reactantes (medio contaminado) externos en (V) también se puede expresar Voltaje de la Celda como:

$$V_{cell} = V_{cátodo} - V_{ánodo} \dots\dots\dots (2.2)$$

Es importante indicar que los materiales para la fabricación de electrodos no son del todo inertes y estos reaccionan químicamente con el medio en el que están sumergidos, por lo cual existe un aporte de energía por los potenciales de los materiales de los electrodos y también por la energía generada por las bacterias; en ese sentido se expresa el siguiente análisis matemático:

$$V_{\text{cátodo}} = E_{\text{cat}M} + E_{\text{cat}} - \eta_{\text{act}}(\text{cat}) - \eta_{\text{con}}(\text{cat}) - \eta_{\text{ohm}}(\text{cat}) \dots 2.3$$

$$V_{\text{ánodo}} = E_{\text{an}M} + E_{\text{an}} - \eta_{\text{act}}(\text{an}) - \eta_{\text{con}}(\text{an}) - \eta_{\text{ohm}}(\text{an}) \dots 2.4$$

Donde:

$V_{\text{ánodo}}$  y  $V_{\text{cátodo}}$ : Potenciales totales de ánodo y cátodo respectivamente en (V).

$E_{\text{cat}M}$   $E_{\text{an}M}$ : Potencial de ánodo y cátodo respectivamente debido al tipo de material en (V) (Se desarrollo en el CAPITULO II).

$E_{\text{cat}}$   $E_{\text{an}}$ : Potencial de ánodo y cátodo respectivamente producido por las bacterias en (V). (Se desarrolló en el CAPITULO II)

$\eta_{\text{act}}(\text{cat})$  y  $\eta_{\text{act}}(\text{an})$ : Polarización de ánodo y cátodo por activación respectivamente en (V) (también denominadas pérdidas por activación) (Se desarrolló en el CAPITULO II).

$\eta_{\text{con}}(\text{cat})$  y  $\eta_{\text{con}}(\text{an})$ : Polarización de ánodo y cátodo por concentración respectivamente en (V) (también denominadas pérdidas por concentración) (Se desarrolló en el CAPITULO II).

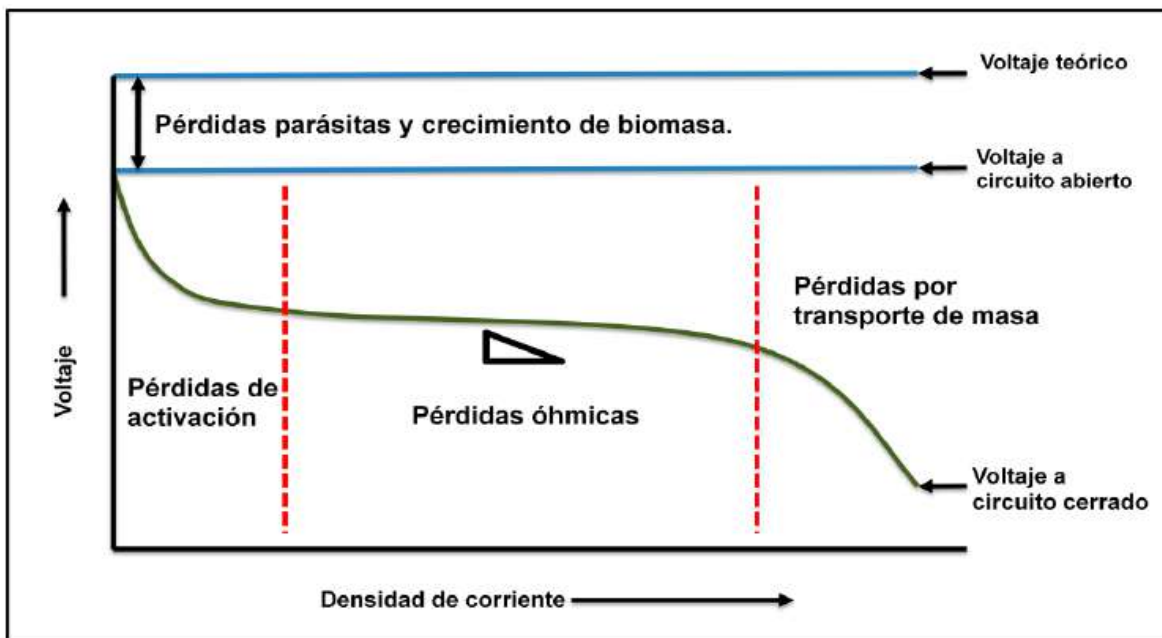
$\eta_{\text{ohm}}(\text{cat})$  y  $\eta_{\text{ohm}}(\text{an})$ : Polarización de ánodo y cátodo por resistencia óhmica en (V) (también denominadas pérdidas por resistencia interna de la celda) (Se desarrolló en el CAPITULO II).

Como se indica las perdidas o polarizaciones tanto en el ánodo y cátodo se desarrollaron en el CAPITULO II; es importante aclarar que para hacer un análisis más preciso de los fenómenos

que ocurren en una CCM, se debe evaluar las semirreacciones que se dan de manera independiente en el ánodo y en el cátodo para luego integrarlas y obtener los resultados a analizar.

Para el análisis de una CCM se evalúa la curva característica que viene dada por el Voltaje vs Densidad de Corriente, como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 17** Curva característica ideal de las pilas de combustible.



*Nota.* (Buitrón Méndez, 2011).

En el CAPITULO II se desarrolló y formularon todos los parámetros necesarios para la obtención de la curva característica de una CCM y para esta experimentación teórica aplicaremos tres pares de materiales, en los que se ha analizado que sus potenciales teóricos estándar conjugarían de mejor manera para una posible construcción de una CCM, los pares seleccionados para experimentación son:

**Tabla 6** Conjugación de pares de materiales para una CCM y datos de entrada para el modelamiento matemático en Simulink.

ITEM CONJUGACION	CATODO (+)						ANODO (-)					
	MATERIAL	SEMIREACCION	MATRIZ DE DATOS DE ENTRADA SIMULINK				MATERIAL	SEMIREACCION	MATRIZ DE DATOS DE ENTRADA SIMULINK			
			POTENCIAL ESTÁNDAR (V)	NRO DE ELECTRONES	MOLES PRODUCTOS	MOLES REACTANTES			POTENCIAL ESTÁNDAR (V)	NRO DE ELECTRONES	MOLES PRODUCTOS	MOLES REACTANTES
1	OXIDO DE PLOMO	$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	1.458	2	1	4	PLOMO	$Pb^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Pb(s)$	1.69	2	1	1
2	OXIDO DE PLOMO	$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	1.458	2	1	4	ALUZINC (55% Al; 43.4% Zn; 1.6% Si)	$Al^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Al(s)$ $Zn^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Zn(s)$ $Si + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow SiH_4$	-1.67 -0.762 <u>-0.147</u> -1.25541	3	1	1
3	OXIDO DE PLOMO	$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	1.458	2	1	4	ALUMINIO	$Al^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Al(s)$	-1.677	3	1	1

Nota. (W. H. Freeman and Company, 2003).

De igual forma el análisis de las semirreacciones que ocurren en el sustrato contenida en una CCM se evalúa de manera independiente en el Cátodo y Ánodo; para este análisis se considera el acetato, que es el sustrato que mayormente se encuentra en aguas residuales y material orgánico de desecho, y se representa de la siguiente forma:

**Tabla 7** Semirreacciones en cátodo y ánodo en una CCM y datos de entrada para el modelamiento matemático en Simulink.

ITEM	CATODO (+)						ANODO (-)					
	SUSTRATO	SEMIREACCION	MATRIZ DE DATOS DE ENTRADA SIMULINK				ELEMENTO	SEMIREACCION	MATRIZ DE DATOS DE ENTRADA SIMULINK			
			POTENCIAL ESTÁNDAR (V)	NRO DE ELECTRONES	MOLES PRODUCTOS	MOLES REACTANTES			POTENCIAL ESTÁNDAR (V)	NRO DE ELECTRONES	MOLES PRODUCTOS	MOLES REACTANTES
1	AGUA	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	4	1	4	ACETATO	$CH_3COO^- + 4H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^-$	0.187	8	1	18

Nota. (W. H. Freeman and Company, 2003).



Para continuar con el análisis matemático de una CCM, es necesario dotar al modelo de Simulink con otros parámetros importantes de entrada y estos lo podemos resumir en la siguiente tabla:

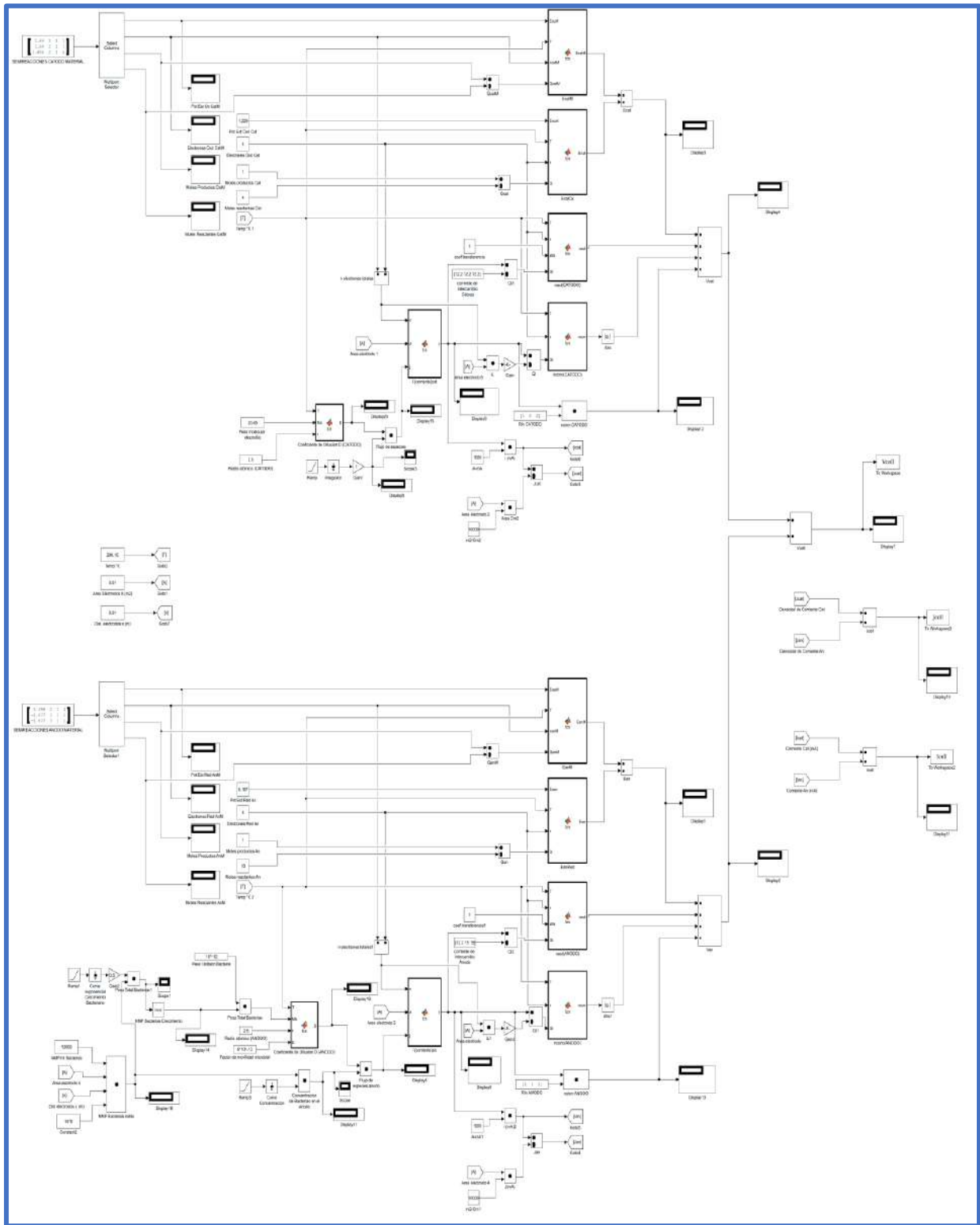
**Tabla 8** Variables de entrada CCM modelo Simulink..

ITEM	VARIABLE	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR	COMENTARIO
1	Temperatura	T	°K	286.15	Temperatura promedio en cusco durante los meses diciembre, enero y febrero
2	Área del Electrodo	A	m <sup>2</sup>	0.0011	
3	Distancia entre electrodos	x	m	0.05	
4	Cantidad de Bacterias		NMP/ml	12000	Número más probable de bacterias en 1 ml de sustrato
5	Peso unitario Aproximado de Bacterias		g	10 <sup>-12</sup>	

*Nota. Elaboración Propia.*

En ese entender aplicando la herramienta del Simulink/Matlab se ha implementado el modelamiento de una CCM con tres conjugaciones de materiales en los electrodos, a continuación, se muestra el modelo de una CCM:

**Figura 18** Modelo de una CCM en Simulink/ Matlab.



*Nota. Elaboración Propia.*

Luego de la simulación se obtiene los tres parámetros importantes que son: Voltaje de celda, Corriente y Densidad de Corriente; cuyos resultados para las tres conjugaciones de materiales son las siguientes:

**Tabla 9** Resultados de Simulación en el Simulink- Matlab de las celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
1	0.9227	1.9797	1.5635	0.0001	0.0008	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.9227	1.9797	1.5635	0.0001	0.0008	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.8961	1.8946	1.4784	0.0041	0.0477	0.0223	0.0000	0.0004	0.0002
4	0.882	1.8698	1.4536	0.0087	0.1015	0.0474	0.0001	0.0009	0.0004
5	0.8735	1.8553	1.4391	0.0132	0.1542	0.072	0.0001	0.0014	0.0007
6	0.8674	1.845	1.4289	0.0177	0.2066	0.0965	0.0002	0.0019	0.0009
7	0.8626	1.837	1.4209	0.0222	0.2588	0.1209	0.0002	0.0024	0.0011
8	0.8588	1.8305	1.4144	0.0267	0.311	0.1453	0.0002	0.0028	0.0013
9	0.8555	1.825	1.4089	0.0313	0.3632	0.1697	0.0003	0.0033	0.0015
10	0.8526	1.8202	1.4041	0.0358	0.4153	0.1942	0.0003	0.0038	0.0018
11	0.8501	1.8159	1.3998	0.0404	0.4675	0.2186	0.0004	0.0042	0.002
12	0.8478	1.8121	1.396	0.045	0.5196	0.243	0.0004	0.0047	0.0022
13	0.8457	1.8086	1.3926	0.0496	0.5718	0.2675	0.0005	0.0052	0.0024
14	0.8438	1.8054	1.3894	0.0542	0.624	0.2919	0.0005	0.0057	0.0027
15	0.8421	1.8024	1.3865	0.0589	0.6761	0.3164	0.0005	0.0061	0.0029
16	0.8404	1.7996	1.3838	0.0635	0.7283	0.3409	0.0006	0.0066	0.0031
17	0.8389	1.7971	1.3812	0.0682	0.7806	0.3654	0.0006	0.0071	0.0033
18	0.8375	1.7946	1.3788	0.0729	0.8328	0.39	0.0007	0.0076	0.0035
19	0.8361	1.7923	1.3765	0.0777	0.8851	0.4145	0.0007	0.008	0.0038
20	0.8348	1.7901	1.3744	0.0824	0.9373	0.4391	0.0007	0.0085	0.004
21	0.7797	1.6868	1.2817	0.5316	5.2349	2.4939	0.0048	0.0476	0.0227
22	0.7791	1.6856	1.2807	0.538	5.2888	2.5201	0.0049	0.0481	0.0229
23	0.7785	1.6843	1.2796	0.5443	5.3426	2.5463	0.0049	0.0486	0.0231
24	0.7779	1.6831	1.2786	0.5507	5.3965	2.5725	0.005	0.0491	0.0234
25	0.7773	1.6818	1.2776	0.5571	5.4504	2.5987	0.0051	0.0495	0.0236
26	0.7767	1.6805	1.2765	0.5635	5.5044	2.6249	0.0051	0.05	0.0239
27	0.776	1.6792	1.2755	0.57	5.5583	2.6512	0.0052	0.0505	0.0241
28	0.7754	1.678	1.2744	0.5764	5.6123	2.6775	0.0052	0.051	0.0243
29	0.7748	1.6767	1.2734	0.5829	5.6663	2.7038	0.0053	0.0515	0.0246
30	0.7742	1.6754	1.2723	0.5894	5.7203	2.7301	0.0054	0.052	0.0248
31	0.7735	1.6741	1.2713	0.5959	5.7743	2.7565	0.0054	0.0525	0.0251
32	0.7729	1.6728	1.2702	0.6025	5.8284	2.7828	0.0055	0.053	0.0253
33	0.7723	1.6715	1.2691	0.609	5.8824	2.8092	0.0055	0.0535	0.0255
34	0.7716	1.6702	1.268	0.6156	5.9365	2.8356	0.0056	0.054	0.0258
35	0.771	1.6688	1.267	0.6222	5.9906	2.862	0.0057	0.0545	0.026

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Zn	PbO2-AI
36	0.7704	1.6675	1.2659	0.6288	6.0448	2.8885	0.0057	0.055	0.0263
37	0.7697	1.6662	1.2648	0.6355	6.0989	2.9149	0.0058	0.0554	0.0265
38	0.7691	1.6648	1.2637	0.6421	6.1531	2.9414	0.0058	0.0559	0.0267
39	0.7684	1.6635	1.2626	0.6488	6.2073	2.9679	0.0059	0.0564	0.027
40	0.7678	1.6621	1.2615	0.6555	6.2615	2.9944	0.006	0.0569	0.0272
41	0.7055	1.5289	1.1563	1.2626	10.7168	5.2071	0.0115	0.0974	0.0473
42	0.7046	1.527	1.1548	1.2709	10.7726	5.2352	0.0116	0.0979	0.0476
43	0.7037	1.525	1.1533	1.2792	10.8284	5.2633	0.0116	0.0984	0.0478
44	0.7028	1.523	1.1517	1.2876	10.8842	5.2915	0.0117	0.0989	0.0481
45	0.7018	1.5211	1.1502	1.2959	10.9401	5.3197	0.0118	0.0995	0.0484
46	0.7009	1.5191	1.1486	1.3043	10.996	5.3478	0.0119	0.1	0.0486
47	0.7	1.5171	1.1471	1.3127	11.0519	5.3761	0.0119	0.1005	0.0489
48	0.6991	1.5151	1.1455	1.3211	11.1078	5.4043	0.012	0.101	0.0491
49	0.6982	1.513	1.144	1.3295	11.1637	5.4325	0.0121	0.1015	0.0494
50	0.6972	1.511	1.1424	1.338	11.2197	5.4608	0.0122	0.102	0.0496
51	0.6963	1.509	1.1408	1.3465	11.2757	5.4891	0.0122	0.1025	0.0499
52	0.6954	1.507	1.1392	1.3549	11.3317	5.5174	0.0123	0.103	0.0502
53	0.6944	1.5049	1.1376	1.3635	11.3877	5.5458	0.0124	0.1035	0.0504
54	0.6935	1.5029	1.136	1.372	11.4437	5.5741	0.0125	0.104	0.0507
55	0.6925	1.5008	1.1344	1.3805	11.4998	5.6025	0.0126	0.1045	0.0509
56	0.6916	1.4987	1.1328	1.3891	11.5559	5.6309	0.0126	0.1051	0.0512
57	0.6906	1.4966	1.1312	1.3977	11.612	5.6593	0.0127	0.1056	0.0514
58	0.6897	1.4946	1.1296	1.4063	11.6681	5.6877	0.0128	0.1061	0.0517
59	0.6887	1.4925	1.128	1.4149	11.7242	5.7161	0.0129	0.1066	0.052
60	0.6877	1.4904	1.1263	1.4236	11.7804	5.7446	0.0129	0.1071	0.0522
61	0.5972	1.2924	0.9737	2.1886	16.3936	8.1152	0.0199	0.149	0.0738
62	0.5959	1.2896	0.9716	2.1989	16.4514	8.1453	0.02	0.1496	0.074
63	0.5947	1.2868	0.9694	2.2091	16.5091	8.1754	0.0201	0.1501	0.0743
64	0.5934	1.284	0.9673	2.2194	16.5669	8.2055	0.0202	0.1506	0.0746
65	0.5921	1.2812	0.9651	2.2297	16.6247	8.2356	0.0203	0.1511	0.0749
66	0.5908	1.2783	0.963	2.24	16.6826	8.2657	0.0204	0.1517	0.0751
67	0.5895	1.2755	0.9608	2.2504	16.7404	8.2959	0.0205	0.1522	0.0754
68	0.5882	1.2727	0.9586	2.2607	16.7983	8.3261	0.0206	0.1527	0.0757
69	0.5869	1.2698	0.9564	2.2711	16.8562	8.3563	0.0206	0.1532	0.076
70	0.5856	1.267	0.9542	2.2815	16.9141	8.3865	0.0207	0.1538	0.0762
71	0.5843	1.2641	0.952	2.2919	16.972	8.4167	0.0208	0.1543	0.0765
72	0.583	1.2612	0.9498	2.3024	17.03	8.447	0.0209	0.1548	0.0768
73	0.5817	1.2583	0.9476	2.3128	17.0879	8.4773	0.021	0.1553	0.0771
74	0.5804	1.2554	0.9454	2.3233	17.1459	8.5076	0.0211	0.1559	0.0773
75	0.579	1.2525	0.9431	2.3338	17.2039	8.5379	0.0212	0.1564	0.0776
76	0.5777	1.2496	0.9409	2.3443	17.262	8.5682	0.0213	0.1569	0.0779
77	0.5764	1.2467	0.9387	2.3549	17.32	8.5986	0.0214	0.1575	0.0782
78	0.575	1.2438	0.9364	2.3654	17.3781	8.629	0.0215	0.158	0.0784
79	0.5737	1.2408	0.9342	2.376	17.4361	8.6594	0.0216	0.1585	0.0787

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI
80	0.4504	0.9702	0.727	3.3096	22.2654	11.2183	0.0301	0.2024	0.102
81	0.4487	0.9666	0.7242	3.3218	22.3251	11.2503	0.0302	0.203	0.1023
82	0.447	0.9629	0.7214	3.334	22.3849	11.2824	0.0303	0.2035	0.1026
83	0.4453	0.9592	0.7185	3.3462	22.4446	11.3144	0.0304	0.204	0.1029
84	0.4437	0.9555	0.7157	3.3585	22.5044	11.3465	0.0305	0.2046	0.1032
85	0.442	0.9518	0.7129	3.3708	22.5641	11.3786	0.0306	0.2051	0.1034
86	0.4403	0.9481	0.71	3.3831	22.6239	11.4107	0.0308	0.2057	0.1037
87	0.4386	0.9444	0.7072	3.3954	22.6838	11.4428	0.0309	0.2062	0.104
88	0.4369	0.9406	0.7043	3.4077	22.7436	11.475	0.031	0.2068	0.1043
89	0.4352	0.9369	0.7015	3.4201	22.8035	11.5072	0.0311	0.2073	0.1046
90	0.4334	0.9331	0.6986	3.4324	22.8633	11.5394	0.0312	0.2078	0.1049
91	0.4317	0.9294	0.6957	3.4448	22.9232	11.5716	0.0313	0.2084	0.1052
92	0.43	0.9256	0.6929	3.4572	22.9832	11.6038	0.0314	0.2089	0.1055
93	0.4283	0.9218	0.69	3.4697	23.0431	11.6361	0.0315	0.2095	0.1058
94	0.4266	0.9181	0.6871	3.4821	23.103	11.6683	0.0317	0.21	0.1061
95	0.4248	0.9143	0.6842	3.4946	23.163	11.7006	0.0318	0.2106	0.1064
96	0.4231	0.9105	0.6813	3.5071	23.223	11.7329	0.0319	0.2111	0.1067
97	0.4213	0.9066	0.6784	3.5196	23.283	11.7652	0.032	0.2117	0.107
98	0.4196	0.9028	0.6754	3.5321	23.3431	11.7976	0.0321	0.2122	0.1073
99	0.4178	0.899	0.6725	3.5446	23.4031	11.83	0.0322	0.2128	0.1075
100	0.2607	0.5574	0.411	4.6256	28.3322	14.5164	0.0421	0.2576	0.132
101	0.2586	0.5528	0.4075	4.6397	28.3939	14.5504	0.0422	0.2581	0.1323
102	0.2564	0.5482	0.4039	4.6539	28.4556	14.5844	0.0423	0.2587	0.1326
103	0.2543	0.5435	0.4004	4.6681	28.5173	14.6184	0.0424	0.2592	0.1329
104	0.2521	0.5389	0.3968	4.6823	28.579	14.6524	0.0426	0.2598	0.1332
105	0.2499	0.5342	0.3932	4.6965	28.6407	14.6865	0.0427	0.2604	0.1335
106	0.2477	0.5295	0.3896	4.7107	28.7024	14.7205	0.0428	0.2609	0.1338
107	0.2456	0.5248	0.386	4.725	28.7642	14.7546	0.043	0.2615	0.1341
108	0.2434	0.5201	0.3824	4.7393	28.826	14.7887	0.0431	0.2621	0.1344
109	0.2412	0.5154	0.3788	4.7536	28.8878	14.8228	0.0432	0.2626	0.1348
110	0.239	0.5107	0.3752	4.7679	28.9496	14.857	0.0433	0.2632	0.1351
111	0.2368	0.506	0.3715	4.7822	29.0115	14.8911	0.0435	0.2637	0.1354
112	0.2345	0.5012	0.3679	4.7966	29.0734	14.9253	0.0436	0.2643	0.1357
113	0.2323	0.4965	0.3642	4.811	29.1352	14.9595	0.0437	0.2649	0.136
114	0.2301	0.4917	0.3606	4.8254	29.1972	14.9937	0.0439	0.2654	0.1363
115	0.2278	0.4869	0.3569	4.8398	29.2591	15.028	0.044	0.266	0.1366
116	0.2256	0.4821	0.3532	4.8542	29.321	15.0622	0.0441	0.2666	0.1369
117	0.2233	0.4773	0.3495	4.8687	29.383	15.0965	0.0443	0.2671	0.1372
118	0.2211	0.4725	0.3458	4.8832	29.445	15.1308	0.0444	0.2677	0.1376
119	0.2188	0.4677	0.3421	4.8977	29.507	15.1651	0.0445	0.2682	0.1379
120	0.2165	0.4628	0.3384	4.9122	29.569	15.1995	0.0447	0.2688	0.1382
121	0.2143	0.458	0.3347	4.9267	29.631	15.2338	0.0448	0.2694	0.1385
122	0.212	0.4531	0.3309	4.9413	29.6931	15.2682	0.0449	0.2699	0.1388
123	0.2097	0.4482	0.3272	4.9558	29.7552	15.3026	0.0451	0.2705	0.1391

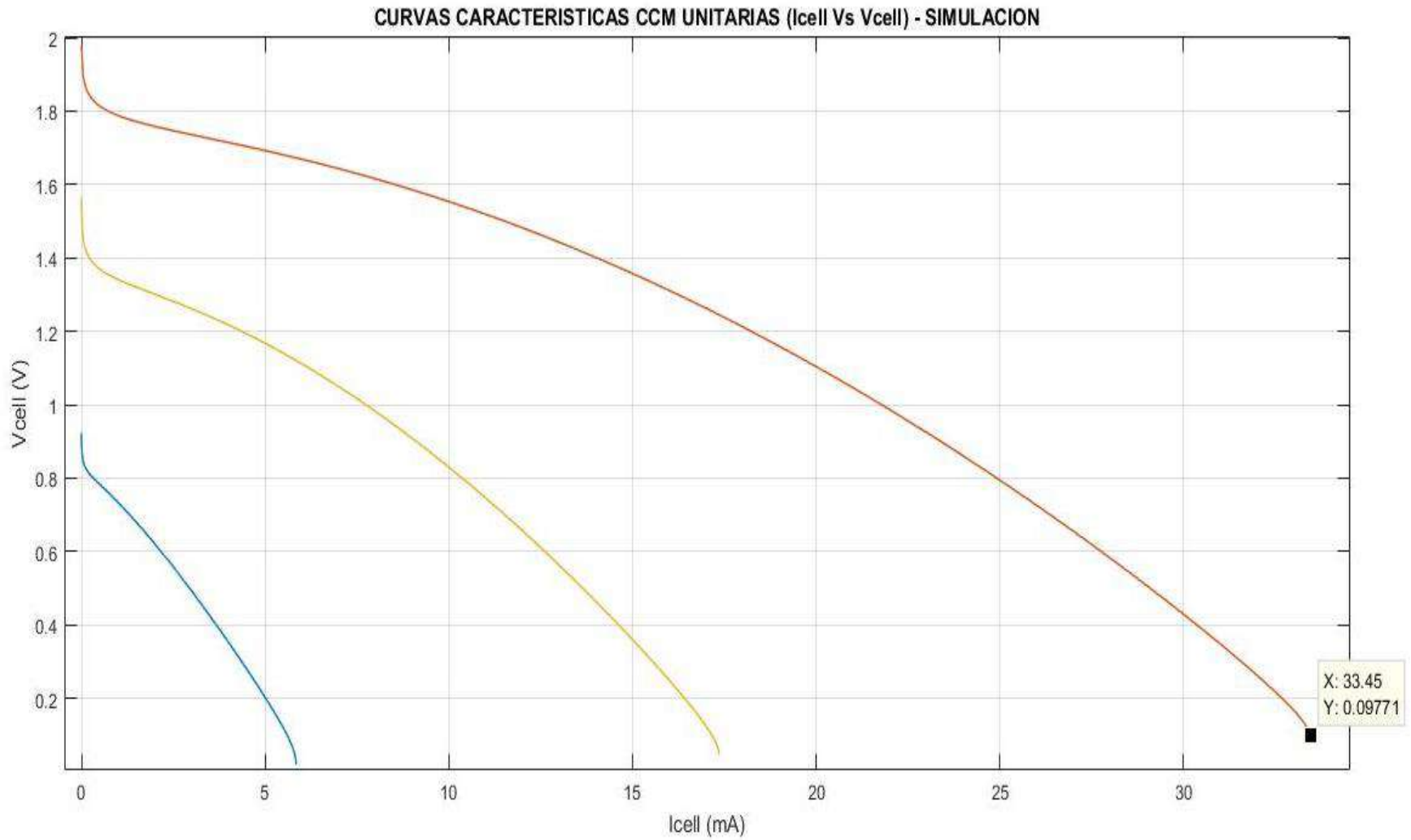
N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI
124	0.2074	0.4434	0.3234	4.9704	29.8173	15.337	0.0452	0.2711	0.1394
125	0.2051	0.4384	0.3196	4.985	29.8794	15.3714	0.0453	0.2716	0.1397
126	0.2027	0.4335	0.3158	4.9997	29.9415	15.4059	0.0455	0.2722	0.1401
127	0.2004	0.4286	0.3121	5.0143	30.0037	15.4404	0.0456	0.2728	0.1404
128	0.1981	0.4237	0.3082	5.029	30.0659	15.4748	0.0457	0.2733	0.1407
129	0.1957	0.4187	0.3044	5.0437	30.1281	15.5094	0.0459	0.2739	0.141
130	0.1934	0.4137	0.3006	5.0584	30.1903	15.5439	0.046	0.2745	0.1413
131	0.191	0.4088	0.2968	5.0731	30.2525	15.5784	0.0461	0.275	0.1416
132	0.1886	0.4038	0.2929	5.0879	30.3148	15.613	0.0463	0.2756	0.1419
133	0.1863	0.3988	0.289	5.1026	30.3771	15.6476	0.0464	0.2762	0.1423
134	0.1839	0.3937	0.2852	5.1174	30.4394	15.6822	0.0465	0.2767	0.1426
135	0.1815	0.3887	0.2813	5.1322	30.5017	15.7168	0.0467	0.2773	0.1429
136	0.1791	0.3836	0.2774	5.1471	30.564	15.7515	0.0468	0.2779	0.1432
137	0.1766	0.3786	0.2735	5.1619	30.6264	15.7862	0.0469	0.2784	0.1435
138	0.1742	0.3735	0.2695	5.1768	30.6888	15.8208	0.0471	0.279	0.1438
139	0.1718	0.3684	0.2656	5.1917	30.7511	15.8555	0.0472	0.2796	0.1441
140	0.1693	0.3633	0.2616	5.2066	30.8136	15.8903	0.0473	0.2801	0.1445
141	0.1668	0.3581	0.2577	5.2215	30.876	15.925	0.0475	0.2807	0.1448
142	0.1644	0.353	0.2537	5.2364	30.9384	15.9598	0.0476	0.2813	0.1451
143	0.1619	0.3478	0.2497	5.2514	31.0009	15.9946	0.0477	0.2818	0.1454
144	0.1594	0.3426	0.2457	5.2664	31.0634	16.0294	0.0479	0.2824	0.1457
145	0.1569	0.3374	0.2416	5.2814	31.1259	16.0642	0.048	0.283	0.146
146	0.1543	0.3322	0.2376	5.2964	31.1884	16.099	0.0481	0.2835	0.1464
147	0.1518	0.327	0.2335	5.3114	31.251	16.1339	0.0483	0.2841	0.1467
148	0.1492	0.3217	0.2294	5.3265	31.3136	16.1688	0.0484	0.2847	0.147
149	0.1467	0.3164	0.2253	5.3416	31.3762	16.2037	0.0486	0.2852	0.1473
150	0.1441	0.3111	0.2212	5.3567	31.4388	16.2386	0.0487	0.2858	0.1476
151	0.1415	0.3058	0.2171	5.3718	31.5014	16.2735	0.0488	0.2864	0.1479
152	0.1388	0.3005	0.2129	5.3869	31.564	16.3085	0.049	0.2869	0.1483
153	0.1362	0.2951	0.2087	5.4021	31.6267	16.3435	0.0491	0.2875	0.1486
154	0.1335	0.2897	0.2045	5.4173	31.6894	16.3785	0.0492	0.2881	0.1489
155	0.1308	0.2843	0.2003	5.4325	31.7521	16.4135	0.0494	0.2887	0.1492
156	0.1281	0.2788	0.1961	5.4477	31.8148	16.4485	0.0495	0.2892	0.1495
157	0.1254	0.2733	0.1918	5.4629	31.8776	16.4836	0.0497	0.2898	0.1499
158	0.1226	0.2678	0.1875	5.4782	31.9403	16.5187	0.0498	0.2904	0.1502
159	0.1199	0.2623	0.1831	5.4935	32.0031	16.5538	0.0499	0.2909	0.1505
160	0.117	0.2567	0.1788	5.5088	32.0659	16.5889	0.0501	0.2915	0.1508
161	0.1142	0.2511	0.1744	5.5241	32.1287	16.624	0.0502	0.2921	0.1511
162	0.1113	0.2455	0.1699	5.5394	32.1916	16.6592	0.0504	0.2927	0.1514
163	0.1084	0.2398	0.1654	5.5548	32.2544	16.6944	0.0505	0.2932	0.1518
164	0.1055	0.2341	0.1609	5.5701	32.3173	16.7296	0.0506	0.2938	0.1521
165	0.1025	0.2283	0.1564	5.5855	32.3802	16.7648	0.0508	0.2944	0.1524
166	0.0994	0.2224	0.1517	5.6009	32.4431	16.8	0.0509	0.2949	0.1527
167	0.0963	0.2166	0.1471	5.6164	32.5061	16.8353	0.0511	0.2955	0.153

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-AI
168	0.0931	0.2106	0.1423	5.6318	32.569	16.8705	0.0512	0.2961	0.1534
169	0.0899	0.2046	0.1375	5.6473	32.632	16.9058	0.0513	0.2967	0.1537
170	0.0866	0.1984	0.1326	5.6628	32.695	16.9411	0.0515	0.2972	0.154
171	0.0832	0.1922	0.1276	5.6783	32.758	16.9765	0.0516	0.2978	0.1543
172	0.0797	0.1859	0.1225	5.6938	32.8211	17.0118	0.0518	0.2984	0.1547
173	0.0761	0.1795	0.1173	5.7094	32.8841	17.0472	0.0519	0.2989	0.155
174	0.0723	0.1728	0.1119	5.7249	32.9472	17.0826	0.052	0.2995	0.1553
175	0.0683	0.166	0.1064	5.7405	33.0103	17.118	0.0522	0.3001	0.1556
176	0.0641	0.159	0.1006	5.7561	33.0734	17.1534	0.0523	0.3007	0.1559
177	0.0596	0.1516	0.0944	5.7717	33.1366	17.1889	0.0525	0.3012	0.1563
178	0.0546	0.1438	0.0879	5.7874	33.1997	17.2243	0.0526	0.3018	0.1566
179	0.049	0.1354	0.0807	5.8031	33.2629	17.2598	0.0528	0.3024	0.1569
180	0.0424	0.1259	0.0724	5.8187	33.3261	17.2953	0.0529	0.303	0.1572
181	0.0338	0.1144	0.0622	5.8344	33.3893	17.3308	0.053	0.3035	0.1576
182	0.0199	0.0977	0.0468	5.8502	33.4525	17.3664	0.0532	0.3041	0.1579
168	0.0931	0.2106	0.1423	5.6318	32.569	16.8705	0.0512	0.2961	0.1534
169	0.0899	0.2046	0.1375	5.6473	32.632	16.9058	0.0513	0.2967	0.1537
170	0.0866	0.1984	0.1326	5.6628	32.695	16.9411	0.0515	0.2972	0.154
171	0.0832	0.1922	0.1276	5.6783	32.758	16.9765	0.0516	0.2978	0.1543
172	0.0797	0.1859	0.1225	5.6938	32.8211	17.0118	0.0518	0.2984	0.1547
173	0.0761	0.1795	0.1173	5.7094	32.8841	17.0472	0.0519	0.2989	0.155
174	0.0723	0.1728	0.1119	5.7249	32.9472	17.0826	0.052	0.2995	0.1553
175	0.0683	0.166	0.1064	5.7405	33.0103	17.118	0.0522	0.3001	0.1556
176	0.0641	0.159	0.1006	5.7561	33.0734	17.1534	0.0523	0.3007	0.1559
177	0.0596	0.1516	0.0944	5.7717	33.1366	17.1889	0.0525	0.3012	0.1563
178	0.0546	0.1438	0.0879	5.7874	33.1997	17.2243	0.0526	0.3018	0.1566
179	0.049	0.1354	0.0807	5.8031	33.2629	17.2598	0.0528	0.3024	0.1569
180	0.0424	0.1259	0.0724	5.8187	33.3261	17.2953	0.0529	0.303	0.1572
181	0.0338	0.1144	0.0622	5.8344	33.3893	17.3308	0.053	0.3035	0.1576
182	0.0199	<b>0.0977</b>	0.0468	5.8502	<b>33.4525</b>	17.3664	0.0532	<b>0.3041</b>	0.1579

*Nota. Elaboración Propia.*

Y en base a estos resultados el software Matlab nos grafica las curvas características de cada conjugación:

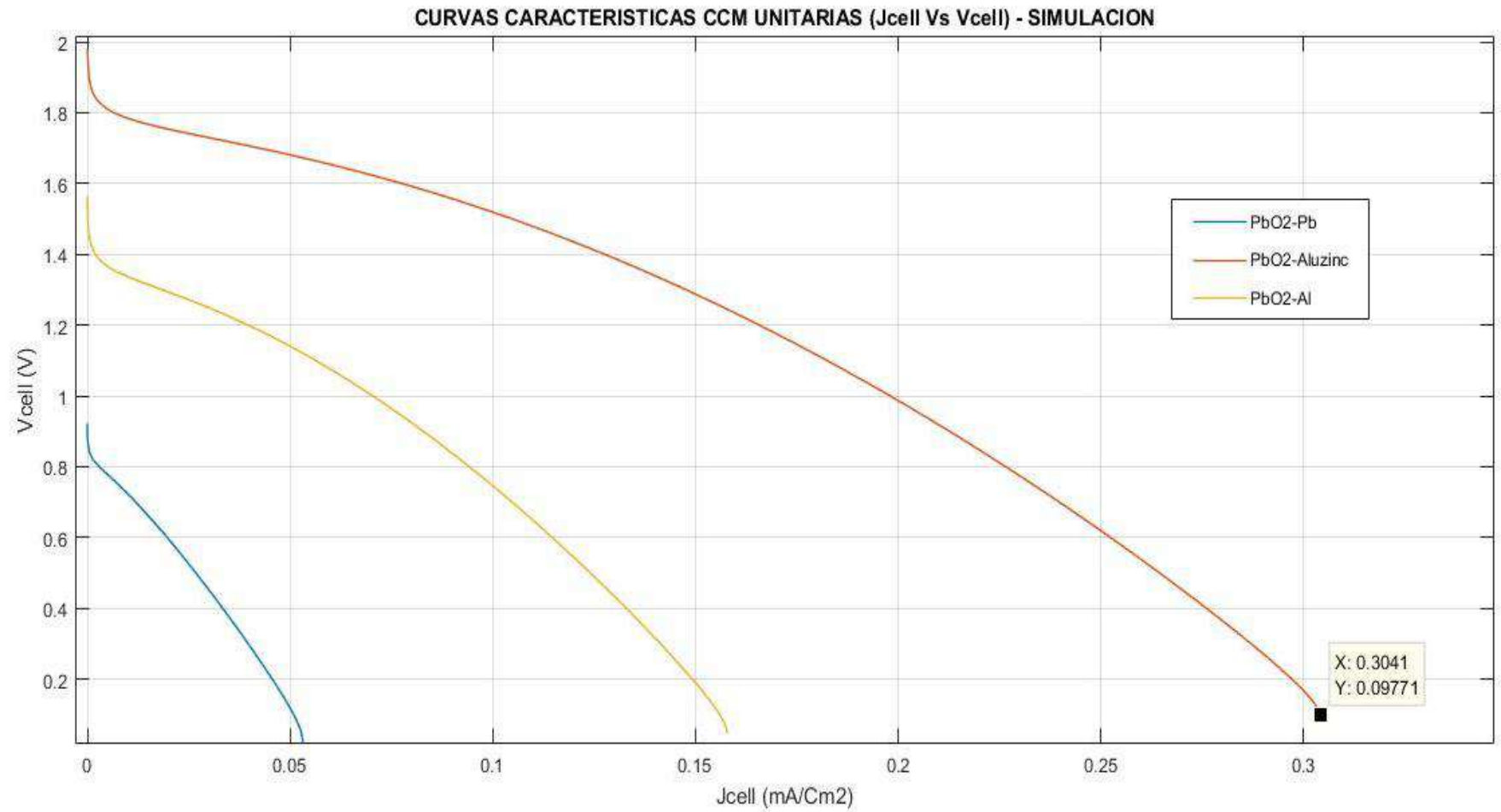
**Figura 19** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink/ Matlab.



*Nota. Elaboración Propia*



**Figura 20** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink/ Matlab.



*Nota. Elaboración Propia.*

Como se puede apreciar tanto grafica como numéricamente, la mejor conjugación se obtuvo con el par PbO<sub>2</sub>-Aluzinc; en esta conjugación se tiene un voltaje máximo de 1.9797 V. (circuito abierto) y una corriente máxima de 33.4525 mA (corto circuito), con una densidad de potencia promedio de 50.58 W/m<sup>2</sup>; a partir de estos valores unitarios se puede mejorar diseños de celdas para obtener mayores voltajes y corrientes, en esta ocasión modelaremos apilamientos básicos, pares de CCM en serie y paralelo.

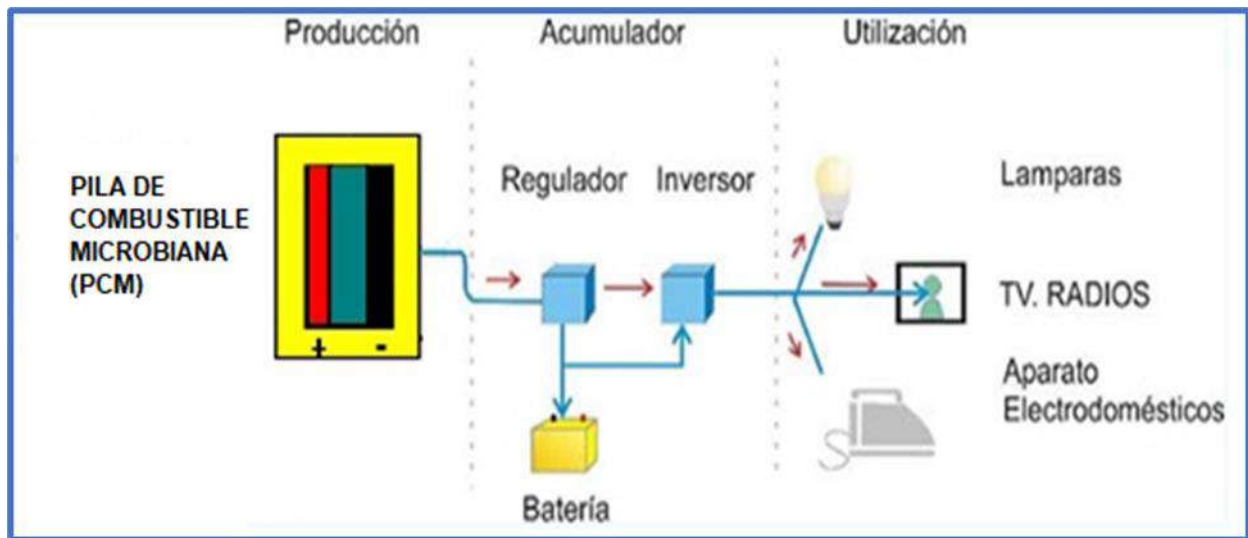
Con los materiales que obtuvieron los mejores resultados se implementará la aplicación práctica del módulo de suministro utilizable.

## **3.2. Simulación de Sistemas de Pilas de Combustible Microbiana**

### **3.2.1. Modelamiento y Simulación de un Sistema De Generación Monofásica con Pilas de Combustible Microbianas (PCM)**

Habiendo modelado una celda de combustible microbiana (CCM), como se vio en el capítulo II, se puede realizar el agrupamiento de celdas en serie para ganar más tensión y celdas en paralelo para ganar más corriente, aplicando un agrupamiento mixto se tiene una Pila de Combustible Microbiana (PCM); para que la energía contenida en una PCM sea utilizable es necesario incorporarla a un sistema de generación o modulo con PCM; estos sistemas como ya se describieron en el Capítulo II, son análogos a un sistema fotovoltaico con la diferencia que en lugar de un panel solar irá una PCM el resto de partes del sistema es como se muestra en la figura.

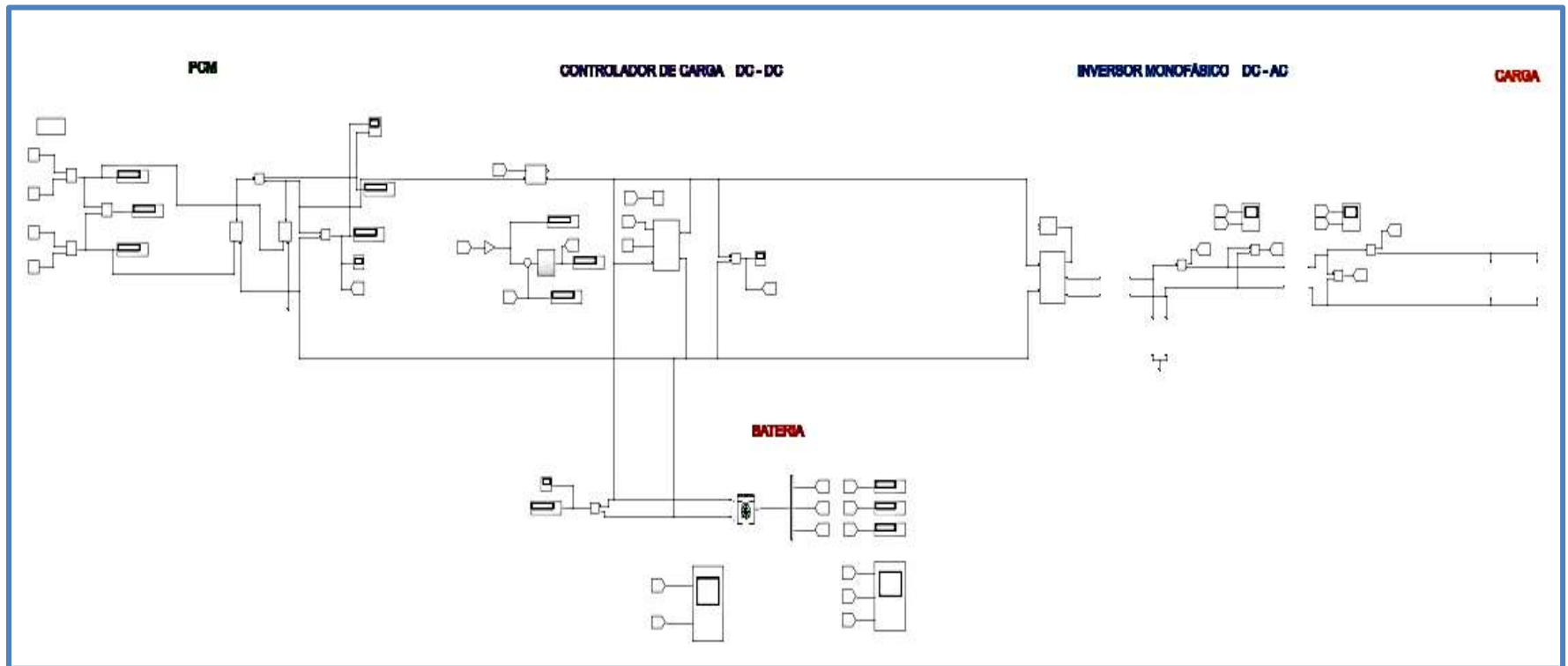
**Figura 21** Esquema de un módulo con PCM para el suministro de energía utilizable



*Nota. Elaboración Propia.*

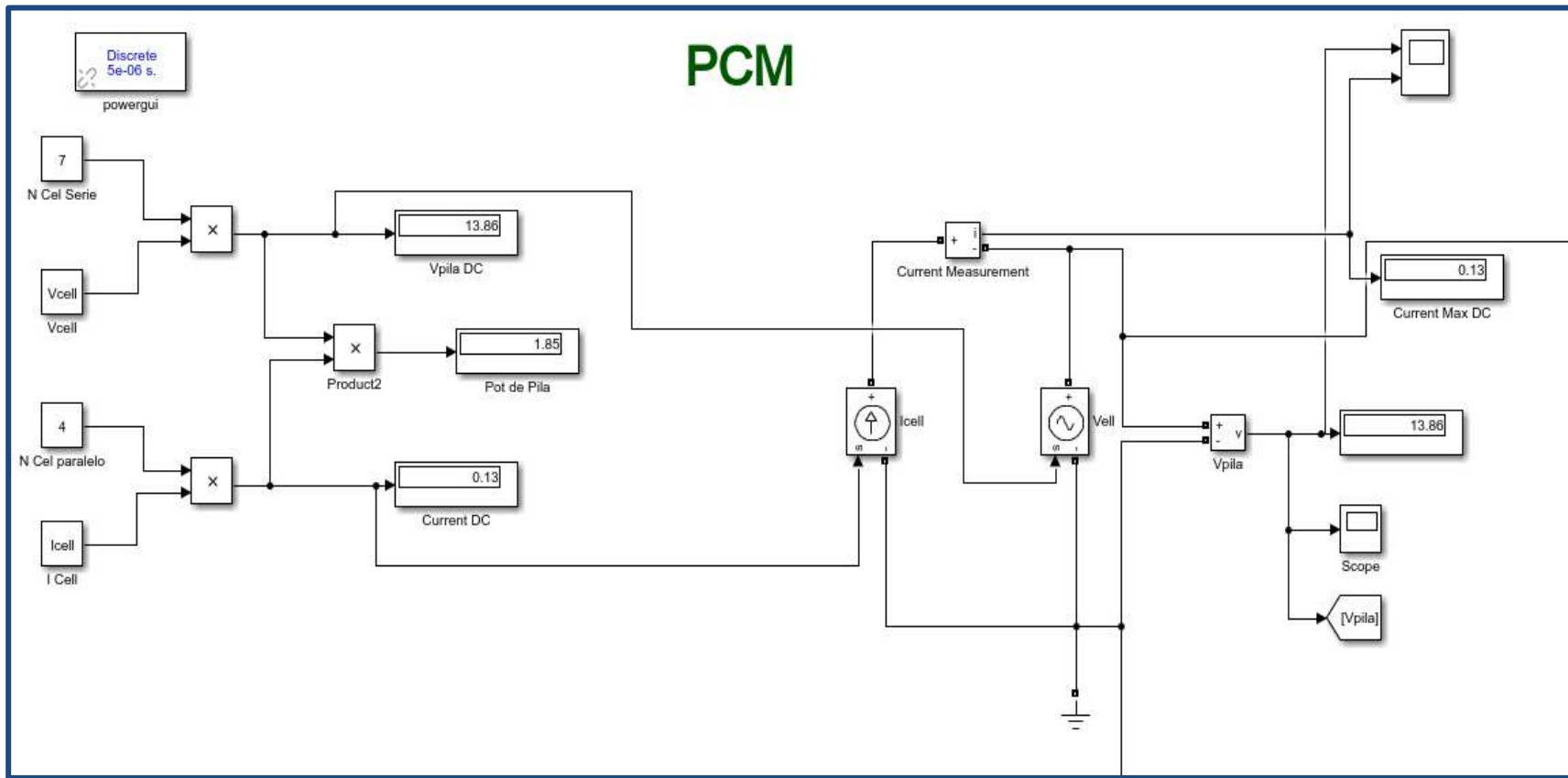
Para el caso del tipo monofásico la energía entregable debe ser de 220 V en corriente alterna (CA), entonces se aplicará un inversor del tipo monofásico con entrada de 0 a 12 V. (CD) y salida de 220 V (CA); entonces implementando la figura 21 a un modelo matemático en el software Simulink de Matlab se tiene el siguiente esquema:

**Figura 22** Modelo en Simulink de un Sistema monofásico 220 V. con PCM .



*Nota. Elaboración Propia.*

**Figura 23** Etapa pila de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo matemático en Software Simulink De Matlab.



*Nota. Elaboración Propia.*

En esta etapa (PCM) consideramos la celda con el par de electrodos PbO<sub>2</sub>-Aluzinc de los resultados se tiene que  $V_{cell} = 1.9797 \text{ V}$ . e  $I_{cell}=33.4525 \text{ mA}$ ; como datos de entrada se tiene:

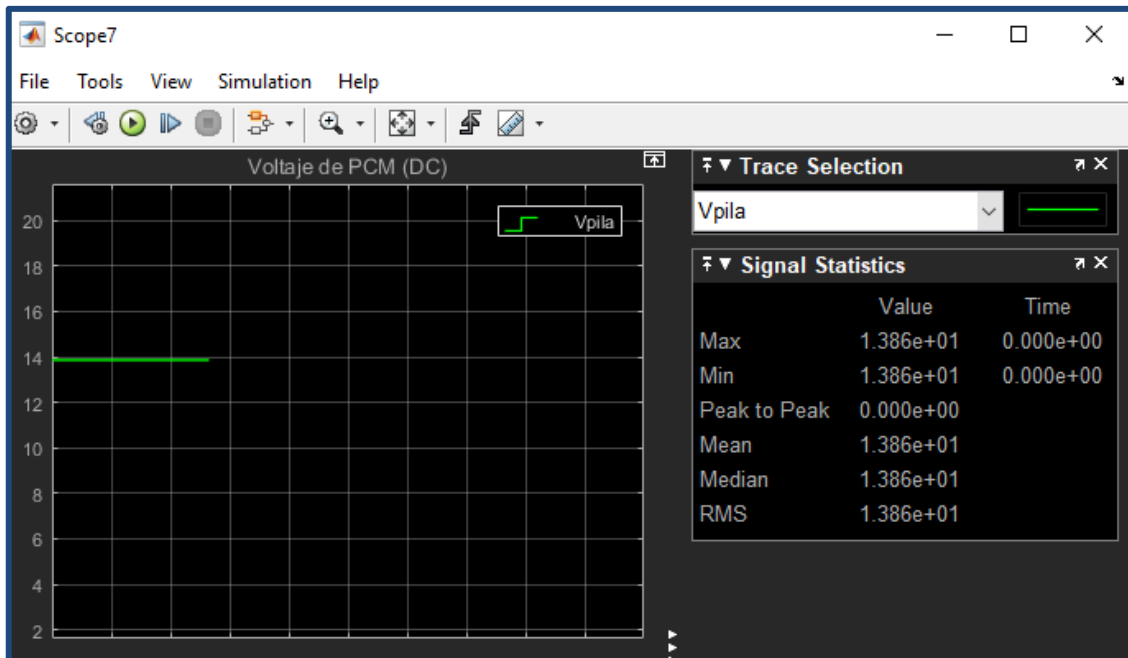
**Tabla 10** Variables de entrada del Sistema de Generación Monofásica con PCM.

ITEM	VARIABLE	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR	COMENTARIO
1	Voltaje de Celda	Vcell	V	1.9797	Obtenido de la Celda unitaria más optima
2	Corriente de Celda	Icell	mA	33.4525	Obtenido de la Celda unitaria más optima
3	Numero de Celdas en Serie	N Cel Serie	Und.	7	Elección según voltaje de entrada en DC de los otros equipos (regulador e inversor) más una holgura para carga de batería
4	Numero de Celdas en Paralelo	N Cel Paralelo	Und.	4	Elección según corriente máxima que se desea obtener en DC

*Nota. Elaboración Propia.*

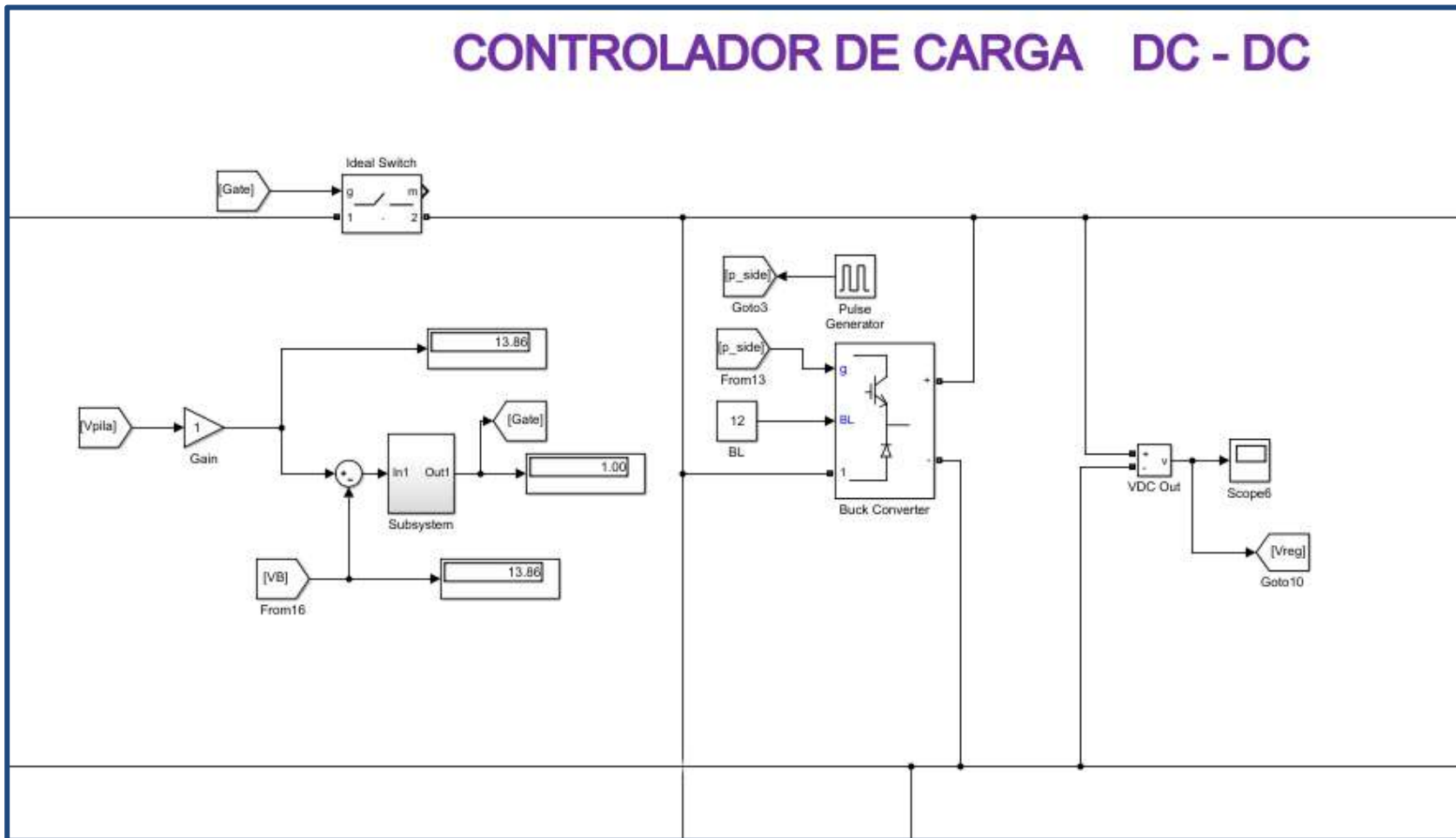
La señal de salida de esta etapa se puede apreciar en un osciloscopio conectado a la salida de esta etapa:

**Figura 24** Voltaje DC de salida de la PCM.



*Nota. Elaboración Propia.*

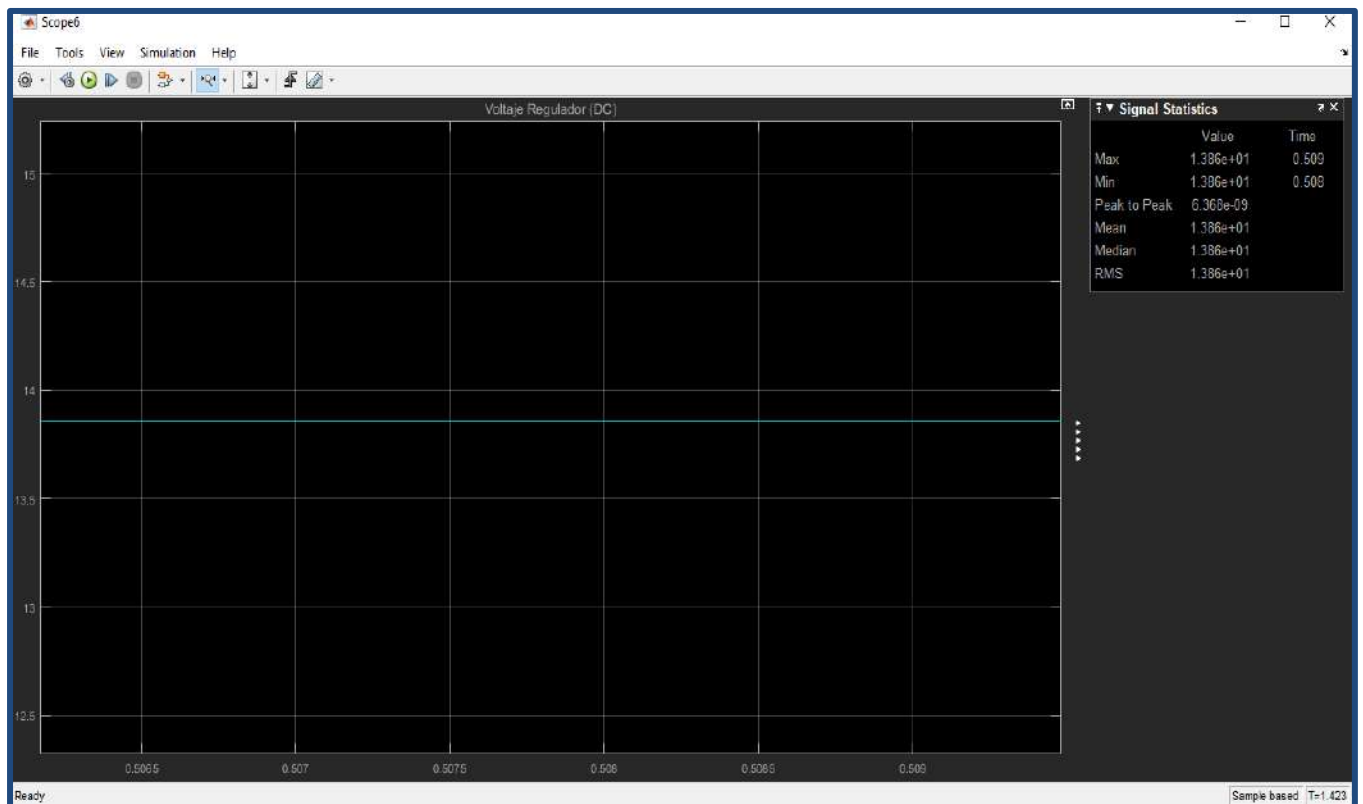
Figura 25 Etapa Controlador o Regulador de Carga – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

Seguidamente a la etapa PCM se encuentra el controlador de carga o también conocido como regulador de carga; este recibe la señal de la PCM y de la Batería o acumulador; la función principal que tiene esta etapa es controlar la salida de voltaje en DC, garantizando que siempre la salida de tensión DC sea estable, cuando la energía emitida por la PCM es suficiente el Controlador permite el paso de esta energía al inversor y además realiza la función de recarga a la batería de respaldo; en otro escenario cuando se da la situación de que la energía emitida por la PCM es insuficiente o decae por algún motivo, el Controlador utiliza la energía de la Batería de respaldo y la envía también al Inversor. El Controlador siempre emitirá un voltaje DC estable, independientemente de donde provenga la energía; en el modelo de Simulink podemos apreciar la señal de salida del controlador mediante un osciloscopio conectado a la salida:

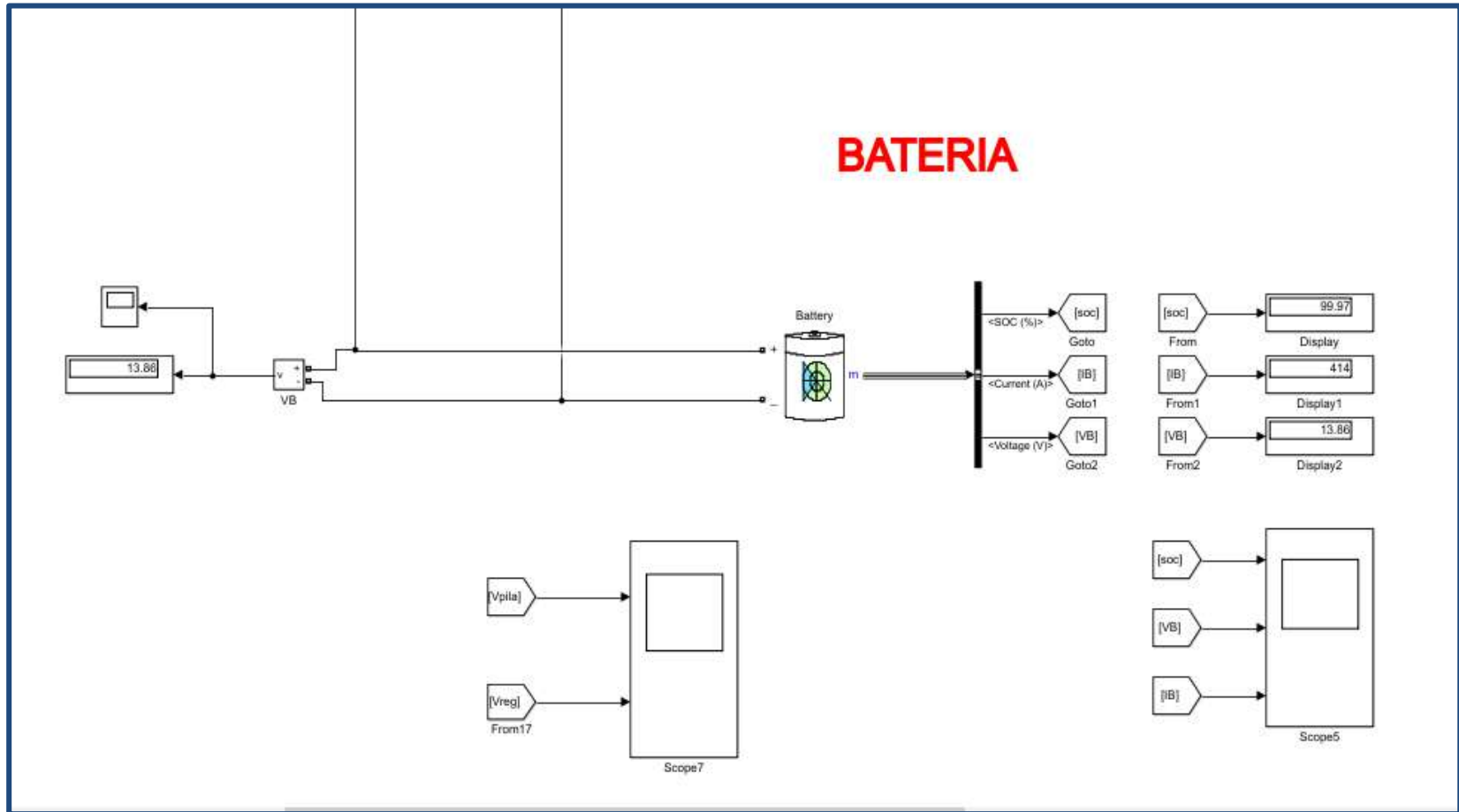
**Figura 26** Voltaje DC de salida del controlador de carga.



Nota. Elaboración Propia.



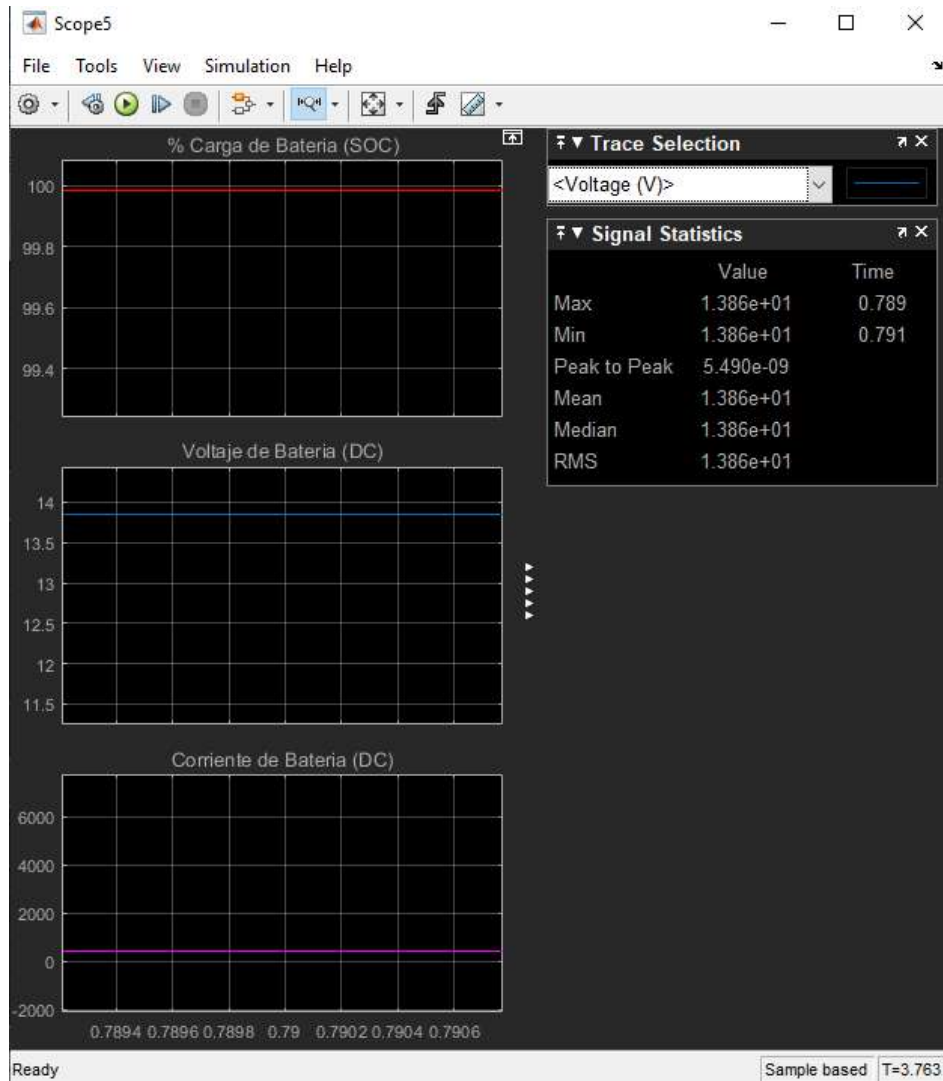
**Figura 27** Etapa Batería o acumulador – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

La etapa Batería o Acumulador, como se ha descrito anteriormente es de respaldo de energía, este equipo carga y dona su energía al sistema según el regulador de carga lo requiera; para apreciar el aporte de energía y descarga de la Batería se utiliza un osciloscopio conectado en borneras del acumulador:

**Figura 28** Voltaje DC, Corriente DC y porcentaje de carga de la batería.

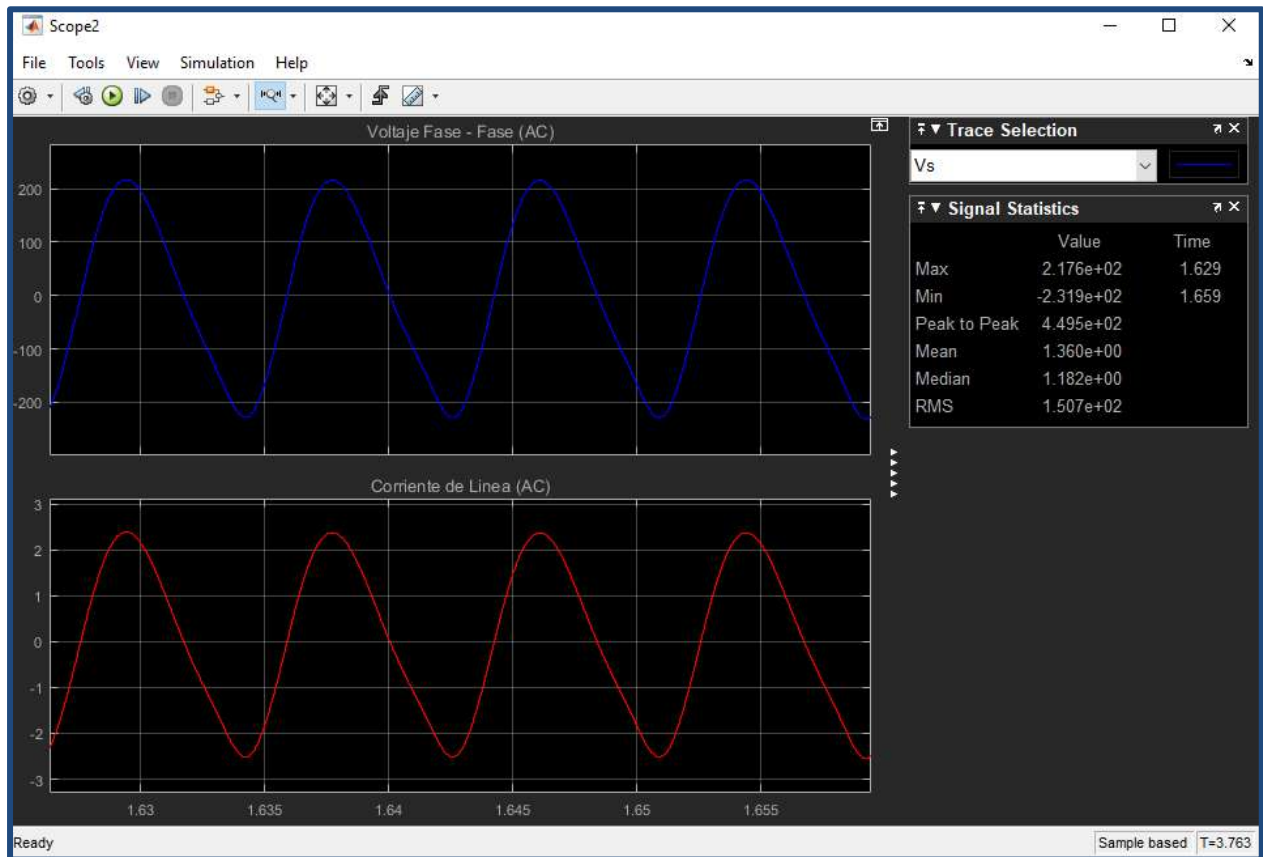


Nota. Elaboración Propia.



Finalmente, la etapa del Inversor, cuya función es convertir el voltaje y corriente DC a voltaje y corriente AC además de elevarla a un nivel de tensión utilizable por cargas monofásicas; en este caso recibe el voltaje de 12 V DC del regulador y la convierte en una tensión de 220 V AC a su salida para entregarla a las cargas monofásicas conectadas al sistema:

**Figura 30** Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del inversor a la carga.



*Nota. Elaboración Propia.*

### **3.2.2. Modelamiento de Sistemas de Generación Trifásica con Pilas de Combustible Microbianas (PCM)**

La generación trifásica empleando la tecnología de las PCMs, es análoga a la metodología de la generación monofásica descrita en el anterior acápite; la única variación está en la modificación del inversor; sin embargo, se puede obtener energía trifásica con estos sistemas de dos formas:

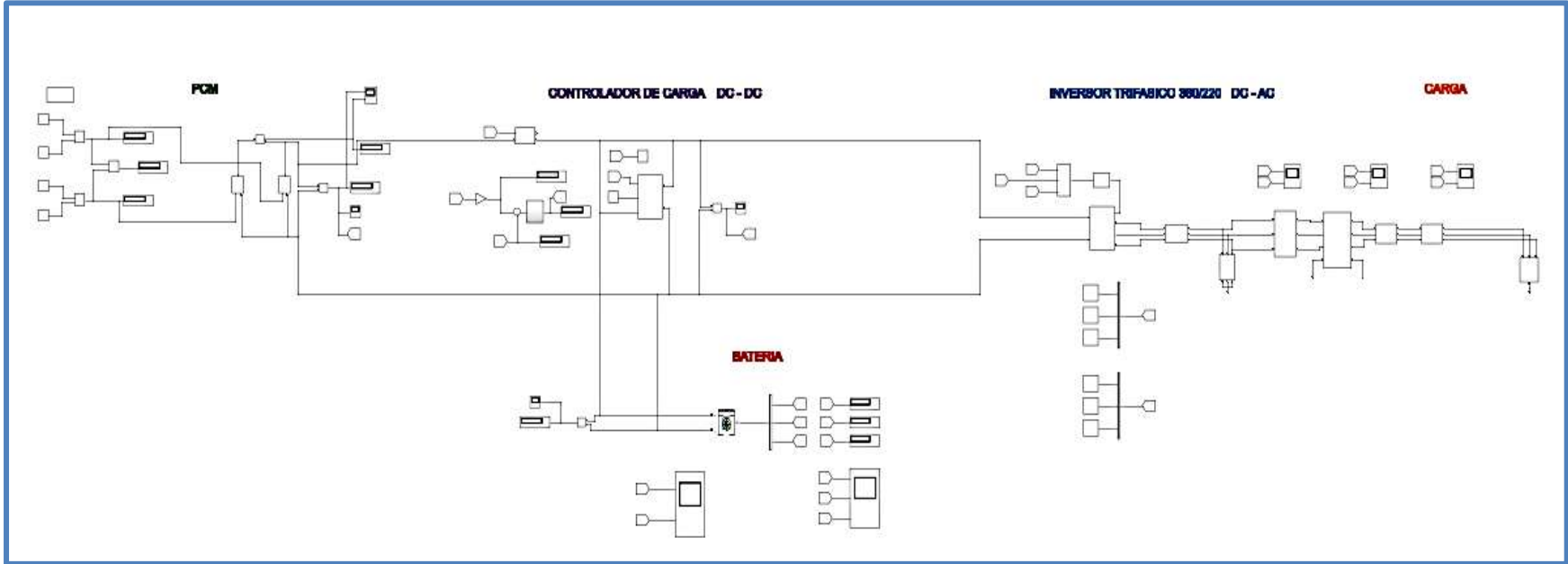
- 1.- A partir de una fuente PCM monofásica DC con Inversor Trifásico.
- 2.- A partir de tres fuentes PCM monofásicas DC, con inversores monofásicos independientes.

En este acápite modelaremos la primera forma, ya que en el mercado existen inversores trifásicos lo cual hace más práctica la obtención de energía trifásica; además es posible modelar los dos sistemas trifásicos conocidos en nuestra región: sistema 380-220 V y sistema 220 V trifásico.

#### **3.2.2.1. Modelamiento de Sistema de Generación Trifásica 380-220 V con Pilas de Combustible Microbianas (PCM)**

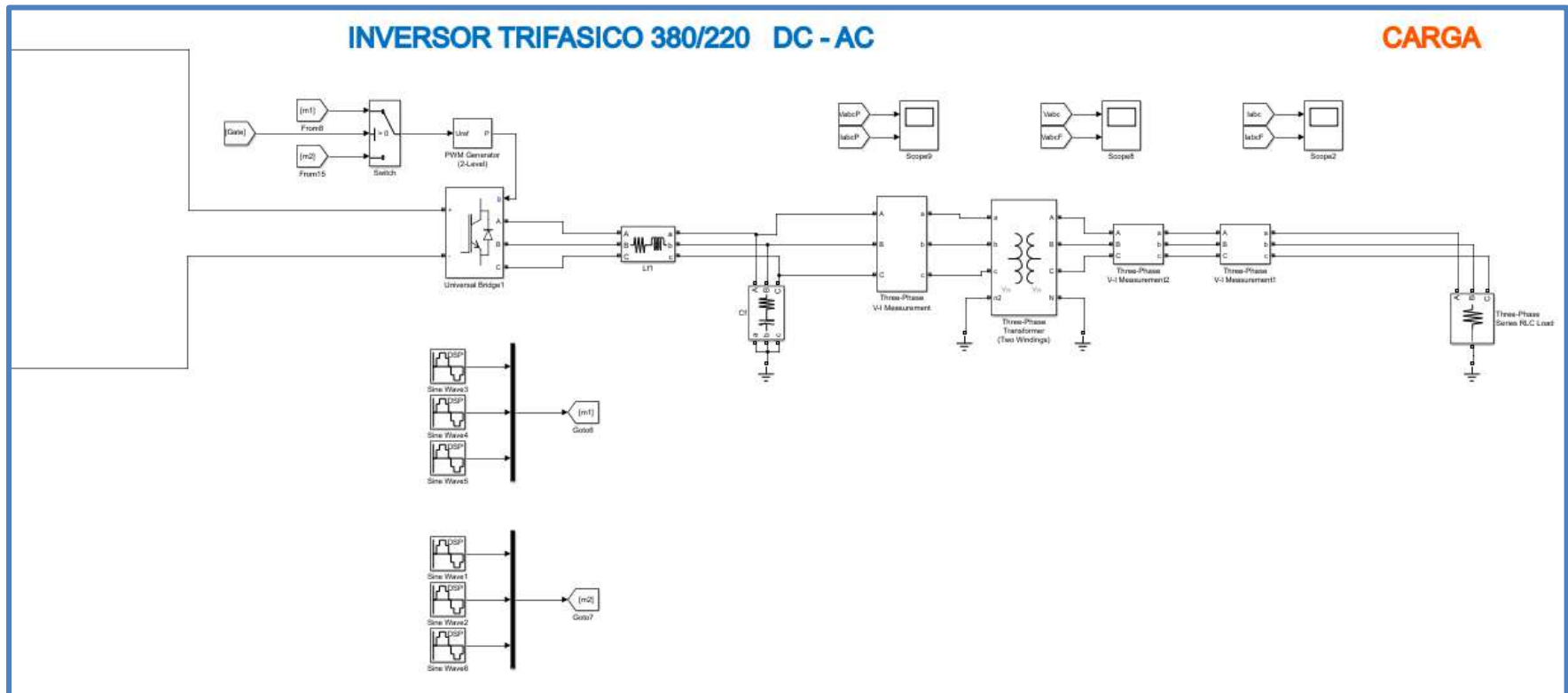
Para el modelamiento de un sistema trifásico a partir de una fuente DC con PCM el esquema es el mismo que el estudiado anteriormente en el tipo monofásico, solo que en este caso se cambiará el inversor, en el mercado existen Inversores con salida trifásica en sistemas 380 – 220 V; para este caso el modelamiento lo haremos utilizando un bloque, que el Simulink ya tiene previsto para este propósito dando la forma de onda sinusoidal a las tres fases de salida y aterrando el neutro, podemos obtener los voltajes de línea VL y los voltajes de fase VF propios del sistema 380-220 V, la energía generada la alimentamos a una carga netamente trifásica; el modelo de Simulink se muestra en la siguiente figura:

**Figura 31** Sistema de Generación Trifásica 380-220 V, con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo Matemático En Software Simulink de Matlab.



*Nota. Elaboración Propia.*

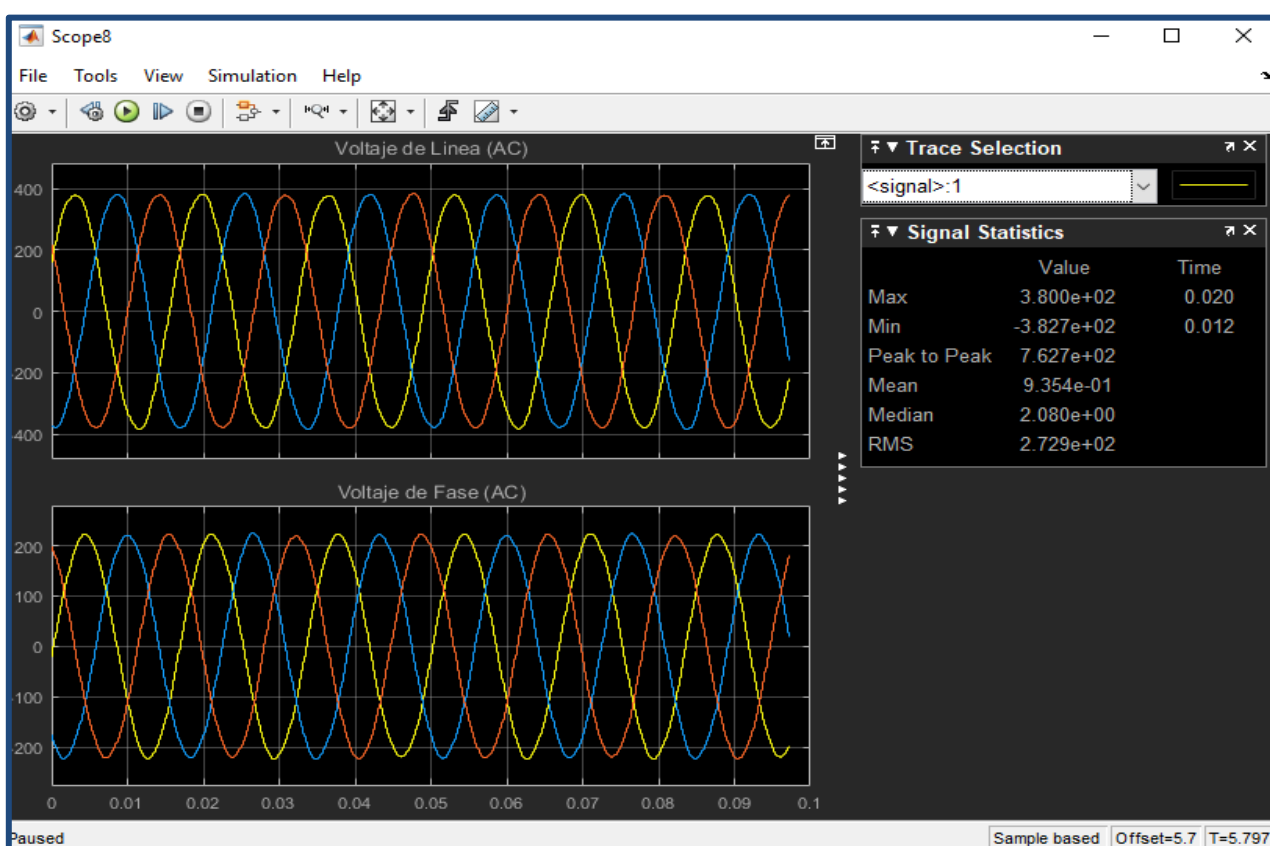
**Figura 32** Etapa Inversor Trifásico (DC - AC) y Carga Trifásica Conectada – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

Como se aprecia en la figura 32 y figura 33, el inversor trifásico 380-220V, convierte una entrada de voltaje monofásica en DC proveniente del Controlador transformándola en voltaje trifásico, obteniéndose voltajes de línea (380 V) y voltajes de fase (220 V) y esto alimenta a la carga trifásica conectada para su funcionamiento; los resultados podemos verlo conectando un osciloscopio analizando la energía generada en cada fase:

**Figura 33** Voltaje de línea y fase AC (Sistema 380/220 V – 3F) de salida trifásica del inversor a la carga.



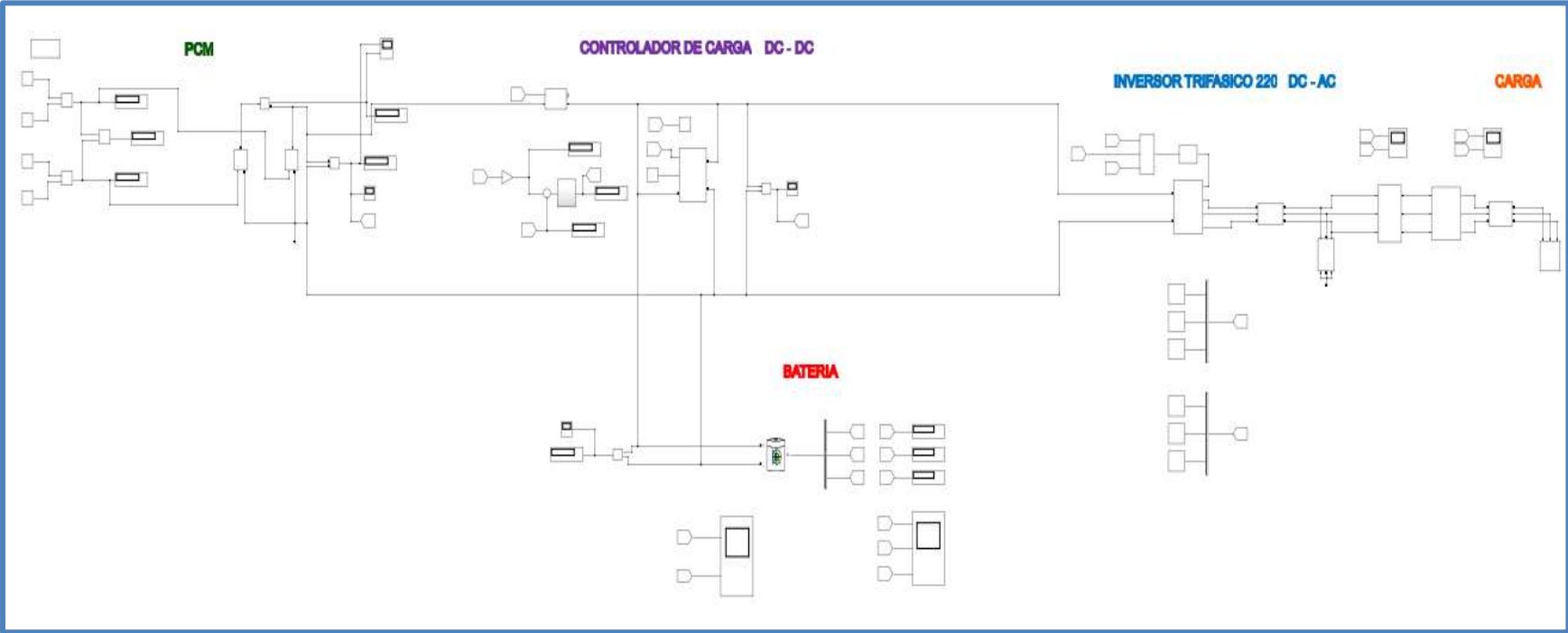
*Nota. Elaboración Propia.*



### **3.2.2.2. Modelamiento De Sistema De Generación Trifásica 220 V Con Pilas De Combustible Microbianas (PCM)**

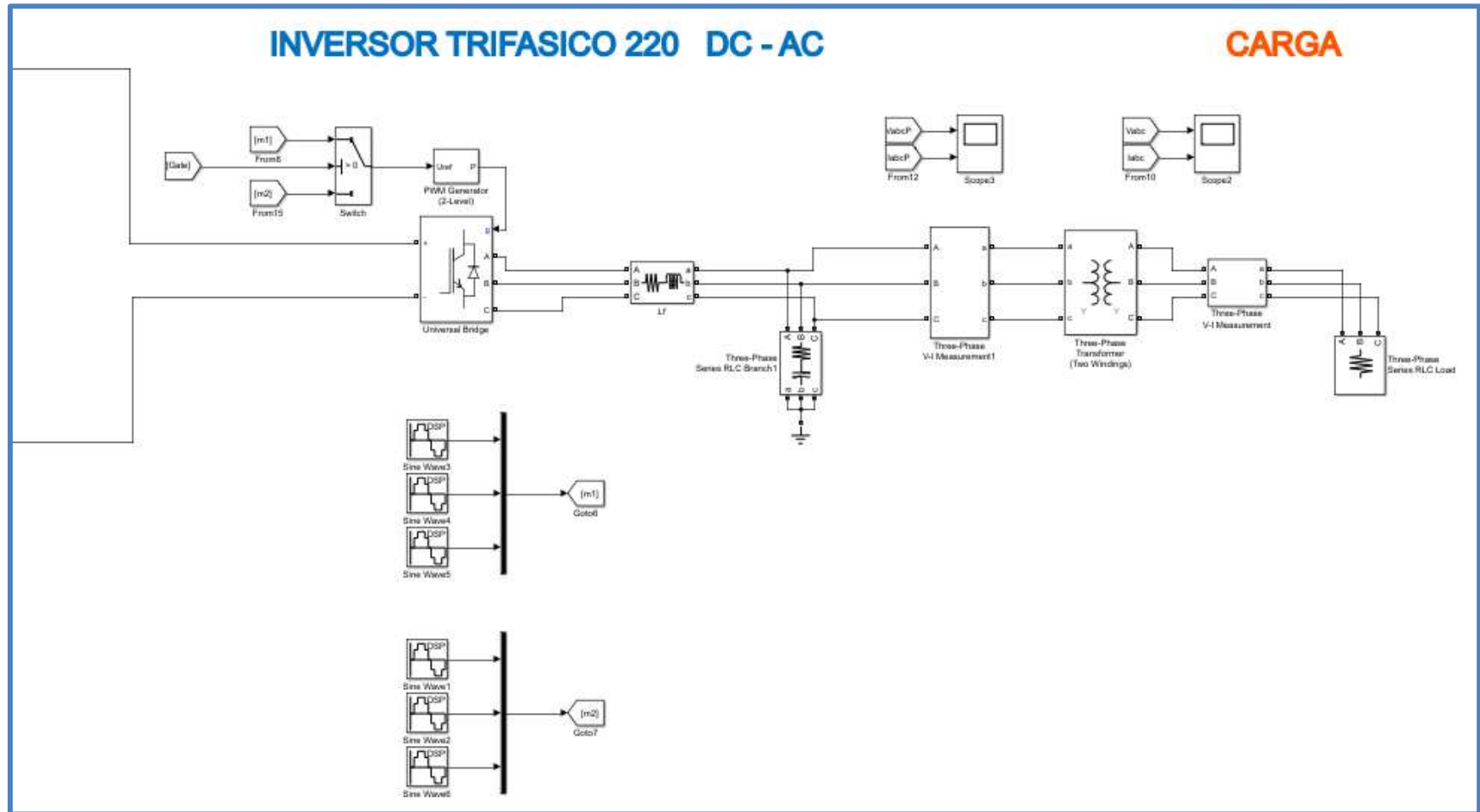
Análogamente al caso anterior para modelar un sistema trifásico 220V modificaremos la etapa de Inversor; la carga a alimentar será sin neutro aterrado así que la tensión de línea será igual a la de fase en la salida (220 V), el sistema en conjunto es similar a lo mostrado anteriormente, la energía generada se alimenta a una carga trifásica en 220V; el modelo de simulink se muestra en la siguiente figura:

**Figura 34** Sistema de Generación Trifásica 220 V, con Pilas de Combustible Microbianas (PCM) – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

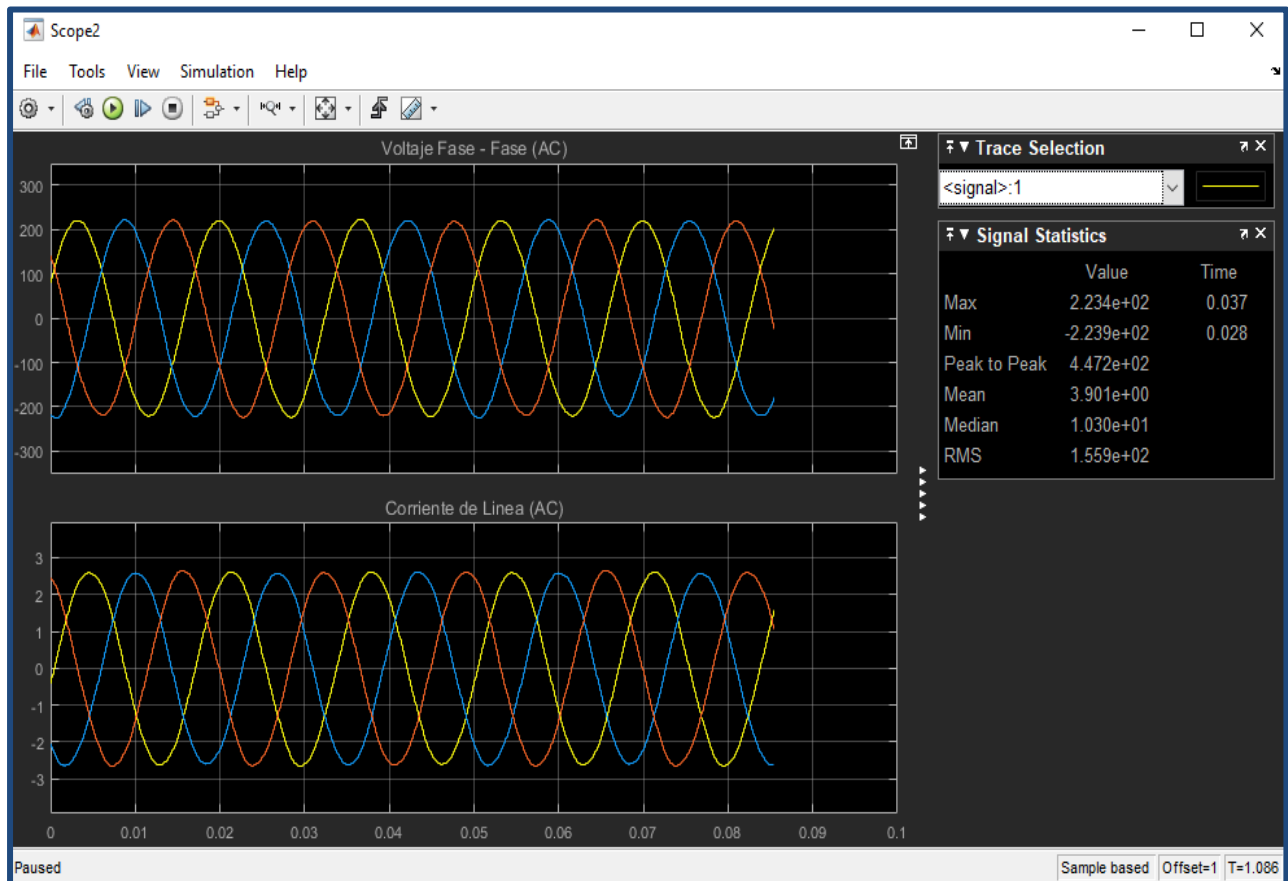
**Figura 35** Etapa Inversor Trifásico 220 V (DC - AC) y carga trifásica conectada – Modelo Matemático en Software Simulink de Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

De igual forma el Inversor trifásico, se encarga de convertir un Voltaje monofásico en DC suministrado por el Controlador en Voltaje trifásico 220 V. de AC, los resultados lo apreciamos en la siguiente figura:

**Figura 36** Voltaje de fase y corriente AC (sistema 220 V – 3F) de salida trifásica del inversor a la carga.



Nota. Elaboración Propia.

## CAPITULO IV: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO FÍSICO DEL SISTEMA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (SPCM)

### 4.1. Evaluación experimental de Celdas de Combustibles Microbianas (CCM)

Para iniciar la validación experimental se debe realizar la construcción de celdas unitarias microbianas para evaluar los parámetros eléctricos que se obtienen con estas; en tal sentido se construirán tres celdas unitarias con electrodos de 11 x 10 cm implementándolas con diferentes conjugaciones de materiales tal como se hizo en las simulaciones esto lo describiremos de la siguiente forma:

**Tabla 11** Conjugaciones de electrodos por el tipo material.

ITEM CONJUGACION	CATODO (+)		ANODO (-)	
	MATERIAL	EXPRESION SIMBOLICA	MATERIAL	EXPRESION SIMBOLICA
1	<b>OXIDO DE PLOMO</b>	$PbO_2 (s)$	<b>PLOMO</b>	$Pb(s)$
2	<b>OXIDO DE PLOMO</b>	$PbO_2 (s)$	<b>ALUZINC (55% Al; 43.4% Zn; 1.6% Si)</b>	$Aluzinc(s)$
3	<b>OXIDO DE PLOMO</b>	$PbO_2 (s)$	<b>ALUMINIO</b>	$Al(s)$

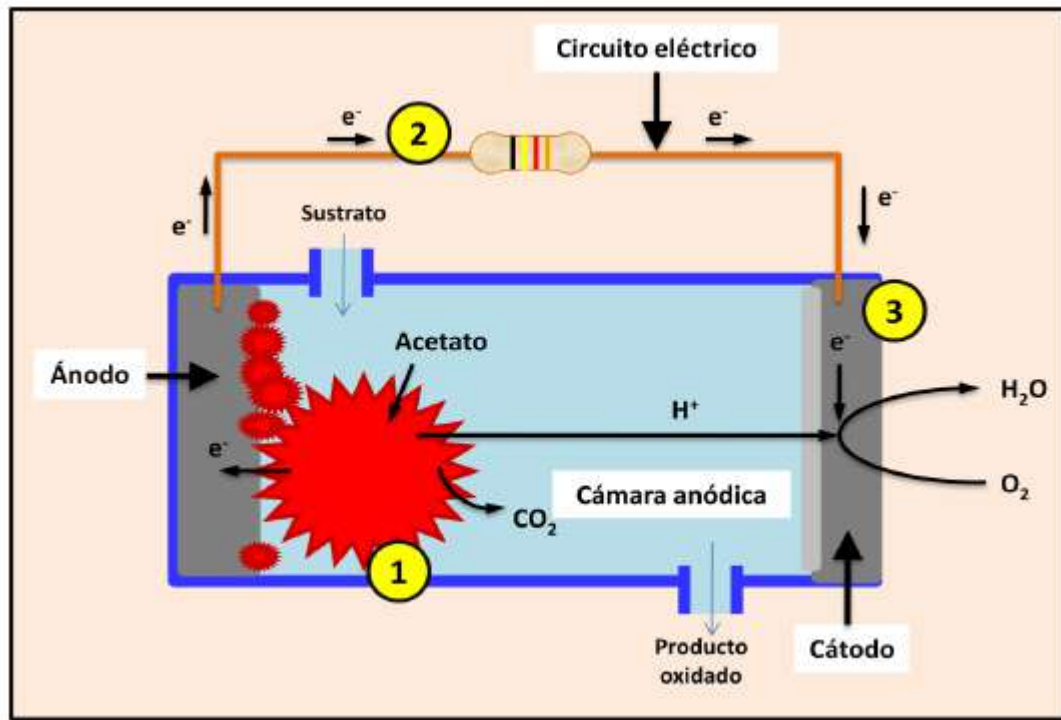
Nota. Elaboración Propia.

El electrolito será aguas residuales con rastros de desechos orgánicos (sustrato) que comúnmente se encuentran en las viviendas.

#### 4.1.1. Diseño y construcción de Celdas Unitarias Microbianas

El esquema a construir se puede apreciar en el siguiente grafico:

**Figura 37** Esquema de una celda de combustible microbiana (CCM); 1) Semirreacción en el ánodo, 2) Carga y 3) Semirreacción en el cátodo.



Nota. (Buitrón Méndez, 2011).

#### a) Electrodo positivo - CATODO (+)

Para los tres casos de CCM unitarias el material elegido es el óxido de plomo ( $PbO_2$ ); este será de 11 cm de altura y 10 cm de ancho con un espesor de aproximadamente 4mm; la fabricación de este electrodo es similar a los electrodos de plomo ácido de las baterías o acumuladores; consiste en una malla fina de plomo la cual es tarrajada con una pasta  $PbO_2$  y para mayor resistencia mecánica dicha pasta se mezcla con un pequeño porcentaje de fibra de vidrio, una vez seca la placa se procede a cargar eléctricamente el electrodo en una solución de ácido sulfúrico rebajado  $H_2SO_4$  conectándolo al polo positivo de una fuente de CD de 12 V durante aproximadamente 24 horas, y para el polo negativo se utiliza placas de plomo; al cabo de este tiempo la placa de  $PbO_2$  se endurece tornara de un color rojizo oscuro, indicando que dicha placa esta lista para su uso, la contextura de

este electrodo es del tipo poroso; los microporos permitirán la reacción entre los iones  $H^+$  contenidos en sustrato (producto del metabolismo bacteriano en el ánodo) y el oxígeno del aire como se aprecia en la fig 37.

**Figura 38** Electrodo positivo de óxido de plomo  $PbO_2$ .



Nota. Elaboración Propia.

**b) Electrodo negativo - ANODO (-)**

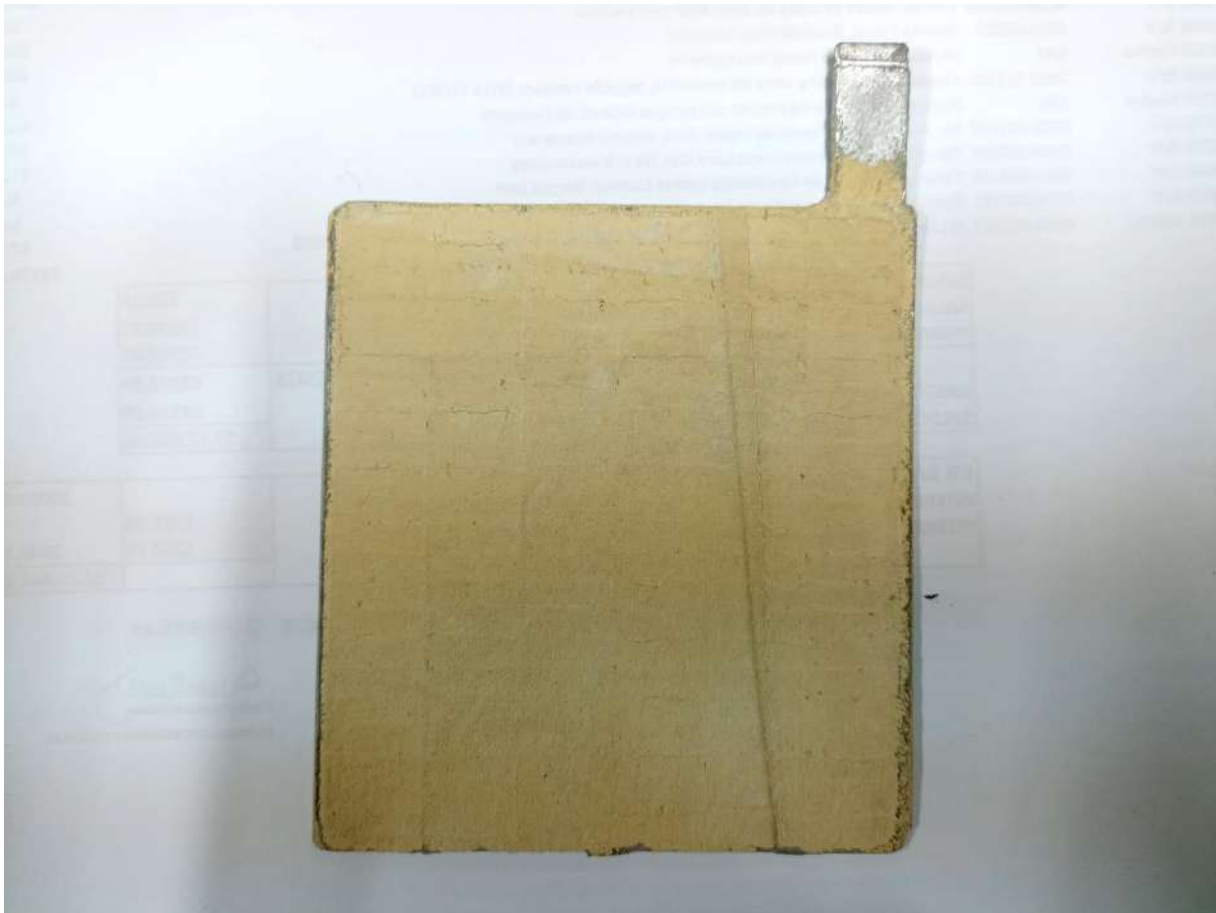
Los electrodos negativos serán de tres tipos de material elegidos para las pruebas:

**b.1. Ánodo de Pb (Plomo)**

Este tipo de electrodo será de 11 cm de altura y 10 cm de ancho con un espesor de aproximadamente 4mm, su fabricación es similar a la del electrodo de óxido de plomo; en este caso se emplea una pasta de plomo puro con fibra de vidrio para mejorar su resistencia mecánica; una

vez seca se procede a cargarla negativamente conectándolo a una fuente de CD de 12V. durante 24 horas; una vez transcurrido este tiempo la placa endurecida se torna de un color gris, lo que indica que ya está lista para su uso; esta placa también es del tipo poroso, este electrodo va completamente sumergido en el sustrato como muestra la fig 37.

**Figura 39** *Electrodo negativo de plomo Pb.*



Nota. Elaboración Propia.

## **b.2. Ánodo de Aluzinc**

La implementación de este electrodo será de una placa de Aluzinc cuyas dimensiones serán de 11 cm de altura y 10 cm de ancho, con un espesor de 4mm; el Aluzinc es una aleación de 55% Al; 43.4% Zn; 1.6% Si; los materiales predominantes Al y Zn son los que determinan un buen



material para el efecto de metabolismo de bacterias anaerobias; cabe indicar que en el mercado regional existe mallas y planchas de Aluzinc, por practicidad para esta prueba se utilizará una plancha de Aluzinc.

**Figura 40** *Electrodo negativo de Aluzinc.*

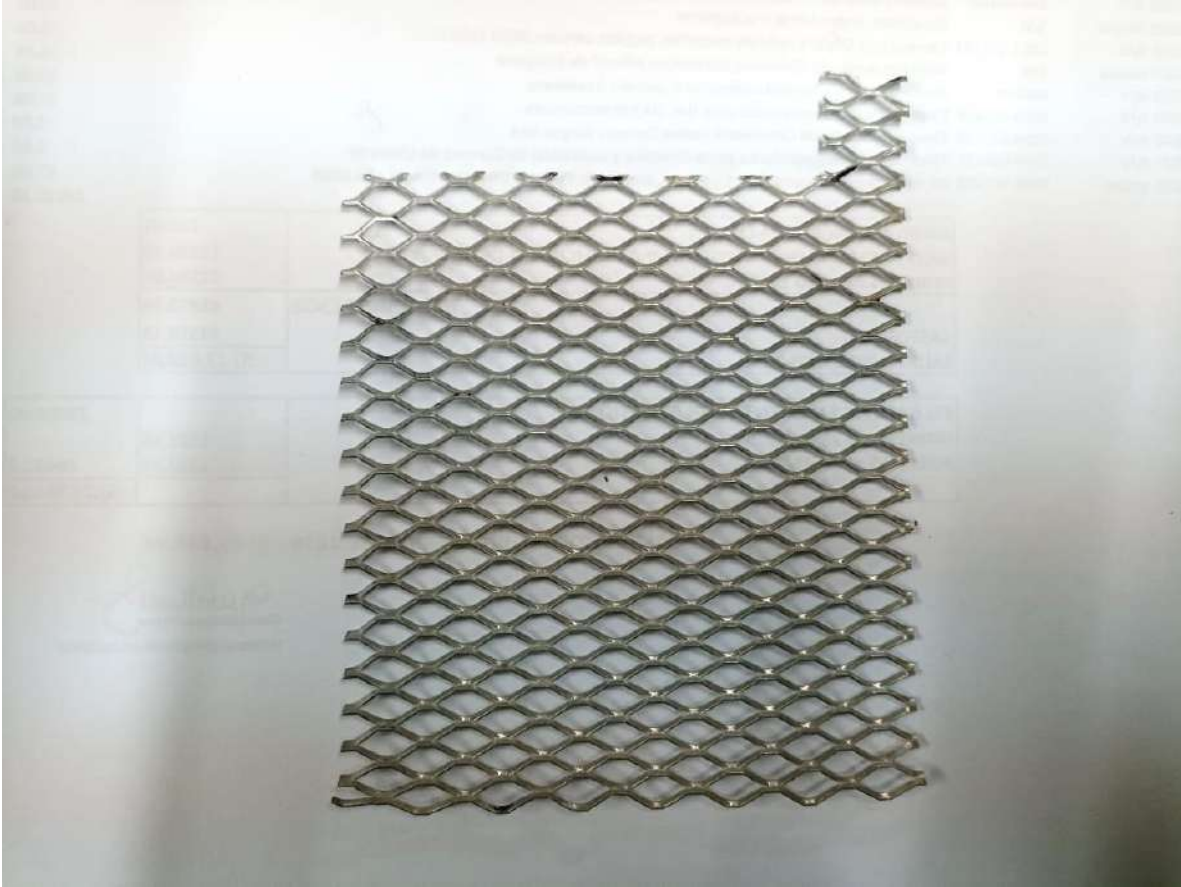


Nota. Elaboración Propia.

### **b.3. Ánodo de Al (Aluminio)**

El electrodo de Aluminio será una malla con dimensiones de 11 cm de altura y 10 cm de ancho con un espesor de 4mm; este tipo de mallas existen en el mercado regional, para distintas aplicaciones como máscaras de automóviles, estructuras de radiadores, entre otros; para el presente estudio se utilizará este tipo de mallas.

**Figura 41** *Electrodo negativo de Aluminio Al.*

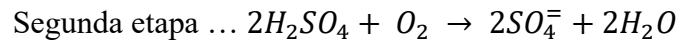
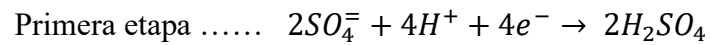


Nota. Elaboración Propia.

**c) Membrana de Intercambio Protónico- Electronic Polymer Membrane (PEM)**

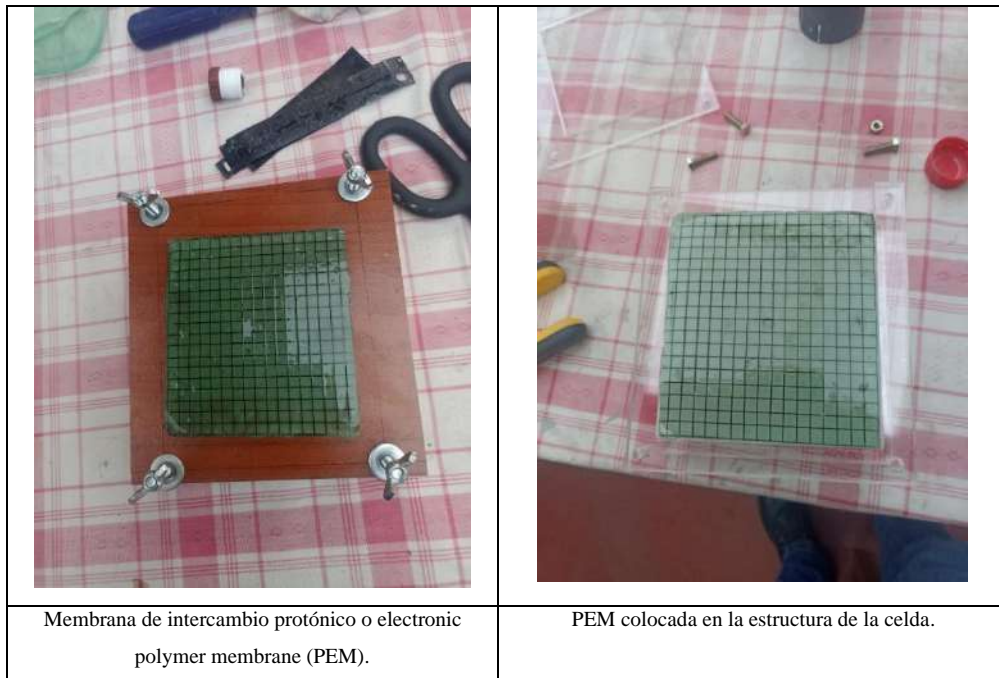
Las membranas de intercambio protónico aún se encuentran en investigación para esta tecnología, normalmente están hechas de la sinterización de un polímero con elementos conductores; para nuestro caso hemos experimentado una sinterización de un gel convirtiéndolo en conductor hasta llevarlo a un estado semisólido (estado coloidal); para esto se ha experimentado sintetizando un 70% de colapez; 10% de Carbopol y 20% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico rebajado al 10%) como resultado se tiene una membrana solida relativamente estable a temperatura ambiente (17 a 18°C) en cuya composición se encuentran suspendidos iones sulfatos  $SO_4^-$  que es un potente aceptor de H<sup>+</sup> (protones); cuando los hidrogeniones (H<sup>+</sup>) provenientes del metabolismo de bacterias

recorren el electrolito (sustrato) hacia la membrana PEM, los sulfatos absorben  $2H^+$  formando  $H_2SO_4$  semiacuoso y este en presencia del oxígeno ( $O_2$ ) del aire en los poros del cátodo sede sus  $2H^+$  para formar moléculas de agua ( $H_2O$ ) y nuevamente dejar sueltos los iones sulfatos  $SO_4^-$ , el proceso es repetitivo y continuo ; para que suceda estas reacciones requiere de los electrones que circulan por el circuito externo de la celda (electrones que también fueron emitidas por las bacterias en el proceso de reducción en el ánodo), con lo cual se completa la circulación de corriente con mayor eficiencia y por ende mayor ganancia de corriente en mA. Se puede resumir el fenómeno químico sucedido en la membrana con las siguientes ecuaciones:



En la siguiente figura podemos apreciar una membrana realizada sobre una estructura de malla de plástico para mejorar su contextura y resistencia mecánica, esta sirvió para probar sus propiedades eléctricas conductivas:

**Figura 42** Membrana de intercambio protónico o electrónico polymer membrane (PEM).



Nota. Elaboración Propia.

Sin embargo, luego de experimentaciones se observó que es más conveniente diseminar la membrana en estado líquido sobre el mismo cátodo en la celda y que se solidifique ya dentro de la celda; logrando así una fusión solidaria con el electrodo y que las reacciones sucedan con mayor eficiencia, a continuación, vemos imágenes del proceso:

**Figura 43** *Fusión solidaria de la PEM con el cátodo.*



Nota. Elaboración Propia.

**d) Cuba**

La cuba es la estructura donde se posicionarán los electrodos positivos y negativos la misma que estará provista en el medio de un depósito de dimensiones de 11 cm de altura, 10 cm de ancho y 5 cm de largo con un entrada y salida para el sustrato; el material de la cuba es la plancha de acrílico de 4 mm; a continuación, se aprecia los planos del diseño de la cuba:

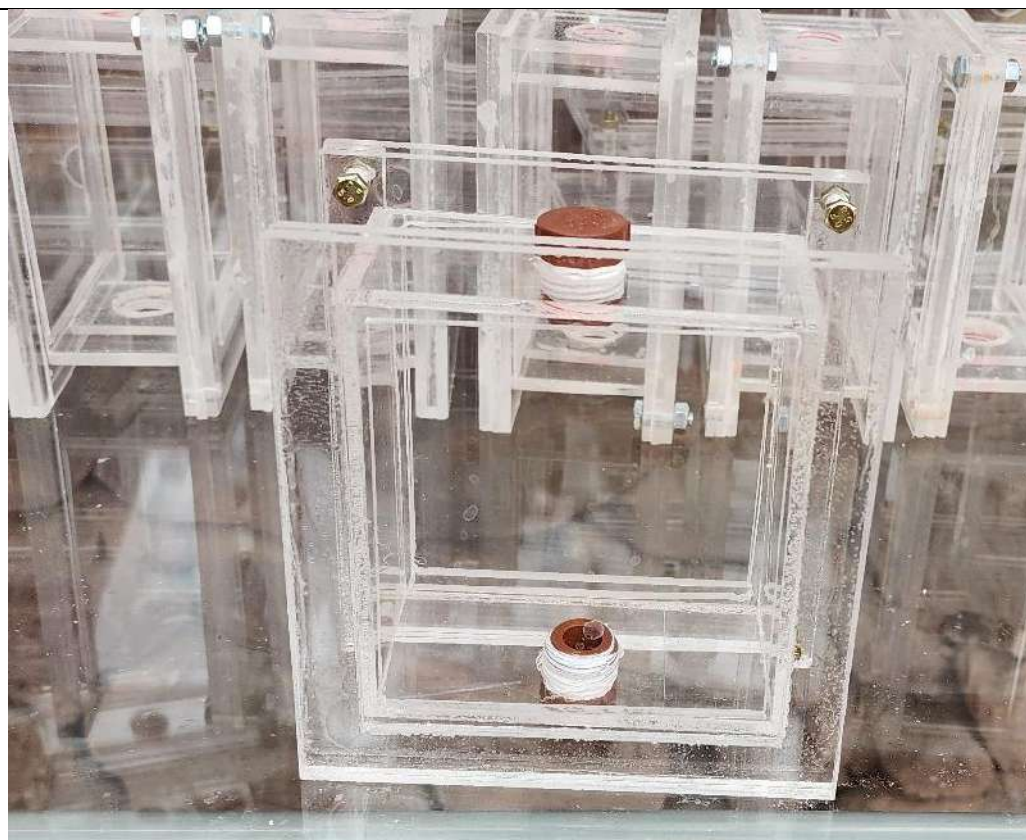
**Figura 44** *Proceso de cortado del acrílico en diversos componentes de la estructura de la cuba.*

<p>Proceso de cortado de la plancha de acrílico de 4mm.</p>	
<p>Procedimiento de montaje de estructura de celdas.</p>	

Procedimiento del armado y pegado de la estructura de las celdas.



Procedimiento del montaje de tapas de hermeticidad para la celda.



Nota. Elaboración Propia.

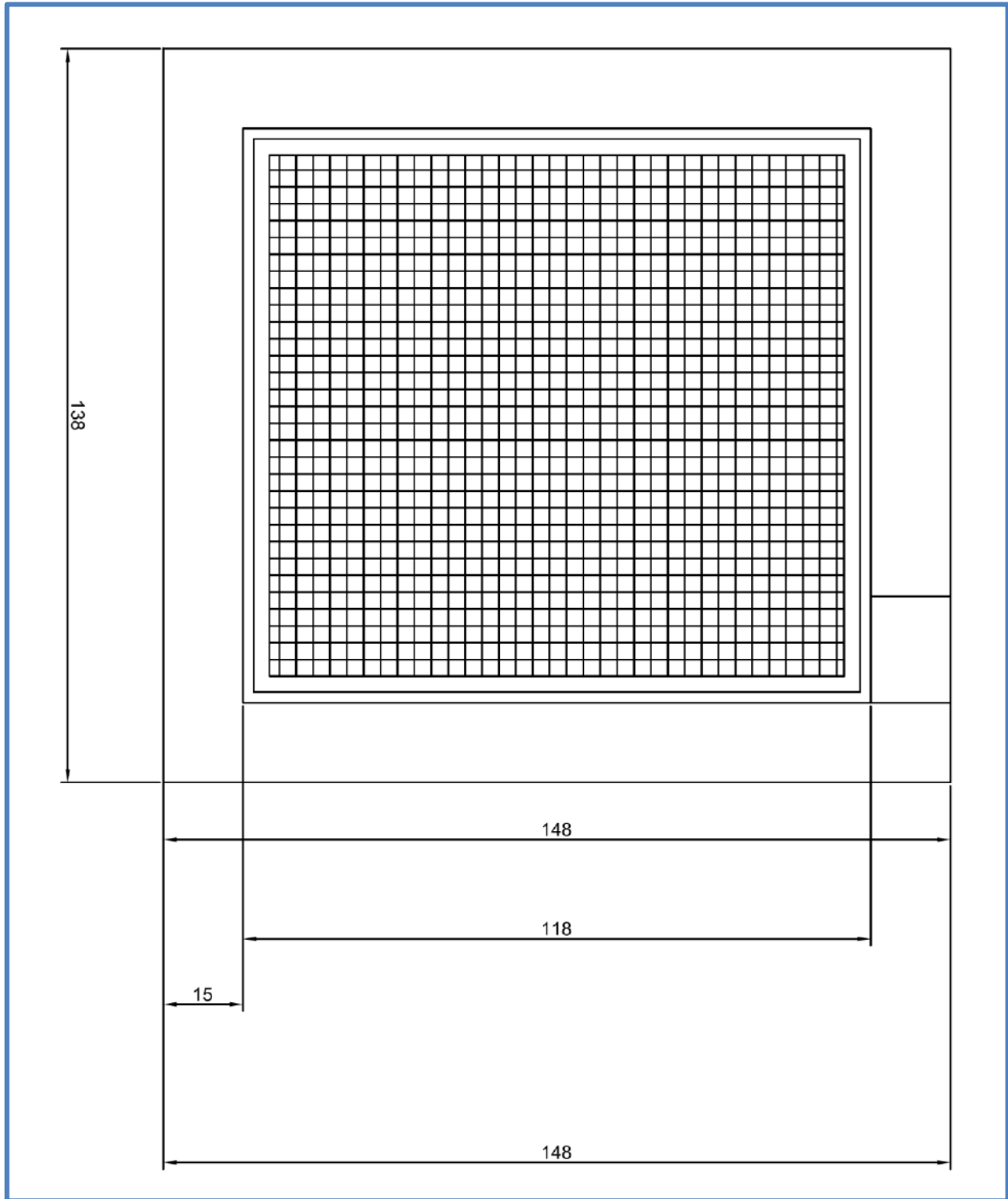
**Figura 45** *Cuba de una CCM.*



Nota. Elaboración Propia.

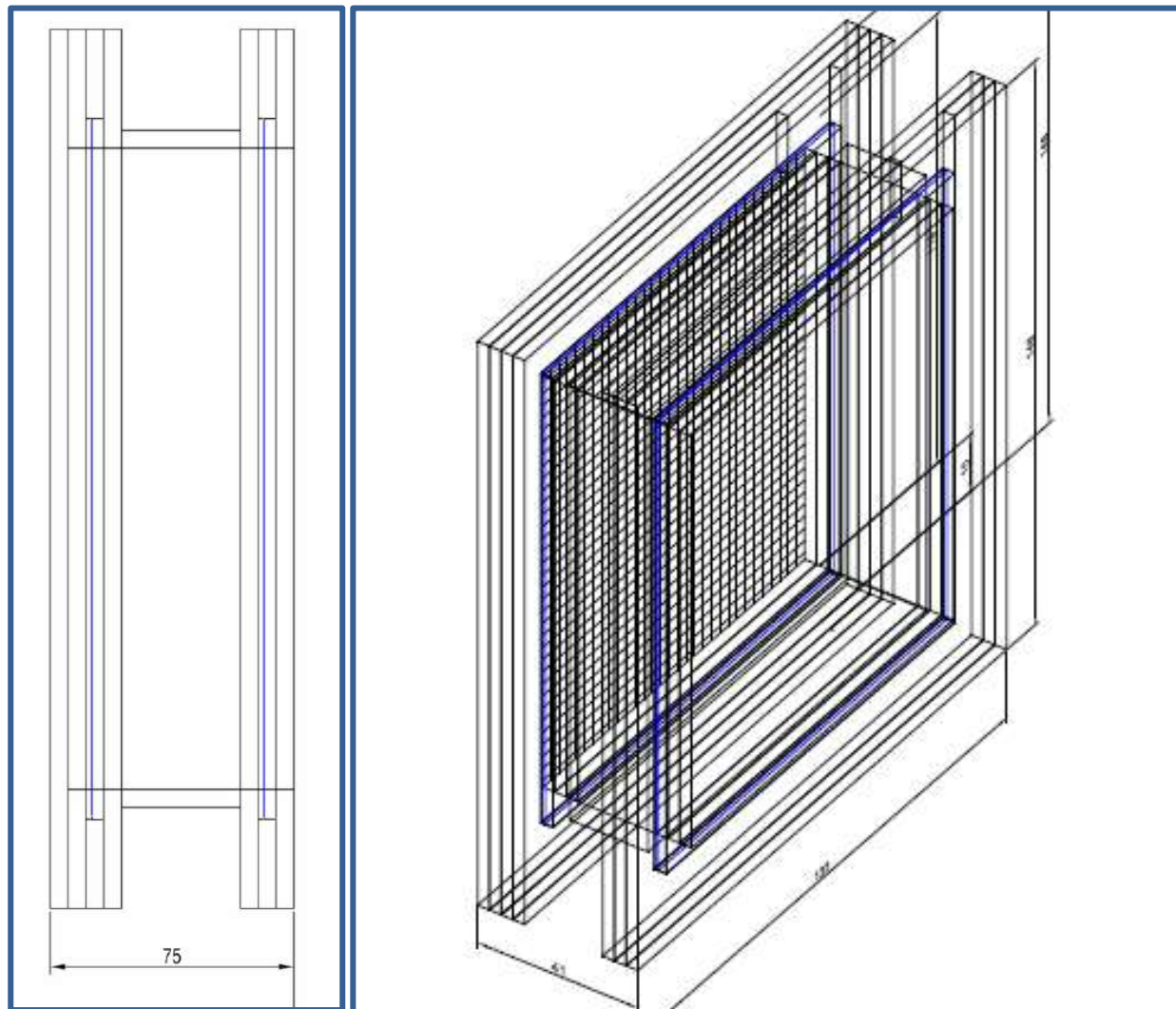


**Figura 46** Vista frontal del diseño de cuba de una CCM, dimensiones en mm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 47** Vista lateral e isométrica del diseño de cuba de una CCM, dimensiones en mm.



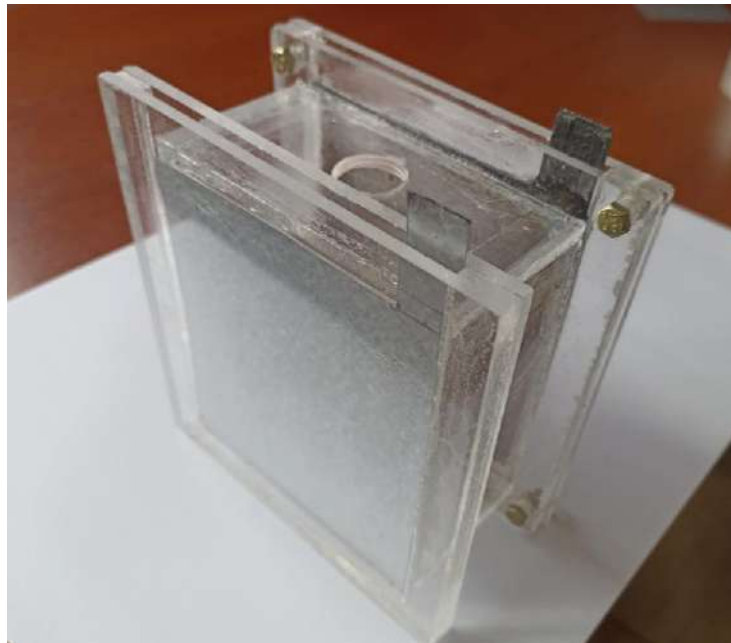
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 48** *CCM unitaria PbO<sub>2</sub>-Pb.*



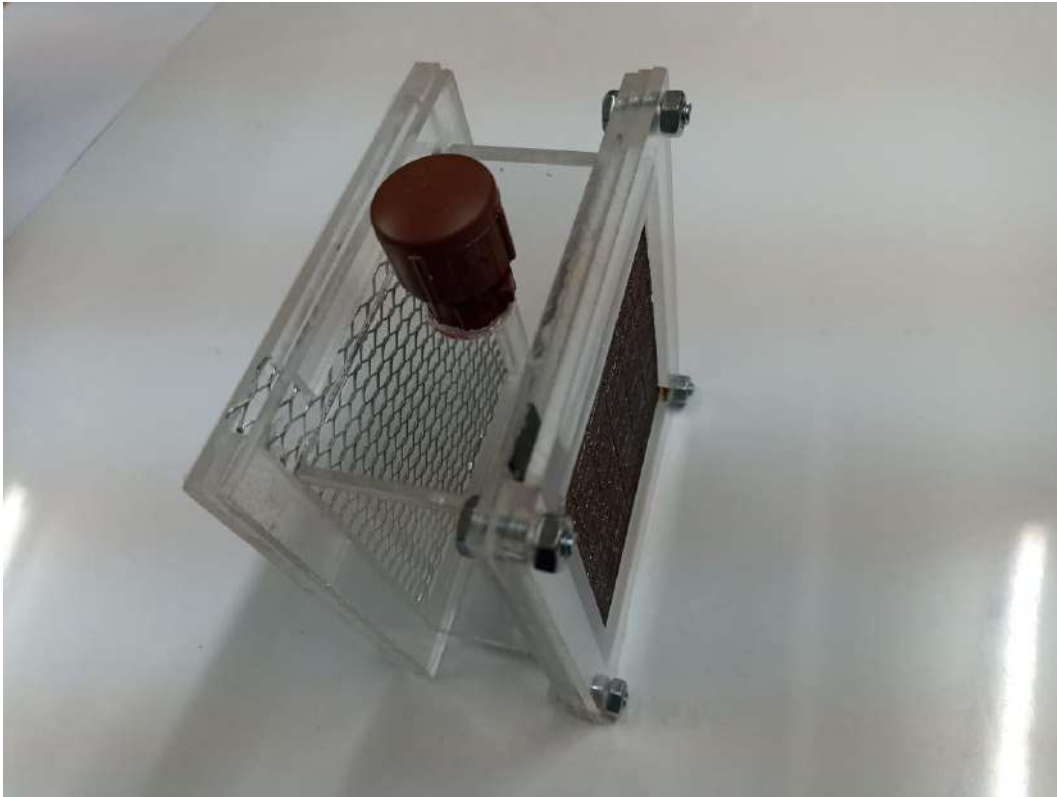
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 49** *CCM unitaria PbO<sub>2</sub>-Aluzinc.*



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 50** CCM unitaria PbO2-Al.



Nota. Elaboración Propia.

**e) El Sustrato**

El sustrato o electrolito a utilizar para las pruebas unitarias son residuos de materia orgánica del tipo vegetal combinados con aguas residuales extraídas del río Huatanay, de una zona donde las aguas se encuentran más contaminadas; un 60% de residuos vegetales se triturarán al cual se le agregará un 40 % de agua residual formando un sustrato acuoso el cual se dejará en un estado de biodegradación dentro de las celdas de prueba unitarias selladas herméticamente por un tiempo de 5 días.

**Figura 51** Extracción de aguas residuales del rio Huatanay.



Extracción de aguas residuales del rio Huatanay



Toma de muestras de aguas residuales del rio Huatanay



Toma de muestras de aguas residuales del rio Huatanay



Residuos vegetales triturados



Almacenamiento de sustrato en las CCM de prueba



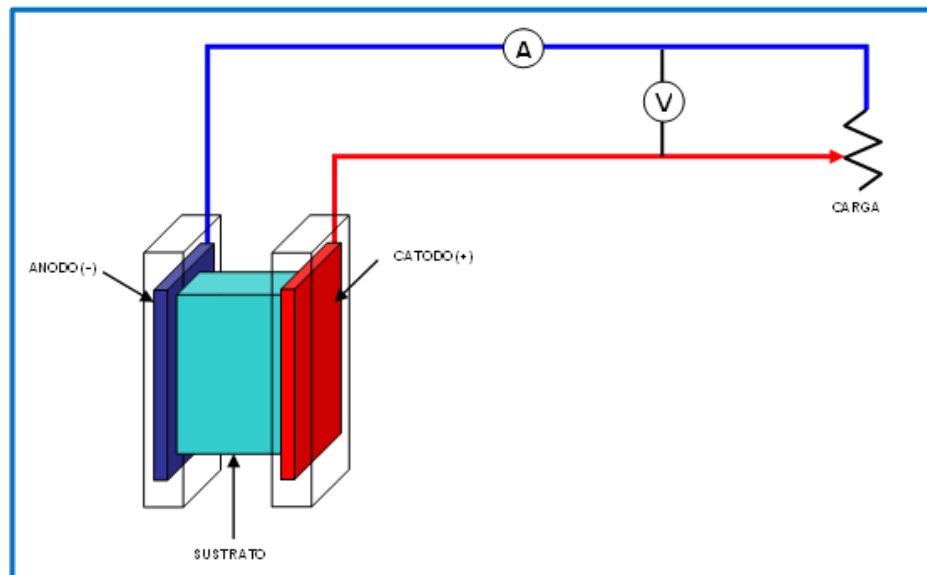
Sustrato en CCM a) Celda PbO<sub>2</sub>-Pb, b) Celda PbO<sub>2</sub>-Aluzinc  
c) Celda PbO<sub>2</sub>-Al

Nota. Elaboración Propia.

#### 4.1.2. Pruebas eléctricas de CCM unitarias

Las pruebas eléctricas aplicadas a las celdas construidas servirán de validación experimental lo simulado en el anterior capítulo III; para este fin se llenará los depósitos de las celdas con sustrato acuoso que contiene desechos orgánicos vegetales y aguas residuales extraídas del río Huatanay del Cusco; luego conectaremos las celdas a una serie de resistencias que harán las veces de carga variable, las mediciones se realizarán con un voltímetro conectado en paralelo para obtener la  $V_{cell}$  (v) y un amperímetro en serie para medir la  $I_{cell}$  (mA); el  $J_{cell}$  (densidad de corriente) se obtiene del cociente de la  $I_{cell}$  entre el área del electrodo ( $mA/cm^2$ ). Se realizará 11 mediciones por celda, la primera en vacío para obtener el voltaje máximo, las siguientes 9 mediciones se realizarán variando a intervalos definidos las resistencias de carga 405K, 305K, 205K, 105K, 5K, 4K, 3K, 2K, 1K y la última medición a corto circuito para obtener la corriente máxima; el esquema de conexión para las pruebas es como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 52** Esquema de pruebas de una CCM.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 53** *Instalación de mesa de trabajo.*



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 54** *Distribución de instrumentos y componentes de pruebas.*



Nota. Elaboración Propia.

## REGISTRO FOTOGRAFICO DE PRUEBAS A LA CCM PbO2-Pb

**Figura 55** Prueba 01: CCM PbO2-Pb a circuito abierto.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 56** Prueba 02: CCM PbO2-Pb a 405 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.



**Figura 57** Prueba 03: CCM PbO2-Pb a 305 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 58** Prueba 04: CCM PbO2-Pb a 205 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 59** Prueba 05: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 105 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 60** Prueba 06: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 5 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 61 Prueba 07: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 4 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 62 Prueba 08: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 3 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 63** Prueba 09: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 2 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 64** Prueba 10: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a 1 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 65** Prueba 11: CCM PbO<sub>2</sub>-Pb a corto circuito.



Nota. Elaboración Propia.

**REGISTRO FOTOGRAFICO DE PRUEBAS A LA CCM PbO2-Aluzinc**

**Figura 66 Prueba 01: CCM PbO2-Aluzinc a circuito abierto.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 67 Prueba 02: CCM PbO2-Aluzinc a 405 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 68** Prueba 03: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 305 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 69** Prueba 04: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a 205 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 70** Prueba 05: CCM PbO2-Aluzinc a 105 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 71** Prueba 06: CCM PbO2-Aluzinc a 5 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.



**Figura 72 Prueba 07: CCM PbO2-Aluzinc a 4 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 73 Prueba 08: CCM PbO2-Aluzinc a 3 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 74 Prueba 09: CCM PbO2-Aluzinc a 2 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 75 Prueba 10: CCM PbO2-Aluzinc a 1 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 76 Prueba 11: CCM PbO<sub>2</sub>-Aluzinc a corto circuito.**



Nota. Elaboración Propia.

**REGISTRO FOTOGRAFICO DE PRUEBAS A LA CCM PbO2-Al**

**Figura 77 Prueba 01: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a circuito abierto.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 78 Prueba 02: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a 405 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 79** Prueba 03: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a 305 Kohm.



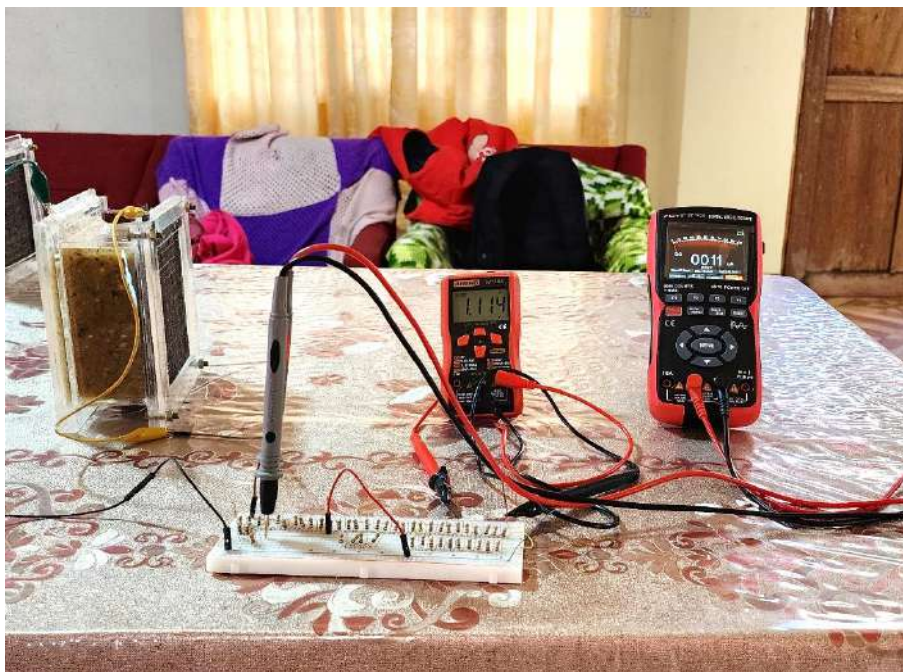
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 80** Prueba 04: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a 205 Kohm.



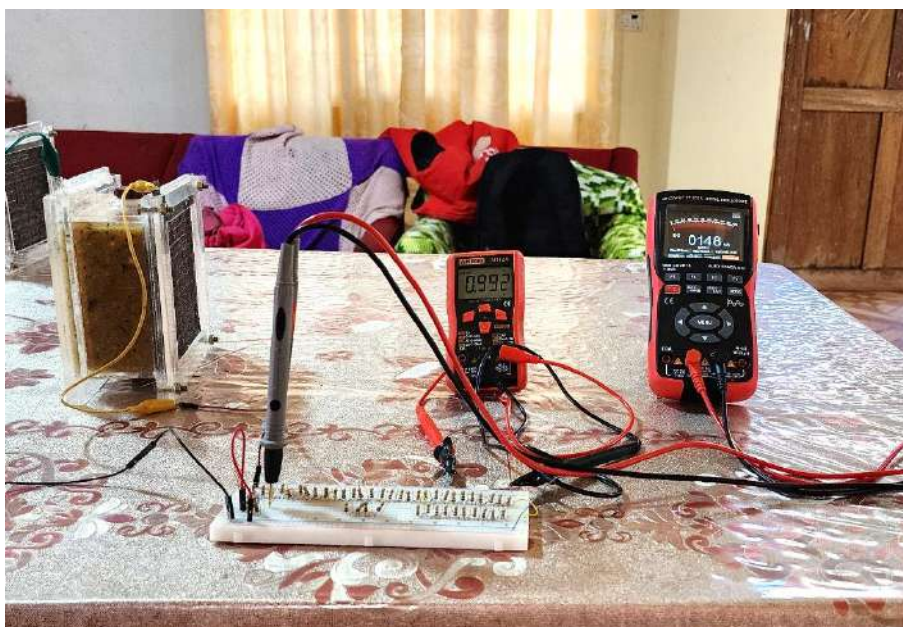
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 81** Prueba 05: CCM PbO2-Al a 105 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 82** Prueba 06: CCM PbO2-Al a 5 Kohm.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 83 Prueba 07: CCM PbO2-Al a 4 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 84 Prueba 08: CCM PbO2-Al a 3 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 85 Prueba 09: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a 2 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 86 Prueba 10: CCM PbO<sub>2</sub>-Al a 1 Kohm.**



Nota. Elaboración Propia.



**Figura 87** Prueba 11: CCM PbO2-Al a corto circuito.



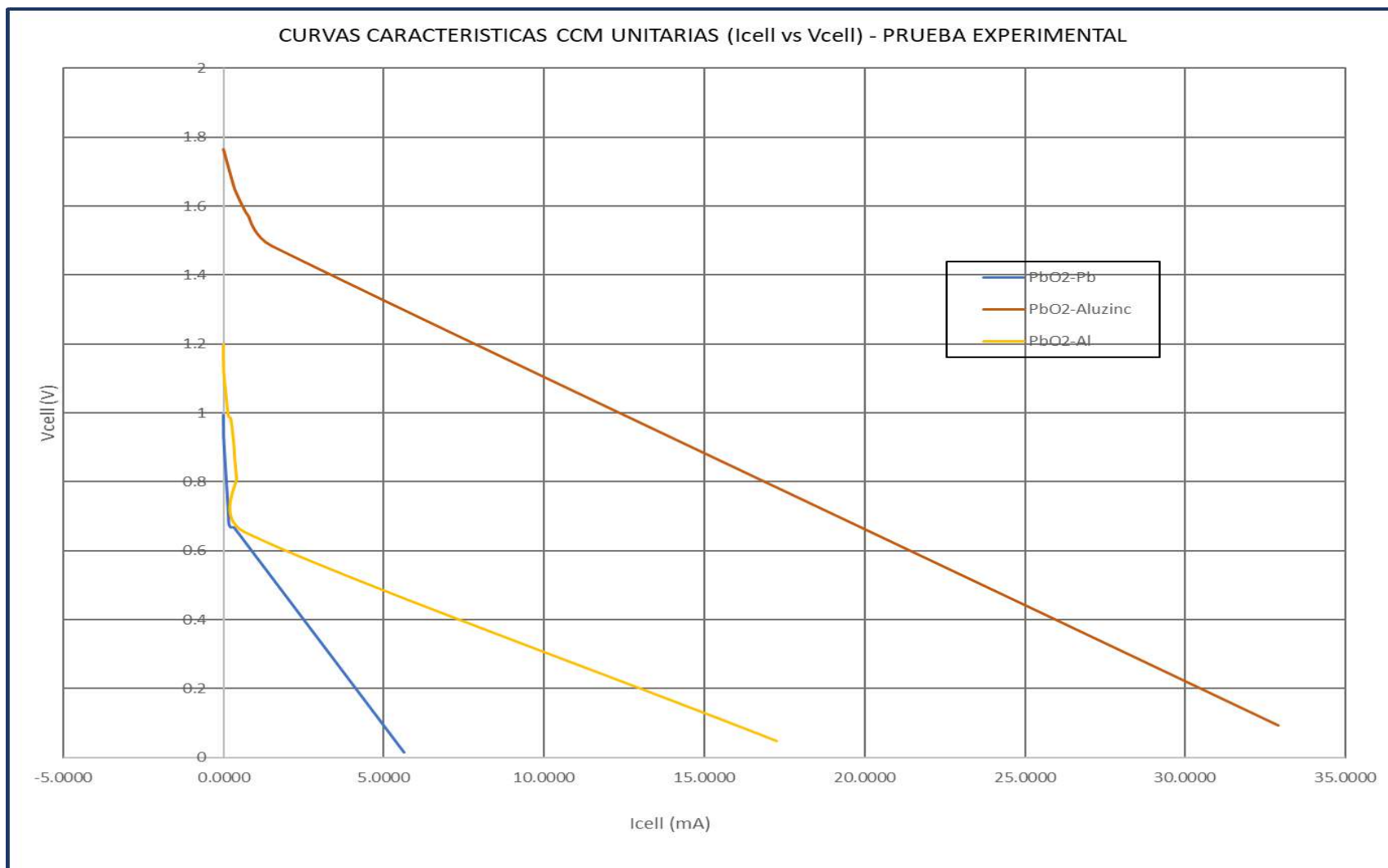
Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 12** Resultados de pruebas experimentales de las celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.

N° de PRUEBA	CARGAS KOHM	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
		PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
1	inf	0.994	1.764	1.197	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	405	0.97	1.764	1.138	0.0010	0.0040	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000
3	305	0.965	1.763	1.145	0.0030	0.0040	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000
4	205	0.955	1.762	1.122	0.0040	0.0080	0.0060	0.0000	0.0001	0.0001
5	105	0.926	1.759	1.114	0.0080	0.0160	0.0110	0.0001	0.0001	0.0001
6	5	0.719	1.654	0.992	0.1480	0.3330	0.1480	0.0013	0.0030	0.0013
7	4	0.678	1.636	0.984	0.1700	0.4130	0.2240	0.0015	0.0038	0.0020
8	3	0.668	1.61	0.921	0.2300	0.5420	0.3100	0.0021	0.0049	0.0028
9	2	0.667	1.568	0.809	0.3390	0.7950	0.4100	0.0031	0.0072	0.0037
10	1	0.619	1.484	0.654	0.7300	1.5100	0.6670	0.0066	0.0137	0.0061
11	0	0.016	0.094	0.049	5.6300	32.8900	17.2600	0.0512	0.2990	0.1569

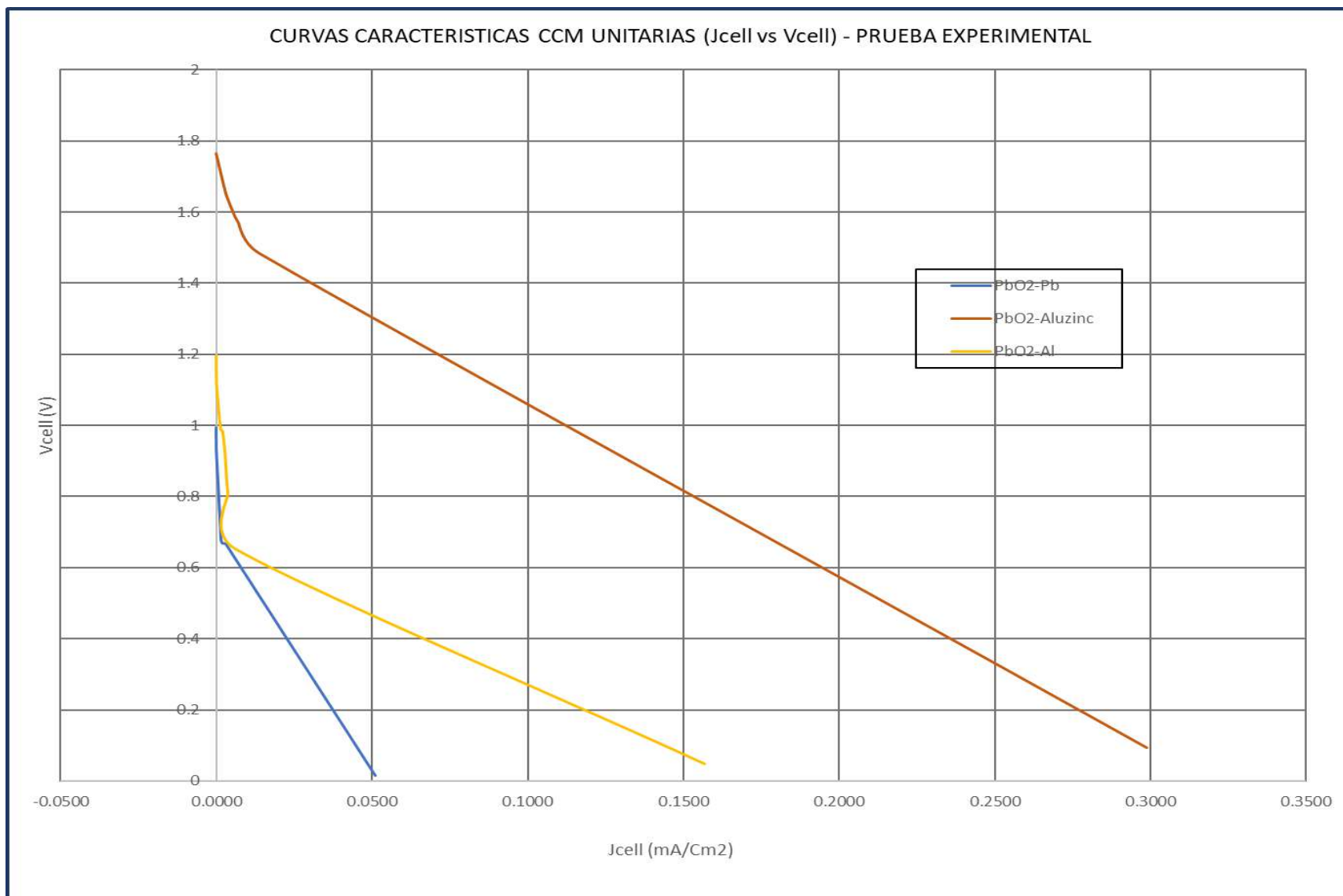
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 88** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas – Pruebas experimentales.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 89** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas – Pruebas experimentales.



Nota. Elaboración Propia.

Como se puede apreciar los resultados experimentales las CCM unitarias con mejores parámetros  $V_{cell} = 1.764V$ ,  $i_{cell} = 32.89 \text{ mA}$  y una densidad de potencia promedio de  $45.82 \text{ W/m}^2$ , es la celda del par  $PbO_2/Aluzinc$ ; en tal sentido se utilizará este tipo de celda para implementar un sistema funcional con un apilamiento de varias celdas en serie y en paralelo como se describe en los siguientes acápite.

#### **4.3.Implementación de un Sistema De Pilas De Combustible Microbianas**

Habiendo obtenido los resultados anteriores, podemos aplicarlos para implementar sistemas funcionales de energía utilizable para casos reales de la vida cotidiana con esta tecnología; en ese entender recordemos que al apilamiento de varias celdas unitarias (CCM) ya sea en serie, paralelo o mixtas, se le denomina Pilas de Combustible Microbianas (PCM) y a todo el sistema funcional complementado con equipos electrónicos para entregar una energía utilizable le denominaremos Sistema de Pilas de Combustible Microbianas (SPCM).

**Figura 90** Construcción de la PCM- Cortado del acrílico.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 91** Construcción de la PCM- Pegado del acrílico.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 92** Construcción de la PCM- Armado de la estructura de la celda.



Nota. Elaboración Propia.

### 4.3.1. Cálculos justificativos para la Implementación de un SPCM demostrativo

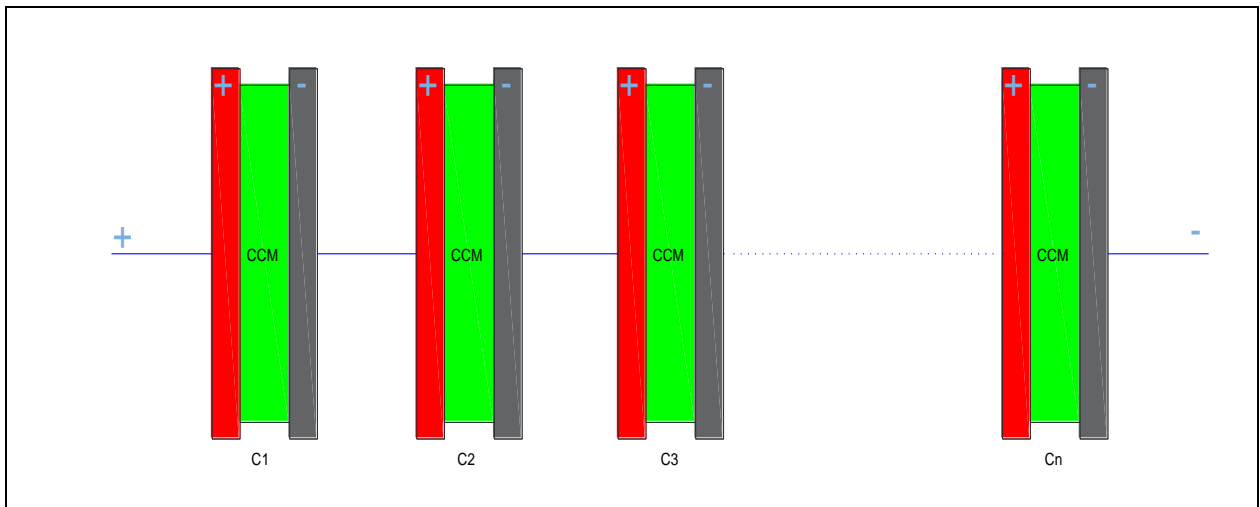
Para este caso práctico con fines demostrativos tomaremos la CCM de par PbO<sub>2</sub>- Aluzinc; implementando 07 celdas en serie y 04 apilamientos en paralelo, es decir un apilamiento mixto.

#### 4.3.1.1. Cálculo de la Tensión Total de la PCM

En un apilamiento en serie de CCM la tensión total estará dada de la siguiente forma:

$$V_{pcm_T} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + \dots + V_{Cn}$$

**Figura 93** Apilamiento de CCM en serie.



Nota. Elaboración Propia.

El equivalente de la anterior ecuación cuando la tensión de cada celda es la misma:

$$V_{pcm_T} = Ns \times V_{Cell}$$

Donde:

Ns: número de celdas en serie

V<sub>cell</sub>: tensión de celda (v)



Entonces reemplazando los valores se tiene que:

$$V_{pcm_T} = 7 \times 1.764$$

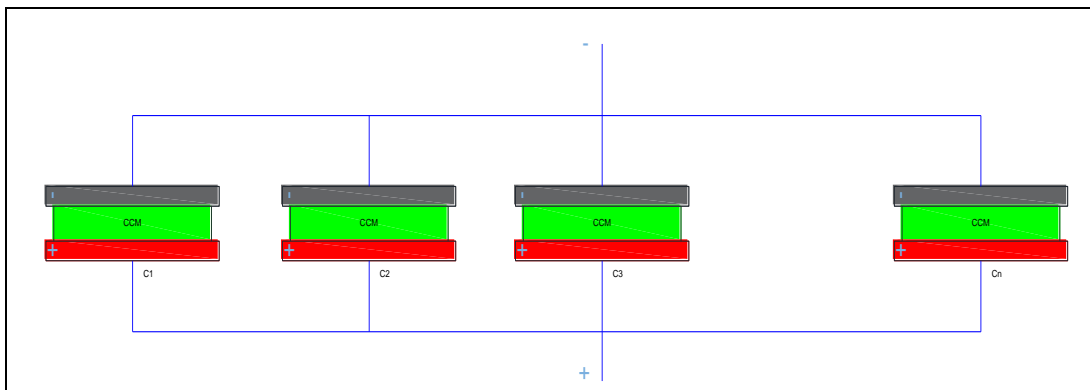
$$V_{pcm_T} = 12.348 \text{ V.}$$

#### 4.3.1.2. Cálculo de la corriente total de la PCM

En un apilamiento en paralelo de CCM la corriente total estará dada de la siguiente forma:

$$I_{pcm_T} = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + \dots + I_{Cn}$$

**Figura 94** Apilamiento de CCM en paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

El equivalente de la anterior ecuación cuando la corriente del grupo de celdas es la misma será de la siguiente forma:

$$I_{pcm_T} = N_p \times I_{cell}$$

Donde:

$N_p$ : número de grupo de celdas en paralelo

I<sub>cell</sub>: Corriente de celda (mA)

Entonces reemplazando los valores se tiene que:

$$I_{pcm_T} = 4 \times 32.89$$

$$I_{pcm_T} = 131.56 \text{ mA}$$

Conociendo los valores numéricos de los parámetros principales de una PCM, podemos seleccionar los equipos que complementaran a esta, para darle un funcionamiento práctico.

#### **4.3.2. Especificaciones técnicas de equipos para implementar un Sistema de Pilas de Combustible Microbianas (SPCM)**

Los equipos que complementaran a la PCM para poder dotar energía utilizable en cargas comunes, son tres las cuales se describen a continuación:

- Regulador de Carga
- Batería
- Inversor

##### **4.3.2.1.Regulador de carga**

El regulador de carga trabaja como un controlador de voltaje también es conocido con el nombre de controlador de carga.

El regulador seleccionado de carga y descarga inteligente tiene una interfaz sencilla y visual gracias a su pantalla LCD de grandes dimensiones. Muchos parámetros de control se pueden ajustar con gran flexibilidad en función de nuestros requisitos; el modelo es el LD2410C de la marca LDSOLAR las características son las siguientes:

**Figura 95** *Regulador de carga.*



Nota. Hoja características tienda.

**Tabla 13** Especificaciones técnicas del Regulador de carga.

Model	LD2410C	LD2420C	LD2430S	LD2440S	LD2450S
System Voltage	12V/24V DC auto				
PV Max Input Voltage	55V				
Self-consumption	<10mA				
Max Charging current	10A	20A	30A	40A	50A
Max Discharging current	10A	20A	30A	40A	50A
Battery type	Sealed(Default)/Gel/Flood				
LVD※*	11.0V ADJ 9V...12V ; x2/24V ; x4/48V				
LVR※*	12.6V ADJ 11V...13.5V ; x2/24V ; x4/48V				
Float Voltage※*	13.8V ADJ 13V... 15V ; x2/24V ; M/48V				
Boost Voltage※*	14.4V ADJ 13V...17V ; x2/24 ; x4/48V				
	battery voltage less than 12.6v auto boost 2hours				
Battery Over Voltage ※*	16.5V ; x2/24V ; x4/48V				
Reverse Connection Protection	Yes				
Load Over Current Protection	Yes, each 30s auto restart again				
USB Output	Optional		/		
Charging Type	PWM				
Charge circuit voltage drop	<=0.25V				
Discharge circuit voltage drop	<=0.1V				
Temperature Consumption#	For 12Vsystem:-24mV /°C ; x2/24V ; x4/48V				
Relative humidity	≤95%, N.C.				
WorkingTemperature	-20°C~+55°C(Product can work continuously at full load)				
LCD temperature range	-20°C~+70°C				
Waterproof grade	IP32				
Mounting hole size	Φ5mm				
Terminals	4mm <sup>2</sup> /12AWG		16mm <sup>2</sup> /6AWG	25mm <sup>2</sup> /4AWG	
Weight	310g	320g	410g	680g	690g
Overall dimension(mm)	168×92×41.5		190×108 ×41.5	200.1×127×55.3	

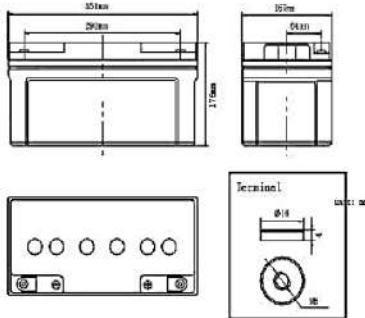
[Fuente: Wikipedia].

### 4.3.2.2. Batería

Batería AGM 12v 7Ah CSBattery; esta batería AGM de la marca CSBattery tiene una capacidad de acumulación de energía de 7Ah C10 de capacidad y para instalaciones solares de 12V. sus características extraídas de la ficha técnica del fabricante son las siguientes:

**Tabla 14 Especificaciones técnicas de la batería.**

Dimensions & Weight		Technical Specifications		
Length(mm/inch)	350/13.78	Nominal Voltage	12V(6 cells per unit)	
Width(mm/inch)	167/6.58	Design Floating Life @25°C	10 Years	
Height(mm/inch)	178/7.01	Nominal Capacity @25°C(10 hour rate@6.50A,10.8V)	65Ah	
Total Height(mm/inch)	178/7.01	Capacity @25°C	20hour rate (3.61A,10.8V)	72.2Ah
Weight(kg/lbs)(±3%)	20.2/44.6		5 hour rate (11.9A,10.5V)	59.5Ah
			1 hour rate (43.2A,9.6V)	43.2Ah
		Internal Resistance	Full Charged Battery@25°C	≤7.0mΩ
		Ambient Temperature	Discharge	-15°C~45°C
			Charge	-15°C~45°C
			Storage	-15°C~45°C
		Max.Discharge Current@25°C		390A (5s)
		Capacity affected by Temperature (10 hour)	40°C	105%
			25°C	100%
			0°C	85%
			-15°C	65%
		Self-Discharge@25°C per Month		3%
		Charge (Constant Voltage) @25°C	Standby Use	Initial Charging Current Less than 16.25A Voltage 13.6-13.8V
			Cycle Use	Initial Charging Current Less than 16.25A Voltage 14.4-14.9V



### Battery Discharge Table

**Discharge Constant Current per Cell (Amperes at 25°C)**

F.V/Time	15min	30min	45min	1h	2h	3h	5h	8h	10h	20h
1.60V	109.7	68.3	49.0	43.2	26.4	19.3	12.4	7.6	6.76	3.75
1.65V	105.2	66.5	47.7	42.1	25.9	18.9	12.2	7.5	6.70	3.72
1.70V	100.6	64.6	46.4	40.9	25.4	18.6	12.1	7.4	6.63	3.68
1.75V	96.0	62.8	45.1	39.8	24.8	18.1	11.9	7.4	6.57	3.64
1.80V	91.5	61.0	43.7	38.6	24.2	17.7	11.7	7.3	6.50	3.61

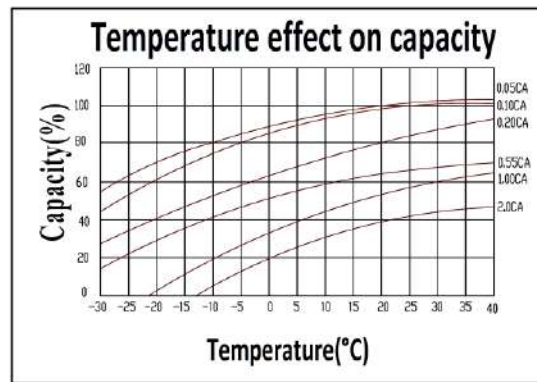
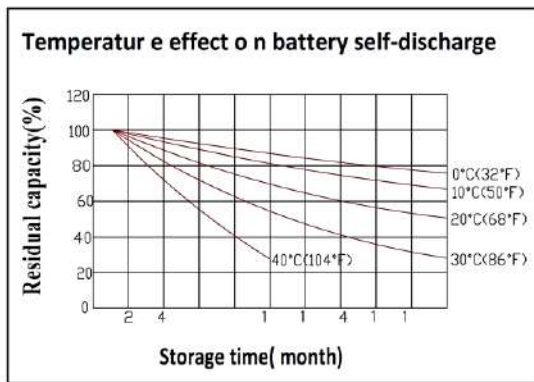
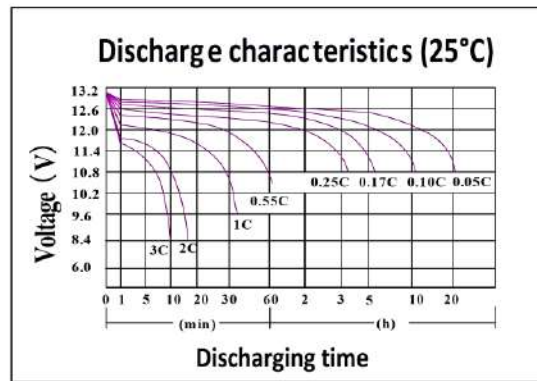
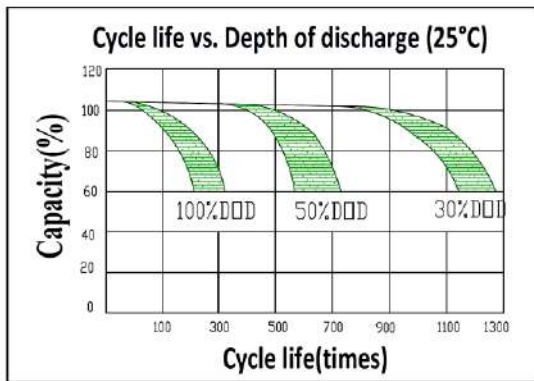
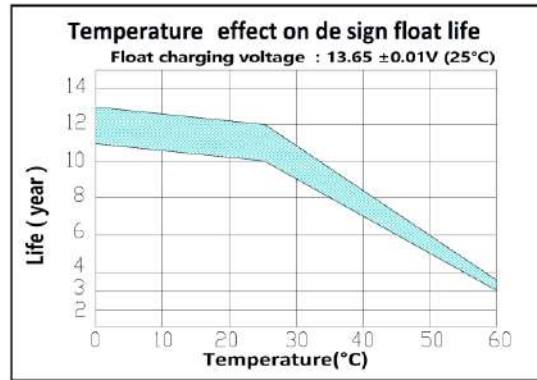
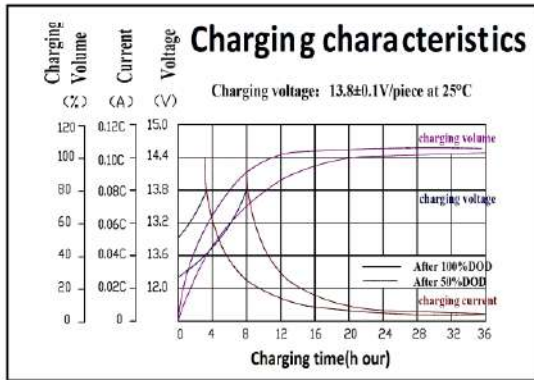
**Discharge Constant Power per Cell (Watts at 25°C)**

F.V/Time	15min	30min	45min	1h	2h	3h	5h	8h	10h	20h
1.60V	204.7	127.4	91.4	80.6	49.2	35.9	23.1	14.1	12.6	7.0
1.65V	196.1	123.9	88.9	78.5	48.3	35.3	22.8	14.0	12.5	6.9
1.70V	187.6	120.5	86.5	76.3	47.4	34.6	22.5	13.8	12.4	6.9
1.75V	179.1	117.1	84.0	74.2	46.2	33.8	22.1	13.7	12.2	6.8
1.80V	170.6	113.7	81.6	72.0	45.1	33.0	21.8	13.6	12.1	6.7

Nota. Wikipedia.

Tabla 15 Diagrama de características técnicas de la batería.

**Performance Characteristics**



**Battery Construction**

Component	Positive plate	Negative plate	Container & Cover	Safety valve	Terminal	Separator	Electrolyte	Pillar seal
Features	Thick high Sn low Ca grid with special paste	Balanced Pb-Ca grid for improved recombination efficiency	Fire resistance ABS (UL94-V0)	Flame Si-Rubber and aging resistance	Female Copper Insert M8	Advanced AGM separator for high pressure cell design	Dilute high purity sulfuric acid	Two layers epoxy resin seal

[Fuente: Wikipedia].

**Figura 96** Batería o Acumulador.



Nota. Wikipedia.

#### **4.3.2.3. Inversor**

Inversor de potencia 12V DC 220V AC 300W; MODELO BS300M

- Marca: BLUE SOLAR
- Material: Aluminio
- Número de Modelo: PE-BLUE300-12V
- Color: Verde y Azul
- Voltaje de entrada: 12V DC
- Voltaje de salida: 220V/ 230V AC
- Potencia nominal: 300W
- Potencia de sobretensión: 600W

**Tabla 16** Especificaciones técnicas del inversor.

Modelo	BS-300M	BS-600M	BS-1000M	BS-1500M	BS-2000M	BS-2500M	BS-3000M
Potencia continua	300W	600W	1000W	1500W	2000W	2500W	3000W
Potencia pico	600W	1200W	2000W	3000W	5000W	5000W	5000W
Dimensiones (mm)	120x105x52	150x105x52	210x150x70	250x220x90	320x220x90	320x220x90	320x220x90
Voltaje entrada CC	10-15Vcc (Modelo 12V) / 20-30Vcc (Modelo 24V) / 40-60Vcc (Modelo 48V)						
Voltaje salida AC	220V-240 VAC +10%						
Frecuencia salida	50 Hz / 60Hz + 10%						
Eficiencia	> 80%						
Forma de onda AC	Onda modificada						

Nota. Wikipedia

**Figura 97** Inversor.



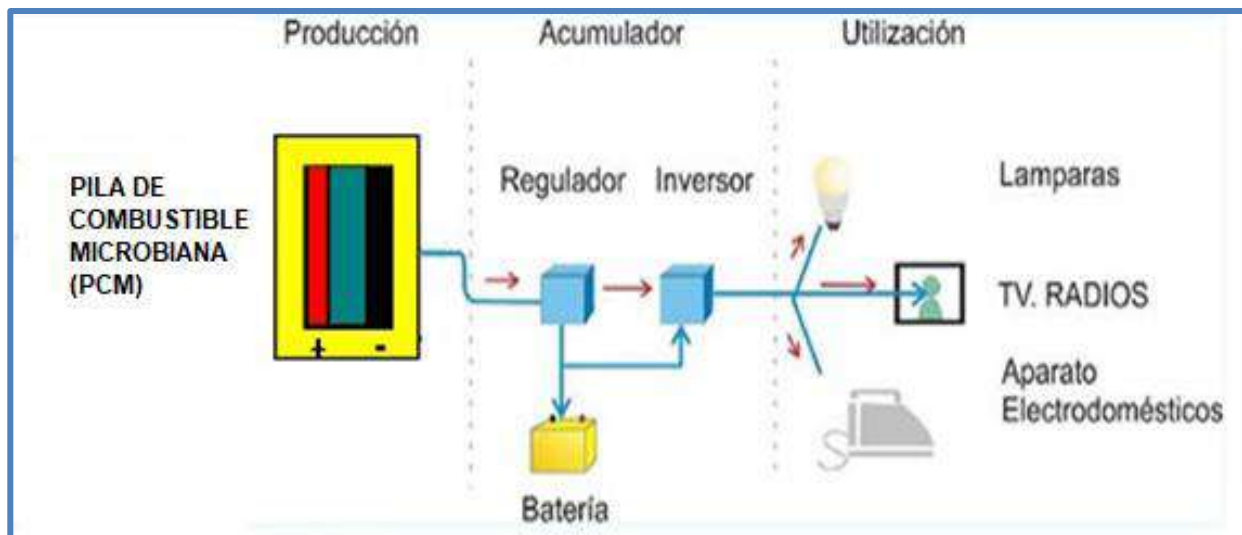
Nota. Wikipedia.



#### 4.3.2.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (SPCM)

Finalmente, la implementación de un Sistema de Pila de Combustible Microbiana (SPCM) consiste en realizar el conexionado de la Pila de Combustible Microbiana (PCM) hacia la entrada del regulador de carga, la batería de respaldo también se conecta al regulador de carga y la salida del regulador de carga en DC se conecta al inversor, tal como se muestra en el siguiente esquema:

**Figura 98** Esquema de un módulo con PCM (SPCM) para el suministro de energía utilizable.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 99** Apilamiento de las Celdas de Combustible Microbianas en serie.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 100** Apilamiento de las Celdas de Combustible Microbianas en serie y paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 101** Montaje del apilamiento de CCM serie- paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 102** *Medición de Voltaje y Corriente de la PCM.*



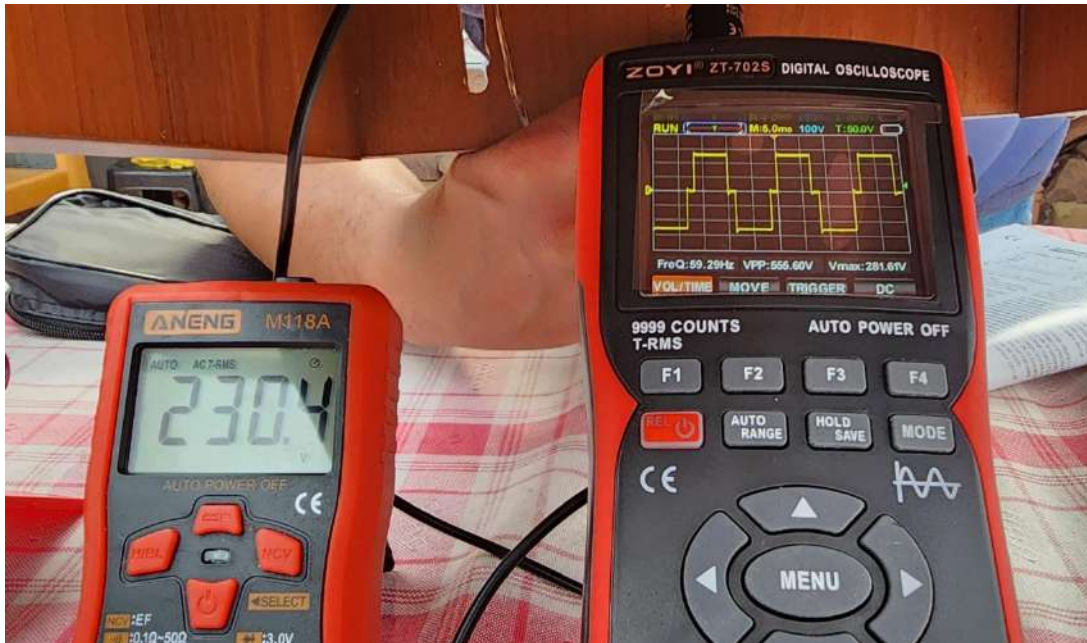
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 103** *Voltaje DC entregado por el regulador de carga al inversor.*



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 104** Voltaje AC y forma de Onda a la salida del Inversor.



Nota. Elaboración Propia.

Como se puede apreciar, la prueba experimental de un apilamiento de celdas de combustible microbianas, lo que sería la el Sistema de Pila de Combustible Microbiana (SPCM), la energía que entrega esta PCM es utilizable, complementando con los equipos electrónicos que regulan (Regulador de Carga) y el inversor que amplifica y convierte la DC en AC (230.4V); el voltaje de salida es posible conectarla a cargas domésticas; la potencia alcanzada con este módulo demostrativo es de 2W a 5 W, de lo experimental resaltamos que realizando mejoras en el diseño y apilando más celdas se obtendría mejores resultados. Para la presente demostración física se está utilizando un inversor de bajo costo que en el mercado es denominado “Inversor de Onda Modificada”, es por este motivo la forma de la onda alterna de la prueba del módulo físico es una onda cuadrada; en el mercado existen los denominados “Inversores de onda Sinusoidal Pura” cuyo costo es superior, y en la salida entregan una onda de tipo sinusoidal más fina. Así mismo, en la

actualidad se puede encontrar una gama tecnológica de estos equipo tales como inversores trifásicos a partir de señales monofásicas de DC, con este tipo de equipos se puede obtener corrientes trifásicas de AC o también se puede realizar agrupamientos de inversores monofásicos para el fin de obtener corrientes trifásicas; por lo cual demostramos que si se puede obtener energía utilizable del metabolismo de las bacterias.

## **CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS**

### **5.1. Análisis y comparación de resultados de las CCM**

Analizamos los resultados obtenidos en las simulaciones y pruebas experimentales de las CCM planteadas en el presente estudio; es importante puesto que nos da una mejor perspectiva a la hora de definir un tipo de material para la construcción real de módulos de PCMs para la dotación de energía utilizable; en ese entender exponemos dichos resultados:



**Tabla 17** Resultados de la simulación en Simulink- Matlab de las Celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
1	0.9227	1.9797	1.5635	0.0001	0.0008	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.9227	1.9797	1.5635	0.0001	0.0008	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.8961	1.8946	1.4784	0.0041	0.0477	0.0223	0.0000	0.0004	0.0002
4	0.882	1.8698	1.4536	0.0087	0.1015	0.0474	0.0001	0.0009	0.0004
5	0.8735	1.8553	1.4391	0.0132	0.1542	0.072	0.0001	0.0014	0.0007
6	0.8674	1.845	1.4289	0.0177	0.2066	0.0965	0.0002	0.0019	0.0009
7	0.8626	1.837	1.4209	0.0222	0.2588	0.1209	0.0002	0.0024	0.0011
8	0.8588	1.8305	1.4144	0.0267	0.311	0.1453	0.0002	0.0028	0.0013
9	0.8555	1.825	1.4089	0.0313	0.3632	0.1697	0.0003	0.0033	0.0015
10	0.8526	1.8202	1.4041	0.0358	0.4153	0.1942	0.0003	0.0038	0.0018
11	0.8501	1.8159	1.3998	0.0404	0.4675	0.2186	0.0004	0.0042	0.002
12	0.8478	1.8121	1.396	0.045	0.5196	0.243	0.0004	0.0047	0.0022
13	0.8457	1.8086	1.3926	0.0496	0.5718	0.2675	0.0005	0.0052	0.0024
14	0.8438	1.8054	1.3894	0.0542	0.624	0.2919	0.0005	0.0057	0.0027
15	0.8421	1.8024	1.3865	0.0589	0.6761	0.3164	0.0005	0.0061	0.0029
16	0.8404	1.7996	1.3838	0.0635	0.7283	0.3409	0.0006	0.0066	0.0031
17	0.8389	1.7971	1.3812	0.0682	0.7806	0.3654	0.0006	0.0071	0.0033
18	0.8375	1.7946	1.3788	0.0729	0.8328	0.39	0.0007	0.0076	0.0035
19	0.8361	1.7923	1.3765	0.0777	0.8851	0.4145	0.0007	0.008	0.0038
20	0.8348	1.7901	1.3744	0.0824	0.9373	0.4391	0.0007	0.0085	0.004
21	0.7797	1.6868	1.2817	0.5316	5.2349	2.4939	0.0048	0.0476	0.0227
22	0.7791	1.6856	1.2807	0.538	5.2888	2.5201	0.0049	0.0481	0.0229
23	0.7785	1.6843	1.2796	0.5443	5.3426	2.5463	0.0049	0.0486	0.0231
24	0.7779	1.6831	1.2786	0.5507	5.3965	2.5725	0.005	0.0491	0.0234
25	0.7773	1.6818	1.2776	0.5571	5.4504	2.5987	0.0051	0.0495	0.0236
26	0.7767	1.6805	1.2765	0.5635	5.5044	2.6249	0.0051	0.05	0.0239
27	0.776	1.6792	1.2755	0.57	5.5583	2.6512	0.0052	0.0505	0.0241
28	0.7754	1.678	1.2744	0.5764	5.6123	2.6775	0.0052	0.051	0.0243
29	0.7748	1.6767	1.2734	0.5829	5.6663	2.7038	0.0053	0.0515	0.0246
30	0.7742	1.6754	1.2723	0.5894	5.7203	2.7301	0.0054	0.052	0.0248
31	0.7735	1.6741	1.2713	0.5959	5.7743	2.7565	0.0054	0.0525	0.0251
32	0.7729	1.6728	1.2702	0.6025	5.8284	2.7828	0.0055	0.053	0.0253
33	0.7723	1.6715	1.2691	0.609	5.8824	2.8092	0.0055	0.0535	0.0255
34	0.7716	1.6702	1.268	0.6156	5.9365	2.8356	0.0056	0.054	0.0258
35	0.771	1.6688	1.267	0.6222	5.9906	2.862	0.0057	0.0545	0.026

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Zn	PbO2-Al
36	0.7704	1.6675	1.2659	0.6288	6.0448	2.8885	0.0057	0.055	0.0263
37	0.7697	1.6662	1.2648	0.6355	6.0989	2.9149	0.0058	0.0554	0.0265
38	0.7691	1.6648	1.2637	0.6421	6.1531	2.9414	0.0058	0.0559	0.0267
39	0.7684	1.6635	1.2626	0.6488	6.2073	2.9679	0.0059	0.0564	0.027
40	0.7678	1.6621	1.2615	0.6555	6.2615	2.9944	0.006	0.0569	0.0272
41	0.7055	1.5289	1.1563	1.2626	10.7168	5.2071	0.0115	0.0974	0.0473
42	0.7046	1.527	1.1548	1.2709	10.7726	5.2352	0.0116	0.0979	0.0476
43	0.7037	1.525	1.1533	1.2792	10.8284	5.2633	0.0116	0.0984	0.0478
44	0.7028	1.523	1.1517	1.2876	10.8842	5.2915	0.0117	0.0989	0.0481
45	0.7018	1.5211	1.1502	1.2959	10.9401	5.3197	0.0118	0.0995	0.0484
46	0.7009	1.5191	1.1486	1.3043	10.996	5.3478	0.0119	0.1	0.0486
47	0.7	1.5171	1.1471	1.3127	11.0519	5.3761	0.0119	0.1005	0.0489
48	0.6991	1.5151	1.1455	1.3211	11.1078	5.4043	0.012	0.101	0.0491
49	0.6982	1.513	1.144	1.3295	11.1637	5.4325	0.0121	0.1015	0.0494
50	0.6972	1.511	1.1424	1.338	11.2197	5.4608	0.0122	0.102	0.0496
51	0.6963	1.509	1.1408	1.3465	11.2757	5.4891	0.0122	0.1025	0.0499
52	0.6954	1.507	1.1392	1.3549	11.3317	5.5174	0.0123	0.103	0.0502
53	0.6944	1.5049	1.1376	1.3635	11.3877	5.5458	0.0124	0.1035	0.0504
54	0.6935	1.5029	1.136	1.372	11.4437	5.5741	0.0125	0.104	0.0507
55	0.6925	1.5008	1.1344	1.3805	11.4998	5.6025	0.0126	0.1045	0.0509
56	0.6916	1.4987	1.1328	1.3891	11.5559	5.6309	0.0126	0.1051	0.0512
57	0.6906	1.4966	1.1312	1.3977	11.612	5.6593	0.0127	0.1056	0.0514
58	0.6897	1.4946	1.1296	1.4063	11.6681	5.6877	0.0128	0.1061	0.0517
59	0.6887	1.4925	1.128	1.4149	11.7242	5.7161	0.0129	0.1066	0.052
60	0.6877	1.4904	1.1263	1.4236	11.7804	5.7446	0.0129	0.1071	0.0522
61	0.5972	1.2924	0.9737	2.1886	16.3936	8.1152	0.0199	0.149	0.0738
62	0.5959	1.2896	0.9716	2.1989	16.4514	8.1453	0.02	0.1496	0.074
63	0.5947	1.2868	0.9694	2.2091	16.5091	8.1754	0.0201	0.1501	0.0743
64	0.5934	1.284	0.9673	2.2194	16.5669	8.2055	0.0202	0.1506	0.0746
65	0.5921	1.2812	0.9651	2.2297	16.6247	8.2356	0.0203	0.1511	0.0749
66	0.5908	1.2783	0.963	2.24	16.6826	8.2657	0.0204	0.1517	0.0751
67	0.5895	1.2755	0.9608	2.2504	16.7404	8.2959	0.0205	0.1522	0.0754
68	0.5882	1.2727	0.9586	2.2607	16.7983	8.3261	0.0206	0.1527	0.0757
69	0.5869	1.2698	0.9564	2.2711	16.8562	8.3563	0.0206	0.1532	0.076
70	0.5856	1.267	0.9542	2.2815	16.9141	8.3865	0.0207	0.1538	0.0762
71	0.5843	1.2641	0.952	2.2919	16.972	8.4167	0.0208	0.1543	0.0765
72	0.583	1.2612	0.9498	2.3024	17.03	8.447	0.0209	0.1548	0.0768
73	0.5817	1.2583	0.9476	2.3128	17.0879	8.4773	0.021	0.1553	0.0771
74	0.5804	1.2554	0.9454	2.3233	17.1459	8.5076	0.0211	0.1559	0.0773
75	0.579	1.2525	0.9431	2.3338	17.2039	8.5379	0.0212	0.1564	0.0776
76	0.5777	1.2496	0.9409	2.3443	17.262	8.5682	0.0213	0.1569	0.0779
77	0.5764	1.2467	0.9387	2.3549	17.32	8.5986	0.0214	0.1575	0.0782
78	0.575	1.2438	0.9364	2.3654	17.3781	8.629	0.0215	0.158	0.0784
79	0.5737	1.2408	0.9342	2.376	17.4361	8.6594	0.0216	0.1585	0.0787

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
80	0.4504	0.9702	0.727	3.3096	22.2654	11.2183	0.0301	0.2024	0.102
81	0.4487	0.9666	0.7242	3.3218	22.3251	11.2503	0.0302	0.203	0.1023
82	0.447	0.9629	0.7214	3.334	22.3849	11.2824	0.0303	0.2035	0.1026
83	0.4453	0.9592	0.7185	3.3462	22.4446	11.3144	0.0304	0.204	0.1029
84	0.4437	0.9555	0.7157	3.3585	22.5044	11.3465	0.0305	0.2046	0.1032
85	0.442	0.9518	0.7129	3.3708	22.5641	11.3786	0.0306	0.2051	0.1034
86	0.4403	0.9481	0.71	3.3831	22.6239	11.4107	0.0308	0.2057	0.1037
87	0.4386	0.9444	0.7072	3.3954	22.6838	11.4428	0.0309	0.2062	0.104
88	0.4369	0.9406	0.7043	3.4077	22.7436	11.475	0.031	0.2068	0.1043
89	0.4352	0.9369	0.7015	3.4201	22.8035	11.5072	0.0311	0.2073	0.1046
90	0.4334	0.9331	0.6986	3.4324	22.8633	11.5394	0.0312	0.2078	0.1049
91	0.4317	0.9294	0.6957	3.4448	22.9232	11.5716	0.0313	0.2084	0.1052
92	0.43	0.9256	0.6929	3.4572	22.9832	11.6038	0.0314	0.2089	0.1055
93	0.4283	0.9218	0.69	3.4697	23.0431	11.6361	0.0315	0.2095	0.1058
94	0.4266	0.9181	0.6871	3.4821	23.103	11.6683	0.0317	0.21	0.1061
95	0.4248	0.9143	0.6842	3.4946	23.163	11.7006	0.0318	0.2106	0.1064
96	0.4231	0.9105	0.6813	3.5071	23.223	11.7329	0.0319	0.2111	0.1067
97	0.4213	0.9066	0.6784	3.5196	23.283	11.7652	0.032	0.2117	0.107
98	0.4196	0.9028	0.6754	3.5321	23.3431	11.7976	0.0321	0.2122	0.1073
99	0.4178	0.899	0.6725	3.5446	23.4031	11.83	0.0322	0.2128	0.1075
100	0.2607	0.5574	0.411	4.6256	28.3322	14.5164	0.0421	0.2576	0.132
101	0.2586	0.5528	0.4075	4.6397	28.3939	14.5504	0.0422	0.2581	0.1323
102	0.2564	0.5482	0.4039	4.6539	28.4556	14.5844	0.0423	0.2587	0.1326
103	0.2543	0.5435	0.4004	4.6681	28.5173	14.6184	0.0424	0.2592	0.1329
104	0.2521	0.5389	0.3968	4.6823	28.579	14.6524	0.0426	0.2598	0.1332
105	0.2499	0.5342	0.3932	4.6965	28.6407	14.6865	0.0427	0.2604	0.1335
106	0.2477	0.5295	0.3896	4.7107	28.7024	14.7205	0.0428	0.2609	0.1338
107	0.2456	0.5248	0.386	4.725	28.7642	14.7546	0.043	0.2615	0.1341
108	0.2434	0.5201	0.3824	4.7393	28.826	14.7887	0.0431	0.2621	0.1344
109	0.2412	0.5154	0.3788	4.7536	28.8878	14.8228	0.0432	0.2626	0.1348
110	0.239	0.5107	0.3752	4.7679	28.9496	14.857	0.0433	0.2632	0.1351
111	0.2368	0.506	0.3715	4.7822	29.0115	14.8911	0.0435	0.2637	0.1354
112	0.2345	0.5012	0.3679	4.7966	29.0734	14.9253	0.0436	0.2643	0.1357
113	0.2323	0.4965	0.3642	4.811	29.1352	14.9595	0.0437	0.2649	0.136
114	0.2301	0.4917	0.3606	4.8254	29.1972	14.9937	0.0439	0.2654	0.1363
115	0.2278	0.4869	0.3569	4.8398	29.2591	15.028	0.044	0.266	0.1366
116	0.2256	0.4821	0.3532	4.8542	29.321	15.0622	0.0441	0.2666	0.1369
117	0.2233	0.4773	0.3495	4.8687	29.383	15.0965	0.0443	0.2671	0.1372
118	0.2211	0.4725	0.3458	4.8832	29.445	15.1308	0.0444	0.2677	0.1376
119	0.2188	0.4677	0.3421	4.8977	29.507	15.1651	0.0445	0.2682	0.1379
120	0.2165	0.4628	0.3384	4.9122	29.569	15.1995	0.0447	0.2688	0.1382
121	0.2143	0.458	0.3347	4.9267	29.631	15.2338	0.0448	0.2694	0.1385
122	0.212	0.4531	0.3309	4.9413	29.6931	15.2682	0.0449	0.2699	0.1388
123	0.2097	0.4482	0.3272	4.9558	29.7552	15.3026	0.0451	0.2705	0.1391

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
124	0.2074	0.4434	0.3234	4.9704	29.8173	15.337	0.0452	0.2711	0.1394
125	0.2051	0.4384	0.3196	4.985	29.8794	15.3714	0.0453	0.2716	0.1397
126	0.2027	0.4335	0.3158	4.9997	29.9415	15.4059	0.0455	0.2722	0.1401
127	0.2004	0.4286	0.3121	5.0143	30.0037	15.4404	0.0456	0.2728	0.1404
128	0.1981	0.4237	0.3082	5.029	30.0659	15.4748	0.0457	0.2733	0.1407
129	0.1957	0.4187	0.3044	5.0437	30.1281	15.5094	0.0459	0.2739	0.141
130	0.1934	0.4137	0.3006	5.0584	30.1903	15.5439	0.046	0.2745	0.1413
131	0.191	0.4088	0.2968	5.0731	30.2525	15.5784	0.0461	0.275	0.1416
132	0.1886	0.4038	0.2929	5.0879	30.3148	15.613	0.0463	0.2756	0.1419
133	0.1863	0.3988	0.289	5.1026	30.3771	15.6476	0.0464	0.2762	0.1423
134	0.1839	0.3937	0.2852	5.1174	30.4394	15.6822	0.0465	0.2767	0.1426
135	0.1815	0.3887	0.2813	5.1322	30.5017	15.7168	0.0467	0.2773	0.1429
136	0.1791	0.3836	0.2774	5.1471	30.564	15.7515	0.0468	0.2779	0.1432
137	0.1766	0.3786	0.2735	5.1619	30.6264	15.7862	0.0469	0.2784	0.1435
138	0.1742	0.3735	0.2695	5.1768	30.6888	15.8208	0.0471	0.279	0.1438
139	0.1718	0.3684	0.2656	5.1917	30.7511	15.8555	0.0472	0.2796	0.1441
140	0.1693	0.3633	0.2616	5.2066	30.8136	15.8903	0.0473	0.2801	0.1445
141	0.1668	0.3581	0.2577	5.2215	30.876	15.925	0.0475	0.2807	0.1448
142	0.1644	0.353	0.2537	5.2364	30.9384	15.9598	0.0476	0.2813	0.1451
143	0.1619	0.3478	0.2497	5.2514	31.0009	15.9946	0.0477	0.2818	0.1454
144	0.1594	0.3426	0.2457	5.2664	31.0634	16.0294	0.0479	0.2824	0.1457
145	0.1569	0.3374	0.2416	5.2814	31.1259	16.0642	0.048	0.283	0.146
146	0.1543	0.3322	0.2376	5.2964	31.1884	16.099	0.0481	0.2835	0.1464
147	0.1518	0.327	0.2335	5.3114	31.251	16.1339	0.0483	0.2841	0.1467
148	0.1492	0.3217	0.2294	5.3265	31.3136	16.1688	0.0484	0.2847	0.147
149	0.1467	0.3164	0.2253	5.3416	31.3762	16.2037	0.0486	0.2852	0.1473
150	0.1441	0.3111	0.2212	5.3567	31.4388	16.2386	0.0487	0.2858	0.1476
151	0.1415	0.3058	0.2171	5.3718	31.5014	16.2735	0.0488	0.2864	0.1479
152	0.1388	0.3005	0.2129	5.3869	31.564	16.3085	0.049	0.2869	0.1483
153	0.1362	0.2951	0.2087	5.4021	31.6267	16.3435	0.0491	0.2875	0.1486
154	0.1335	0.2897	0.2045	5.4173	31.6894	16.3785	0.0492	0.2881	0.1489
155	0.1308	0.2843	0.2003	5.4325	31.7521	16.4135	0.0494	0.2887	0.1492
156	0.1281	0.2788	0.1961	5.4477	31.8148	16.4485	0.0495	0.2892	0.1495
157	0.1254	0.2733	0.1918	5.4629	31.8776	16.4836	0.0497	0.2898	0.1499
158	0.1226	0.2678	0.1875	5.4782	31.9403	16.5187	0.0498	0.2904	0.1502
159	0.1199	0.2623	0.1831	5.4935	32.0031	16.5538	0.0499	0.2909	0.1505
160	0.117	0.2567	0.1788	5.5088	32.0659	16.5889	0.0501	0.2915	0.1508
161	0.1142	0.2511	0.1744	5.5241	32.1287	16.624	0.0502	0.2921	0.1511
162	0.1113	0.2455	0.1699	5.5394	32.1916	16.6592	0.0504	0.2927	0.1514
163	0.1084	0.2398	0.1654	5.5548	32.2544	16.6944	0.0505	0.2932	0.1518
164	0.1055	0.2341	0.1609	5.5701	32.3173	16.7296	0.0506	0.2938	0.1521
165	0.1025	0.2283	0.1564	5.5855	32.3802	16.7648	0.0508	0.2944	0.1524
166	0.0994	0.2224	0.1517	5.6009	32.4431	16.8	0.0509	0.2949	0.1527
167	0.0963	0.2166	0.1471	5.6164	32.5061	16.8353	0.0511	0.2955	0.153

N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
168	0.0931	0.2106	0.1423	5.6318	32.569	16.8705	0.0512	0.2961	0.1534
169	0.0899	0.2046	0.1375	5.6473	32.632	16.9058	0.0513	0.2967	0.1537
170	0.0866	0.1984	0.1326	5.6628	32.695	16.9411	0.0515	0.2972	0.154
171	0.0832	0.1922	0.1276	5.6783	32.758	16.9765	0.0516	0.2978	0.1543
172	0.0797	0.1859	0.1225	5.6938	32.8211	17.0118	0.0518	0.2984	0.1547
173	0.0761	0.1795	0.1173	5.7094	32.8841	17.0472	0.0519	0.2989	0.155
174	0.0723	0.1728	0.1119	5.7249	32.9472	17.0826	0.052	0.2995	0.1553
175	0.0683	0.166	0.1064	5.7405	33.0103	17.118	0.0522	0.3001	0.1556
176	0.0641	0.159	0.1006	5.7561	33.0734	17.1534	0.0523	0.3007	0.1559
177	0.0596	0.1516	0.0944	5.7717	33.1366	17.1889	0.0525	0.3012	0.1563
178	0.0546	0.1438	0.0879	5.7874	33.1997	17.2243	0.0526	0.3018	0.1566
179	0.049	0.1354	0.0807	5.8031	33.2629	17.2598	0.0528	0.3024	0.1569
180	0.0424	0.1259	0.0724	5.8187	33.3261	17.2953	0.0529	0.303	0.1572
181	0.0338	0.1144	0.0622	5.8344	33.3893	17.3308	0.053	0.3035	0.1576
182	0.0199	0.0977	0.0468	5.8502	33.4525	17.3664	0.0532	0.3041	0.1579
168	0.0931	0.2106	0.1423	5.6318	32.569	16.8705	0.0512	0.2961	0.1534
169	0.0899	0.2046	0.1375	5.6473	32.632	16.9058	0.0513	0.2967	0.1537
170	0.0866	0.1984	0.1326	5.6628	32.695	16.9411	0.0515	0.2972	0.154
171	0.0832	0.1922	0.1276	5.6783	32.758	16.9765	0.0516	0.2978	0.1543
172	0.0797	0.1859	0.1225	5.6938	32.8211	17.0118	0.0518	0.2984	0.1547
173	0.0761	0.1795	0.1173	5.7094	32.8841	17.0472	0.0519	0.2989	0.155
174	0.0723	0.1728	0.1119	5.7249	32.9472	17.0826	0.052	0.2995	0.1553
175	0.0683	0.166	0.1064	5.7405	33.0103	17.118	0.0522	0.3001	0.1556
176	0.0641	0.159	0.1006	5.7561	33.0734	17.1534	0.0523	0.3007	0.1559
177	0.0596	0.1516	0.0944	5.7717	33.1366	17.1889	0.0525	0.3012	0.1563
178	0.0546	0.1438	0.0879	5.7874	33.1997	17.2243	0.0526	0.3018	0.1566
179	0.049	0.1354	0.0807	5.8031	33.2629	17.2598	0.0528	0.3024	0.1569
180	0.0424	0.1259	0.0724	5.8187	33.3261	17.2953	0.0529	0.303	0.1572
181	0.0338	0.1144	0.0622	5.8344	33.3893	17.3308	0.053	0.3035	0.1576
182	0.0199	<b>0.0977</b>	0.0468	5.8502	<b>33.4525</b>	17.3664	0.0532	<b>0.3041</b>	0.1579

Nota. Elaboración Propia.

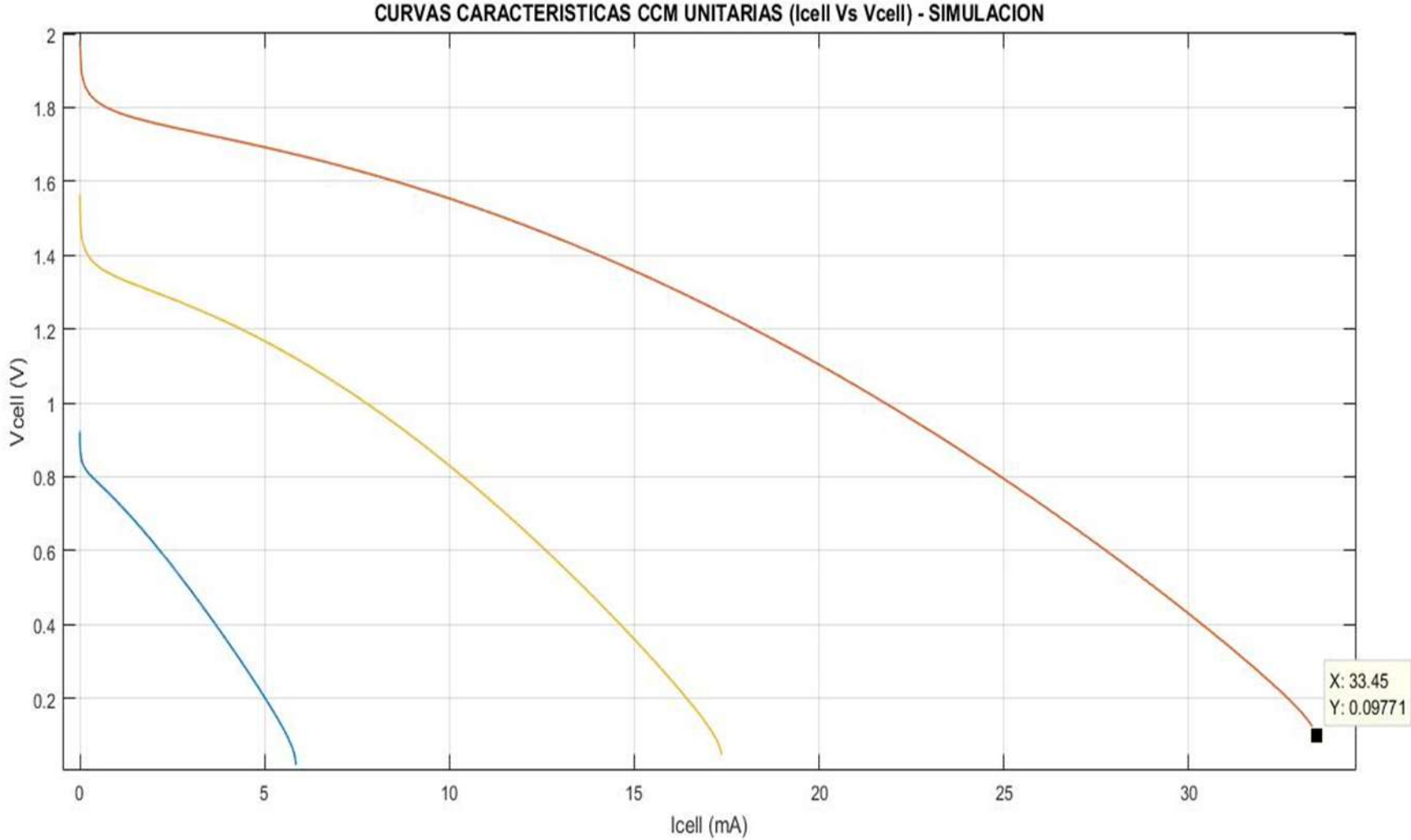
**Tabla 18** Resultados de las pruebas experimentales de las Celdas unitarias con diferentes pares de electrodos.

N° de PRUEBA	CARGAS KOHM	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
		PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
1	inf	0.994	1.764	1.197	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	405	0.97	1.764	1.138	0.0010	0.0040	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000
3	305	0.965	1.763	1.145	0.0030	0.0040	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000
4	205	0.955	1.762	1.122	0.0040	0.0080	0.0060	0.0000	0.0001	0.0001
5	105	0.926	1.759	1.114	0.0080	0.0160	0.0110	0.0001	0.0001	0.0001
6	5	0.719	1.654	0.992	0.1480	0.3330	0.1480	0.0013	0.0030	0.0013
7	4	0.678	1.636	0.984	0.1700	0.4130	0.2240	0.0015	0.0038	0.0020
8	3	0.668	1.61	0.921	0.2300	0.5420	0.3100	0.0021	0.0049	0.0028
9	2	0.667	1.568	0.809	0.3390	0.7950	0.4100	0.0031	0.0072	0.0037
10	1	0.619	1.484	0.654	0.7300	1.5100	0.6670	0.0066	0.0137	0.0061
11	0	0.016	0.094	0.049	5.6300	32.8900	17.2600	0.0512	0.2990	0.1569

Nota. Elaboración Propia.

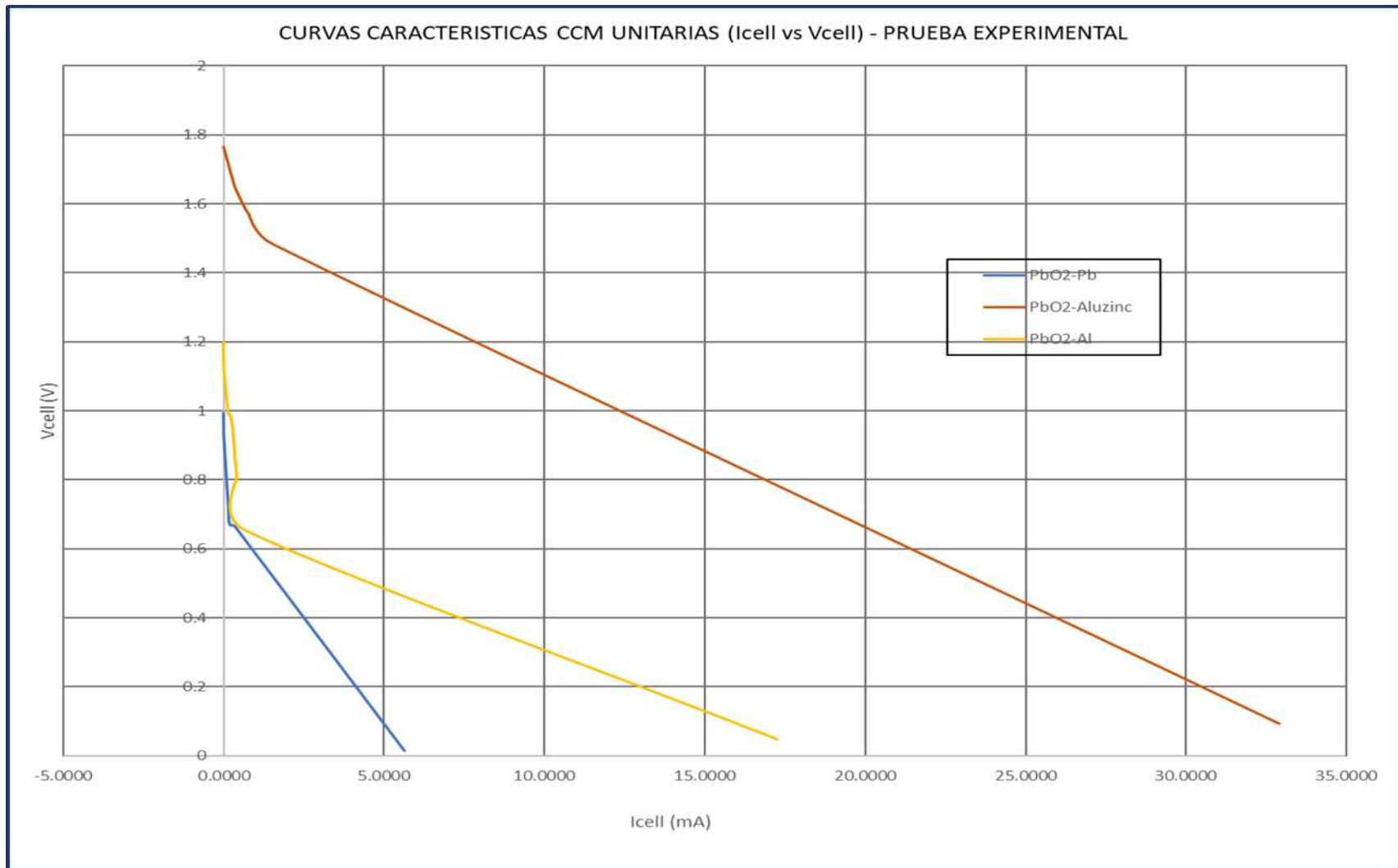
Los parámetros eléctricos más importantes de ambas actividades son: la tensión Vcell (V), la corriente Icell (mA) y la Densidad de corriente Jcell (mA/cm2), tomando en cuenta que para ambas situaciones se consideró electrodos de dimensiones 11x10 cm; estos parámetros nos indican que tan eficiente u optima se comporta la conjugación de materiales que nos hemos planteado para este estudio, la data a considerarse debe ser en todos los casos en una situación donde la celdas se sobre exigen, es decir en una situación donde la carga tiende al corto circuito o la resistencia es mínima; si tomamos estos datos para nuestros diseños estaremos garantizando la buena dotación de energía para situaciones normales; es así como mostraremos las curvas características de la simulación y de la experiencia experimental; también realizaremos la comparación de los resultados de la iteración N°1 y 182 del Simulink de Matlab con la prueba N° 1 y 11 de las pruebas experimentales.

**Figura 105** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en Simulink- Matlab.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 106** Resultados de curvas características de celdas unitarias microbianas en pruebas experimentales.



Nota. Elaboración Propia.



**Tabla 19** Comparación de resultados de la CCM unitarias simulados en Simulink Matlab y mediante las pruebas experimentales.

SIMULACIONES MATLAB										VALIDACION EXPERIMENTAL										
N° de Iteraciones	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)			N° de PRUEBA	CARGAS KOHM	Vcell (V)			Icell (mA)			Jcell (mA/cm2)		
	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al			PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al	PbO2-Pb	PbO2-Aluzinc	PbO2-Al
1	0.9227	1.9797	1.5635	0.0001	0.0008	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	1	inf	0.994	1.764	1.197	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
182	0.0199	<b>0.0977</b>	0.0468	5.8502	<b>33.4525</b>	17.3664	0.0532	<b>0.3041</b>	0.1579	11	0	0.016	<b>0.094</b>	0.049	5.6300	<b>32.8900</b>	17.2600	0.0512	<b>0.2990</b>	0.1569

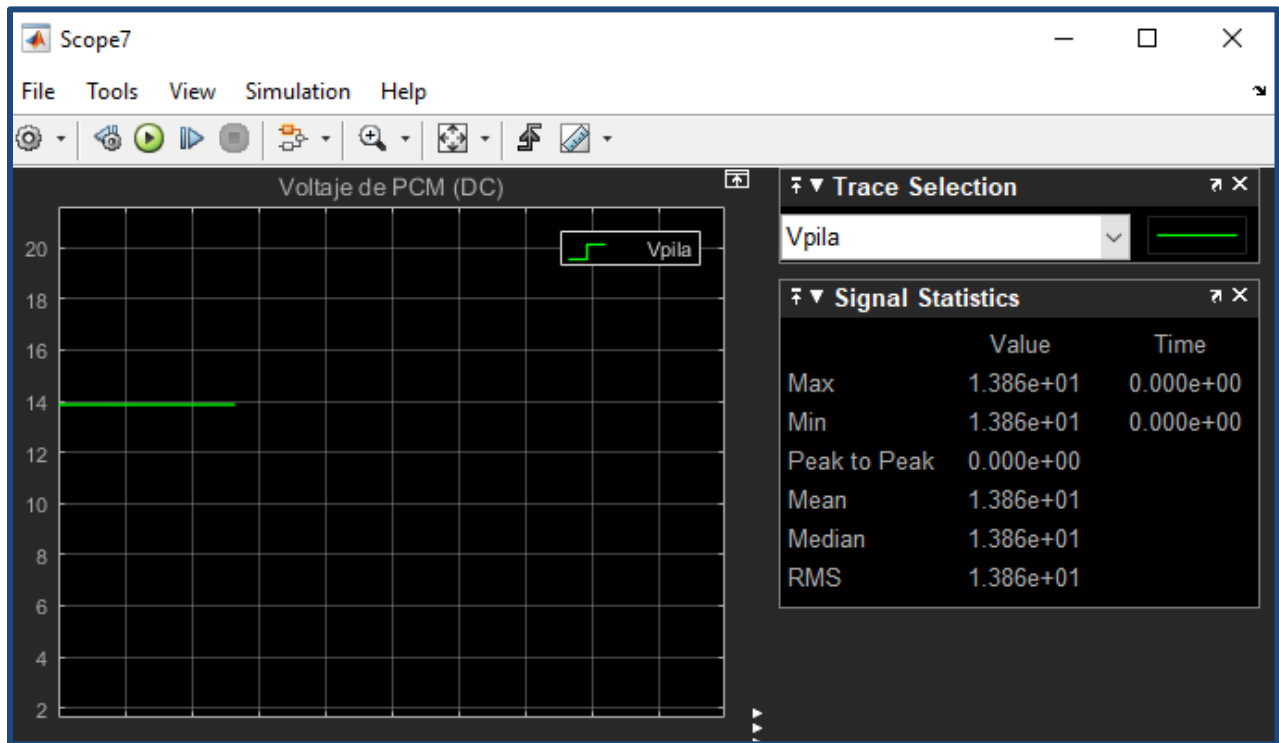
Nota. Elaboración Propia.

Como se aprecia en la tabla 20, los resultados numéricos son muy próximos; lo que se debe notar es que en ambas situaciones se verifica el predominio de ciertos materiales en la generación de energía eléctrica de las tres conjugaciones se ha resaltado el interés en el par PbO<sub>2</sub>-Aluzinc, ya que con este se obtienen mayores voltajes de celda ( $V_{cell} = 1.9797V$  simulado ;  $V_{cell} = 1.764V$  experimental) y mayores corrientes ( $I_{cell} = 33.4525$  mA simulado;  $I_{cell} = 32.89$  mA experimental), también mencionamos la densidad de potencia de celda con el par de electrodos indicado es mayor ( $P_{An} = 50.58$  W/m<sup>2</sup> simulado;  $P_{An} = 45.82$  W/m<sup>2</sup> experimental); esto se debe a que el Ánodo (-) hecho de Aluzinc que es una aleación de 55% Al; 43.4% Zn; 1.6% Si; las bacterias metabolizan mucho mejor al adherirse a este material; además es de notar que el material realiza su aporte de energía química con sus potenciales estándar al hacer la conjugación con el Cátodo (+) de óxido de plomo (PbO<sub>2</sub>); por tanto este material es para tomarle interés para dimensionar o proyectar el SPCM; sin embargo a pesar de que las otras conjugaciones no predominan en los parámetros eléctricos obtenidos, no son despreciables ya que, se observó que tienen propiedades beneficiosas para la combustión microbiana y también se podría realizar mejoras al diseño con estos materiales, convirtiéndose en alternativas para emplear esta tecnología.

## 5.2. Análisis y Comparación de Resultados de los SPCM

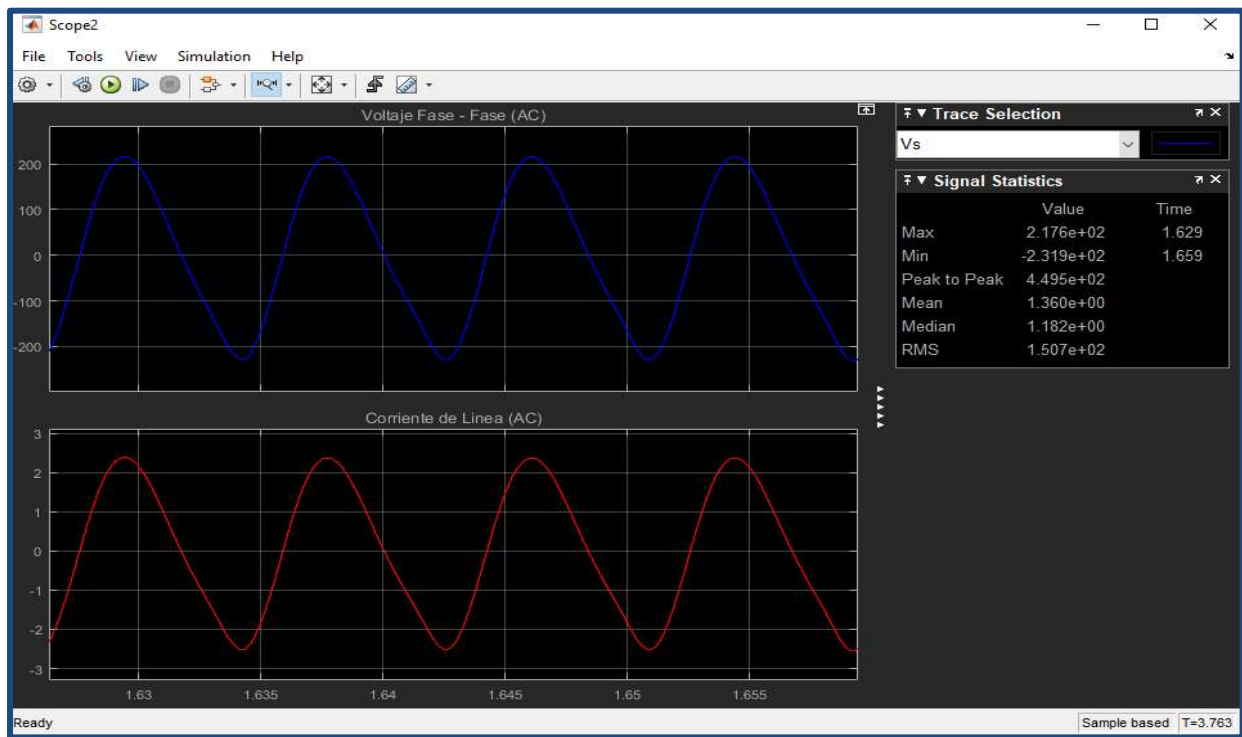
Análogamente al acápite anterior haremos el análisis y comparación de resultados obtenidos en la simulación del Simulink y una experiencia experimental; pero en esta etapa se evalúa ya al módulo completo SPCM con el material o conjugación más predominante (PbO<sub>2</sub>-Aluzinc); para lo cual verificaremos la tensión de entrada DC y la tensión de salida AC durante un periodo de 20 segundos; esto para el caso de un SPCM monofásico 220V, porque este fue el que se implementó en el presente estudio; en ese entender exponemos los resultados y gráficos correspondientes:

**Figura 107** Voltaje DC de entrada al SPCM simulación.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 108** Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del SPCM simulación.



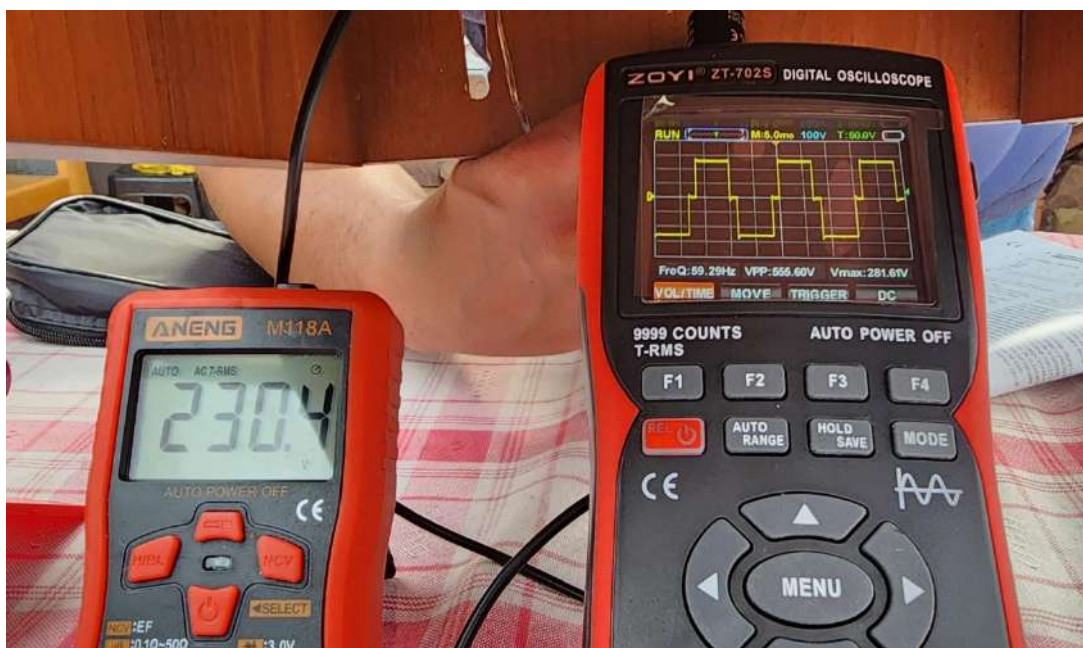
Nota. Elaboración Propia.

**Figura 109** Voltaje DC de entrada al SPCM prueba experimental.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 110** Voltaje AC y corriente AC de salida monofásica del SPCM prueba experimental.



Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 20** Comparación de resultados PCM y SPCM simulados y experimentales.

	SIMULACION		PRUEBA EXPERIMENTAL	
	PCM (ENTRADA)	SPCM (SALIDA)	PCM (ENTRADA)	SPCM (SALIDA)
V DC (V)	13.86		12.348	
Vmax (V)		217.6		281.61
Vmin (V)		-231.9		-230.4
Vpico-pico (V)		449.5		555.6

Nota. Elaboración Propia.

Con los resultados que se puede verificar tanto en la simulación como en las pruebas experimentales, se logra el objetivo de estructurar una salida de energía eléctrica de AC, utilizable que puede abastecer a cargas de uso común, desde luego por ser este un módulo experimental primario tendrá sus limitaciones, como es la potencia obtenida; sin embargo, se puede mejorar con los arreglos necesarios y la ampliación de estudios.

### 5.3. Mejoras al Sistema de la Pila de Combustible Microbiana en la etapa experimental

#### Mejoras en el área del electrodo

Se realizó una mejora en el área del electrodo negativo (Ánodo), conexionando en paralelo 10 placas de aluminio, como se muestra en la figura, esto con el fin de aumentar el área de contacto del electrodo con las bacterias contenidas en el agua residual.

**Figura 111** Apilamiento de 10 placas de Aluminio en paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

Área de 01 electrodo ánodo=  $0.10 \text{ m} \times 0.11 \text{ m} = 0.01 \text{ m}^2 \times 10$ (cantidad de placas en paralelo)

Área de 01 electrodo ánodo =  $0.10 \text{ m}^2$ .

#### Mejoras en el conexionado de las celdas

Del mismo modo, se realizó mejoras en el conexionado del sistema de Pila de Combustible Microbiana, se realizó la conexión de 7 celdas en serie en grupos de 4, y éstas 4 agrupaciones a su vez se conectaron en serie, con el fin de elevar la corriente.

**Figura 112** Apilamiento de 10 placas de Aluminio en paralelo.



Nota. Elaboración Propia.

Con esta nueva configuración en el conexionado, se obtienen los siguientes parámetros y resultados obtenidos:

**Parámetros calculados:**

Área total de los 28 electrodos ánodos=  $0.10 \text{ m}^2 \times 28 \text{ celdas} = 2.8 \text{ m}^2$ .

Área de 01 electrodo cátodo=  $0.10\text{m} \times 0.11\text{m} = 0.01\text{m}^2$

Área de los 28 electrodos cátodo=  $0.01\text{m}^2 \times 28 \text{ celdas} = 0.28\text{m}^2$

Volumen agua residual por celda =  $0.10\text{m} \times 0.11\text{m} \times 0.04\text{m} = 0.00044 \text{ m}^3$

Volumen total agua residual PCM =  $0.00044 \text{ m}^3 \times 28 \text{ (Número de Celdas)} = 0.012 \text{ m}^3 =$   
12.32 litros de agua residual.

## Resultados:

Con las mejoras realizadas, se obtiene una tensión a la salida de la Pila de Combustible Microbiana de 12.29 V y una corriente de 1.25 A, obteniendo una potencia de 15.36 W.

**Figura 113** Resultados de la tensión a la salida de la PCM en CC.



Nota. Elaboración Propia.

Y como Sistema de Pila de Combustible Microbiana funcional, se obtiene a la salida del inversor una tensión de 226.4 V en Corriente Alterna y una forma de onda alterna.



**Figura 114** Resultados de la tensión a la salida del SPCM en CA.



Nota. Elaboración Propia.

**Figura 115** Resultados a la salida del SPCM forma de onda alterna.



Nota. Elaboración Propia.

#### **5.4. Evaluación económica**

En el presente acápite se desarrollará la evaluación económica del módulo experimental ensamblado (SPCM), con el fin de tener una referencia del costo de los materiales, equipos e insumos necesarios para poner en práctica esta tecnología; considerando la aplicación a una vivienda unifamiliar del tipo rural con un consumo que no exceda los 10W, con los recursos que se pueden encontrar en nuestro país o región; a continuación, se presenta el metrado y presupuesto del SPCM:

**Tabla 21** *Metrado y presupuesto referencial del proyecto de investigación.*

Item	Descripción	Unid	METRADO Y PPTO		
			Cant.	P. Unitario (s/.)	C. Parcial (s/.)
<b>A</b>	<b>MATERIALES</b>				
<b>1.00</b>	<b>EQUIPOS, DISPOSITIVOS Y MATERIALES PARA MODULO CON PCM</b>				
1.01	Pila de Combustible Microbiana (PCM) 2-5W 12 V - 0.6A; incluye estructura de sujeción y conexiones	Eq.	1.00	1500.00	1500.00
1.02	Controlador - Regulador de carga, de 12V DC input Igen(A)=10, Icons(A)=10; marca recomendada (LDSOLAR)	Eq.	1.00	158.40	158.40
1.03	Batería tipo AGM de 12Vcc, tipo de ciclo profundo, de 7AH de Capacidad, marca recomendada (CSBattery)	Eq.	1.00	48.00	48.00
1.04	Inversor DC/AC , Tensión entrada DC= 12 Voltios, Tensión salida AC= 220 Voltios, Potencia = 300 W., marca recomendada (Blue solar)	Eq.	1.00	130.20	130.20
1.05	Otros accesorios de conexionado	glb	1.00	150.00	150.00
	<b>Sub-Total 1</b>				<b>1986.60</b>
<b>B</b>	<b>MONTAJE</b>				
1.00	Montaje de la PCM y conexionado al regulador	Cjto	1.00	600.00	600.00
2.00	Conexionado e instalación de Regulador de Carga, Batería e inversor	Cjto	1.00	300.00	300.00
4.00	Pruebas eléctricas	Cjto	1.00	100.00	100.00
	<b>Sub-Total Montaje</b>				<b>1000.00</b>

RESUMEN		RESUMEN			
A	Materiales				1,986.60
B	Montaje				1,000.00
C	Transporte	10%			298.66
<b>D</b>	<b>COSTO DIRECTO</b>				<b>3,285.26</b>
	IGV	18%			591.35
	<b>TOTAL INVERSION</b>				<b>3876.61</b>

Nota. Elaboración Propia.

## CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

### CONCLUSIONES

- Con la investigación realizada, se logró modelar y construir un módulo físico funcional de Sistema de Pila de Combustible Microbiana para poder aplicarlo a una vivienda rural; utilizando electrodos: Óxido de Plomo (Cátodo) y Aluzinc (Ánodo), obteniendo a la salida de la Pila de Combustible Microbiana 12.29 V, 1.25 A y 15.36 W en corriente continua.
- De la investigación se pudo identificar el comportamiento del metabolismo bacteriano en reacción química con los componentes de los materiales de los electrodos; según las simulaciones y pruebas experimentales la mejor combinación es el Óxido de Plomo y el Aluzinc. Los materiales de los electrodos se consiguieron en nuestra región y se identificó diversos materiales que funcionan como electrodos, como son: Aluzinc, Plomo, Aluminio, Óxido de Plomo, que reaccionan con las bacterias de las aguas residuales y se obtuvieron diversos parámetros de energía eléctrica, las cuales fueron aplicadas a las Pilas de Combustible Microbianas.
- Se modeló una Celda de Combustible Microbiana y un Sistema de Pila de Combustible Microbiana en el software MATLAB – SIMULINK, y se obtuvieron los parámetros eléctricos (tensión, corriente, densidad de corriente, potencia y densidad de potencia) y la curva característica de una Celda de Combustible Microbiana; también se simuló sistemas prácticos para la dotación de energía eléctrica con Pila de Combustible Microbiana, como es el Sistema de generación Monofásico y Sistema de Generación Trifásico. Consecuentemente se implementó el prototipo de un sistema monofásico en corriente alterna para poder aplicarlo a una vivienda rural; como Sistema de Pila de Combustible Microbiana a la salida del Inversor genera una tensión de 226.2 V en corriente alterna.

- Mérito del presente estudio, ha posibilitado la comprobación y el análisis de los resultados obtenidos en el modelamiento del Matlab y la experimentación física; como se muestra en la Tabla N°19, y se aprecia que los resultados presentan mínimas variaciones en los parámetros obtenidos.

## **SUGERENCIAS Y REDOMENDACIONES**

- Se recomienda continuar con las investigaciones a fin de encontrar materiales con propiedades óptimas para la fabricación de electrodos, y aplicarlas a la implementación de PCM con mejores prestaciones energéticas.
- Para el apilamiento de las CCM mixtas (serie- paralelo), es importante verificar que cada CCM tengan similares tensiones y corrientes unitarias, así se garantiza mayor tensión y mayor corriente; también se recomienda mejorar las celdas implementando mayor cantidad de electrodos negativos; con esta acción se incrementa el área de contacto de bacterias y por ende la potencia del dispositivo (con la misma cantidad de celdas se pudo obtener 15 a 20 W de potencia).
- Es posible mejorar el rendimiento de una celda e incrementar su potencia eléctrica de entrega; adicionando el catalizador de níquel por electrodeposición en el Cátodo (+) y una membrana de intercambio protónico que contenga iones activos, lo cual mejora la prestación de los electrodos. Se debe precisar que el rendimiento energético de una CCM depende en gran medida del grado de contaminación del sustrato o aguas residuales contenidas en ella.
- Mejorar los diseños constructivos de las CCM y PCM para aprovechar al máximo sus prestaciones energéticas, y diseñar equipos versátiles a un mantenimiento técnico adecuado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Jean Paul Gonzales Delgado, “Generación Alternativa de energía eléctrica a partir de aguas residuales en la Región Cusco” Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú 2006.
- Germán Buitrón Méndez “Biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana”, Universidad Autónoma de México 2011.
- Logan (2008), Tesis: Diseño de una Celda de Combustible Microbiológica con Uso de Bacterias Oxidantes de Azufre y Hierro; Igor Marcos Saavedra Salas; Chile 2012.
- Carlos Cervantes Astorga, Universidad Nacional Autónoma de México - Tesis: Biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana, 2011.
- F. Mateo-Ramírez, F.J. Hernández-Fernández, A.P. de los Rios, H. Addi, L.J. Lozano, C. Godínez, Universidad Politécnica de Cartagena – Paper: Aplicación de la tecnología de Pilas de Combustible Microbianas en depuración de aguas de origen urbano e industrial con producción simultánea de energía eléctrica, 2014.
- Alonso - Vante, Nicolás: “Electroquímica Y Electrocatálisis” Vol Ia; Ed. E-Libro.Net, 1ra Ed. 2003; 420 Pág. Buenos Aires - Argentina.
- Alonso - Vante, Nicolás: “Electroquímica Y Electrocatálisis” Vol Ib; Ed E-Libro.Net, 1ra Ed. 2003; 283 Pág. Buenos Aires – Argentina.
- Cámara Da Lesly, Hernández Mario, Paz Luiselana: “Manual De Diseño Para El Tratamiento De Aguas Residuales” 11 Pág.
- W.H. Freeman and Company, New York and Basingstoke 41 Madison Avenue, New York (NY)- U.S.A. 2003: “Quantitative Chemical Analysis. Sixth Edition”, AP. 23.

Cultural S.A.: “Guía Práctica De Electricidad”; Ed Cultural, 2da Ed. 2000; 156 Pág. Madrid-España.

García De Jalon, Javier; Rodríguez, José I.: “Manual De Matlab 7.0”; Ed. Escuela Superior de Politécnicos Industriales – Universidad De Navarra. 1ra Ed. 2005; Madrid España.

H. E. White: “Física Moderna”; Ed. Montaner Y Simón S.A. 5ta Ed. 1965; 811 Pág. Barcelona-España.

Salcedo L., Alfredo: “Química”; Ed. San Marcos. 1992; 896 Pág. Lima –Perú.

Martínez Domínguez, Fernando: “Tecnología Eléctrica”; Ed. Paraninfo Thomson Learning.

Ortega Rodríguez, Mario: “Energías Renovables”; Ed Thomson Paraninfo, S.A. 1ra Ed. 2001; 336 Pág. Madrid –España.

VV.AA.: “Biotecnología e Ingeniería”; Ed Española, S.A. 1ra Ed. 2003; 149 Pág. Barcelona-España.

Universidad Nacional Del Centro Del Perú/ Fidel Víctor Lagos Gómez - Tesis: “Sistema Fotovoltaico para el ahorro de Energía Eléctrica en el Servicio de Alumbrado General de Condominios”.

Hernández, Fernández y Baptista “Metodología de la Investigación” 6ta. Edición, Mc Graw Hill, México, 2014.

Metodología de la Investigación, M. en C. Roberto Hernández Sampieri.

<https://concepto.de/energia-electrica/#ixzz8aEW07q5p>.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Celda\\_de\\_combustible\\_microbiano](https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_de_combustible_microbiano).

**ANEXOS N° 01:**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA.**



MATRIZ DE CONSISTENCIA

“GENERACIÓN ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL CON BIOTECNOLOGÍA DE PILAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”

<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Conclusiones</b>						
<p><b>Problema Principal</b> ¿En qué medida se puede generar energía eléctrica no convencional con el diseño de la biotecnología de pilas de combustible microbianas para el uso en viviendas rurales en la región del Cusco?</p> <p><b>Problemas específicos</b> a) ¿Es posible analizar la reacción de las bacterias contenidas en el agua residual en contacto con el material de los electrodos que se encuentran en la región del Cusco para aplicarlos en una pila de combustible microbiana? b) ¿Se podrá modelar una Celda de PCM y por ende un sistema de Pila de combustible microbiana (PCM), utilizando herramientas computacionales como el MATLAB – SIMULINK para generar energía eléctrica monofásica y trifásica no convencional? c) ¿Será posible diseñar y construir un módulo físico funcional y aplicable a viviendas rurales de la región del Cusco, con el sistema de generación de energía eléctrica alterna monofásico con Pilas de Combustible Microbianas?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Modelar, diseñar y construir un Sistema de Pila de Combustible Microbiana para generar energía eléctrica no convencional para el uso en viviendas rurales.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b> a) Analizar y evaluar la reacción de los componentes de los electrodos con el metabolismo de las bacterias contenidas en el agua residual para incrementar la generación de energía eléctrica. Identificar los materiales de los electrodos que se puedan obtener en el mercado regional, para la implementación de Celdas Combustible Microbianas (CCM). b) Modelar una Celda de Combustible Microbiana (CCM) y por ende una pila de combustible microbiana (PCM), utilizando herramientas computacionales como el Matlab – Simulink para generar energía eléctrica monofásica y trifásica no convencional. Implementar y/o construir un módulo físico de sistema de generación de energía eléctrica monofásica alterna con Pilas de Combustible Microbianas. c) Comprobar y analizar los resultados obtenidos en el modelamiento del Matlab y en el prototipo físico experimental.</p>	<p><b>Hipótesis general</b> Con la utilización de la biotecnología de las celdas de combustible microbianas se modelará y construirá un generador eléctrico funcional para dotar de energía eléctrica no convencional a viviendas rurales en la región del Cusco.</p> <p><b>Hipótesis específica</b> a) Se evalúa la reacción de los componentes de los electrodos con el agua residual, para mejorar los parámetros de generación energía eléctrica., considerando los materiales que se encuentran en la región del Cusco para la utilización en los electrodos, como son: Óxido de plomo, Plomo, Aluzinc y Aluminio en reacción con el metabolismo de las bacterias de las aguas residuales para la aplicación de las pilas de combustible microbianas. b) Se modela una celda de combustible microbiana (CCM) y un apilamiento de celdas de combustible microbiana (PCM), utilizando el MATLAB – SIMULINK, y se aplica al sistema de generación de energía eléctrica monofásico y trifásico, obteniendo un sistema funcional energía eléctrica no convencional. Se construye un módulo físico de sistema de generación monofásica de energía eléctrica alterna con Pila de Combustible Microbiana para aplicarlo en una vivienda rural. c) Se comprueba los resultados de los parámetros de energía eléctrica de la simulación y del experimental.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Con la investigación realizada, se logró modelar y construir un módulo físico funcional de Sistema de Pila de Combustible Microbiana para poder aplicarlo a una vivienda rural; utilizando electrodos: Óxido de Plomo (Cátodo) y Aluzinc (Ánodo), obteniendo a la salida de la Pila de Combustible Microbiana 12.29 V, 1.25 A y 15.36 W en corriente continua.</li> <li>2. De la investigación se pudo identificar el comportamiento del metabolismo bacteriano en reacción química con los componentes de los materiales de los electrodos; según las simulaciones y pruebas experimentales la mejor combinación es el Óxido de Plomo y el Aluzinc. Los materiales de los electrodos se consiguieron en nuestra región y se identificó diversos materiales que funcionan como electrodos, como son: Aluzinc, Plomo, Aluminio, Óxido de Plomo, que reaccionan con las bacterias de las aguas residuales y se obtuvieron diversos parámetros de energía eléctrica, las cuales fueron aplicadas a las Pilas de Combustible Microbianas.</li> <li>3. Se modeló una Celda de Combustible Microbiana y un Sistema de Pila de Combustible Microbiana en el software MATLAB – SIMULINK, y se obtuvieron los parámetros eléctricos (tensión, corriente, densidad de corriente, potencia y densidad de potencia) y la curva característica de una Celda de Combustible Microbiana; también se simuló sistemas prácticos para la dotación de energía eléctrica con Pila de Combustible Microbiana, como es el Sistema de generación Monofásico y Sistema de Generación Trifásico. Consecuentemente se implementó el prototipo de un sistema monofásico en corriente alterna para poder aplicarlo a una vivienda rural; como Sistema de Pila de Combustible Microbiana a la salida del Inversor genera una tensión de 226.2 V en corriente alterna.</li> <li>4. Mérito del presente estudio, ha posibilitado la comprobación y el análisis de los resultados obtenidos en el modelamiento del Matlab y la experimentación física; como se muestra en la Tabla N°19, y se aprecia que los resultados presentan mínimas variaciones en los parámetros obtenidos</li> </ol>						
<b>Metodología</b>	<b>Variables e Indicadores</b>		<b>Sugerencias</b>						
<p><b>Tipo de investigación</b> Explicativo <b>Diseño de investigación</b> Cuasiexperimental <b>Análisis de Datos</b> Cuantitativo</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="466 1076 667 1101">Variables</th> <th data-bbox="667 1076 1295 1101">Indicadores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="466 1101 667 1274"><b>Independiente</b> Pilas de combustible microbianas</td> <td data-bbox="667 1101 1295 1274">Volumen de agua residual con contenido de bacterias.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="466 1274 667 1421"><b>Dependiente</b> Generación de energía eléctrica</td> <td data-bbox="667 1274 1295 1421">-Potencia -Tensión -Intensidad de corriente -Resistencia eléctrica</td> </tr> </tbody> </table>		Variables	Indicadores	<b>Independiente</b> Pilas de combustible microbianas	Volumen de agua residual con contenido de bacterias.	<b>Dependiente</b> Generación de energía eléctrica	-Potencia -Tensión -Intensidad de corriente -Resistencia eléctrica	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se recomienda continuar con las investigaciones a fin de encontrar materiales con propiedades óptimas para la fabricación de electrodos, y aplicarlas a la implementación de PCM con mejores prestaciones energéticas.</li> <li>2. Para el apilamiento de las CCM mixtas (serie- paralelo), es importante verificar que cada CCM tengan similares tensiones y corrientes unitarias, así se garantiza mayor tensión y mayor corriente; también se recomienda mejorar las celdas implementando mayor cantidad de electrodos negativos; con esta acción se incrementa el área de contacto de bacterias y por ende la potencia del dispositivo (con la misma cantidad de celdas se pudo obtener 15 a 20 W de potencia).</li> <li>3. Es posible mejorar el rendimiento de una celda e incrementar su potencia eléctrica de entrega; adicionando el catalizador de níquel por electrodeposición en el Cátodo (+) y una membrana de intercambio protónico que contenga iones activos, lo cual mejora la prestación de los electrodos. Se debe precisar que el rendimiento energético de una CCM depende en gran medida del grado de contaminación del sustrato o aguas residuales contenidas en ella.</li> <li>4. Mejorar los diseños constructivos de las CCM y PCM para aprovechar al máximo sus prestaciones energéticas, y diseñar equipos versátiles a un mantenimiento técnico adecuado.</li> </ol>
	Variables	Indicadores							
<b>Independiente</b> Pilas de combustible microbianas	Volumen de agua residual con contenido de bacterias.								
<b>Dependiente</b> Generación de energía eléctrica	-Potencia -Tensión -Intensidad de corriente -Resistencia eléctrica								