



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE CONEXIONES ELÉCTRICAS
EN HUMEDALES ARTIFICIALES ASISTIDOS
ELECTROQUÍMICAMENTE
A ESCALA DE LABORATORIO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T A :
HÉCTOR ARI RIVERA LABRADA**

JURADO DE EXAMEN

**DIRECTORA : DRA. MARÍA GUADALUPE SALINAS JUÁREZ
ASESORA : M. en C. YENNIFER PAOLA ARAUZ TORRES
ASESOR : M. en C. LUIS ANTONIO RAMÍREZ TORRES
SINODAL : DR. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA
SINODAL : DR. FAUSTO CALDERAS GARCÍA**



CIUDAD DE MÉXICO

AGOSTO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

PRESIDENTE:	DR. CALDERAS GARCÍA FAUSTO
SECRETARIO:	DR. HERRERA VALENCIA EDTSON EMILIO
1er. VOCAL:	DRA. SALINAS JUÁREZ MARÍA GUADALUPE
2do. VOCAL:	M. en C. ARAUZ TORRES YENNIFER PAOLA
3er. VOCAL:	M. en C. RAMÍREZ TORRES LUIS ANTONIO

LUGAR EN DONDE SE DESARROLLÓ EL TRABAJO EXPERIMENTAL

Laboratorio de Reología y Fenómenos de Transporte, Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ) L-7 Primer Piso y área verde del humedal. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Batalla 5 de Mayo S/N, Ejército de Oriente Zona Peñón, Iztapalapa, 09230 Ciudad de México, CDMX.

TUTORA DEL TEMA

Dra. María Guadalupe Salinas Juárez

SUSTENTANTE

Héctor Ari Rivera Labrada

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RECONOCIMIENTOS	IX
AGRADECIMIENTOS	X
DEDICATORIA	XI
RESUMEN	XII
NOMENCLATURA	XIII
GLOSARIO	XV
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMÁTICA POR GASES DE EFECTO INVERNADERO	2
1.1.2 GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	5
1.2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO	5
1.2.3 SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	6

OBJETIVOS.....	10
2.1 OBJETIVO GENERAL	11
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	11
2.3 METAS Y ALCANCES.....	11
MARCO TEÓRICO	12
3.1 RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES	13
3.2 HUMEDALES NATURALES Y HUMEDALES ARTIFICIALES.....	15
3.2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES ASISTIDOS ELECTROQUÍMICAMENTE	17
3.3 GENERALIDADES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA VEGETAL	18
3.4 BACTERIAS ELECTROACTIVAS.....	19
3.5 CONVERSIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN ELECTRICIDAD.....	22
3.5.1 REACCIONES INVOLUCRADAS EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA VEGETAL	24
ANTECEDENTES.....	27
4.1. CONFIGURACIÓN (DISEÑO BÁSICO).....	28
4.2 MEDIO DE SOPORTE	28
4.2.1 TEZONTLE	29
4.3 MATERIAL PARA LOS ELECTRODOS.....	30
4.3.1 GRAFITO	30
4.4 ELECTROLITO	31
4.5 ESPECIE VEGETAL.....	32
4.6 INVESTIGACIONES PREVIAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES ASISTIDOS ELECTROQUÍMICAMENTE	32

MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
5.1 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS Y CONFIGURACIÓN.....	43
5.2 ACTIVACIÓN DE BIO-ELECTRODOS	45
5.3 SOLUCIÓN NUTRITIVA	46
5.4 CONFIGURACIÓN DE COLECTORES DE CORRIENTE ELÉCTRICA Y CIRCUITO ELÉCTRICO	47
5.5 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE CCMV.....	50
5.6 PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	55
5.6.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN CIRCUITO ABIERTO.....	55
5.6.2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN CIRCUITO CERRADO	58
5.7 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	60
5.7.1 PH Y TEMPERATURA.....	60
5.7.1 OXÍGENO DISUELTO	61
RESULTADOS	63
6.1 POTENCIAL DE ÁNODO Y CÁTODO.....	64
6.2 DENSIDAD DE POTENCIA	85
6.3 PH Y TEMPERATURA	88
6.4 OXÍGENO DISUELTO	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
7.1 CONCLUSIONES	95
7.2 RECOMENDACIONES	97

ANEXOS.....	98
REFERENCIAS	102
PARTICIPACIÓN EN EVENTOS ACADÉMICOS.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación eléctrica mundial en TWh para el año 2019 (OLADE, 2020).	4
Figura 2. Generación neta (GWh) y porcentaje de generación eléctrica limpia y convencional (Secretaría de Energía, 2021).....	7
Figura 3. Principales tipos de los recursos materiales (Tyler-Miller, 2002).	13
Figura 4. Conversión y utilización de la energía (Jarabo, Pérez, Elortegui, Fernández, & Macías, 1988).....	14
Figura 5. Componentes de un humedal artificial: a) Capa impermeable, b) Sustrato, c) Vegetación, d) Influyente (agua residual), e) Efluente (agua tratada) (Montenegro-Rosero, Fernández, Villamar-Ayala, & Espinoza-Montero, 2019).	16
Figura 6. Esquema de celda de combustible microbiana de doble cámara (elaboración propia).	18
Figura 7. Estructura que comparte una célula procariota y una eucariota animal (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012).....	19
Figura 8. Estructura de una célula procariota (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012).....	20
Figura 9. Célula bacteriana flagelada y estructura de un flagelo procariótico (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012).....	21
Figura 10. Esquema del catabolismo y anabolismo (T. Audesirk y G.Audesirk, 2003)	22
Figura 11. Esquema de celda de combustible microbiana vegetal.....	24
Figura 12. Esquema de la configuración general de celda de combustible microbiana vegetal (elaboración propia).	44
Figura 13. Vista superior de una celda de combustible microbiana vegetal (elaboración propia).	44
Figura 14. Valoración óhmica de colectores de corrientes: a) malla de alambre, b) alambre, c) placa perforada (elaboración propia).	46
Figura 15. Colectores de corriente de acero inoxidable. a) Malla de alambre (14x14), b) Malla de alambre (150x150), c) Alambre entretejido en fieltro de carbono, d) Placa perforada.	48
Figura 16. Humedales artificiales con distintos colectores de corriente, a) Alambre de cobre (C-Ctrl), b) Tela de malla (CT), c) Placa perforada, d) Malla de alambre (CM), e) Alambre (CA).	49

Figura 17. Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ).	51
Figura 18. Espacio de experimentación-para las celdas de combustible microbianas vegetal y contenedores para solución nutritiva.	51
Figura 19. Vista lateral de material PVC con orificio inferior para celda de combustible microbiana (izquierda). Vista superior de colector anódico y tubos para muestreo (derecha).	52
Figura 20. Especie vegetal <i>Phragmites Australis</i> .	53
Figura 21. Celdas de combustible microbianas con sistema de venoclisis incorporado y tezontle con <i>Phragmites Australis</i> .	54
Figura 22. Celda de combustible microbiana vegetal con resistencia 11.3 K Ω (izquierda). Celda de combustible microbiana vegetal en circuito abierto con tela pellón en cátodo (derecha).	55
Figura 23. Multímetro digital AMPROBE modelo 38XR-A.	56
Figura 24. Electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl).	57
Figura 25. Valoración de potencial eléctrico de electrodo de plata/cloruro de plata elaborado por medio de electrodo de referencia.	57
Figura 26. Diagrama de flujo para valoración de los parámetros eléctricos en un circuito abierto.	58
Figura 27. Conexión eléctrica para obtención de curva de polarización. a) Celda de combustible microbiana vegetal, b) amperímetro, c) voltímetro, d) caja de resistencias.	60
Figura 28. Uso de electrodo para pH de Multiparamétrico en zona anódica de celda de combustible microbiana vegetal (CM-2).	61
Figura 29. Potencial de ánodos en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes versus tiempo.	68
Figura 30. Potencial de cátodos en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes versus tiempo.	69
Figura 31. Voltajes en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes versus tiempo.	70
Figura 32. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 1.	72
Figura 33. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 2.	73
Figura 34. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 3.	75
Figura 35. Crecimiento de microalgas en cátodos con malla de alambre (arriba). Colocación de grafito en polvo en cátodos con malla de alambre y placa (abajo).	76

Figura 36. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de malla de alambre 1	79
Figura 37. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de malla 2	80
Figura 38. Potenciales anódicos de celda control, celda tela de alambre1 y 2	81
Figura 39. Corrosión y desgaste de colectores de corriente eléctrica en celdas de malla de alambre (150x150) "Tela de malla"	83
Figura 40. Corrosión presente en celdas de combustible microbianas vegetal de alambre.....	84
Figura 41. Curvas de polarización para celda placa 1 y celda placa 2.....	86
Figura 42. Curvas de polarización para celda de placa 3 y celda de malla 1.....	87
Figura 43. Potenciales de ánodo y cátodo con concentraciones de oxígeno disuelto en celda de combustible microbiana vegetal de placa 1.....	92
Figura 44. Potenciales de ánodo y cátodo con concentraciones de oxígeno disuelto en celda de combustible microbiana vegetal de malla 1	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Configuración 1 para celda de combustible microbiana vegetal y características eléctricas.....	34
Tabla 2. Configuración 2 para celda de combustible microbiana vegetal.....	34
Tabla 3. Resultados eléctricos de la configuración 2.....	35
Tabla 4. Configuración 3 para celda de combustible microbiana vegetal (Salinas-Juárez, 2016).....	35
Tabla 5. Resultados eléctricos de configuración 3 (Salinas-Juárez, 2016).....	36
Tabla 6. Configuración 4 de celda de combustible microbiana vegetal y resultados eléctricos (Salinas-Juárez, 2016).	37
Tabla 7. Configuración de celda de combustible microbiana con especie <i>Thypha latifolia</i>	39
Tabla 8. Parámetros eléctricos de configuración con <i>Typha latifolia</i>	40
Tabla 9. Configuración con placa de acero inoxidable y solución nutritiva.....	41
Tabla 10. Resistencias óhmicas de electrodos destinados para ánodos (sólo fieltro).....	45
Tabla 11. Resistencias óhmicas de electrodos destinados para cátodos (sólo fieltro).....	45
Tabla 12. Resistencias óhmicas de ánodos con colector de corriente (fieltro - colector).....	46
Tabla 13. Resistencias óhmicas de cátodos con colector de corriente (fieltro - colector).....	46
Tabla 14. Composición de agua residual sintética (Luviano-Vigueras, 2020).....	47
Tabla 15. Celdas construidas con diferentes colectores de corriente.....	47
Tabla 16. Potencial más negativo en el ánodo de cada CCMV.....	66
Tabla 17. Potencial máximo en los cátodos de las CCMV.....	66
Tabla 18. Valores máximos de voltaje en las CCMV.....	67
Tabla 19. Valores máximos de densidad de potencia para cada configuración.....	85
Tabla 20. Promedios de valores fisico-químicos en CCMV de placa y malla de alambre.....	89
Tabla 21. Oxígeno Disuelto en celdas con placa perforada y malla de alambre.....	90

RECONOCIMIENTOS

El trabajo de investigación presentado en esta tesis fue posible gracias al financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, por medio del Proyecto **PAPIIT IA107020**.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por albergar un camino de conocimiento, motivándome a transitarlo en compañía de la docencia que proporciona esta sede, la cual muestra que la disciplina y el aprendizaje no tienen que estar alejados de los airesos momentos.

Al Laboratorio de Reología y Fenómenos de Transporte, Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ), Laboratorio 7 del primer piso, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por permitirme un espacio para la realización de los análisis y para alojar los equipos utilizados en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de las personas aquí citadas.

Con un profundo respeto hacia mi tutora de tesis, la Dra. María Guadalupe Salinas Juárez, por la disposición que la caracterizó en ofrecerme los conocimientos y medios necesarios para la elaboración del presente proyecto, por su paciencia que manifestó continuamente al comunicar las respuestas precisas ante las dudas que surgían durante este trayecto. Sin pasar desapercibido el apoyo de su parte en distintos eventos, cursos y presentaciones, que me han servido como una preparación para esta tesis. Ha sido un orgullo para mí, el haber formado parte de su equipo de investigación; admirando su profesionalismo y entrega.

A la M. en C. Yennifer Paola Arauz Torres, cuya enseñanza trasciende las aulas del aprendizaje, moldeando convivencias que animaron a compartir una amistad y confianza.

Al M. en C. Luis Antonio Hernández Torres, por su incondicional colaboración, siempre alegre y completa disposición para compartir sus consejos y guía en la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Fausto Calderas García, quien, junto con su estoica presencia, mostró una continua atención a las necesidades requeridas para concluir este propósito.

Al Dr. Edtson Emilio Herrera Valencia, quien, con su amena personalidad y grata conversación, acogió este proyecto con gran interés hasta llegar a su final.

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a la retribución de la voluntad firme de mi madre y a su cálido fervor que siempre me ha inspirado a no renunciar al entusiasmo. Y quien en más de una ocasión me ha visto ser sincero ante mis facciones y los desalentados fracasos que en su momento obligaron a forjar opciones que llevaron a nuevos inicios en más de una circunstancia.

“Nada está perdido si se tiene el valor de proclamar
que todo está perdido y hay que empezar de nuevo.”

___ Julio Cortázar ___

RESUMEN

Con el incremento del desarrollo industrial y un acelerado crecimiento demográfico, se ha ocasionado una crisis climática. La elevada demanda de electricidad, proveniente de los combustibles fósiles como materia prima, ha promovido el aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI). Por otra parte, se requiere la depuración de residuos líquidos procedentes del uso doméstico, esto es, la depuración de las aguas residuales. Ambas situaciones han impulsado diversas investigaciones para dar solución a estas necesidades mediante tecnologías que sean sustentables y poco agresivas con el medio ambiente. Una de estas alternativas son los sistemas bio-electroquímicos, como son las celdas de combustible microbianas vegetales (en adelante, CCMV) que tienen la capacidad de transformar la energía bioquímica almacenada en un sustrato biodegradable en corriente eléctrica. Esta transformación se logra mediante el metabolismo de microorganismos que realizan una transferencia de electrones a un ánodo, a partir de la oxidación de compuestos orgánicos. La implementación de CCMV en humedales artificiales permite la producción de una corriente eléctrica, así como el tratamiento de agua residual generando en conjunto un sistema denominado humedal artificial asistido electroquímicamente (en adelante, HA-AEQ).

En el presente trabajo se construyeron 12 HA-AEQ a escala de laboratorio. Para su construcción se empleó fieltro de carbono en los electrodos. Para los colectores de corriente, se utilizó acero inoxidable, en tres presentaciones: alambre, placa y dos presentaciones de malla (14x14 y 150x150: Número de alambres en 1 pulgada). También se empleó cable de cobre calibre No. 18 para una celda control. Se utilizó la especie vegetal *Phragmites Australis* y una resistencia de 11.30 k Ω en cada humedal. El objetivo de esta investigación fue evaluar los materiales usados como colectores de corriente por medio del desempeño eléctrico de los humedales mediante curvas de polarización, así como de la densidad de potencia eléctrica. Los mejores resultados se obtuvieron con los materiales de placa y malla de alambre (14x14), con densidades de potencia de 7.2 (mW/m²) y 1.4 (mW/m²) respectivamente.

NOMENCLATURA

μA	Microamperes
11	Celda bio-electroquímica con ánodo de fieltro de grafito, con planta
1GrPl	Celda bio-electroquímica con ánodo de grafito y planta 1
2GrPl	Celda bio-electroquímica con ánodo de grafito y planta 2
ADN	Ácido desoxirribonucleico
Ag/AgCl	Plata/Cloruro de plata
ALL	Celda bio-electroquímica sin planta, alimentada con agua de llave
ARN	Ácido ribonucleico
ARS	Agua residual sintética
ARSI	Celda bio-electroquímica sin planta alimentada con agua residual sintética I
atm	Atmósferas (unidad de medida para la presión)
ATP	Adenosíntrifosfato
C - 1	Celda bio-electroquímica 1
C - 2	Celda bio-electroquímica 2
C - 3	Celda bio-electroquímica 3
CCM	Celda de combustible microbiana
CCMV	Celda de combustible microbiana Vegetal
cm	Centímetros
DP	Densidad de potencia eléctrica
GEI	Gases de efecto invernadero
HA	Humedales artificiales
HA-AEQ	Humedales artificiales asistidos electroquímicamente
j	Densidad de corriente
K	Grados Kelvin
KCl	Cloruro de Potasio
L	Litro
m	Metros
M	Molaridad
mA	Miliamperes
mm	Milímetros
mol	Moles
mV	Milivolts
mW	Miliwatts
P	Potencia eléctrica
PARS	Celda bio-electroquímica, con planta alimentada con agua residual sintética
PARSI I	Celda bio-electroquímica inoculada con planta, alimentada con agua residual sintética I
PARSI II	Celda bio-electroquímica inoculada con planta, alimentada con agua residual sintética II

PARSI III	Celda bio-electroquímica inoculada con planta, alimentada con agua residual sintética III
PIB	Producto interno bruto
Prim	Primera celda microbiana de prueba
PSN	Celda bio-electroquímica inoculada, con planta y alimentada con agua residual sintética
SBE	Sistema bio-electroquímico
SN	Solución nutritiva
TEE	Transferencia extracelular de electrones
TzPI	Celda bio-electroquímica con tezontle y planta
VCA	Voltaje en circuito abierto
VCC	Voltaje en circuito cerrado

GLOSARIO

Agua renovable: Se le denomina a la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema y que se renueva por medio de la lluvia (Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), 2023).

Agua residual: Son las provenientes de actividades domésticas, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias o de cualquier otra actividad que, por el uso de que han sido objeto, contienen materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original (Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), 2023).

Aguas crudas: Son las aguas residuales sin tratamiento (Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), 2023).

Aguas residuales tratadas: Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos y otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público (Secretaría del Medio Ambiente (Sedema), 2023).

Combustible: Se refiere a cualquier material con la capacidad de liberar energía cuando se cambia o se transforma su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable (por ser una reacción química, se conoce como energía química). En bioquímica se refiere a la sustancia que es oxidada por un organismo vivo para obtener energía útil en los procesos de renovación y regeneración celular, así como el crecimiento y obtención de carbohidratos, lípidos, proteínas, entre otros (Ediciones Larousse, S.A. de C.V., 2023).

Sustrato: En bioquímica, se define a una sustancia sobre la que actúa una enzima, y como el alimento para microorganismos. Por otra parte, en biología, este término se refiere a el lugar que sirve de asiento a una planta o un animal fijo (Real Academia Española, 2014).

CAPÍTULO I

Introducción

1.1 PROBLEMÁTICA POR GASES DE EFECTO INVERNADERO

La contaminación es el cambio no deseado en las condiciones del aire, el agua, suelo o alimentos, y que afectan nocivamente la salud humana o de algún otro organismo vivo. Estas alteraciones llegan a surgir por la extracción, procesado, transformación en producto y utilización de algún recurso, presentándose como sustancia química sólida, líquida o gaseosa. Uno de los factores contaminantes, con la capacidad de influir sobre el clima, son los arreglos químicos producidos en la tropósfera por la acción humana, principalmente las trazas de vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), entre otros compuestos. Estas sustancias tienen la aptitud de retener el calor absorbido en la superficie de la Tierra y promueven el cambio climático, son denominadas como **gases de efecto invernadero (GEI)** (Tyler-Miller, 2002).

El cambio climático es un fenómeno milenario que se va presentando en todo el planeta durante diversos periodos que abarcan décadas o millones de años. Una de las principales causas han sido las actividades humanas, que han influido de manera directa o indirecta a este fenómeno. Desde el año 1950, se ha declarado a las **actividades antropogénicas, como la principal causa del efecto invernadero**; debido a las emisiones de sustancias que son liberadas hacia la atmósfera y resultantes en el incremento de la temperatura en forma global y progresiva. El principal componente responsable de este efecto es el **dióxido de carbono (CO_2)**, pues, debido a su origen natural, así como a las actividades de producción de electricidad y **al uso de combustibles fósiles**; ha llegado a ser el principal problema del siglo XXI, relacionado tanto con a temas ambientales, como con aspectos económicos, políticos y sociales, por la escasa participación en el desarrollo de energéticos que se puedan aprovechar sin tener la dependencia de hidrocarburos (Ibarra , 2020).

1.1.2 GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL

La Agencia de prensa francesa (*Agence France-Presse*, AFP) afirma que se invirtieron 550,000 millones de dólares a las fuentes carburantes (principales en ocasionar el calentamiento global); dos veces más de lo asignado a las fuentes renovables durante el año 2019. Mostrando que el 80 % del consumo mundial de energía proviene de las fuentes fósiles, la cual es una disminución insignificante al porcentaje de hace una década. El año 2020, que pudo dar una aportación al cambio climático, ha tomado una dirección desfavorable debido a los planes pos-COVID, pretendiendo **invertir seis veces más en energías fósiles que en a las renovables**; lo anterior indica estar aún lejos de un futuro energético limpio y saludable (*Agence France-Presse*, 2021).

Varios países (incluido México), se han incorporado al **Acuerdo de París**, adoptando el compromiso de limitar el calentamiento global a 1.5 °C, reduciendo los gases de efecto invernadero. Sin embargo, **los institutos de investigación, así como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente** (PNUMA), han señalado en sus informes sobre los planes por parte de varios gobiernos en incrementar la producción de petróleo y gas para las próximas décadas. A pesar de una leve disminución de carbón, estas acciones parecen provocar una resistencia por una transición hacia la obtención de energías limpias y una mejor calidad ambiental, ya que estas proyecciones contemplan una producción para el 2030 de un 110% de combustibles fósiles con respecto al año 2019, asegurando un **incremento mayor de consumo de gas entre los años 2020 y 2040** (Nairobi, 2021).

La generación eléctrica a nivel mundial durante el 2019 presenta cifras de 26,908 TWh, siendo 1.3% más que el año 2018; en donde predomina el origen por combustibles fósiles. Se reportó un 63% de generación eléctrica (aprox.) a partir de combustibles fósiles sobre las fuentes renovables, las que presentan un 27% de participación; de éstas, la principal aportación es de fuentes hidro-energéticas con un 16%, eólicas y solar con un 8%, y con un 3% la biomasa. Los continentes que más contribuyeron en la generación eléctrica para el año 2019, fueron Asia y

Australia, proporcionando 12,690 TWh equivalente a poco más del 47% de la producción mundial; América del Norte generó 5,062 TWh, teniendo un porcentaje superior al 18%; la aportación por parte del continente europeo fue mayor del 14% con 3,993 TWh de la generación eléctrica a nivel mundial. La Comunidad de Estados Independientes (CEI), originaron cifras de 1,431 TWh, resultando el 5.32%. La participación de América Latina y el Caribe (ALC), es liderada principalmente por Brasil, con una generación eléctrica de 626 TWh, lo que proporciona el 2.33% a nivel mundial. México es el segundo país de ALC que encabeza en esta cifra mundial, con un total de 324 TWh, correspondiendo al 1.20% de participación (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); esto representa un incremento del 2.06% con respecto al 2018 de su producción eléctrica. Sin embargo, esta producción en México fue concebida en su mayoría por combustibles fósiles, predominando el 72%, la generación a partir de fuentes renovables, se originó con un 24% (hidroenergía, eólica, bio-gas, solar y geotermia) y el resto provino de fuente nuclear (OLADE, 2020).

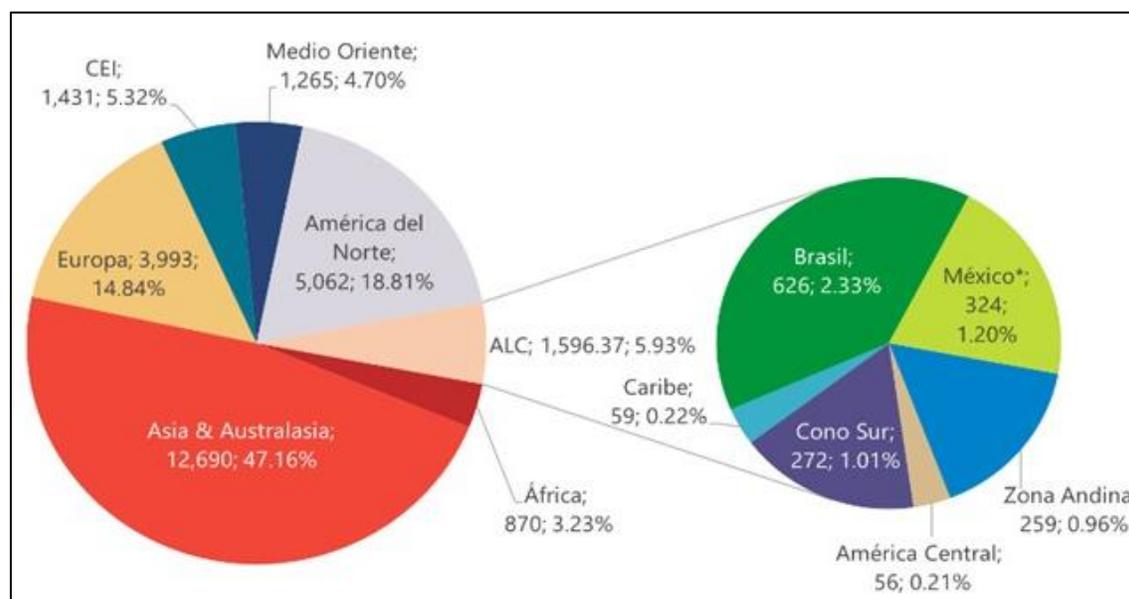


Figura 1. Generación eléctrica mundial en TWh para el año 2019 (OLADE, 2020).

En términos ambientales, nuestro planeta ha entrado en un estado de constantes modificaciones, direccionado a un riesgo climático que se manifiesta como inundaciones y

distribución geográfica de la precipitación, además, de las sequías extremas, disminución de reservas del agua almacenada en los glaciares, entre otras consecuencias ocasionadas por las condiciones y características que se han mencionado con anterioridad. Estos factores han incitado a la **escasez de agua**, el cual, es un recurso clave, para el **desarrollo sostenible para la salud humana y para el crecimiento económico**. A partir de la escasez de agua se originan distintas problemáticas que van desde la sobreexplotación de **los mantos acuíferos**, los problemas en la red de distribución del agua, **la contaminación** y la falta de un control sobre las concesiones, incluyendo la parte agrícola e industria (García, 2018).

1.2 JUSTIFICACIÓN

En esta sección, se presentan los principales medios que México desarrolla para su producción eléctrica. Por otra parte, también se menciona la dificultad en la que México se encuentra lidiando actualmente para la disposición adecuada del recurso hídrico, debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento en su consumo doméstico, además de los diversos componentes del sector productivo principalmente en la agricultura y la industria; provocando la sobre explotación del recurso, la contaminación de ecosistemas, la degradación de los suelos y a un impacto negativo sobre la seguridad alimentaria. Actualmente el tratamiento de agua residual por lodos activados sigue siendo el más utilizado y otros tratamientos menos empleados incluyen **humedales artificiales**. Una estrategia que, aunque lleva más de 50 años de uso en países europeos, en México aún se tiene poco conocimiento de su utilidad, por falta de manuales de construcción y preparación con carreras afines donde se enseñe sobre la alternativa y estrategias sustentables (Vidal-Álvarez, 2018).

1.2.1 ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO

La producción eléctrica en el país corresponde principalmente a las **centrales generadoras de ciclo combinado**. En estas centrales se transforma la energía térmica del **gas**

natural en electricidad mediante dos ciclos consecutivos: el que corresponde a una turbina de gas convencional y el de una turbina de vapor. **El segundo sitio en capacidad instalada es para las hidroeléctricas**, aquella que se genera al transformar la fuerza del agua en energía eléctrica, y para lo cual se construyen grandes infraestructuras hidráulicas capaces de extraer el máximo potencial de este recurso renovable libre de emisiones. **La tercera posición la ocupan las centrales térmicas convencionales**, también llamadas termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles (gas natural, carbón o combustóleo) para generar energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor. **Las Eolo-eléctricas ocupan otra parte importante de la capacidad instalada en México**; funciona mediante un aerogenerador que gracias al viento hace girar las palas que se conectan a un rotor que a su vez va a un multiplicador que eleva la velocidad de giro a miles de revoluciones por minuto, para transformar la energía cinética a un generador que la convierte en energía eléctrica. **Las carboeléctricas funcionan como las centrales térmicas convencionales**, pero utilizan como combustible el carbón, lo que las hace muy contaminantes en el proceso de producción eléctrica (Milenio, 2021).

Para la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE), todo suministro energético proveniente de plantas hidroeléctricas, fotovoltaicas, eolo-eléctricas, geotérmicas y las que utilizan bioenergéticos, es considerado como una fuente de **generación eléctrica limpia renovable**, cuya participación neta en este sector para el año 2020 (véase **Figura 2**), presentó el 25.5% (67,425.50 GWh), a comparación del 74.52% (197,182.07 GWh) de energías convencionales provenientes de permisionarios incluyendo a la Comisión Federal de Energía (CFE) y otros proyectos financiados por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), (Secretaría de Energía, 2021).

1.2.3 SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

El Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental comenta que, en México cada año se vierten a los cuerpos de agua millones de metros cúbicos de aguas residuales. Estas aguas

residuales incluyen descargas municipales, industriales y agrícolas tratadas de forma inadecuada o sin tratamiento alguno, teniendo un severo impacto en los ecosistemas y en la salud.

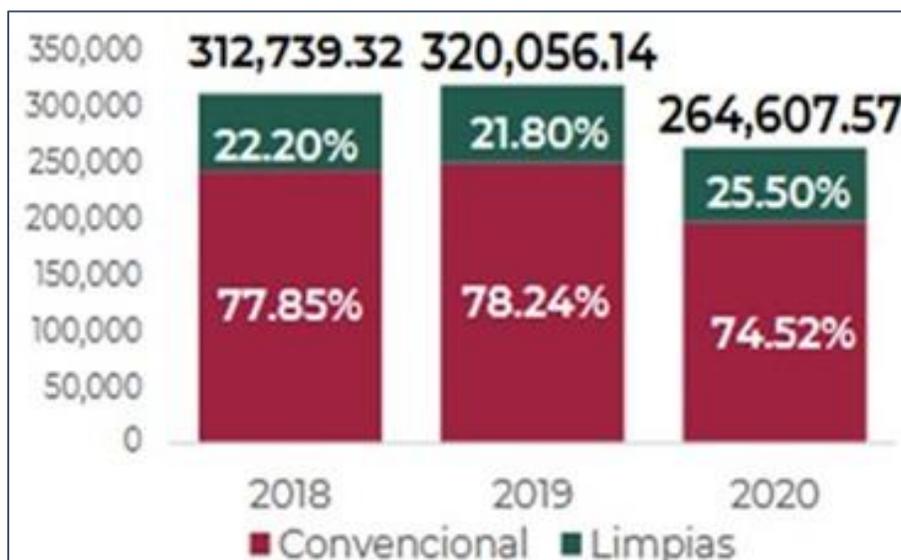


Figura 2. Generación neta (GWh) y porcentaje de generación eléctrica limpia y convencional (Secretaría de Energía, 2021)

Se calcula que **en 2015 el costo económico de la contaminación causada por aguas residuales no tratadas fue de 57,403 millones de pesos, equivalente al 0.3% del producto interno bruto.** Al igual que se requirió una inversión de infraestructura para agua potable, alcantarillado y saneamiento de 9,173 millones de pesos, representando el 26% de la inversión hídrica total del país.

El uso de aguas residuales tratadas podría contribuir a cerrar la brecha entre la oferta y demanda del agua. Según las proyecciones, **en 2030 habrá 9.2 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales** que, de ser tratadas y reusadas, reducirían en un 40% la demanda (F.C.E.A., 2018).

De acuerdo con la Asamblea General de las Naciones Unidas, cuya organización ha reconocido el acceso al agua como un **derecho humano**; señala que, para cubrir las necesidades domésticas y personales, se requiere una cantidad de entre 50 y 100 litros por día por persona. Sin embargo, el abastecimiento en México, no ha logrado una cobertura eficaz en su territorio,

pues no toda la población tiene el acceso diario a este recurso básico, entre otros factores, esto se debe a que la distribución geográfica del agua no coincide con la distribución geográfica de la población (García, 2018). El Consejo Consultivo del Agua, asegura que el volumen de **agua renovable** promedio del país **per cápita** es de **4.028 metros cúbicos por año**; dicha organización manifiesta que el 27% de la población concentrada en el centro norte de México, genera el 79% del PIB, disponiendo con el 32% del agua renovable, a diferencia de la zona sur donde se dispone el 68% del agua y se asienta un 23% de la población, produciendo 21% del PIB. Al tener presente la mala calidad del agua como limitante en cuanto a su aprovechamiento, esta fuente afirma que un 33.2% del agua superficial se encuentra con una calidad aceptable y el 44.1% se califica como calidad buena, sin embargo, el agua superficial contaminada o fuertemente contaminada es del 22.7%, además, se considera que en las ciudades se desperdicia aproximadamente 40% del agua y únicamente el 57% de las aguas residuales colectadas recibe un tratamiento, a pesar de ello, un porcentaje mucho más bajo cumple con las normas oficiales de las descargas residuales (NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-ECOL-1997) (Consejo Consultivo del Agua (CCA), 2022).

Lo anterior indica **la necesidad de priorizar el diseño de esquemas de descentralización para el tratamiento de aguas residuales**, debido a que investigadores por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y otras instituciones de educación pública en la Agenda Ambiental 2018 Diagnóstico y Propuestas, han señalado que México es el segundo país en utilizar agua residual cruda para el riego, posibilitando la acumulación de contaminantes como son los patógenos no controlados, metales pesados, residuos de productos de aseo personal y doméstico, derivados de combustibles, disolventes industriales y plaguicidas, entre otros contaminantes emergentes y que no son considerados en la normativa mexicana actual (anteriormente mencionada); estas aguas residuales crudas llegan a los cuerpos receptores nacionales, aun cuando **hay evidencia de que estas sustancias pueden estar relacionados con el incremento de enfermedades crónico-**

degenerativas. En vista del deterioro en la calidad del agua, se ha generado desconfianza, favoreciendo el consumo de agua embotellada; esto coloca a nuestro país como el principal consumidor per cápita en el mundo y de igual manera se origina otra fuente de contaminación (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018).

En la presente tesis se muestran los resultados obtenidos en un proyecto experimental relacionado con un proceso de depuración de aguas residuales que tiene la capacidad de generar una corriente eléctrica con emisiones de GEI reducidas. Este proyecto tiene el objetivo de contribuir en la solución de las problemáticas ya expuestas.

CAPÍTULO II

Objetivos

2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar el desempeño de tres humedales artificiales asistidos electroquímicamente (HA-AEQ), contruidos con diferentes materiales en los colectores de corriente, por medio de parámetros eléctricos de respuesta tales como la diferencia de potencial, la intensidad de corriente y la potencia eléctrica.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- i. Diseñar y construir tres configuraciones de celda de combustible microbiana implementadas en los HA-AEQ a escala laboratorio.
- ii. Evaluar la generación de electricidad de las tres configuraciones de celda de combustible microbiana en los HA-AEQ del sistema experimental.
- iii. Analizar los factores que impactan la generación de electricidad en los HA-AEQ, como lo son: el potencial del ánodo y el potencial del cátodo, la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto.

2.3 METAS Y ALCANCES

- Construir y operar el sistema experimental conformado por tres configuraciones diferentes de celda de combustible microbiana implementadas en HA-AEQ a escala laboratorio. Cada configuración de celda difiere de las otras por el material usado como colector de corriente.
- Evaluar la generación de electricidad por medio de la medición de voltaje (diferencia de potencial), intensidad de corriente y densidad de potencia eléctrica en cada HA-AEQ fabricado.
- Determinar el colector de corriente que genere los mejores resultados de generación de potencia eléctrica.

CAPÍTULO III

Marco Teórico

3.1 RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES

Un recurso es aquello proveniente del ambiente que se ocupa para satisfacer nuestras necesidades. Estos recursos se encuentran de manera tangible en, por ejemplo, los minerales o en el petróleo, así como los suministros intangibles los cuales están disponibles directamente para su uso, como el aire. La reserva de recursos existentes en varios lugares de la corteza terrestre, con la posibilidad de renovarse por los procesos geológicos, físicos y químicos, a través de periodos extensos de tiempo, se clasifican como **recursos agotables o no renovables**. Estos recursos requieren un mayor tiempo de formación en comparación con la velocidad a la que son extraídos y utilizados. La diferencia de un recurso **perenne y potencialmente renovable** (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) es que pueden durar de una forma indefinida sin reducir la reserva disponible (Tyler-Miller, 2002).

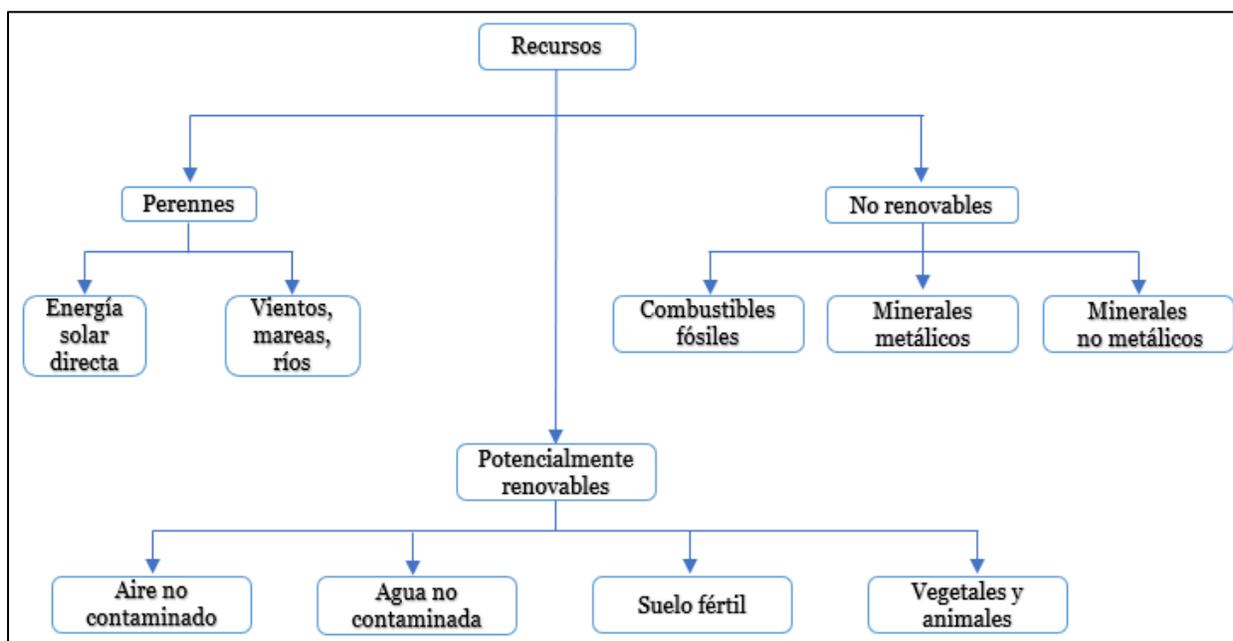


Figura 3. Principales tipos de los recursos materiales (Tyler-Miller, 2002).

Desde el punto de vista de la utilización de la energía, es necesario distinguir entre aquella que se obtiene directamente de la naturaleza, antes de cualquier transformación por medios técnicos (**energía primaria** o recursos energéticos) y que, por tanto, corresponde a un tipo de energía almacenada, de aquellas que deben sufrir una o varias transformaciones (energía

secundaria o energía intermedia)-para alcanzar la forma de la energía deseada por el consumidor (**energía útil** o energía final) (véase **Figura 4**).La conversión de los diferentes energéticos: combustibles fósiles, combustibles nucleares o fuentes renovables en las formas de energía útil: calor, trabajo mecánico, iluminación, entra una serie de operaciones o procesos formando cadenas energéticas (Jarabo, Pérez, Elortegui, Fernández, & Macías, 1988).

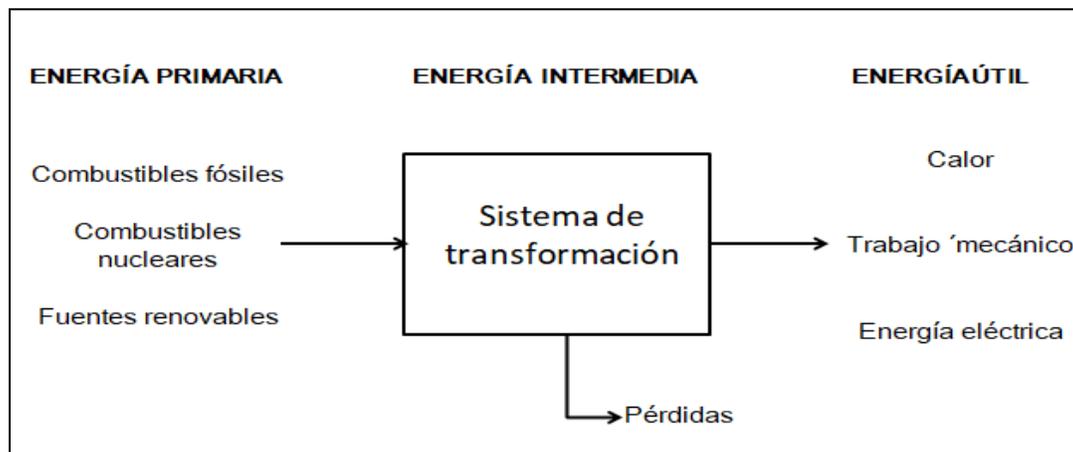


Figura 4. Conversión y utilización de la energía (Jarabo, Pérez, Elortegui, Fernández, & Macías, 1988).

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles. De estos últimos, existen cantidades determinadas o reservas, agotables en un plazo más o menos fijo. Los descubrimientos sobre el origen antropogénico del cambio climático, el agotamiento y encarecimiento de los recursos energéticos fósiles, ha provocado mayor conciencia en utilizar a las energías renovables como una fuente primaria, contribuyendo aproximadamente con el 11.7% en el consumo total de energía a nivel mundial con respecto a las energías no renovables (Schallenberg, y otros, 2008); (ENERGÍAS RENOVABLES, 2022).

La raza humana se ha obligado a manifestar un amplio interés en la necesidad de reducir la **dependencia de los combustibles fósiles y sustituirlos por fuentes renovables; especialmente en la generación de electricidad**, la cual es un servicio básico para la población mundial. Existen múltiples formas para generarla y dependiendo del tipo de tecnología,

se determina su costo, ya sea renovable o no. Las tecnologías de generación renovable, ya sea hidroeléctrica, eólica, solar o por biomasa, tienen argumentos más favorables encaminado a las políticas y regulaciones de otros tipos de fuentes, incluyendo a la energía nuclear; en cuanto a mayor seguridad de almacenamiento de residuos y captura de CO₂. Entre otras atracciones que presentan las energías renovables, se halla el interés en la política industrial para países que se ven a sí mismos como líderes en el desarrollo de las llamadas **tecnologías verdes**; contribuyendo a un posible aumento de producción de energía primaria a nivel global.

México se beneficiaría al implementar medios más naturales para obtener electricidad al disponer de diversas fuentes y tecnologías. La principal vía para obtener electricidad por medios naturales es la hidroeléctrica. Por otro lado, se encuentran las tecnologías convencionales como: turbo-gas, combustión interna y carboeléctrica, siendo éstas últimas las más contaminantes por utilizar combustibles fósiles en sus procesos (Moselle, Padilla, & Schmalensee, 2010; Milenio, 2021).

3.2 HUMEDALES NATURALES Y HUMEDALES ARTIFICIALES

Se considera como humedal a las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies terrestres cubiertas de agua natural o artificial, de forma permanente o temporal. Los humedales naturales son comúnmente llamados pantanos o manglares y su clasificación depende de la localidad donde se encuentre y el tipo de vegetación que disponga. En México, los humedales se han clasificado principalmente en tres recintos:

- **Marinos y estuarinos**, ubicados en la zona costera, donde el agua salada predomina, sin embargo, el agua dulce ocasionalmente llega a mezclarse en la entrada de estos humedales
- Los humedales llamados **lacustres**, son los que se originan en los lagos y sus orillas
- Aquellos humedales que son alimentados únicamente con agua dulce, ubicados en bordes de ríos, lagunas o planicies inundables, se le denominan **Palustres** (Marín & Hernández, 2013).

Los humedales tienen la capacidad de depuración del agua por medio de procesos que son considerados parte de un tratamiento, se incluyen, por ejemplo, la sedimentación, la degradación microbiana, la acción de las plantas, la absorción, algunas reacciones químicas y la volatilización. Debido a la calidad de agua resultante de este procedimiento natural, se ha optado por reproducir artificialmente estos ecosistemas para obtener el mismo beneficio, pero en condiciones más controladas. Estos sistemas se denominan **humedales artificiales (en adelante, HA)**, (véase **Figura 5**).

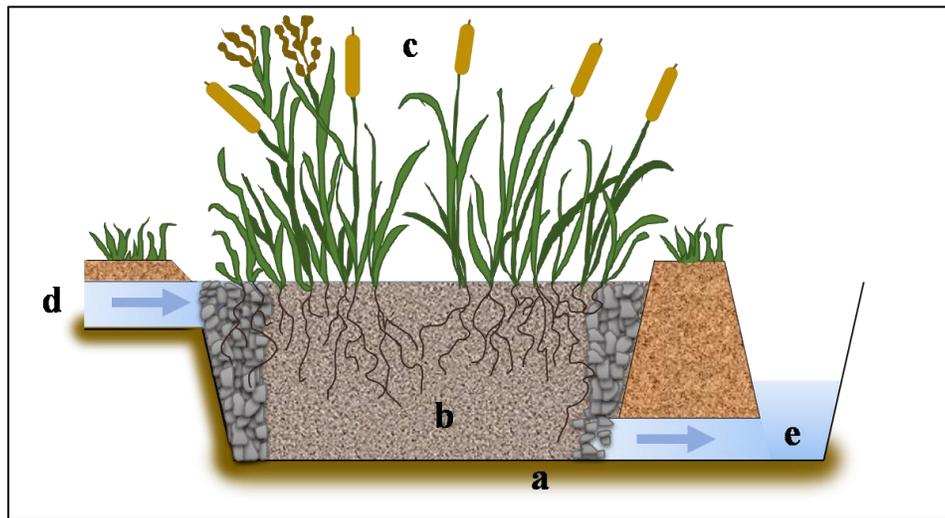


Figura 5. Componentes de un humedal artificial: a) Capa impermeable, b) Sustrato, c) Vegetación, d) Influyente (agua residual), e) Efluente (agua tratada) (Montenegro-Rosero, Fernández, Villamar-Ayala, & Espinoza-Montero, 2019).

Estos sistemas funcionan principalmente por la actividad bioquímica de microorganismos (en la raíz de la planta y en el medio de soporte), el aporte de oxígeno a través de la naturaleza de las especies vegetales que se encuentran en un lecho inerte como soporte para el enraizamiento. Estos mecanismos favorecen la biodegradación de materia orgánica presente en el agua como contaminante hasta mineralizarla y formar nuevos componentes, promoviendo así, su uso como una técnica para el tratamiento de diversas aguas residuales, ya sean urbanas, industriales provenientes de refinerías o aguas de drenaje por la extracción de mineras, etc., logrando

economizar costos en energía y mantenimiento (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010; Merino M. , 2009).

3.2.1 HUMEDALES ARTIFICIALES ASISTIDOS ELECTROQUÍMICAMENTE

A inicios del siglo XX se postuló la posibilidad de producir energía eléctrica, mediante **sistemas bio-electroquímicos (SBE)**, aprovechando la desintegración de la materia orgánica, realizada por microorganismos. Este planteamiento originó que, en 1960 se empezara a implementar a estos seres vivos como una herramienta útil en las celdas de combustible y enfocarse en aprovechar la energía acumulada en la biomasa de los desechos orgánicos para ser transformados en otra fuente de energía favorable por los humanos como son: **la metanogénesis, el hidrógeno molecular y la bio-electricidad**, empezando así, el desarrollo de las **celdas de combustible microbianas** (en adelante, **CCM**) (Farias, 2016; Ramírez, 2017). En estos dispositivos, interactúa un agente oxidante y un *combustible*¹ o sustrato, produciendo corriente eléctrica, calor y agua como productos de las reacciones espontáneas (Rodríguez, Solorza, & Hernández, 2010).

Adicionalmente, Salinas-Juárez *et al.* (2022) realizaron una revisión de las innovaciones realizadas en la configuración de las pilas de combustible bio-electroquímicas que se han efectuado en la última década, con la finalidad de encontrar las mejores condiciones de acoplamiento de los HA y las CCM, en virtud de que ambas son tecnologías biológicas que degradan materia orgánica, además, las CCM requieren de un gradiente de potencial de óxido-reducción, el cual se puede encontrar en los HA, dependiendo de condiciones aerobias o condiciones anaerobias (Salinas-Juárez, Cruz-Martínez, & Solorza-Feria, 2022).

¹. Un combustible se trata de sustancias que al transformar su estructura química proporciona energía que se puede aprovechar. En CCM no ocurre una combustión, sin embargo, este término se refiere a la fuente energética que se suministra para ser aprovechada al haberse oxidado.

3.3 GENERALIDADES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA VEGETAL

Una celda de combustible microbiana es un dispositivo bio-electroquímico, con la capacidad de generar electricidad mediante el funcionamiento básico de una celda electroquímica galvánica. Lo anterior indica que se involucran dos semi-reacciones electroquímicas (oxidación y reducción), microorganismos o **bacterias electroactivas**, y materia orgánica. Su estructura suele estar constituida con dos compartimientos separados físicamente, albergando de manera independiente al **ánodo** y al **cátodo**, aunque estos sistemas también suelen ser fabricados con un solo recipiente. Entre la separación del ánodo y del cátodo, generalmente se encuentra una **membrana polimérica de intercambio protónico o catiónico**, la cual es de una constitución semipermeable (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En ocasiones se utiliza algún material separador con características similares a la membrana para sustituirla, ya que el costo de la membrana es elevado.

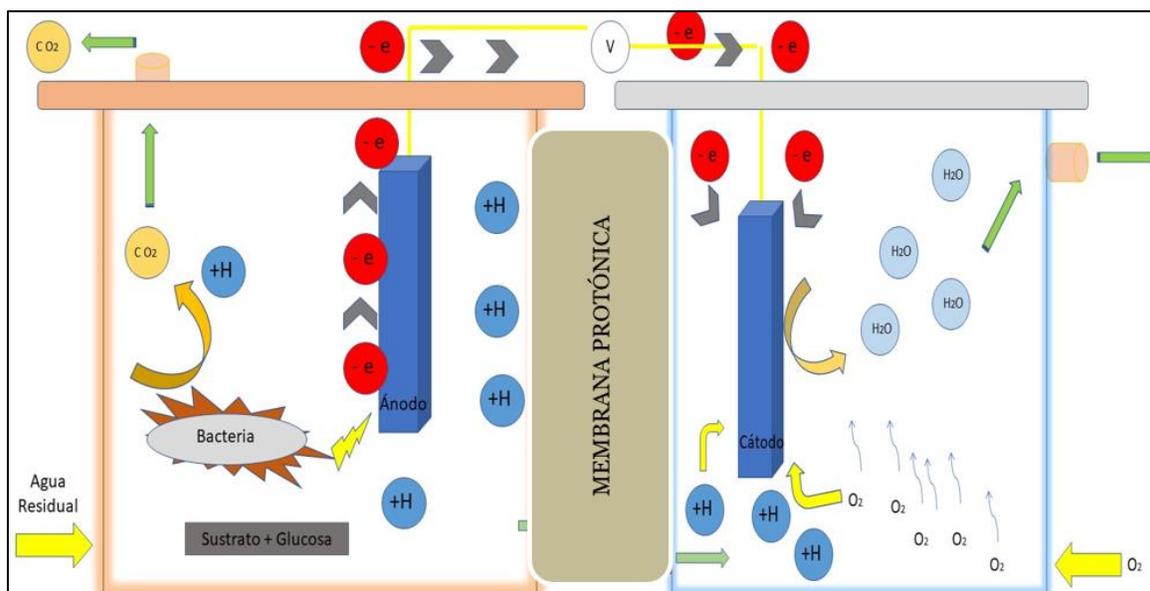


Figura 6. Esquema de celda de combustible microbiana de doble cámara (elaboración propia).

Un factor que distingue a las celdas de combustible microbianas vegetales (en adelante, **CCMV**) es el uso de la vegetación que se le adiciona a la configuración del sistema, de tal forma que la raíz del ejemplar vegetal se implementa en el compartimiento del ánodo. Los exudados de

la raíz de la planta sirven como combustible de estas CCMV; así, se aprovecha la energía solar por medio de la vegetación comúnmente empleada, que generalmente se encuentra con facilidad en los humedales naturales (Salinas-Juárez, 2016).

3.4 BACTERIAS ELECTROACTIVAS

Como es sabido, todos los seres vivos están constituidos por células clasificadas en procariotas y eucariotas, siendo de una estructura bioquímica funcionalmente compleja (véase **Figura 7**). Estos dos tipos de células comparten características comunes entre sí:

- **Membrana plasmática** o plasmalema, que las separa y comunica con el exterior
- **Pared celular**, que rodea a la membrana celular
- **Ribosomas**, organismos que sintetizan proteínas
- **Citoplasma**, que forma la mayor parte del volumen celular y en el que están inmersos los organelos celulares
- **Ácido desoxirribonucleico (ADN)**, es el material hereditario de los genes
- **Ácido ribonucleico (ARN)**, expresa la información contenida en el ADN

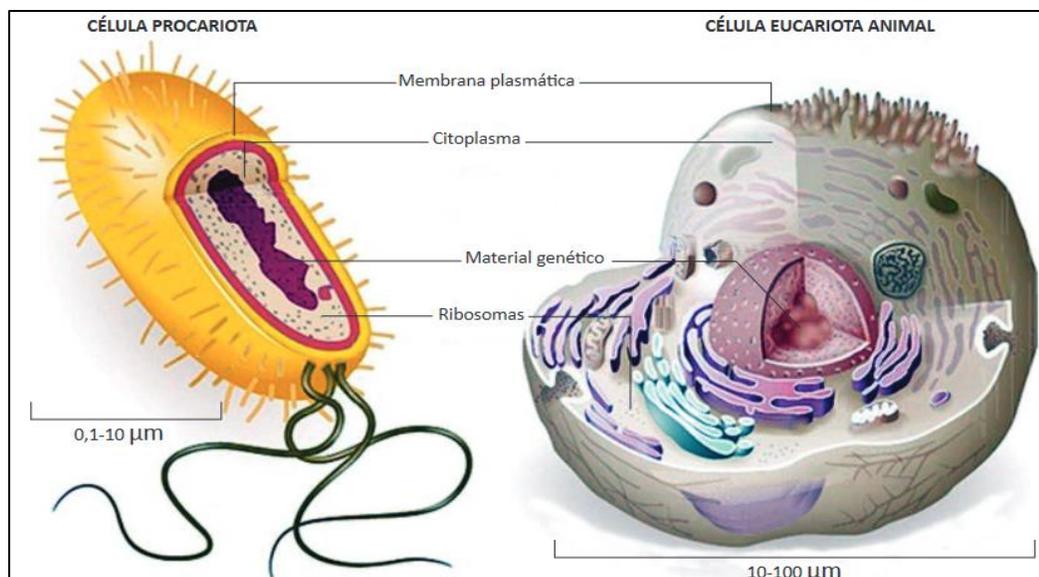


Figura 7. Estructura que comparte una célula procariota y una eucariota animal (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012)

Entre los organismos procariontes se encuentran las bacterias, habitantes en casi todos los ambientes de donde obtienen los suficientes nutrientes para su desarrollo, basados en carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, fósforo y azufre. Una característica de estos especímenes,

que se relaciona con su supervivencia, son los **cuerpos de inclusión**, que corresponden a nutrientes que pueden ser desdoblados al ser necesario. Entre las estructuras que conforman a las células bacterianas se encuentran los **flagelos**, componentes que permiten el desplazamiento de algunas bacterias, las **fimbrias y pilis sexuales** (véase **Figura 8** y **Figura 9**), que sirven para que la bacteria se pueda adherir a las superficies, así como unirse a otras bacterias y pasar su ADN (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012).

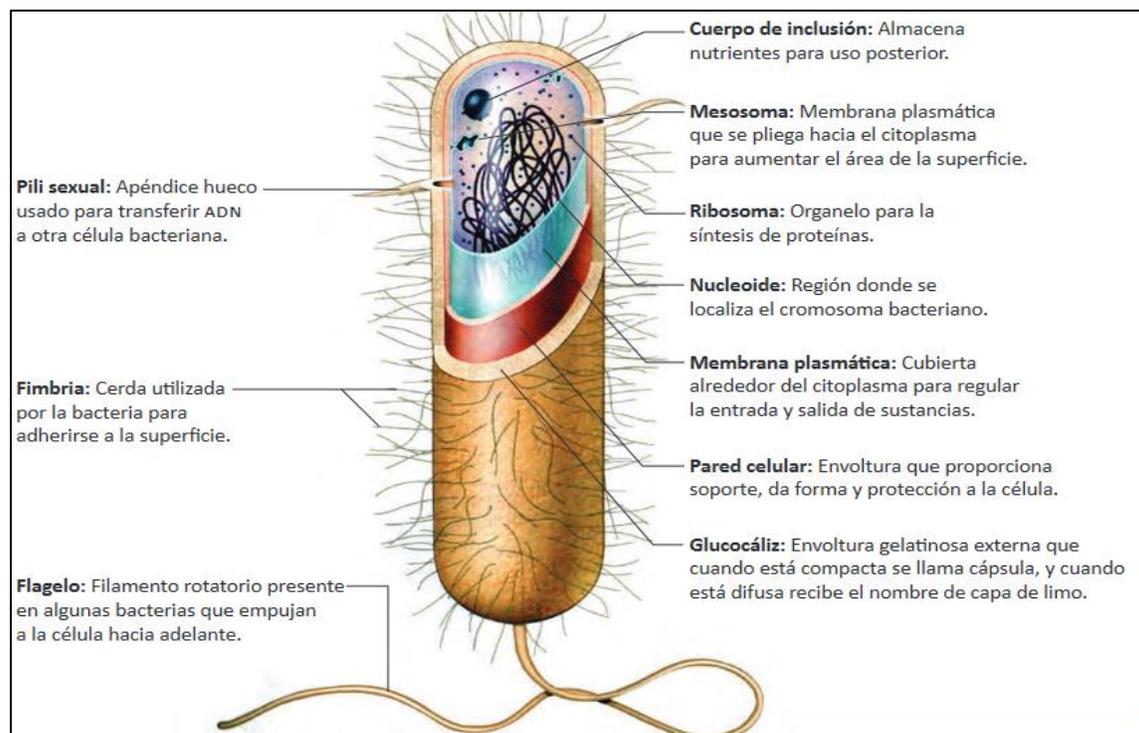


Figura 8. Estructura de una célula procariota (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012)

La fuente de energía de estos microorganismos, proviene principalmente de la materia orgánica, aunque tienen la capacidad para la transformación de distintos componentes inorgánicos, incluyendo contaminantes que son considerados de alto riesgo.

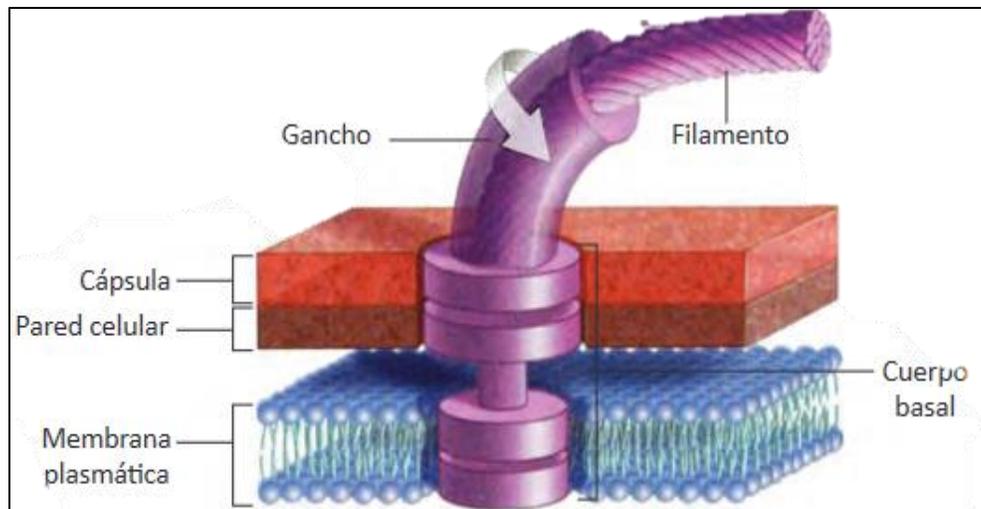


Figura 9. Célula bacteriana flagelada y estructura de un flagelo procariótico (Angulo, Galindo, Avendaño, & Pérez, 2012)

La bacteria obtiene energía mediante reacciones de oxidación-reducción, destinadas a transformar las moléculas nutritivas en elementos útiles para la síntesis de componentes estructurales y producción energética. Estas sumas de transformaciones físico-químico-fisiológicas, que forman varios productos intermediarios denominados metabolitos, se les conoce como vías metabólicas, iniciado por un donante de electrones primario, hasta un aceptor final que es el aceptor terminal de electrones. El metabolismo microbiano, incluye dos vías biológicamente útiles: la fermentación y la respiración; permitiendo liberar la energía de los nutrientes o sustratos para ser acumulados en un compuesto altamente activo llamado **adenosín trifosfato (ATP)** (véase **Figura 10**), provocando la movilidad de la energía química, generada por el transporte de electrones a través de una cadena de metabolitos (Stanier, Ingraham, Wheelis, & Painter, 1992).

Las bacterias tienen la posibilidad de formar una conexión eléctrica con otras especies microbianas y de una manera directa con minerales insolubles. A este tipo de organismos se les llama: bacterias electroactivas, electroquímicamente activas o exoelectrógenas, indicando la aptitud de llevar a cabo una transferencia extracelular de electrones por parte de los microbios.

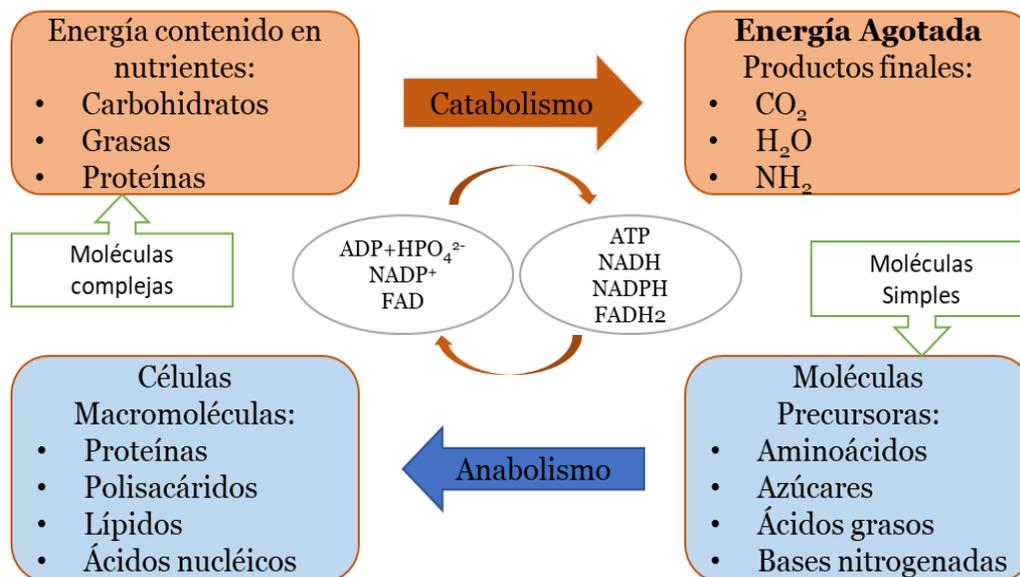


Figura 10. Esquema del catabolismo y anabolismo (T. Audesirk y G.Audesirk, 2003)

Entre el amplio abanico de microorganismos, se ha estudiado el género *Geobacter*, el cual se desarrolla en condiciones anaerobias y ha evidenciado tener una alta conductividad eléctrica similar a la metálica. Este género bacteriano al desarrollar una cadena de cables con otros microbios, por medio de sus estructuras de inclusión, anteriormente mencionados como *pilis* y, conocidos también como nanocables. *Geobacter* establece conexiones eléctricas entre sí, permitiendo la transferencia de electrones de una manera directa; las bacterias receptoras de los electrones usan la corriente para activar sus propias reacciones químicas (Salinas-Juárez, 2016); (Logan & Rabaey, 2012); (Franks & Nevin, 2010).

3.5 CONVERSIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN ELECTRICIDAD

Para obtener una corriente eléctrica en las CCMV, se requiere del crecimiento de un consorcio microbiano, originando una biopelícula sobre la superficie del ánodo. Estos microorganismos, también llamados como biocatalizadores, oxidan los residuos orgánicos y la biomasa renovable que se suministran como combustible en estos dispositivos y como fuentes de alimento para las bacterias. Mediante el metabolismo microbiano, la energía capturada y

almacenada, induce a una transferencia extracelular de electrones (TEE), direccionado los electrones a nitratos y/u oxígeno, que son compuestos aceptores de electrones en un medio natural. Sin embargo, estos componentes pueden ser sustituidos por algún electrodo no soluble que realice la labor de aceptar electrones en condiciones anaerobias, promoviendo al crecimiento de bacterias que requieran estas condiciones para su desarrollo y mejorando el desempeño por parte de la TEE. Las bacterias exoelectrógenas, al encontrarse en la región anódica, necesitan desenvolverse en un estado libre de aceptores de electrones naturales, favoreciendo de esta forma al electrodo como el único que capture a los electrones provenientes de la célula microbiana.

Los SBE se conforman por un circuito eléctrico externo que actúa como conductor electrónico externo, transfiriendo a los electrones por este medio hacia el cátodo y efectuándose una diferencia de potencial en los electrodos. De esta forma se genera un voltaje en la CCMV, de manera simultánea los protones que se originan en la parte del ánodo, son transportados por el interior de la celda, usando algún electrolito como conductor iónico, atravesando la membrana que separa el ánodo del cátodo. La membrana es de constitución semipermeable y entre las más estudiadas está la membrana nafión, sin embargo, su uso es muy limitado por su alto costo. En una CCVM, si no existe este material, el medio de soporte de característica permeable y material granular, será la única separación entre estas dos regiones. Las condiciones del cátodo, al ser un área aerobia, faculta a que se realice la reducción del oxígeno atmosférico, debido a que éste es el aceptor final de los electrones trasladados y al reaccionar junto con los protones, se origina agua (véase **Figura 11**).

Las-CCMV albergan una especie vegetal, de esta forma la producción de electrones en las celdas, no dependa únicamente de la degradación de residuos orgánicos, que habiten en un electrolito, sino también, de aquella que proviene de la degradación de los exudados (monosacáridos, polisacáridos, etc.) que libera la planta por medio de sus raíces como consecuencia de la fotosíntesis (Salinas-Juárez, Cruz-Martínez, & Solorza-Feria, 2022; Gaurav, Singh, Tiwari, & Srivastaba, 2019; Erazo, 2015).

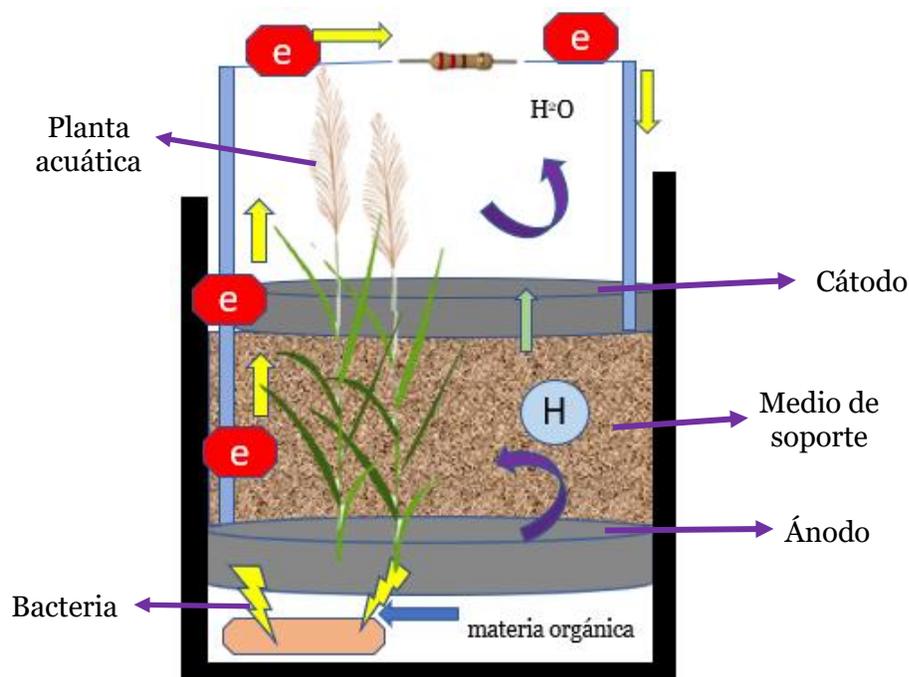


Figura 11. Esquema de celda de combustible microbiana vegetal (elaboración propia).

3.5.1 REACCIONES INVOLUCRADAS EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA VEGETAL

Las reacciones electro-químicas de una CCMV pueden ser analizadas indirectamente por separado, considerando los potenciales electroquímicos de sus electrodos. Al ocurrir un flujo de electrones proveniente de estas dos semi-reacciones sobre el ánodo y/o cátodo, se origina un potencial en cada electrodo, el cual puede ser determinado de manera teórica mediante la ecuación de Nernst. La diferencia de potencial entre estos dos electrodos es lo que se conoce como tensión o voltaje de celda (en adelante, V). El voltaje al mantenerse en ausencia de corriente se conoce como voltaje en circuito abierto (en adelante, VCA).

El potencial teórico del ánodo se puede estimar con la ecuación Nernst y el potencial real del ánodo se mide con el electrodo normal de hidrógeno (ENH=0 mV en condiciones estándar). En esta investigación, el acetato se toma como representante de los exudados de la planta, considerando que las sustancias liberadas por la raíz de la planta al medio comprenden una gran diversidad y es difícil determinar la reacción de degradación para todas ellas. Por lo tanto,

idealmente se determina el potencial del ánodo considerando la oxidación del acetato de acuerdo con la siguiente reacción (1):



A partir de esta reacción el potencial del ánodo se determina aplicando la ecuación de Nernst (2) bajo las siguientes condiciones:

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

Donde:

E_{an} = potencial del ánodo, (V)

E_{an}^0 = potencial estándar del ánodo (298.15 K y concentraciones de especies químicas en 1 M), [V]

R = constante universal de los gases; 0.082057 [atm·L/mol·K]

T = temperatura (K)

F = constante de Faraday $9.65 \cdot 10^4$ [C/mol]

8 = número de electrones involucrados en la reacción

$[CH_3COO^-]$ = concentración de acetato en [mol/L]

$[H^+]$ = concentración de protones en [mol/L]

$[HCO_3^-]$ = concentración de bicarbonato en [mol/L]

En las condiciones que se presentan anteriormente, el potencial teórico del ánodo en circuito abierto es de -0.289V.

Para que se efectúe la generación eléctrica, el potencial del cátodo debe tener un mayor voltaje a comparación del potencial anódico. En la zona del cátodo la reacción que ocurre es la reducción del oxígeno (3):



Aplicando la ecuación de Nernst para la reacción de reducción de oxígeno se determina con la siguiente ecuación (4):

$$E_{cat,O_2} = E_{cat}^0 - \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{1}{pO_2[H^+]^4} \right) \quad (4)$$

Donde:

E_{cat,O_2} = potencial del cátodo (V)

E_{cat}^0 = potencial estándar del cátodo (298.15 K y concentraciones de especies químicas en 1 M), [V]

R = constante universal de los gases; 0.082057 [atm·L/mol·K]

T = temperatura [K]

F = constante de Faraday $9.65 \cdot 10^4$ [C/mol]

4 = número de electrones involucrados en la reacción

pO_2 = presión parcial del oxígeno (atm)

$[H^+]$ = concentración de protones [mol/L]

El potencial estándar del cátodo, con la reacción de reducción del oxígeno normalmente es de +0.805 a 0.82 V vs el electrodo estándar de hidrógeno.

Considerando los potenciales para el ánodo y para el cátodo de acuerdo con las reacciones anteriores se tiene un voltaje teórico esperado de 1.1 V de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$E_{cell} = E_{cat} - E_{an} \quad (5)$$

Donde:

E_{cell} = voltaje de celda [V]

E_{cat} = potencial del cátodo [V]

E_{an} = potencial del ánodo [V]

(Salinas-Juárez, 2016).

CAPÍTULO IV

Antecedentes

4.1. CONFIGURACIÓN (DISEÑO BÁSICO)

Las investigaciones que se han realizado sobre CCMV han demostrado la importancia en el desarrollo de una configuración física y los materiales a considerar para la construcción de una celda de combustible microbiana vegetal (CCMV). Dado que hay distintos materiales que se pueden emplear, es necesario considerar los más apropiados con base en informaciones reportadas y económicamente disponibles que permitan la actividad bio-electroquímica que favorezca las mejores condiciones de operación para el sistema experimental. Al diseñar los compartimientos, es requerido tomar atención en sus componentes con la finalidad de procurar la reducción de la resistencia óhmica para reducir las pérdidas de energía. La investigación y desarrollo a nivel mundial de las CCMV, es impulsada en los últimos años en consecuencia de las necesidades energéticas y con un impacto ambiental reducido (Salinas-Juárez, 2016).

Diversos grupos de investigación dirigen sus trabajos en la conversión de energía eléctrica por medio de las CCMV, ya que éstas a diferencia de las celdas de combustible convencionales pueden ser menos costosas para la producción de electricidad, debido a que no se precisa del uso de metales preciosos para lograr una operación eficiente. Además, las CCM permiten condiciones de operación más sencillas, seguras y amigables con el medio ambiente (existe una generación reducida de gases de efecto invernadero a la atmósfera por el uso de estos dispositivos). Sin embargo, las aplicaciones industriales están aún limitadas por las bajas densidades de potencia de apenas unos cuantos mili-Watts por metro cuadrado de ánodo.; El principal reto es llevar estas tecnologías a una escala real y diseñar sistemas prácticos para la producción de bioenergía a (Franks & Nevin, 2010).

4.2 MEDIO DE SOPORTE

El medio de empaque, también llamado **sustrato o medio de soporte**, juega un papel importante en el funcionamiento de los humedales. La principal característica del medio de soporte es que debe tener la permeabilidad suficiente para admitir el paso del agua a través de él.

Esto obliga a utilizar materiales de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con poros finos para evitar el. El sustrato o medio de empaque, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportar gran variedad de organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporcionar un lugar de almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, permitiendo un intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las reacciones biológicas más importantes en el humedal (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

El medio de empaque es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023).

4.2.1 TEZONTLE

El tezontle es una roca volcánica utilizada como sustrato en humedales artificiales en México, que presenta una proporción variable de porosidad interna, incluye al volumen de poros cerrados que no están conectados con los poros externos sin intervenir la relación agua – aire del sustrato. Una de las ventajas de este material es que facilita su manejo y el llenado de contenedores al disminuir la densidad, así como es considerado un material inerte, con valores

de pH en la neutralidad, baja capacidad de intercambio iónico y buena aireación (Rodríguez-Díaz et al., 2013); (Revelo, Dolly, Hurtado, Nelson, & Jaime, 2013).

4.3 MATERIAL PARA LOS ELECTRODOS

Una forma para mejorar la generación de electricidad usando microorganismos en una CCMV, es por medio de materiales eléctricamente conductivos que presenten propiedades no corrosivas, que tengan un área específica alta y una estructura abierta para evitar un bioensuciamiento, es decir, que no sean finos con porosidades bajas. (Logan & Rabaey, 2012).

Entre los parámetros relacionados con el desempeño de los bio-ánodos en las CCMV incluyen: las características electroquímicas, la formación de la biopelícula y la adherencia bacteriana en estos electrodos. Por lo anterior, se han tenido que crear estrategias para reforzar los vínculos bióticos y abióticos que den rendimientos favorables en cuestión de biopelícula-material. Estas modificaciones se han centrado en cambiar la textura de los materiales, así como aumentar el área superficial. Entre los métodos que han sido explorados, se encuentran técnicas químicas y físicas que corresponden a recubrimientos con metales y polímeros, tratamientos térmicos, oxidación química y oxidación electroquímica usando inmersión en ácido (Cercado-Quezada, Marie-Line, & Bergel, 2006). Se han registrado datos de densidad de potencial de 483 y 435 mW/m², en CCM de un solo compartimiento y sin membrana de intercambio (Poggi-Varaldo, Solorsa-Feria, & Vázquez-Larios, 2010).

4.3.1 GRAFITO

La actividad en los sistemas bio-electroquímicos depende de diversos factores que aportan a la generación eléctrica; como es la formación de una biopelícula sobre la superficie de los electrodos. Uno de los materiales más empleados es el carbono, debido a la gran estabilidad química, mejor transferencia de electrones y adecuada biocompatibilidad entre la célula microbiana y el electrodo. Este material es un carbono puro que cristaliza en láminas hexagonales.

Comercialmente, el grafito puede ser encontrado en múltiples presentaciones que van desde barras, tubos, geles, telas, placas, polvo, escamas, cinta, fieltros y gránulos. En las celdas de combustible, la forma de grafito empleada se basa en la facilidad de su manejo, en su costo y en su funcionalidad. Como sustrato o medio de soporte requiere una gran área superficial para la transferencia de electrones, sin embargo, puede emplearse como polvo o gránulos. Las telas de carbón activado, son materiales que poseen elevadas porosidades y un área superficial entre 1000 y 2100 m²/g, así como, una cinética de adsorción más rápida en comparación a otras formas tradicionales de carbono, entre otras cualidades (García-Guel, Múzquiz-Ramos, & Ríos-Hurtado, 2019; Cházaro-Ruiz, y otros, 2013).

4.4 ELECTROLITO

Se sabe que el agua residual doméstica incluye entre sus componentes material orgánico que puede ser usado como **sustrato** (alimento) para los microorganismos. Sin embargo, el agua residual puede ser sustituida por una solución electrolítica que imite el contenido de los nutrientes necesarios para el desarrollo microbiano y que propicie la energía para su metabolismo. En la información que se proporciona por parte de la Salinas-Juárez *et al.*, 2022, se menciona que el contenido orgánico en un electrolito, influye en el resultado de la obtención eléctrica, por lo que es recomendado emplear suplementos para tener mejor desempeño en la CCMV, así como el uso de acetato, debido que, en diversos estudios realizados con anterioridad, este componente proporciona buenos resultados en comparación con el uso de glucosa (Salinas-Juárez, Cruz-Martínez, & Solorza-Feria, 2022).

El electrolito que se emplea en los SBE, es de una composición orgánica variable que servirá como sustrato y fuente de alimentación para que los microorganismos ubicados en la parte anódica, realicen adecuadamente sus funciones. Ya que el electrolito es la solución que ocupa la región del ánodo, también se le denomina como anolito. Los contaminantes presentes en el agua residual doméstica y municipal, consisten, en su mayoría, en material orgánico, sin embargo, en

diversos, experimentos se utiliza el agua residual sintética, conformada por los componentes necesarios para ser oxidados por las bacterias electroactivas y de proporciones adecuadas para ser suficiente en el procedimiento de la generación eléctrica. Por otra parte, las plantas que se utilizan en los HA, son beneficiadas por el electrolito al alimentarse por los nutrientes para su desarrollo (Luviano-Vigueras, 2020). Se han reportado densidades de potencia de 70, 43 y 2 mW/m² al emplear acetato como sustrato en agua residual doméstica, libre de solución nutriente (Poggi-Varaldo, Solorsa-Feria, & Vázquez-Larios, 2010).

4.5 ESPECIE VEGETAL

Entre los humedales, ya sean naturales o artificiales, la vegetación desempeña un papel importante, debido a que son organismos foto-autótrofos con la habilidad de llevar oxígeno de la atmósfera hacia el medio donde se encuentran sus raíces, a través de sus hojas y tallos. La traslocación de oxígeno permite que se originen regiones aerobias adecuadas para que algunos organismos ocupen este componente en sus reacciones de degradación de materia orgánica. Es necesario elegir las plantas adecuadas para que cumplan una adecuada función en los HA, debido a que ciertos organismos no se adaptan a las condiciones anóxicas. Diversas especies de plantas acuáticas son empleadas en estos mecanismos para la depuración de aguas residuales como: *Canna indica*, *Bryophyllum pinnatum*, *Thypha spp*, *Phragmites australis*, entre otras (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

4.6 INVESTIGACIONES PREVIAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES ASISTIDOS ELECTROQUÍMICAMENTE

Las primeras experimentaciones emplearon diversos materiales para la configuración de las CCM, sin embargo, la información referente a esta temática es aún escasa. Por lo tanto, se han generado múltiples formas de construcción de manera similar entre ellas, pero a su vez utilizando diferentes materiales o dimensiones. Algunos componentes de las CCMV, como son electrodos y

medios de soporte con los que se ha trabajado, han sido principalmente de constitución orgánica como es el carbono en fieltro, en barra y grafito en polvo; los materiales usados para el contenedor han sido-vidrio, plástico (plexiglás) y cloruro de polivinilo (PVC, por sus siglas en inglés). Los datos que se muestran en las **Tabla 1-6**, muestran configuraciones construidas usando fieltro de grafito con sus respectivos resultados de generación eléctrica, en donde el fieltro de grafito cumple con la función de los electrodos, así como el empleo PVC como contenedor.

En los experimentos mencionados se empleó cable de cobre calibre No. 12 como colector de corriente, tanto en la parte anódica como en la catódica y el medio de empaque utilizado varió entre grafito en polvo (**Tabla 1 y Tabla 2**), gránulos de grafito (**Tabla 4**), tezontle y grafito (**Tabla 6**). Las configuraciones donde se empleó grafito en polvo como medio de soporte, presentan cifras arriba de 30 mW/m^2 . En los bio-reactores en los que el volumen es mayor y con un empaque con gránulos de grafito, la densidad de potencia (DP) se redujo según el máximo registrado de 25.33 mW/m^2 (**Tabla 3 y 5**). Estos datos obtenidos de la literatura muestran densidades de potencia distintas entre cada configuración estudiada, evidenciando que, tanto el material de empaque como el volumen, influyen en los resultados obtenidos y son una característica a contemplar para la fabricación de los dispositivos como CCMV. Por otro lado, los valores que se obtienen en la producción eléctrica por medio de las CCMV dependen no solamente de una configuración instalada en los sistemas experimentales, sino también de las condiciones en las que se operen los sistemas mencionados (Salinas-Juárez, 2016).

En las **Tablas 1 a 6** se muestran las características de diversos experimentos realizados como antecedente al trabajo de investigación de la presente tesis. En las tablas se indica, de manera general, qué materiales han sido utilizados como electrodos, así como las dimensiones que han tenido las CCMV y algunas otras características generales que han sido la base para plantear los materiales usados en esta investigación.

Tabla 1². Configuración 1 para celda de combustible microbiana vegetal y características eléctricas.

Capítulo 4 (Salinas - Juárez, 2016)	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Solución Nutritiva (ml)	Especie Vegetal
	Altura (cm)	10	Filtro de Grafito		Cable de Cobre	Grafito en Polvo		
	Diámetro (cm)	9.5	Diámetro (cm)	9.5	Calibre No. 18	Partícula (mm)	300	<i>Phragmites Australis</i>
	Volumen (L)	0.7	Espesor (cm)	0.63		0.074		
Designación		VCA máx. (mV)	VCC máx. (mV)		DP (mW/m ²)		<i>j</i> (mA/m ²)	
Prim		464	228.60		36.60		213.45	

Tabla 2. Configuración 2 para celda de combustible microbiana vegetal.

Capítulo 5 (Salinas-Juárez, 2016)	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Solución Nutritiva (ml)	Especie Vegetal
	Altura (cm)	11	Filtro de Grafito		Cable de Cobre	Grafito en Polvo		
	Diámetro (cm)	9.5	Diámetro (cm)	9.5	Calibre No. 18	Partícula (µm)	300	<i>Phragmites Australis</i>
	Volumen (L)	0.7	Espesor (cm)	0.63		0.002		

² Las **Tablas 1 y 2** fueron elaboradas con los datos obtenidos de Salinas-Juárez, (2016) (Salinas-Juárez, 2016).

Tabla 3³. Resultados eléctricos de la configuración 2

Designación	VCA máx. (mV)	VCC máx. (mV)	DP (mW/m ²)	<i>j</i> (mA/m ²)	Especie vegetal Implantada
C-1	319.15	Inestable	10.26	Bajo e Inestable	✓
C-2	633	393	33.56	90.25	✓
	345	144.4	30.67	212.41	✓
C-3	Inestable	Inestable	22.31	Bajo e Inestable	✗

Tabla 4. Configuración 3 para celda de combustible microbiana vegetal (Salinas-Juárez, 2016).

Capítulo	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Especie Vegetal
6 <small>(tesis de Salinas- Juárez, 2016)</small>	Altura (cm)	17.5	Filtro de Grafito		Cable de Cobre	Gránulos de Grafito	<i>Phragmites Australis</i>
	Diámetro (cm)	15	Diámetro (cm)	15	Calibre No. 18	Partícula (mm)	
	Volumen (L)	3	Espesor (cm)	0.63		1 – 2	

³ Las **Tablas 3 y 4** fueron elaboradas con los datos obtenidos de Salinas-Juárez, (2016) (Salinas-Juárez, 2016).

Tabla 5⁴. Resultados eléctricos de configuración 3 (Salinas-Juárez, 2016).

Designación	Alimento de Sustrato	Inóculo	Especie Vegetal	VCA (mV)	VCC (mV)	DP (mW/m ²)	j (mA/m ²)
PARSI I	Agua Residual Sintética	✓	✓	266.20	236	6.74	28.55
				436.00	383	17.64	46.06
PARSI II	Agua Residual Sintética	✓	✓	260	98	25.33	278.79
PARSI III	Agua Residual Sintética	✓	✓	198.00	149	11.75	174.55
ARSI	Agua Residual Sintética	✓	✗	Valores Nulos			
PARS	Agua Residual Sintética	✗	✓	206.00	69	10.30	149.01
				498.00	330	12.78	38.79
ARS	Agua Residual Sintética	✗	✗	Valores Nulos			
PSN	Solución Nutritiva	✗	✓	474.00	505	30.79	60.97
SN	Solución Nutritiva	✗	✗	294.00	255	6.04	23.70
				383.70	164	5.96	35.36
ALL	Agua de Llave	✗	✗	Valores Inestables			
11	Solución Nutritiva	✗	✓	455.00	217	19.08	136.36

⁴ Esta tabla fue elaborada con los datos obtenidos de Salinas-Juárez, (2016) (Salinas-Juárez, 2016).

Tabla 6⁵. Configuración 4 de celda de combustible microbiana vegetal y resultados eléctricos (Salinas-Juárez, 2016).

Capítulo	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Diámetro (cm)	Solución Nutritiva (ml)	Especie Vegetal
7 (tesis de Salinas-Juárez, 2016)	Altura (cm)	9	Filtro de Grafito		Cable de Cobre	Grafito	0.074	120	<i>Phragmites Australis</i>
	Diámetro (cm)	11	Diámetro (cm)	9.5	Calibre No. 12	Tezontle	0.5		
	Volumen (L)	0.77	Espesor (cm)	0.63					
Designación	Inóculo	Especie Vegetal	Medio de Soporte	VCA (mV)		VCC (mV)	DP (mW/m ²)	j (mA/m ²)	
1GrPl	x	✓	Grafito	266		98	25.33	278.79	
				198		149	11.75	174.55	
2GrPl	x	✓	Grafito	260		89	26.00	278.79	
TzPl	x	✓	Tezontle	533		321	9.73	30.31	

(Salinas-Juárez, 2016)

⁵ Esta tabla fue elaborada con los datos obtenidos de Salinas-Juárez, (2016) (Salinas-Juárez, 2016).

Miranda Méndez, (2017) presentó distintos arreglos de CCMV donde se emplea como medio de soporte el tezontle con diámetros de partícula entre 5 y 19 cm; de igual forma utilizó gránulos de grafito de 1 mm de tamaño como medio de empaque. En sus bio-reactores, incorporó un volumen de 800 ml como inóculo dentro del dispositivo, el cual tenía una capacidad de 10 litros de volumen; de acuerdo con sus experimentaciones, este autor seleccionó la planta *Typha latifolia* a diferencia de 4 siguientes celdas de combustible, donde no usó esta especie, como se representa en la **Tabla 7**. El voltaje promedio obtenido por este autor, estaba en función del uso de diferentes resistencias eléctricas (10 Ω , 560 Ω , 1000 Ω y 5600 Ω), donde los promedios más sobresalientes resultaron en las configuraciones donde se empleó un componente vegetal (RCP y RLP), a pesar de tener en todas sus CCMV un volumen de inóculo. Estos valores han sido de 502.29 ± 119.09 y 362.43 ± 262.53 mV, en comparación con los sistemas que no utilizaron planta. En cuanto al promedio de la intensidad de corriente, las bio-celdas anteriormente mencionadas, registraron nuevamente valores ventajosos; apuntando datos de 1133.00 ± 92.14 y 909 ± 473.12 μ A, correspondiendo a la resistencia de 5600 Ω . (**Tabla 8**) (Miranda-Méndez, 2017).

Por otra parte, la tesis realizada por Luviano-Vigueras, 2020, formuló una solución nutritiva para las CCMV, constituida principalmente por acetato de sodio y diversos nutrientes para utilizarla como agua residual sintética. Entre los nutrientes se incluyeron iones cloruro que son necesarios para hacer la medición del potencial del ánodo y del cátodo con un electrodo de Ag/AgCl o bien, con uno de calomel. Los resultados que obtuvo al utilizar acero inoxidable como colector de corriente, con un área geométrica de 22 x 15 cm, proporcionando densidades de potencia entre 0.7 y 14 mW/m² como se presenta en la **Tabla 9** (Luviano-Vigueras, 2020).

Tabla 7⁶. Configuración de celda de combustible microbiana con especie *Thypa latifolia*.

Capítulo	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Diámetro	Agua Residual Sintética (L)	Especie Vegetal
4 (Miranda-Méndez, 2017)	Altura (cm)	34	Filtro de Grafito		Cable de Cobre	Grafito Granulado	1.0 (mm)	5.30	<i>Typha latifolia</i>
	Diámetro (cm)	20	Diámetro (cm)	20	Calibre No. 12	Tezontle	5.6(cm) a 19.0(cm)		
	Volumen (L)	9.94	Espesor (mm)	6					
Designación			Inóculo 800 (ml)		Especie Vegetal		Empaque		
RCP			✓		✓		✓		
RLP			✓		✓		✓		
RCT			✓		✗		✓		
RLT			✓		✗		✓		
RCB			✓		✗		✗		
RLB			✓		✗		✗		

⁶ Esta tabla fue elaborada con los datos obtenidos de Miranda-Méndez, (2017) (Miranda-Méndez, 2017).

Tabla 87. Parámetros eléctricos de configuración con *Typha latifolia*.

Voltaje Promedio (mV)						
	RCP	RCT	RCB	RLP	RLT	RLB
Circuito Abierto	230.34±116.52	212.61±114.64	86.87±87.90	308.70±229.26	307.23±189.04	243.98±131.29
5600 Ω	502.29±119.09	199.50±78.45	59.64±81.35	362.43±262.53	224.36±182.26	75.93±109.24
1000 Ω	462.20±101.15	106.07±59.57	24.47±56.64	270.13±228.06	271.07±267.38	60.53±82.14
560 Ω	383.07±151.92	118.13±42.24	17.73±10.45	187.87±225.91	302.60±309.16	26.60±25.96
10 Ω	100.37±214.04	56.07±27.09	10.77±27.09	5.55±4.66	91.99±196.23	9.79±27.26
Promedios Intensidad de Corriente (μA)						
Ω	RCP	RCT	RCB	RLP	RLT	RLB
5600	1133.00±92.14	872±159.11	44.57±43.00	909.96±473.12	913.81±752.85	68.28±22.53
1000	1011.60±82.83	638.33±154.38	34.38±34.10	639.70±497.41	967.88±787.01	126.59±146.74
560	959.80±344.60	633.37±203.84	74.24±44.29	374.19±433.75	967.94±851.35	64.41±65.37
10	306.62±365.05	214.89±224.99	24.09±20.64	101.64±215.37	348.71±530.06	8.20±7.16

(Miranda-Méndez, 2017)

⁷ Esta tabla fue elaborada con los datos obtenidos de Miranda-Méndez, (2017) (Miranda-Méndez, 2017).

Tabla 9⁸. Configuración con placa de acero inoxidable y solución nutritiva.

Autor	Dimensiones		Electrodos		Conexión	Empaque	Especie Vegetal
Luviano	Altura (cm)	15	Filtro de Grafito		Placa de Acero Inoxidable	Tezontle	<i>Phragmites Australis</i>
	Base (cm)	22	Área (cm ²)	240		Partícula (cm)	
	Ancho (cm)	15	Espesor (mm)	3		0.5 - 1	
Designación	Alimento de Sustrato	VCC (mV)	DP (mW/m ²)		<i>j</i> (mA/m ²)		
H1	Agua Residual Sintética	470	5.9		45		
J1	Agua Residual Sintética	320	1.8		9		
V1	Agua Residual Sintética	445	0.7		6		
Z2	Agua Residual Sintética	372	14		125		

⁸ Esta tabla fue elaborada con los datos obtenidos de Luviano-Vigueres, (2017) (Luviano-Vigueras, 2020).

CAPÍTULO V

Materiales y métodos

5.1 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS Y CONFIGURACIÓN

En el presente trabajo se fabricaron doce CCMV, de un único compartimento y estructura cilíndrica, con un volumen de 0.7 L empleando PVC para el contenedor (véase **Figura 13**). Los electrodos fueron elaborados con fieltro de grafito de geometría circular con medidas de: 9.5 cm de diámetro y 6 mm de espesor, a los cuales se les realizó un pre-tratamiento para ser ensamblados en las CCMV. Como parte de la configuración eléctrica se utilizó acero inoxidable (aleación tipo 304 y 316) en tres de sus presentaciones: placa perforada, alambre y malla en dos presentaciones (con diferente calibre y apertura entre los alambres – 14x14 y 150x150⁹). Se construyeron tres reactores utilizando el alambre, tres con placa y tres con la malla 14x14; con la malla 150x150 sólo se construyó un duplicado (en el resto del documento se designa a este material como “tela de alambre”). De acuerdo con los antecedentes estudiados para la elaboración de esta tesis (Capítulo IV), se instaló un único dispositivo con cable de cobre de calibre No. 18, como referencia. El alambre, la placa, las mallas y el cable de cobre se desempeñaron como colectores de corriente en los bio-reactores, por lo tanto, cada material se unió a cada electrodo (fieltro de grafito), por medio de hilo de acero inoxidable, exceptuando al cable de cobre y al alambre de acero inoxidable. Estos dos materiales se unieron de forma entretrejida a la estructura de los electrodos. Es importante mencionar que el alambre tenía una aleación diferente a las mencionadas con mayor contenido de hierro.

Con la finalidad de medir parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura y oxígeno disuelto), se introdujeron en cada dispositivo tres tubos de media pulgada, uno de ellos fue perforado y envuelto con pellón para permitir el paso del agua del sistema a su interior y que ahí se pudiera introducir el electrodo de pH y de otros parámetros. Un segundo tubo no estaba perforado y sólo permitía hacer la medición del potencial del ánodo. El tercer tubo sólo tocaba la superficie del cátodo y servía para medir el potencial del cátodo (**Figura 12** y **Figura 13**). Como

⁹ 14x14 indica que hay 14 aberturas (entre alambre y alambre) en una pulgada de esta malla y el calibre de estos alambres es 25 (0.508 mm). 150x150 indica que hay 150 aberturas entre alambre y alambre y el calibre de estos alambres es 45 (<0.1 mm).

especie vegetal seleccionada se utilizó *Phragmites Australis* junto con la matriz de soporte conformada por tezontle triturado (véase **Figura 13**).

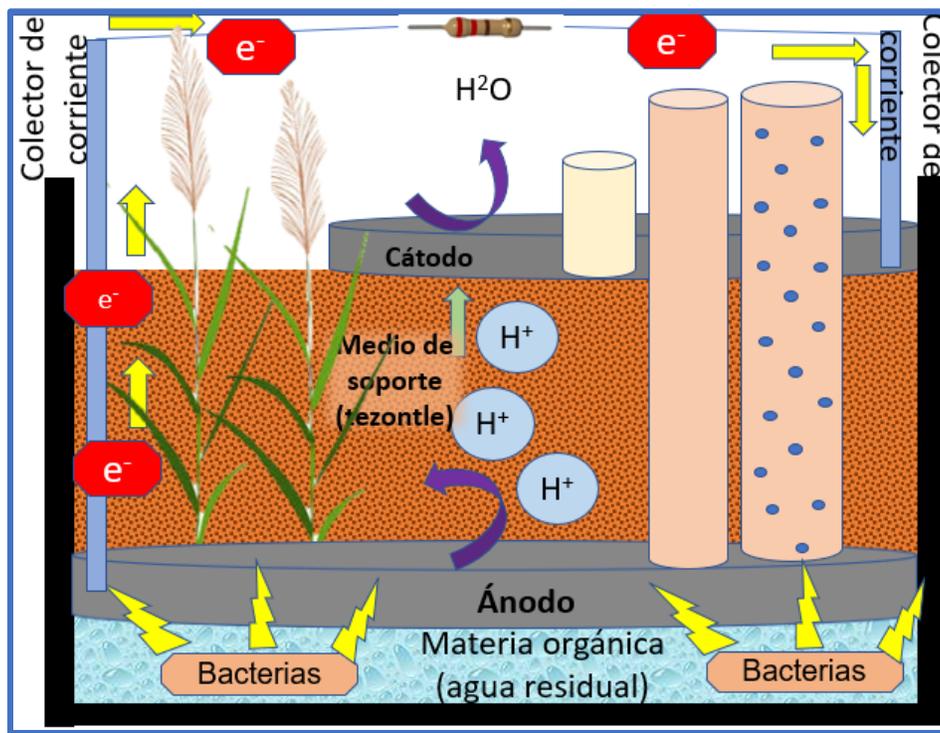


Figura 12. Esquema de la configuración general de celda de combustible microbiana vegetal (elaboración propia).

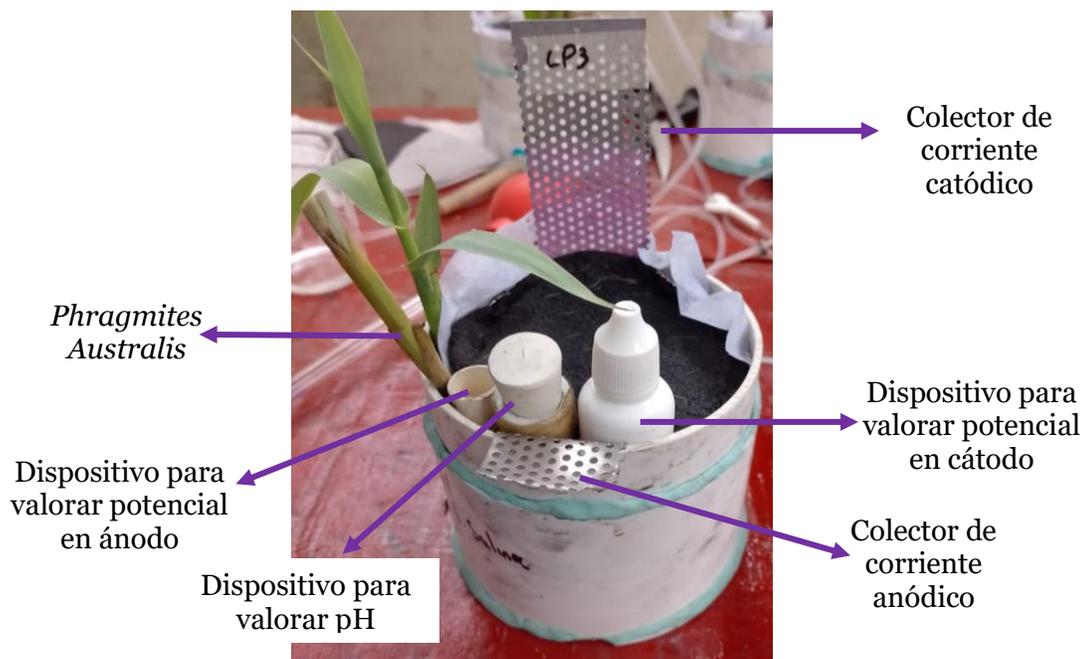


Figura 13. Vista superior de una celda de combustible microbiana vegetal (elaboración propia).

5.2 ACTIVACIÓN DE BIO-ELECTRODOS

Considerando las cualidades favorables que mencionan distintas referencias bibliográficas en emplear al carbono como bio-electrodo, en la presente obra se optó por emplear fieltro de grafito (Luken, Tecnología Química, S.A. de C.V.). Se realizó la activación del fieltro mediante tratamiento térmico o también llamado oxidación térmica con la finalidad de aumentar la conductividad eléctrica, así como eliminar hulla y otras impurezas que provocan resistencia eléctrica en estos materiales (Cercado-Quezada, Marie-Line, & Bergel, 2006).

El procedimiento para la activación consistió en colocar los electrodos dentro de una mufla a una temperatura de 550 °C durante un periodo de 60 minutos. Ciertas bibliografías, han sugerido mantener temperaturas entre 600 y 1000 °C (García-Guel, Múzquiz-Ramos, & Ríos-Hurtado, 2019), (Cházaro-Ruiz, y otros, 2013), sin embargo, para prevenir algún desgaste del material, se realizó este procedimiento con la temperatura de 550 °C.

Posteriormente a este tratamiento, se empleó un multímetro (Amprobe modelo 38XR-A) para valorar la resistencia óhmica de los fieltros en forma individual, los cuales, fueron seleccionados para los ánodos y los cátodos de los reactores (**Tabla 10** y **Tabla 11**). Cada material fue destinado para ser unido con su respectivo colector de corriente (véase **Figura 14**), de igual forma, ya ensamblados los electrodos, se registró su resistencia (**Tabla 12** y **Tabla 13**).

Tabla 10. Resistencias óhmicas de electrodos destinados para ánodos (sólo fieltro).

Configuración	Resistencia óhmica de fieltro de carbono individual (Ω)		
	1	2	3
Alambre	0.8	0.9	0.9
Placa perforada	39.3	60.9	16.6
Malla de alambre	18.3	21.0	40.0
Tela de alambre	22.0	28.5	0.0

Tabla 11. Resistencias óhmicas de electrodos destinados para cátodos (sólo fieltro).

Configuración	Resistencia óhmica de fieltro de carbono individual (Ω)		
	1	2	3
Alambre	4.6	5.1	14.5
Placa Perforada	21.7	15.0	5.0
Malla de alambre	183.9	210.0	88.7
Tela de alambre	27.9	23.5	0.0

Tabla 12. Resistencias óhmicas de ánodos con colector de corriente (fieltro - colector).

Configuración	Resistencia óhmica de electrodos (Ω)		
	1	2	3
Alambre	0.5	0.3	0.4
Placa Perforada	0.3	0.5	0.3
Malla de alambre	0.5	0.9	0.6
Tela de alambre	0.9	0.7	0.0

Tabla 13. Resistencias óhmicas de cátodos con colector de corriente (fieltro - colector).

Configuración	RESISTENCIA ÓHMICA DE ELECTRODOS (Ω)		
	1	2	3
Alambre	0.9	0.4	1.2
Placa Perforada	0.6	254.6	126.0
Malla de alambre	480	1407.0	113.0
Tela de alambre	7.4	13.4	0.0

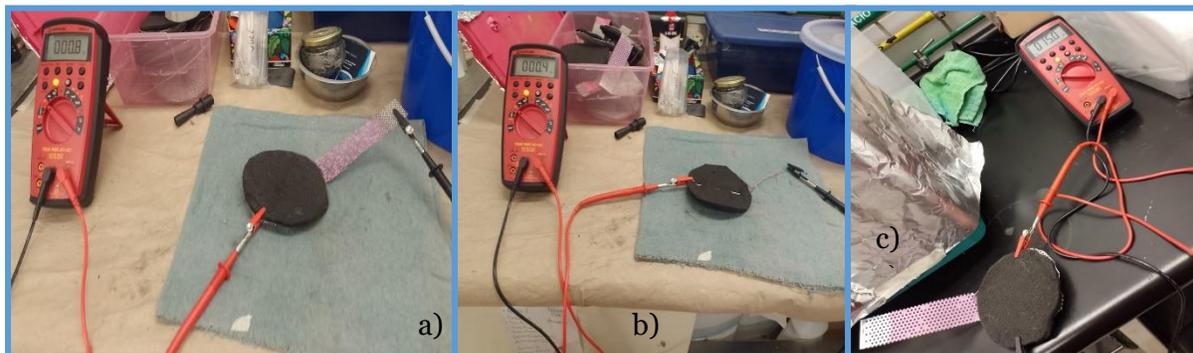


Figura 14. Valoración óhmica de colectores de corrientes: a) malla de alambre, b) alambre, c) placa perforada (elaboración propia).

5.3 SOLUCIÓN NUTRITIVA

Considerando la información obtenida de (Luviano-Vigueras, 2020), el electrolito para una CCMV, debe tener una concentración que proporcione minerales y sales suficientes para contribuir, no sólo al crecimiento de las bacterias, sino también, al desempeño favorable en el traslado de electrones a través del SBE. Es por ello que en esta investigación se empleó una solución nutritiva (SN) con los constituyentes de agua residual sintética (ARS), con una composición de acetato de sodio, nitrógeno, fósforo y potasio, así como magnesio, cloro, calcio y azufre, disueltos en agua de grifo, de acuerdo con el trabajo desempeñado por el autor anteriormente mencionado. Los iones cloruro permiten la medición del potencial de los electrodos con un electrodo de referencia de Ag/AgCl.

Tabla 14. Composición de agua residual sintética (Luviano-Vigueras, 2020).

Compuesto	Fórmula química	Concentración en mg/L
Sulfato de magnesio	MgSO ₄	4.95
Cloruro de amonio	NH ₄ Cl	141.30
Cloruro de potasio	KCl	38.13
Cloruro de calcio	CaCl ₂	1.00
Fosfato de amonio monobásico	NH ₄ H ₂ PO ₄	26.22
Acetato de sodio	C ₂ H ₃ NaO ₂	128.00

5.4 CONFIGURACIÓN DE COLECTORES DE CORRIENTE ELÉCTRICA Y CIRCUITO ELÉCTRICO

Un colector de corriente es un material para establecer una conexión eléctrica, de manera que deben de permitir el flujo de los electrones entre un electrodo y otro (Fuquene & López, 2017). La fabricación de los electrodos para la presente investigación, fue mediante la unión del electrodo de fieltro de carbono activado y un colector de corriente (material conductor de electrones) por medio de hilo de acero inoxidable, de acuerdo con lo mencionado en la primera sección de este Capítulo V (véase **Figura 15**). Cada colector de corriente se agrupó en pares, uno para el ánodo y otro para el cátodo dentro del circuito eléctrico en cada CCMV distinta. De esta forma se construyó el sistema experimental de acuerdo con lo mencionado en la **Tabla 15**. Celdas construidas con diferentes colectores de corriente, (véase **Figura 16**).

Tabla 15. Celdas construidas con diferentes colectores de corriente.

Celdas construidas	Nombre y nomenclatura	Colector de corriente
1	Celda control (C-Ctrl)	Alambre de cobre
2	Celda tela de malla (CT)	Malla de acero inoxidable t-304* (150x150)
3	Celda placa perforada (CP)	Placa de acero inoxidable t-316*
3	Celda malla de alambre (CM)	Malla de acero inoxidable t-304* (14x14)
3	Celda alambre (CA)	Alambre de acero inoxidable

* 304 y 316 son las aleaciones del acero utilizado (INDURA S.A., 2010).

** 150x150 y 14x14 es el número de hilos de acero que comprende una pulgada del material (Matex. Materiales Textiles, S.A. de C.V., 2020).

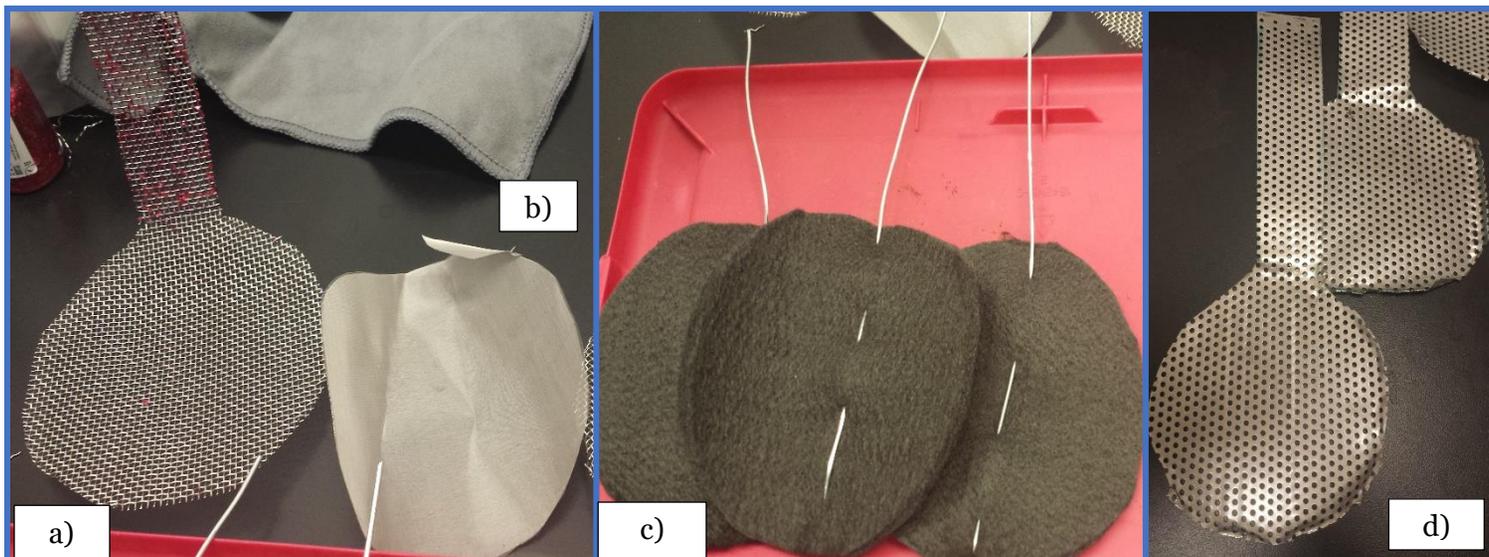


Figura 15. Colectores de corriente de acero inoxidable. a) Malla de alambre (14x14), b) Malla de alambre (15x15), c) Alambre entretejido en fieltro de carbono, d) Placa perforada.



Figura 16. Humedales artificiales con distintos colectores de corriente, a) Alambre de cobre (C-Ctrl), b) Tela de malla (CT), c) Placa perforada, d) Malla de alambre (CM), e) Alambre (CA).

5.5 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE CCMV

Esta investigación se realizó principalmente en dos espacios de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FESZ). La preparación de los materiales y de algunos reactivos para el sistema experimental se realizó en el laboratorio de Reología y Fenómenos de Transporte del edificio de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ) Laboratorio 7 del primer piso. El sistema experimental se instaló en el área verde cerca del humedal de la FES Zaragoza.

De esta forma, los bio-reactores que se fabricaron se colocaron a la intemperie, pero a la sombra durante cien días (véase **Figura 17** y **Figura 18**). Al inicio de este capítulo, se mencionó la forma y el material del contenedor que se empleó como CCM, el cual fue unido mediante pegamento especial para PVC, obteniendo una altura de 10 cm, así como. plastilina epóxica en la parte externa de las uniones que se ensamblaron, con la finalidad de evitar que estos dispositivos presentaran alguna fuga desde su interior. Se hizo una perforación en la parte inferior de cada celda, de forma que un sistema de venoclisis se introdujera para ser la vía de alimentación del ARS y así se lograra suministrar la solución nutritiva de una forma ascendente (véase **Figura 19**).

La SN, era almacenada en un recipiente con graduaciones volumétricas de cien en cien mililitros, previamente realizadas, con la finalidad de conocer la cantidad de ARS agregada a los bio-reactores diseñados. Los recipientes destinados a cada celda, así como, el sistema de venoclisis, fueron envueltos con papel aluminio para evitar el contacto con la luz solar, impidiendo el crecimiento de algas dentro del sistema (véase **Figura 18**).



Figura 17. Unidad Multidisciplinaria de Investigación Experimental Zaragoza (UMIEZ).



Figura 18. Espacio de experimentación-para las celdas de combustible microbianas vegetal y contenedores para solución nutritiva.

Mediante una secuencia ordenada de pasos, se construyó cada dispositivo para que su resultado tuviera el funcionamiento adecuado como una CCMV, empezando con la preparación de la zona anódica del sistema. Primeramente, se colocaron 5 g de polvo de grafito en la base interna del contenedor de la celda, por encima de esta cama espolvoreada, se situó el ánodo con su correspondiente colector de corriente.

En esta sección, se ocuparon dos tubos de media pulgada y 10.5 cm de largo de material PVC, de manera que, el acomodo de estos tubos estuviese en contacto con el ánodo y de una manera firme. Uno de estos tubos, fue perforado previamente a lo largo de su estructura y envuelto con ayuda del material textil conocido como pellón, posteriormente se espolvoreó grafito en polvo por encima del ánodo, rodeando los tubos, evitando que las partículas de este polvo se depositen en su interior (**Figura 19**).



Figura 19. Vista lateral de material PVC con orificio inferior para celda de combustible microbiana (izquierda). Vista superior de colector anódico y tubos para muestreo (derecha).

La zona anódica es una región con condiciones anaerobias para el crecimiento microbiano. El organismo vegetal que se colocó fue una especie acuática conocida como *Phragmites australis*, comúnmente llamado carrizo (**Figura 20**). Se escogió esta especie debido a que estas plantas tienen facilidad en adaptarse a condiciones de anaerobiosis, así como presentan tolerancia a la

bioacumulación, por lo que se llega a observar la extensión de sus raíces en medios anóxicos, de acuerdo con los trabajos documentados y las referencias señaladas en el capítulo IV. En esta investigación, las raíces de las plantas se depositaron por encima del polvo de grafito que cubrió al ánodo, extendiendo la rizosfera por el compartimiento. El medio de soporte que se manejó, fue de tezontle triturado y lavado en ocasiones previas a su instalación (**Figura 21**) con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de impurezas que afecten a la operación de las celdas, se situó a este material encima de la rizosfera, cubriendo de tres a cuatro centímetros de altura. Al colocar esta sección de la celda, se dejó pasar un lapso de 14 días con la finalidad de esperar un crecimiento microbiano en la parte anódica y continuar con la instalación de la celda por completo.



Figura 20. Especie vegetal *Phragmites Australis*



Figura 21. Celdas de combustible microbianas con sistema de venoclysis incorporado y tezontle con *Phragmites Australis*

El diseño de estos HA a escala laboratorio, fue de un único compartimiento y en vez de utilizar una membrana de intercambio protónico se dispuso de un material textil de fibra sintética denominado como pellón en México, este material es fabricado a base de polipropileno con un espesor menor a un milímetro. El pellón se consiguió de la tienda “Telas Parisina” y se recortó en forma circular de 9.5 cm de diámetro, correspondiente a la forma circular de las CCMV utilizadas. Para que este material no fuera obstaculizado por el tallo del espécimen vegetal, se ajustó mediante un corte en el extremo de su circunferencia, permitiendo cubrir la superficie de la celda, ya que, las membranas son una separación de los medios aerobios y anaerobios. Posteriormente, el cátodo se ubicó en la parte superior del pellón. Además, se colocó un tercer depósito similar a los tubos de la parte anódica, pero éste tenía la función única de permitir la medición del potencial del cátodo. Por último, para cerrar el circuito eléctrico, a estos HA, se conectó una resistencia eléctrica de 11.30 K Ω , la cual, se soldó a un extremo con una terminal de caimán mediante cautín, para unir cada extremo del colector de corriente, anódico y catódico de cada CCMV (véase **Figura 22**).



Figura 22. Celda de combustible microbiana vegetal con resistencia $11.3\text{ K}\Omega$ (izquierda). Celda de combustible microbiana vegetal en circuito abierto con tela pellón en cátodo (derecha)

5.6 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

5.6.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN CIRCUITO ABIERTO

En una celda de combustible microbiana, la diferencia de los potenciales de sus electrodos representa el voltaje del sistema y el valor más alto generado por el dispositivo se mide estando en circuito abierto, es decir, desconectando el circuito eléctrico. Para realizar esta medición se retiró la resistencia eléctrica mencionada con anterioridad.

Con la finalidad de conocer a mayor profundidad la respuesta eléctrica de los sistemas, se realizaron lecturas de los potenciales de los electrodos ubicados en cada celda que se fabricó, siguiendo una secuencia de pasos que se muestra en la **Figura 26**, para ello, se empleó un multímetro digital AMPROBE modelo 38XR-A (**Figura 23**), así como, el uso de un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), (véase **Figura 24**), fabricado en las instalaciones

mencionadas al inicio del presente capítulo, siguiendo las indicaciones publicadas por (Shaukatali, Moshin, & Shantosh, 2018).

Antes de iniciar las lecturas de los potenciales en las CCMV con el electrodo de referencia construido, fue necesario conocer su potencial electroquímico, para ello se utilizó un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata Metrohm modelo 6.0733.100 con concentración de cloruro de potasio (KCl) 3 mol/L y 12.5 cm de longitud (véase **Figura 25**).



Figura 23. Multímetro digital AMPROBE modelo 38XR-A

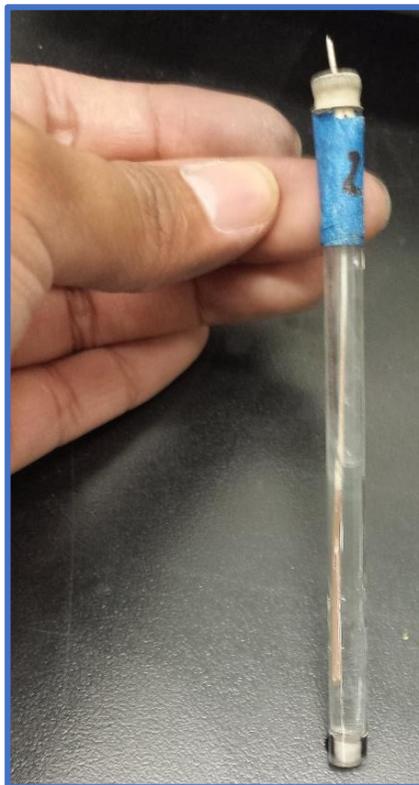


Figura 24. Electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)

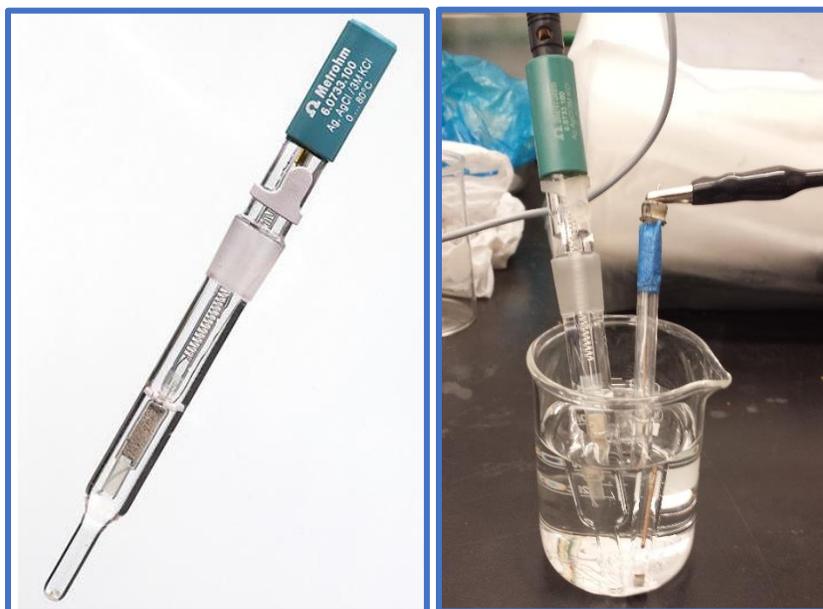


Figura 25. Valoración de potencial eléctrico de electrodo de plata/cloruro de plata elaborado por medio de electrodo de referencia.

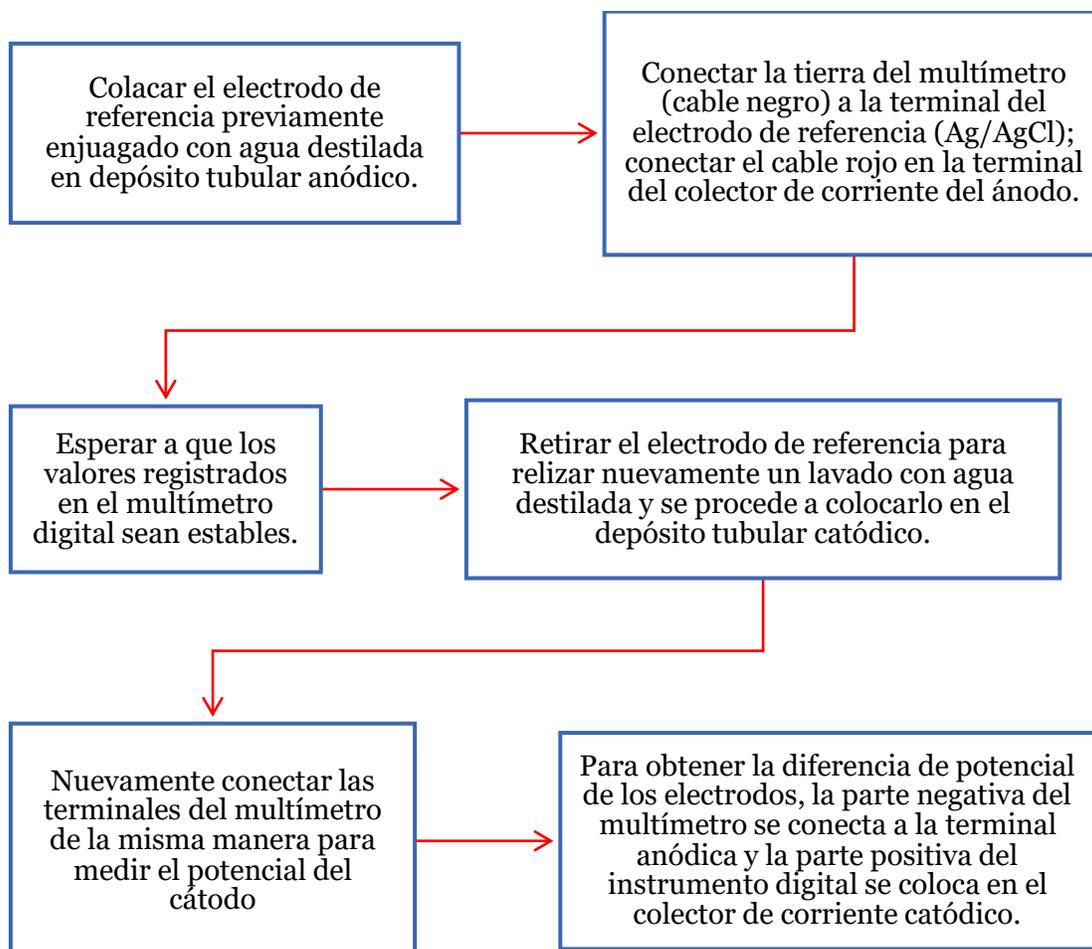


Figura 26. Diagrama de flujo para valoración de los parámetros eléctricos en un circuito abierto

5.6.2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN CIRCUITO CERRADO

El desempeño de las CCMV se determinó en función del potencial anódico/catódico y de la diferencia potencial entre los electrodos (en adelante se definirá como voltaje de la celda). También se determinó la corriente y la potencia eléctrica generadas por la celda. Se construyeron curvas de polarización y de potencia para caracterizar electroquímicamente las celdas. Para ello se sometió cada celda a una variación de resistencias externas de forma descendente mediante el uso de una caja de resistencias variable (de $20\text{k}\Omega$ a $1\ \Omega$).

Para la obtención de la potencia eléctrica (véase la ecuación (6)), se utilizaron dos multímetros digitales de mano, uno de ellos fue para registrar la corriente eléctrica (*BK Precision*

393), que sirvió como amperímetro. Las mediciones se registraron en unidades de microamperios (μA). y Se utilizó otro multímetro destinado a obtener el voltaje (*B&K Precision 390A*), presentando sus unidades en milivoltios (mV). Ambos equipos se conectaron a la caja de resistencias anteriormente mencionada para realizar la curva de polarización. Esta conexión eléctrica se realizó situando el cable positivo del amperímetro unido a las terminales negativas de la caja de resistencias y del voltímetro, mientras que los extremos positivos de estos utensilios se conectaron al cátodo de la celda a valorar, cerrando el circuito por medio de la terminal negativa del amperímetro en el ánodo de la celda, como se muestra en la **Figura 27**.

$$P = V * I \quad (6)$$

Donde, P es la potencia eléctrica [W], V es el voltaje [V] medido en uno de los multímetros e I [A] es la intensidad de corriente medida con el multímetro restante.

Para determinar el valor de la densidad de potencia se utilizó la ecuación:

$$DP = \frac{P}{A_{an}} \quad (7)$$

Donde, DP es la densidad de potencia [mW/m^2], P es la potencia [mW], P es la potencia en unidades de mW y A_{an} es el área del ánodo [m^2].

Para determinar el valor de la densidad de corriente se obtiene de la siguiente ecuación:

$$j = \frac{I}{A_{an}} \quad (8)$$

Donde, j es la densidad de corriente [mA/m^2], I es la corriente eléctrica [mA] y A_{an} es el área del ánodo [m^2].

Para determinar el área geométrica del ánodo se utilizó la siguiente ecuación:

$$A_{an} = (\pi) * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (9)$$

Donde, A_{an} es el área del ánodo, D es el diámetro del ánodo [m] y π es la constante del valor de pi ($\pi = 3.141516$).

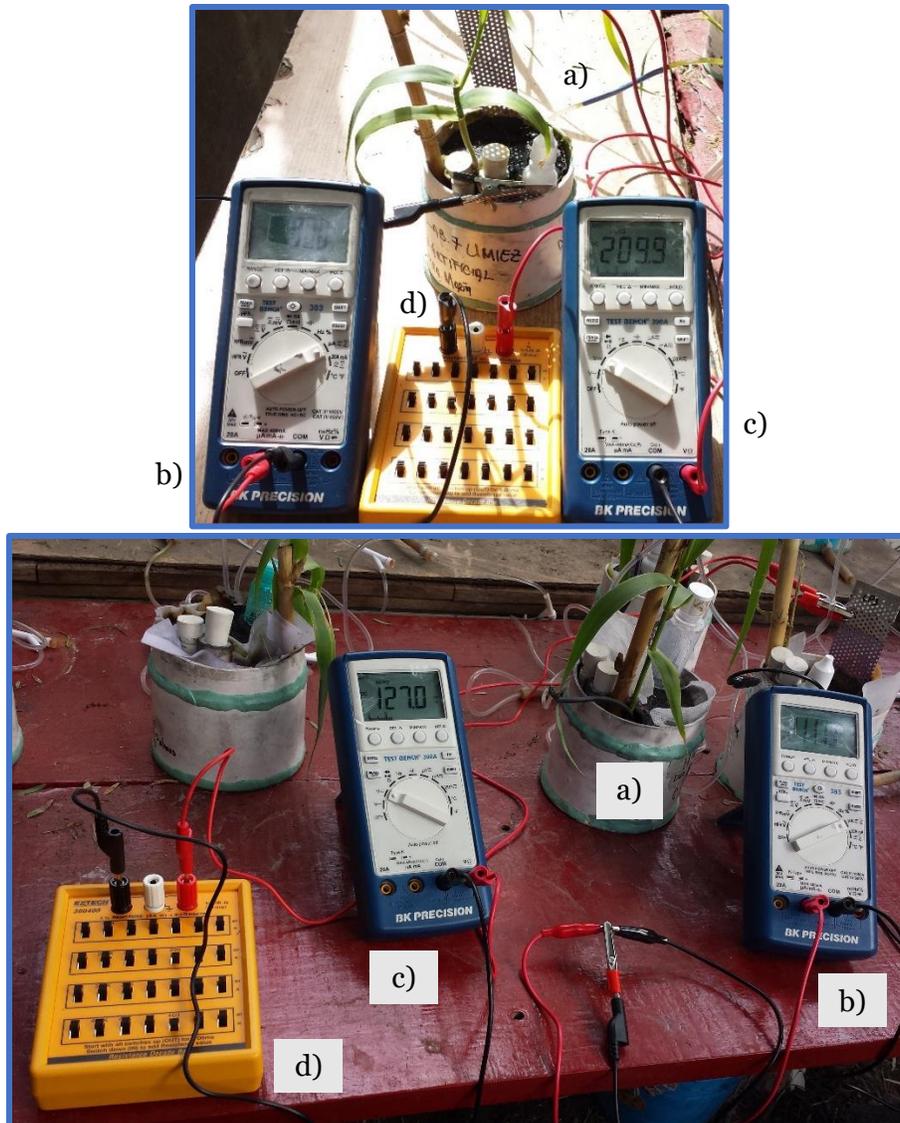


Figura 27. Conexión eléctrica para obtención de curva de polarización. a) Celda de combustible microbiana vegetal, b) amperímetro, c) voltímetro, d) caja de resistencias.

5.7 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

5.7.1 PH Y TEMPERATURA

Al tratarse de sistemas con actividad biológica en el ánodo, es requisito básico medir el valor de pH y de temperatura en las CCMV. Estas mediciones ayudarían a determinar si existen las condiciones adecuadas para el crecimiento microbiano en la zona anaerobia (zona anódica), considerando que en las aguas residuales urbanas el pH se encuentra entre 6.5 y 8.5 y que valores

mayores a estos causan efectos inhibidores en el crecimiento microbiano esperado, por otra parte, al medir dichos parámetros se conocerá la naturaleza ácida o alcalina del sistema (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Para esta tarea se utilizó un equipo medidor multiparamétrico de pH portátil Edge modelo HI2020-01 adquirido por parte de HANNA, así como un electrodo para pH digital Hanna modelo HI 11310 con un sensor de temperatura integrado, cuya estructura era de cristal con una solución en su interior de cloruro de potasio (KCl), de concentración 3.5 mol/L. Cada HA, tenía un dispositivo tubular ubicado en el compartimiento anódico, donde se sumergía este electrodo para que estuviese lo más cercano a la superficie del ánodo evitando el contacto entre ellos y evaluar únicamente el anolito esperando a que las cifras fueran estables (véase **Figura 28**).



Figura 28. Uso de electrodo para pH de Multiparamétrico en zona anódica de celda de combustible microbiana vegetal (CM-2)

5.7.1 OXÍGENO DISUELTO

En una CCM, la generación de corriente eléctrica se hace posible al mantener a los microorganismos electroquímicamente activos separados del oxígeno, o de cualquier otro aceptor de electrones diferente al ánodo. Para esto se requiere un ambiente anaerobio en la cámara anódica. La determinación del oxígeno disuelto se realizó mediante un instrumento Hanna modelo HI2020-01 con sonda de oxígeno disuelto polarográfica digital y membrana reemplazable con

rangos de 0.00 -45.00 mg/L (ppm). Estas mediciones fueron realizadas colocando la sonda mencionada en la región del ánodo para que tuviera una interacción con la solución ubicada en esta sección (anolito), y de igual manera se realizaron las medidas para la región del cátodo permitiendo que la sonda estuviera en contacto con el electrolito de esta parte de la celda a valorar (catolito). Al realizar este procedimiento era importante que el nivel de ARS ubicado en cada CCMV fuese adecuado, es decir, que cubriera la región del cátodo sin tener exceso, permitiendo que el oxígeno proveniente del ambiente no llegara a la zona anaerobia alterando las condiciones ambientales del ánodo ni los valores que se obtuvieran de esta sección, de igual manera, al tener este nivel óptimo en la parte del cátodo, la sonda registraría únicamente el oxígeno disuelto del catolito.

CAPÍTULO VI

Resultados

En este capítulo se describen los resultados más relevantes del trabajo de investigación realizado. Estos resultados muestran la respuesta de los humedales electroquímicos en términos del potencial de los electrodos, del voltaje de la celda, de la densidad de potencia y densidad de corriente, de temperatura, de pH y finalmente, del oxígeno disuelto.

6.1 POTENCIAL DE ÁNODO Y CÁTODO

El potencial anódico es un indicador indirecto de lo que ocurre en el ánodo en función de las reacciones químicas y bioquímicas que pudieran ocurrir en esta zona. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los valores obtenidos del potencial anódico correspondiente a cada configuración de CCMV. Durante la medición del potencial la celda se encontraba en circuito abierto. Estos sistemas iniciaron su operación a partir del día 24 de agosto del año 2022 (día cero) y los primeros registros del potencial en mV, empezaron dos días después de haberse instalado. Los valores iniciales que se registraron en cada celda se ubicaron por encima de 40 mV y con el tiempo transcurrido se observó un cambio descendente, evidenciando que las celdas con placa perforada y las celdas con malla de alambre (14x14) son más sobresalientes en este tipo de investigación a diferencia de las otras celdas estudiadas. En las celdas con placa y malla se registraron los potenciales de ánodo más negativos como se observa en la **Tabla 16**. Por otra parte, se percibe un comportamiento similar en las repeticiones de cada configuración, permitiendo realizar más adelante una evaluación mejor detallada de estos sistemas.

Adicionalmente, en la **Figura 30** se presentan el comportamiento de potencial en los cátodos, los cuales se colocaron 14 días posteriores al inicio de la experimentación. A diferencia de los resultados obtenidos en los ánodos, estos valores se encuentran en la parte positiva de la gráfica, exceptuando ciertas configuraciones que no fueron favorables para el desarrollo experimental. Sin embargo, las configuraciones de placa perforada y malla de alambre (14x14), reafirman ser los materiales más adecuados para este tipo de celdas, al presentar potenciales más

positivos. Con referencia a lo anterior, se presenta en la **Tabla 17**, el registro de los potenciales máximos de cátodo para cada una de las configuraciones. Las mediciones del potencial del cátodo se realizaron estando las celdas en circuito abierto. La tabla también muestra el valor respectivo de potencial anódico y voltaje.

La **Figura 31** presenta la variación de voltajes en circuito abierto de cada configuración de CCMV, estos valores comenzaron registrarse a partir del 07 de septiembre (día 14 de experimentación), ese mismo día se inició la medición de los potenciales catódicos. Esta gráfica muestra valores iniciales entre -60 mV y 101 mV, exceptuando una configuración de placa perforada (CP-3) cuyo registro comenzó en 227.4 mV; conforme transcurrió el tiempo experimental se percibieron valores máximos de 404.6 mV, 431.8 y 645.2 mV en las celdas con placa (CP-1, CP-2 y CP-3, respectivamente). De esta forma se comprueba que los colectores de corriente con placa son los más adecuados para este tipo de celdas, ya que al no existir corrosión, no se interfirió con las reacciones bio-electroquímicas. La configuración de malla de alambre resultó ser un material apto para la generación de voltaje, en especial las composiciones CM-1 y CM-2 mostraron voltajes arriba de 100 mV; cabe destacar que las tres repeticiones de esta configuración registran una similitud en sus valores, que se pueden apreciar en la La medición del potencial se realizó en circuito abierto.

*Los potenciales de ánodo y cátodo mostrados en esta tabla se midieron con un electrodo de Ag/AgCl.

**El potencial de ánodo y el voltaje mostrados son los correspondientes al mismo día de la medición del potencial del cátodo.

Tabla 18.

Los HA contruidos para el proyecto se conectaron a una resistencia eléctrica de 11.3 k Ω a partir del día 07 de octubre (día 44) y se colocó polvo de grafito sobre el fieltro del cátodo de cada celda el 10 de noviembre (día 78). En la Figura 19 se observa que la colocación de la resistencia eléctrica pudo haber beneficiado el desempeño de las celdas mejorando su voltaje. La adición de grafito en polvo al cátodo el día 78 benefició únicamente a las celdas que tenían crecimiento algal sobre la superficie del cátodo.

Tabla 16. Potencial más negativo en el ánodo de cada CCMV.

Configuración	Fecha	Día Experimental	Potencial Ánodo (mV)*	Potencial Cátodo (mV)**	Voltaje Celda (mV)**
Celda Control	02-sep	9	-18.7	Sin Registrar	Sin Registrar
Celta Tela 1	29-sep	36	-53.1	27.5	94.3
Celda Tela 2	28-sep	35	39.8	-30.6	-69.2
Celda Placa 1	24-nov	92	-478.5*	128.3	481.0
	28-nov	96	-381.7	92.6	481.0
Celda Placa2	10-oct	47	-289.1	86.7	371.3
Celda Placa 3	07-nov	75	-332.6	74.6	404.6
Celda Malla 1	29 sep	36	-91.0	92.5	184.7
Celda Malla 2	02-dic	100	-57.8	61.5	115.7
Celda Malla3	27-sep	34	-7.4	109.1	115.0

La medición del potencial se realizó en circuito abierto.

*Los potenciales de ánodo y cátodo mostrados en esta tabla se midieron con un electrodo de Ag/AgCl.

**El potencial de cátodo y el voltaje mostrados son los correspondientes al mismo día de la medición del potencial del ánodo.

Tabla 17. Potencial máximo en los cátodos de las CCMV

Configuración	Fecha	Día Experimental	Potencial Ánodo (mV)**	Potencial Cátodo (mV)*	Voltaje Celda mV**
Celda Control	03-oct	40	74.7	122.0	44.6
Celta Tela 1	07-sep	14	85.8	182.4	101.9
	21-sep	28	-6.5	140.5	151.7
Celda Tela 2	17-oct	54	86.9	243.8	120.5
Celda Placa 1	17-nov	85	-266.4	143.3	556.9
	08-sep	15	64.1	146.5	79.2
Celda Placa2	08-nov	76	-90.2	294.0	395.3
Celda Placa 3	07-sep	14	-73.3	154.6	227.4
	29-nov	97	-236.0	114.2	345.9
Celda Malla 1	24-nov	92	108.7	258.6	137.5
Celda Malla 2	17-oct	54	25.7	192.0	155.4
Celda Malla3	28-nov	96	48.0	255.8	190.2

La medición del potencial se realizó en circuito abierto.

*Los potenciales de ánodo y cátodo mostrados en esta tabla se midieron con un electrodo de Ag/AgCl.

**El potencial de ánodo y el voltaje mostrados son los correspondientes al mismo día de la medición del potencial del cátodo.

Tabla 18. Valores máximos de voltaje en las CCMV

Configuración	Fecha	Día Experimental	Potencial Ánodo(mV)**	Potencial Cátodo(mV)*	Voltaje Celda(mV)
Celda Control	14-sep	21	2.8	79.6	77.0
Celda Tela 1	26-sep	33	-21.1	80.7	159.6
Celda Tela 2	17-oct	54	57.3	243.8	185.0
Celda Placa 1	02-dic	100	-471.8	123.2	645.2
	17-nov	40	-266.4	143.3	556.9
Celda Placa2	24-oct	61	-271.1	160.7	431.8
Celda Placa 3	07-nov	75	-214.8	80.6	404.6
Celda Malla 1	05-oct	42	-46.2	172.7	205.4
Celda Malla 2	19-oct	56	24.8	138.7	158.7
Celda Malla 3	23-nov	91	42.3	241.9	195.1

La medición del voltaje se realizó en circuito abierto.

*Los potenciales de ánodo y cátodo mostrados en esta tabla se midieron con un electrodo de Ag/AgCl.

**Los potenciales de ánodo y cátodo mostrados son los correspondientes al mismo día de la medición del voltaje.

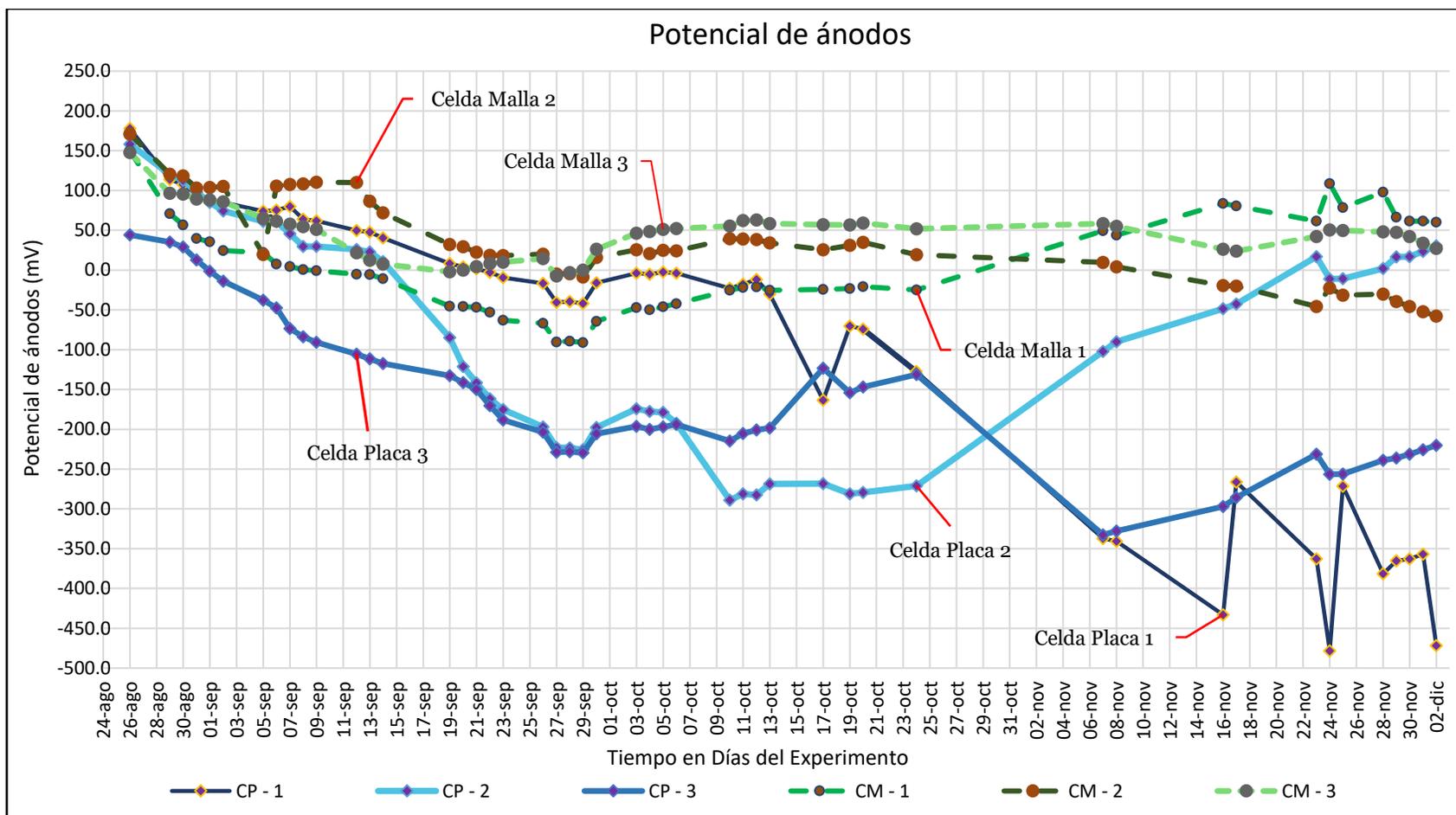


Figura 29. Potencial de ánodos en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes *versus* tiempo

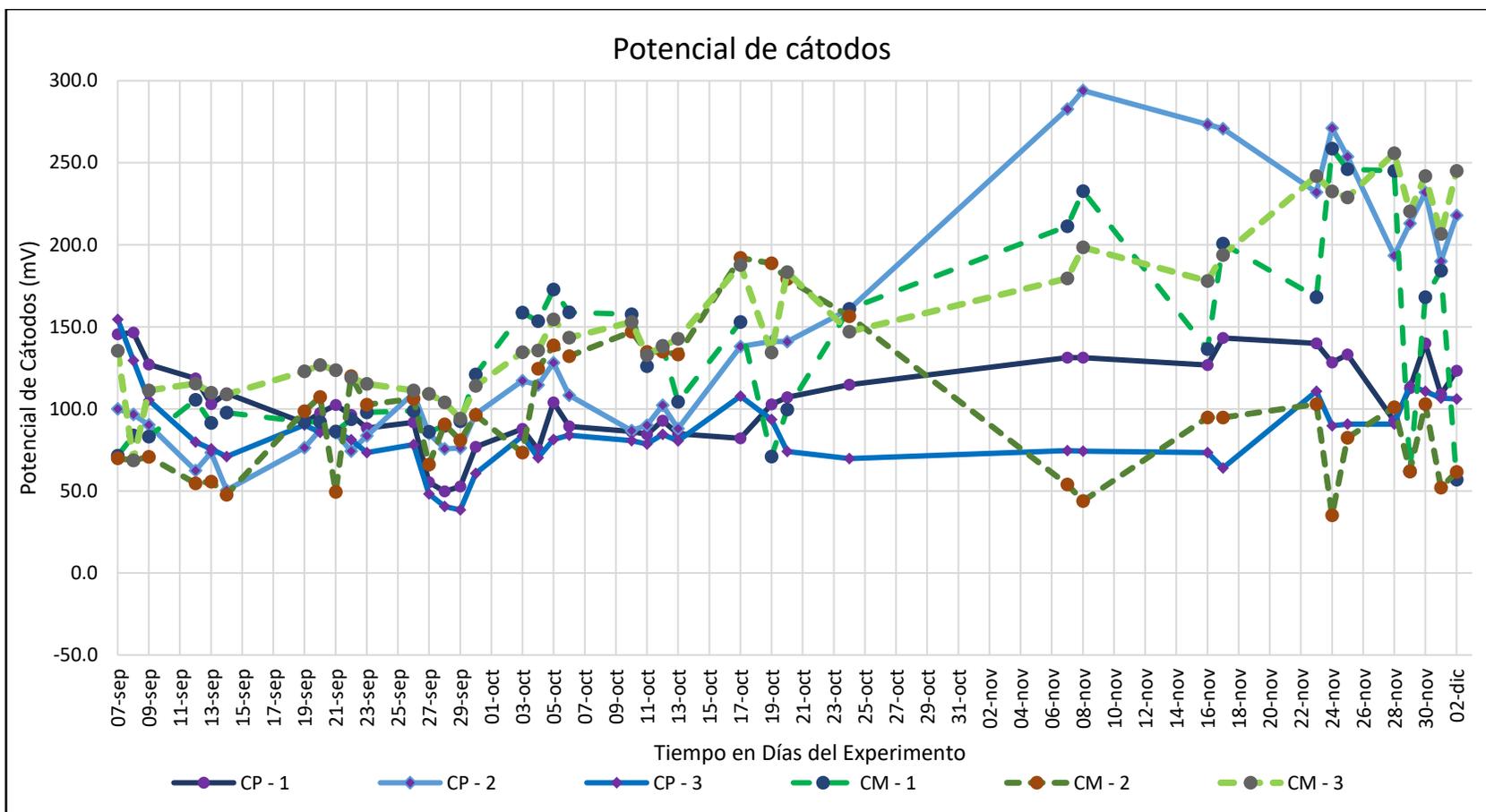


Figura 30. Potencial de cátodos en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes *versus* tiempo

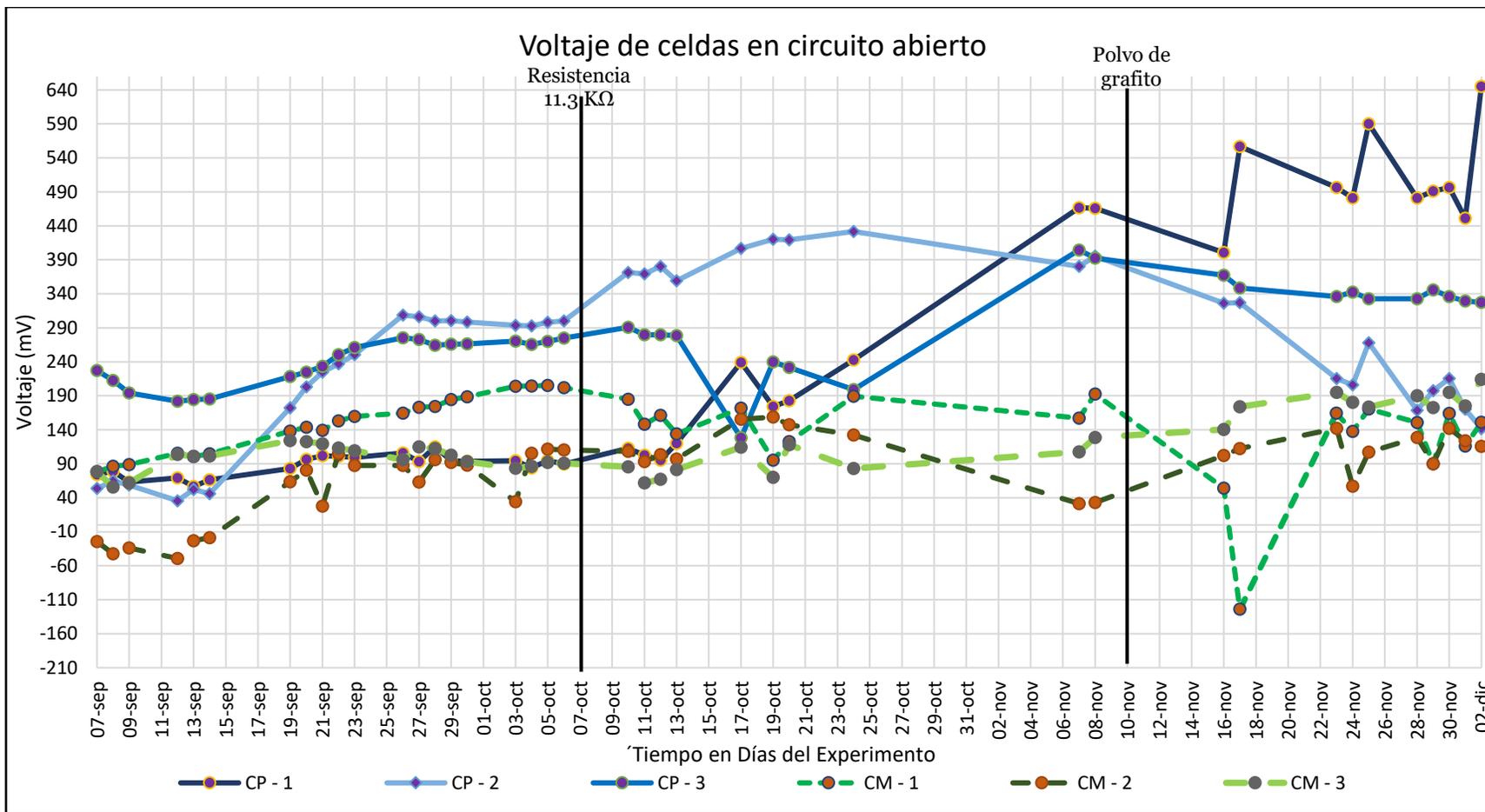


Figura 31. Voltajes en circuito abierto de las CCVM más sobresalientes *versus* tiempo

En la **Figura 31**, se muestran los resultados de voltaje de cada configuración de celda con sus réplicas. Es fácil percatarse de que las configuraciones de placa perforada tuvieron resultados más altos que los dispositivos que fueron ensamblados con la malla de alambre, sin embargo, entre cada configuración hubo algunos detalles que diferenciaron el comportamiento entre cada dispositivo del mismo material, como la adaptación de la especie vegetal, la resistencia óhmica por parte de los electrodos que se mencionaron desde la **Tabla 10** a **Tabla 13** en el Capítulo V, la posible limitación del flujo protónico que la membrana empleada ocasiona, el control adecuado de la solución nutritiva al suministrarse a las celdas, así como el ambiente controlado en los cátodos al estar expuestos a la intemperie y la adaptación de los microorganismos en la zona del ánodo.

En la **Figura 32** se presenta el comportamiento de los valores eléctricos que la CP-1 proporcionó a la investigación. Se observan valores similares en sus potenciales anódicos registrados, con una disminución paulatina de estos datos hasta el día del acomodo de la resistencia (11.30K Ω). De acuerdo con los valores reportados, la conexión de la resistencia generó un comportamiento más negativo en el bio-ánodo, registrando un valor mínimo de -478.5 mV el día 92. Por parte del cátodo en la celda CP-1, la tendencia generada no se detectó una variación significativa en el potencial; el valor máximo adquirido fue de 143.3 mV el día 85; en cuanto al voltaje, CP-1 alcanzó 556.9 mV, antes de que su especie vegetal comenzara a secarse. Para la última fecha del experimento (día 100) el voltaje se incrementó hasta 645.2 mV, sin embargo, la planta se había secado totalmente.

La **Figura 33** corresponde al comportamiento eléctrico por parte del bio-reactor CP-2 a la cual, se les realizó en dos ocasiones el cambio de la especie vegetal. En esta celda los días 23 de septiembre y 14 de octubre (días 30 y 51) se optó por el cambio del organismo vegetal debido al mal acoplamiento que tuvo dentro del sistema. De acuerdo con los datos obtenidos, el punto mínimo (más negativo) del ánodo de CP-2 se registró el día 10 de octubre (día 47) con -289.1 mV y para el cátodo se obtuvieron 294.0 mV.

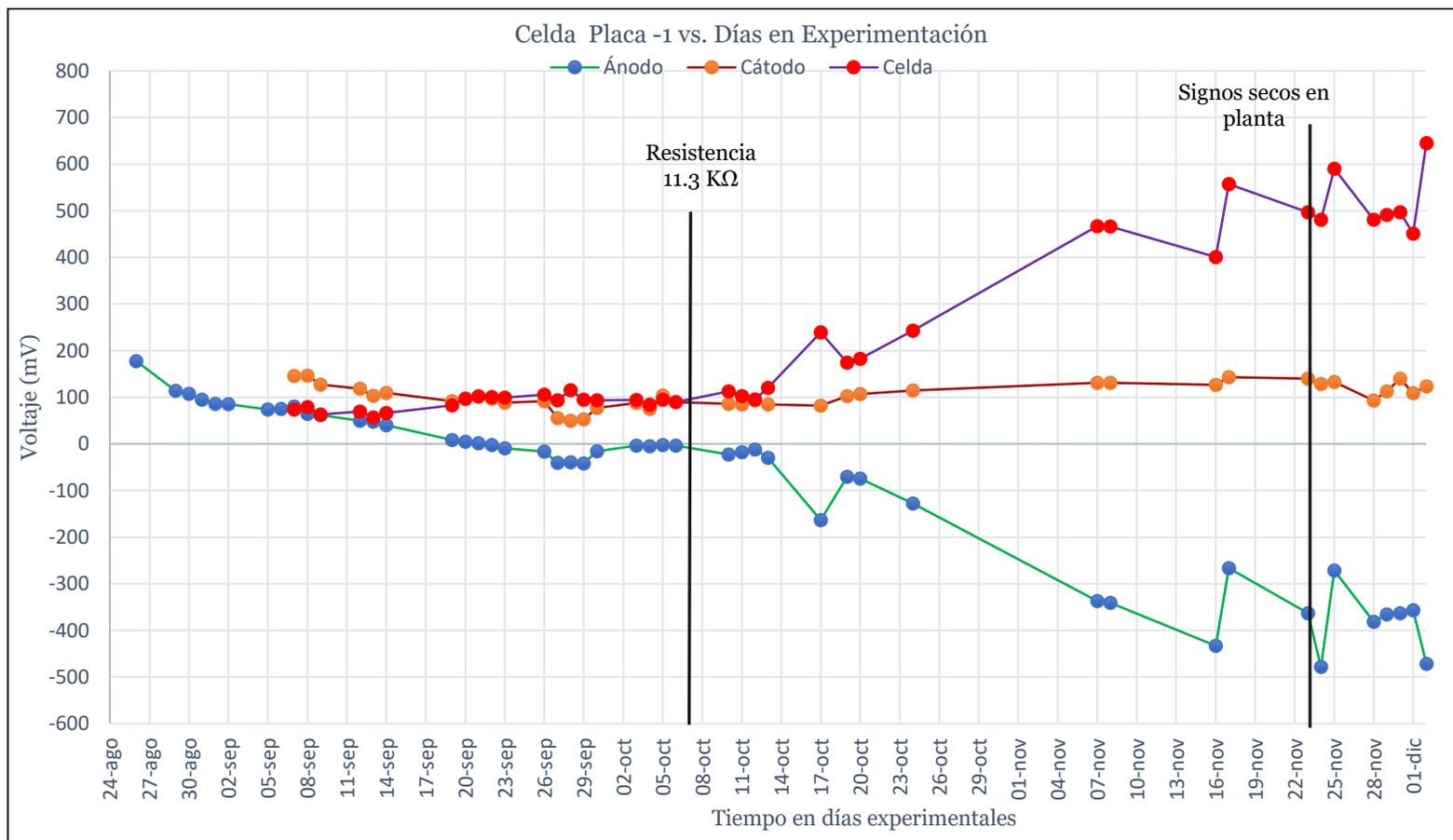


Figura 32. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 1.

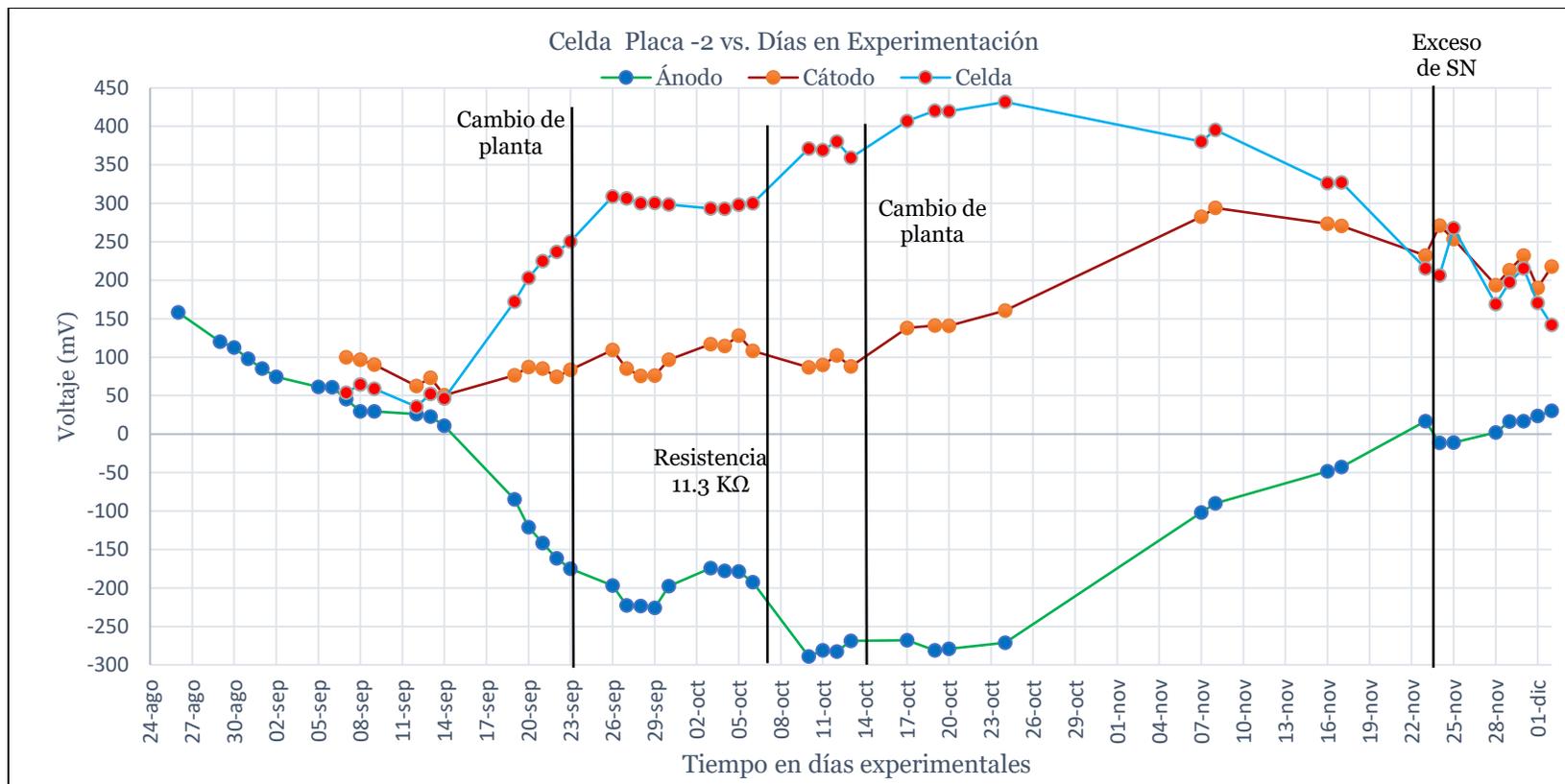


Figura 33. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 2.

El día 24 de octubre (día 61) se registró el voltaje de celda más alto para el humedal CP-2, con un valor de 431.8mV. Por otra parte, en los últimos días,, la solución nutritiva se suministró de manera excesiva, esto ocasionó que el cátodo se inundara causando alteraciones en los resultados de potencial en los electrodos (**Figura 33**). Además, la inundación en la zona del cátodo modifica el pH del catolito afectando al potencial del cátodo. Recordando que el potencial de los electrodos es consecuencia a las reacciones redox en la superficie de éstos y, que, en el cátodo se efectúa la reducción del oxígeno (ecuación (3)), al tener inundada esta región por exceso de SN, se dificulta la interacción oxígeno - electrodo, resultando un voltaje de celda disminuido.

La **Figura 34** corresponde a los datos para la réplica con placa perforada (CP-3). Esta configuración tuvo diversas modificaciones con respecto a su especie vegetal, ya que se cambió tres veces a diferencia de las réplicas anteriores, debido a una deficiente adaptación. Estos cambios de especie vegetal correspondieron a las fechas 05 de septiembre, 23 de septiembre y 07 de octubre (días 12, 30 y 44, respectivamente). También esta **Figura 34** presenta los potenciales de su ánodo, el cual registró un valor mínimo (más negativo) de -332.6 mV en la fecha 07-noviembre (día 75). Para estos días la última planta mostraba signos de poca vitalidad, muriendo por completo el día 25 de noviembre (día 93). Por otra parte, el día 16 de noviembre (día 84), el potencial de este ánodo registró el segundo valor mínimo (más negativo) con un valor de -297.2 mV. Así mismo se representan los valores del potencial del cátodo el cual registró un valor máximo de 154.6 mV el primer día de haberse instalado en el dispositivo, un segundo valor alto se emitió el día 29 de noviembre con 114.2 mV (día 97). Este dato se registró en los últimos días del experimento y con un organismo vegetal seco, así como días después de haberse espolvoreado polvo de grafito sobre el cátodo. Por último, el registro máximo en cuanto a voltaje de celda fue de 404.6 mV, ocurrido en las mismas fechas en que la planta presentaba una vitalidad deficiente, el segundo valor más alto en voltaje fue de 290.6 mV con la vitalidad de su planta adecuada (día 47). El valor más bajo de voltaje para esta celda CP-3, se registró, el día 54 como resultado de un nivel bajo de electrolito para la valoración de los parámetros eléctricos.

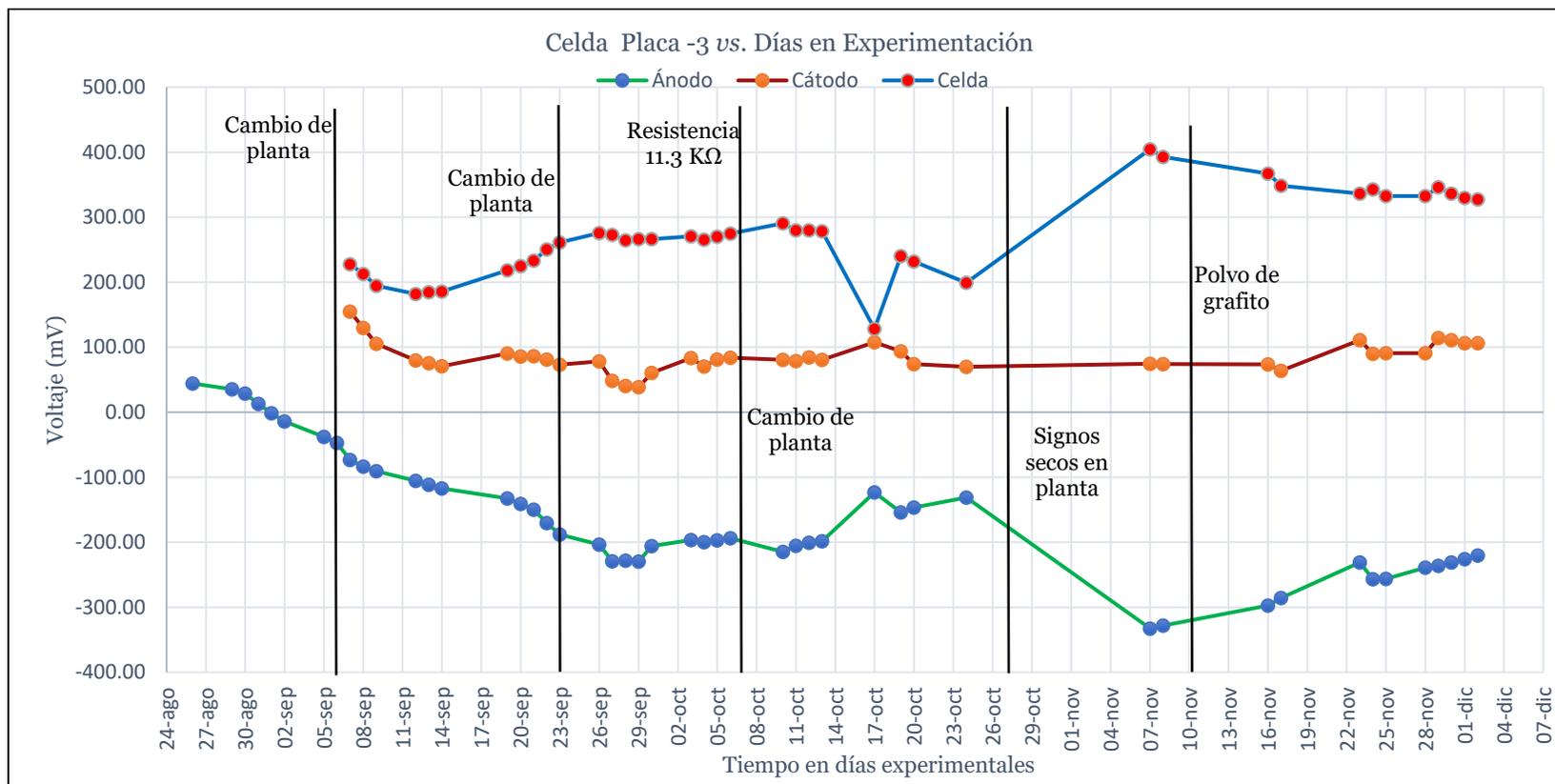


Figura 34. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de placa 3.

Un factor que pudo haber afectado el potencial de los cátodos fue el crecimiento de microalgas. Como se muestra en la **Figura 35**, hubo proliferación de microalgas en la superficie del cátodo de las celdas con mayor exposición a la luz. Esto se atribuye a los nutrientes contenidos en el agua residual sintética, así como a la exposición directa a la luz. La presencia de microalgas pudo haber generado potenciales mixtos que disminuyeron el potencial del ánodo.



Figura 35. Crecimiento de microalgas en cátodos con malla de alambre (arriba). Colocación de grafito en polvo en cátodos con malla de alambre y placa (abajo).

La **Figura 36** representa los datos registrados de los potenciales para ánodo y cátodo del material de malla de alambre 14x14, así como el voltaje en la primera configuración asignada como CM-1.

Este sistema mostró el mejor desempeño a diferencia de sus dos réplicas, logrando obtener un valor mínimo (más negativo) en el ánodo con -91.0 mV, presentándose a poco más del mes de haberse instalado (día 36 experimental). A pesar de que en este dispositivo eléctrico se obtuvieron los resultados esperados en la investigación, su progreso decayó después de esta fecha. El día 47 experimental se obtuvieron datos de voltaje y corriente eléctrica con ayuda de una caja de resistencias externas, tal y como se mencionó en el Capítulo V. Con estos datos de voltaje y corriente se construyó la curva de polarización, la cual generó pérdidas de activación, óhmicas y de transferencia de masa. Después de este día los valores de voltaje fueron menores y se sugiere que esto fue el resultado de las pérdidas óhmicas, como lo menciona (Poggi-Varaldo, Solorsaferia, & Vázquez-Larios, 2010). Por ejemplo, en la **Tabla 10** y **Tabla 11**, se muestran los valores de resistencia para los materiales empleados. Esta resistencia sumada a la del resto de los materiales pudieron haber afectado el desempeño general de la celda.

Con respecto a los registros en el cátodo, el punto máximo se obtuvo en la fecha 24 de noviembre (día 92) evidenciando 258.6 mV, sin embargo, para estas fechas el cátodo presentó proporciones de algas en su superficie, fenómeno por el cual empezó a mostrarse a partir del día 07 de ese mismo mes (día 75 del experimento). La gráfica a partir de esta fecha, muestra un aumento en el potencial catódico, es por ello que, un valor adecuado para mencionar es el que se presenta antes de estos eventos, el cual es de 172.7 mV en la fecha 05-octubre (día 42).

La diferencia del potencial de los electrodos proporcionado por este sistema alcanzó un valor de 205.4 mV, presentado el 05 de octubre (día 42). Una característica que presentó este sistema aparte de la descarga que se comentó anteriormente, fueron los inconvenientes en la vía de suministro de su electrolito, debido a fisuras en la conexión del sistema de venoclisis.

Con la **Figura 37** podemos considerando los potenciales de electrodos en la segunda réplica asignada como CM-2; la cual produjo valores inferiores a comparación de su predecesora (CM-1), así como un menor voltaje. Al inicio de la instalación del colector de corriente anódico se observa que este potencial registró cifras de 171.0 mV, por lo que son voltajes inferiores a cero mV. Una de las principales características con las que se pudo comparar su desempeño con el de CM-1 es la pronta presencia de microalgas en el cátodo, así como una manifestación de corrosión en los colectores de corrientes (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), generado a partir de la fecha 05 de octubre (día 42). Posiblemente este fenómeno no permitió un flujo adecuado de corriente eléctrica en estas terminales eléctricas, alterando los valores tanto en el cátodo como en el voltaje de la celda. Esto mismo ocurrió para la tercera repetición de este material (CM-3) de una manera más abundante. Debido a esta manifestación de alga y poco flujo de corriente eléctrica en los dispositivos, se procedió a colocar 5 mg de grafito en polvo en la superficie de cada cátodo incluyendo las demás configuraciones de celdas.

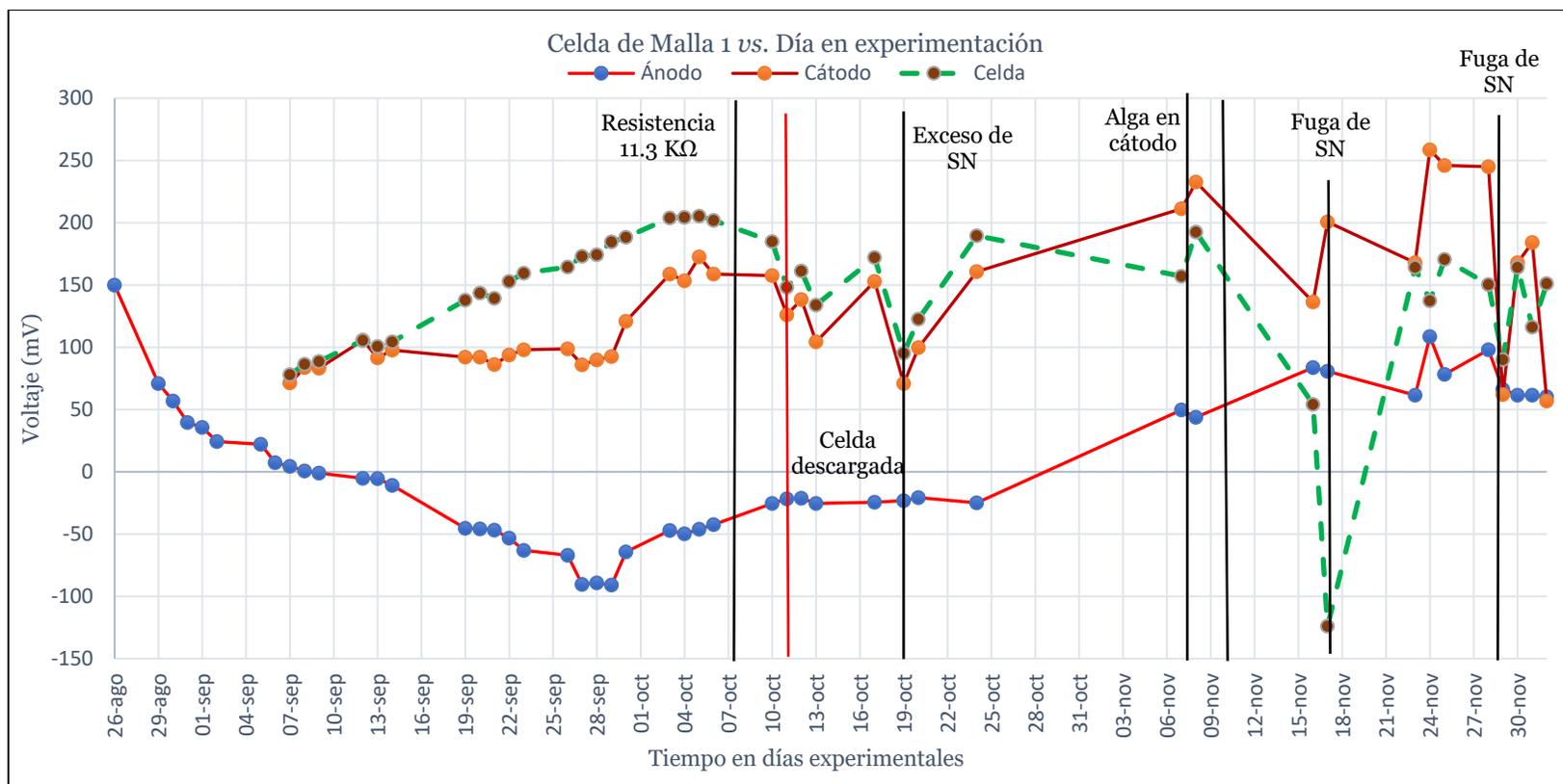


Figura 36. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de malla de alambre 1

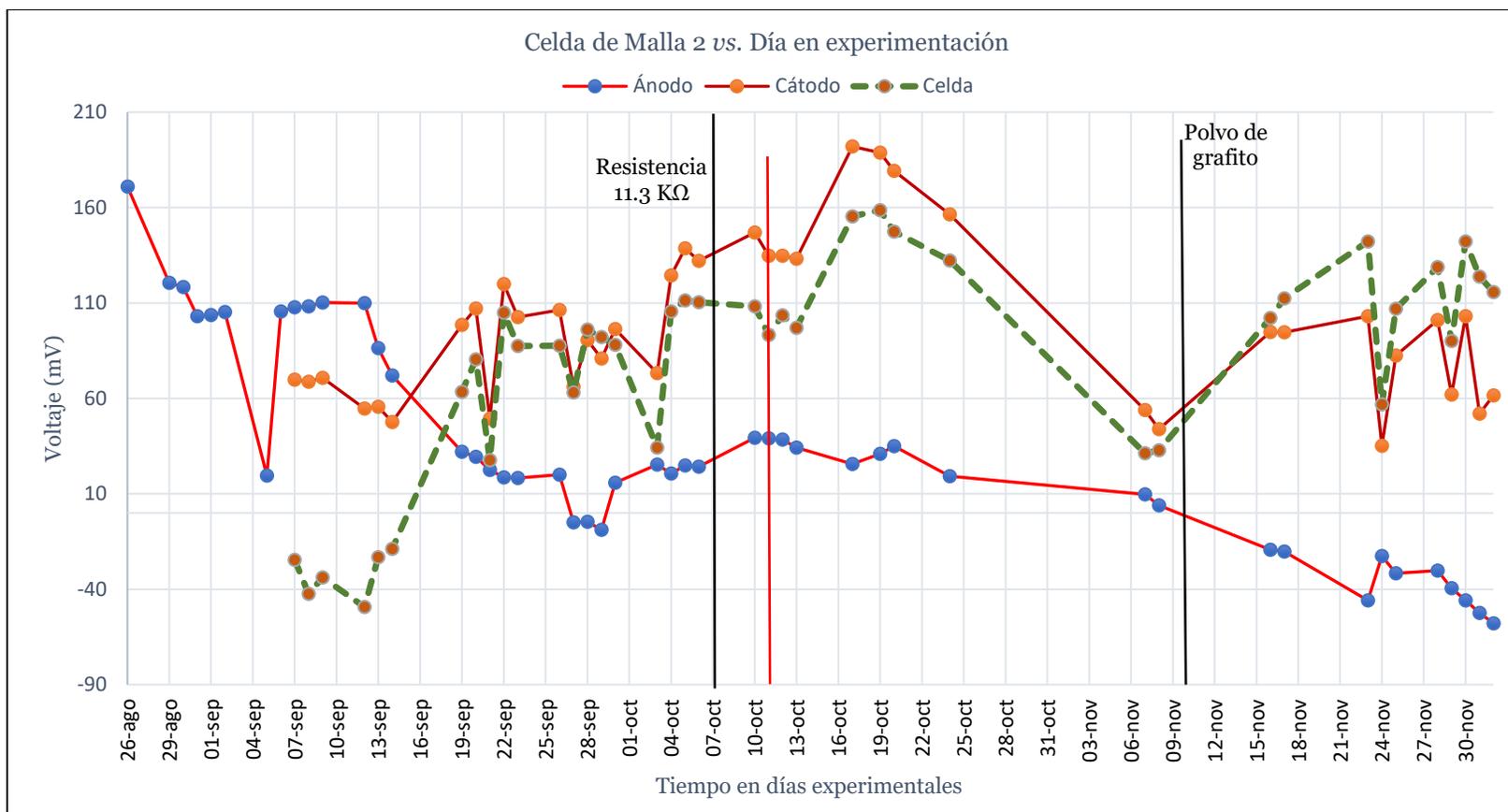


Figura 37. Potenciales eléctricos de electrodos y voltaje en celda de malla 2

En la **Figura 38** se muestra la variación del potencial del ánodo medido en las celdas de configuración tela de malla (CT) repetida dos veces y el potencial de la celda de control, en función del tiempo experimental. La celda CT-2 mostró un mayor potencial en comparación con la repetición 1 (CT-1), esto puede deberse a que en la repetición 1, la planta empezó a presentar problemas de vitalidad, obligando a cambiar la planta en la segunda semana de haber colocado el electrodo anódico en esta celda. Otra de las razones es que la segunda réplica (CT-2) de esta configuración presentó ciertas complicaciones en su experimentación, por ejemplo, fugas en la parte de la alimentación de la SN hacia el reactor. Estos bio-reactores presentaron corrosión en sus colectores de corriente haciendo que sus terminales eléctricas de la celda se corroyeran y se deshicieran. Además, la segunda réplica del material tela de alambre concluyó su experimentación antes de los cien días, debido a que fue imposible evaluar los potenciales eléctricos en sus electrodos precisamente por la alteración que originó la corrosión en sus conexiones de cátodo y ánodo (véase **Figura 39**).

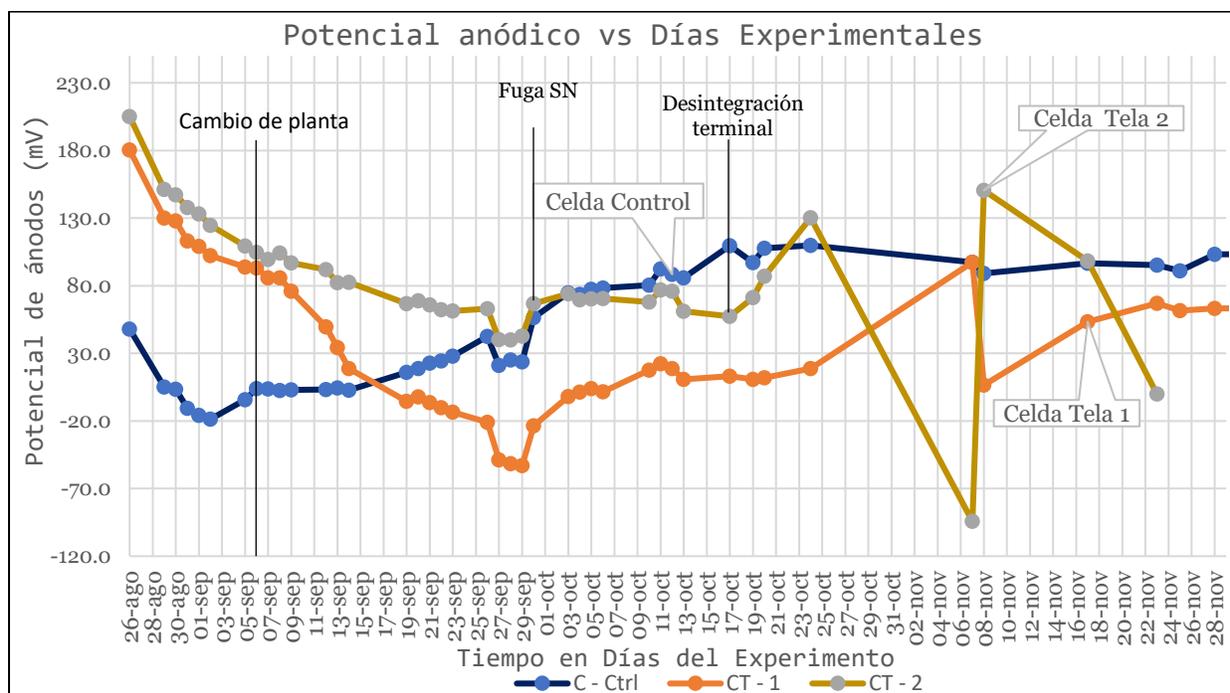


Figura 38. Potenciales anódicos de celda control, celda tela de alambre 1 y 2

Los resultados y gráficas que se han presentado anteriormente excluyen a las celdas del material de alambre, ya que esta composición resultó no ser apta para este tipo de investigación. El alambre utilizado presentó corrosión en la parte catódica a inicios de la instalación en el bio-sistema (véase **Figura 40**). Esta corrosión no sólo provocó inestabilidades en sus valoraciones, también desconfianza en sus datos, obligando a desmantelar la primera celda de alambre (CA-1) en el día 61 del proyecto. El ánodo de este sistema proporcionaba potenciales bastante negativos (-695.9 mV), sin embargo, este valor pudo ser causado por la corrosión y no por el metabolismo y características de la zona anódica. De la igual forma el potencial del cátodo manifestó valores negativos (-525.0 mV), adjudicándose a lo mencionado. Los promedios para pH y temperatura resultaron de: 7.3 ± 0.30 y 21.7 ± 3.14 , respectivamente. Por parte de las dos repeticiones de este material (CA-2, CA-3), los parámetros eléctricos manifestaron valores negativos similares por las mismas condiciones que la celda CA-1 presentó. De estas réplicas se suspendieron los parámetros físico-químicos y eléctricos en el día experimental 85, debido a que la solución dentro de las celdas se encontraba contaminada a causa de la corrosión del material poniendo en riesgo a los equipos de medición, pudiendo haber ocasionado un malfuncionamiento e interferir con las mediciones de las configuraciones restantes. A pesar de estos inconvenientes se realizaron los promedios para los parámetros físico-químicos, para CA-2 el promedio de pH fue de 7.07 ± 0.41 y 21.54 ± 2.85 de temperatura; en CA-3 se obtuvieron 6.46 ± 0.44 y 21.28 ± 2.40 respectivamente.

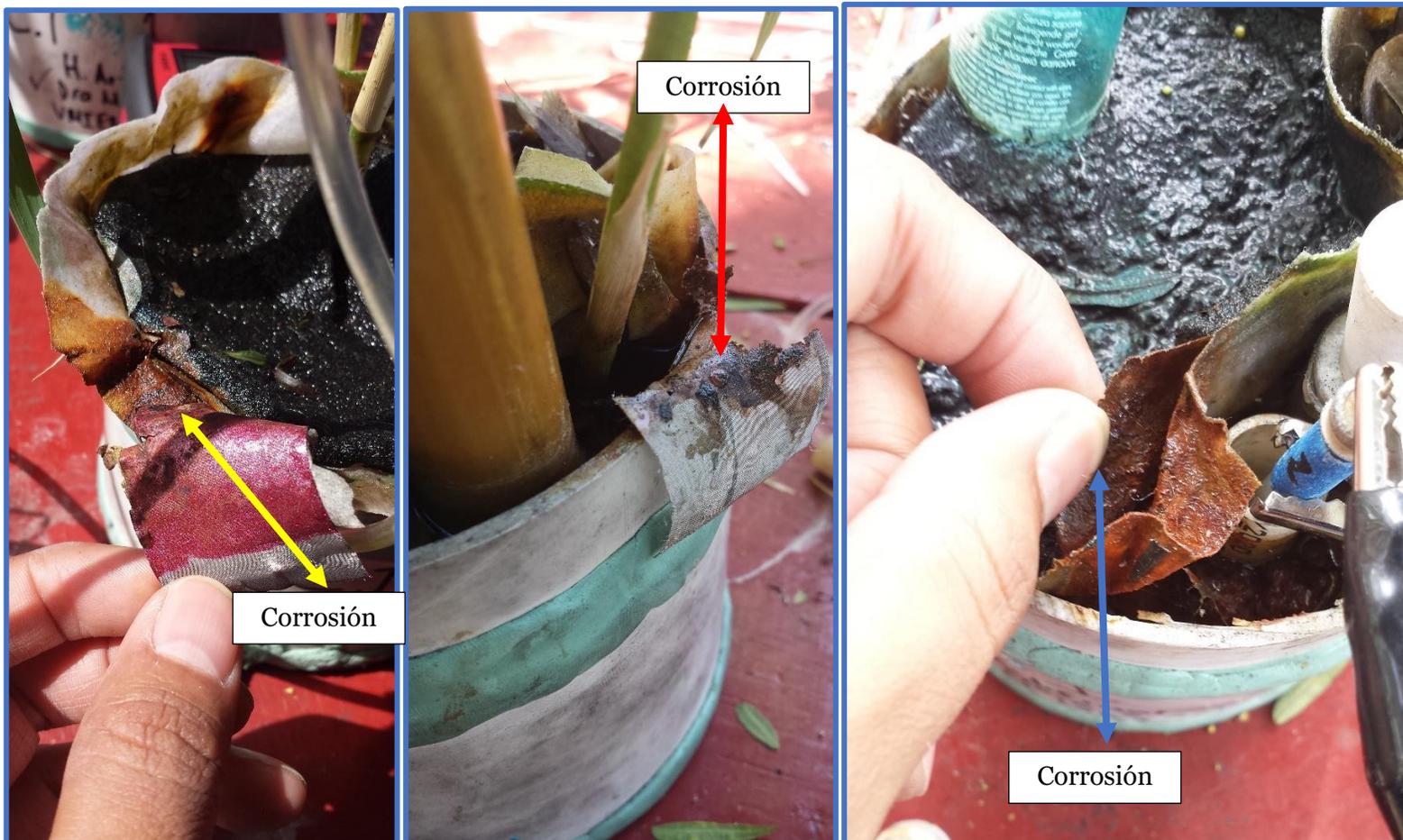


Figura 39.Corrosión y desgaste de colectores de corriente eléctrica en celdas de malla de alambre (150x150) “Tela de malla”



Figura 40. Corrosión presente en celdas de combustible microbianas vegetal de alambre

6.2 DENSIDAD DE POTENCIA

Las curvas de polarización expresan el voltaje de la celda y la densidad de potencia eléctrica en función de la densidad de corriente de una celda de combustible. La información generada por la curva de polarización y la curva de potencia representan la caracterización de la celda como una celda electroquímica galvánica, es decir, confirman que la celda está funcionando como una pila.

En la **Tabla 19** se presentan los valores de la densidad de potencia máxima obtenida por parte de las mejores configuraciones de los materiales utilizados: placa perforada y malla de alambre (14x14); adicionalmente se presentan los resultados del material de malla de alambre (150x150) señalado como “Tela de alambre” y la configuración de alambre de cobre (celda control).

Los resultados se muestran acompañados de la resistencia eléctrica en que se obtuvo la densidad de potencia máxima, así como la potencia calculada y la densidad de corriente, añadiendo el valor máximo de densidad de corriente de acuerdo con gráfico de su curva de polarización (véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Además, las curvas de polarización demuestran que las CCMV instaladas y analizadas en esta investigación funcionan como una celda galvánica con el voltaje y potencia mostrados.

Tabla 19. Valores máximos de densidad de potencia para cada configuración

Configuración	Resistencia Ω	V (mV)	j^* (mA/m ²)	DP (mW/m ²)	j^{**} (mA/m ²)
Placa 1	1 K	225.5	31.8	7.2	62.6
Placa 2	1 K	187.9	26.5	5.0	54.3
Placa3	600	144.0	33.8	4.9	66.2
Malla 1	1 K	99.2	14.0	1.4	27.2
Malla 2	2 K	89.7	6.1	0.5	14.4
Tela 1	1 K	28.1	0.9	0.1	5.70
Control	2 K	35.5	2.5	0.1	7.99

*Valor de densidad de corriente (j) que corresponde a la densidad de potencia indicada.

**Valor máximo de densidad de corriente correspondiente a la densidad de potencia indicada.
La Densidad de potencia (D) se calcula en función del área geométrica del ánodo. (0.0071 m²)

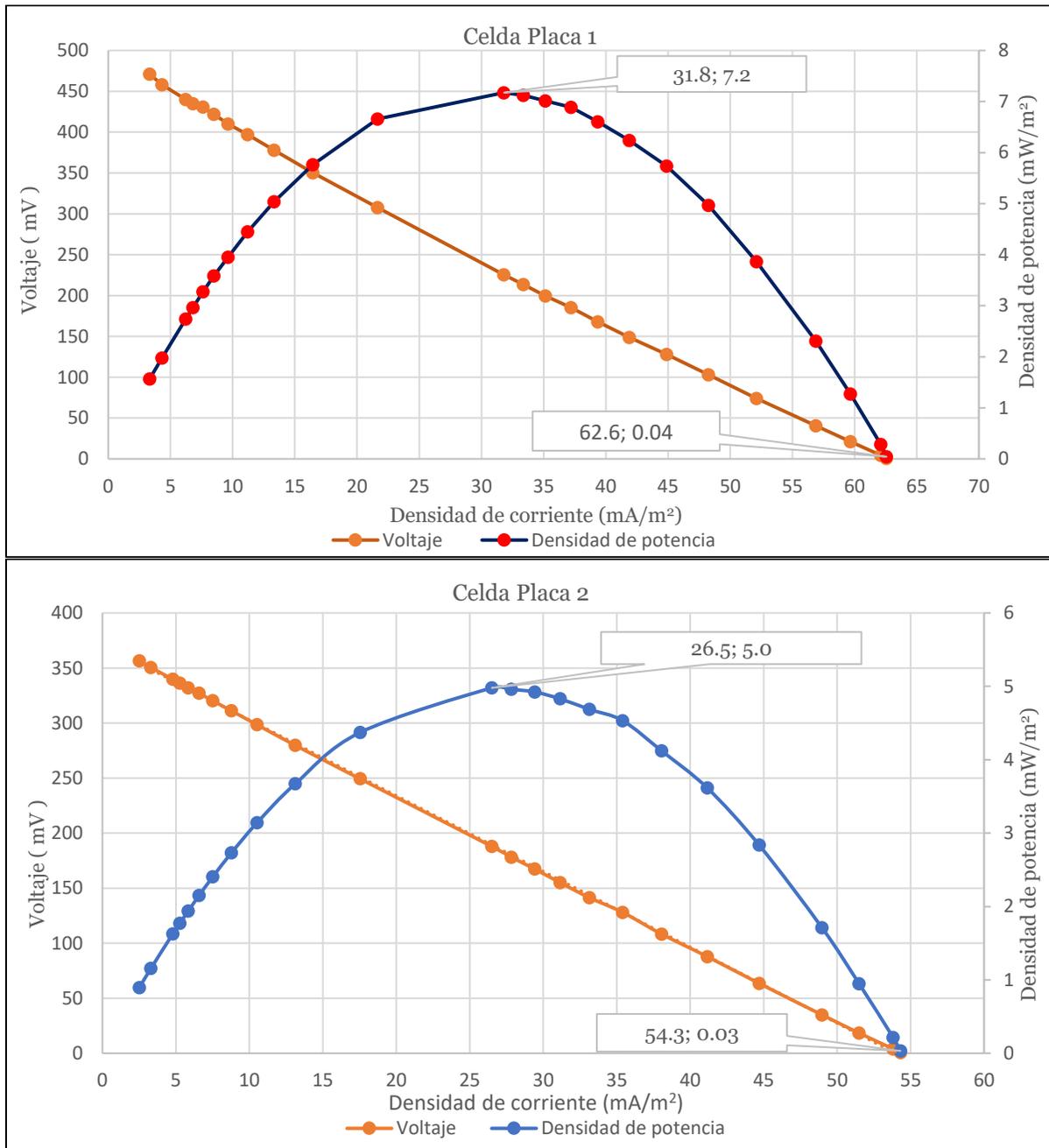


Figura 41. Curvas de polarización para celda placa 1 y celda placa 2

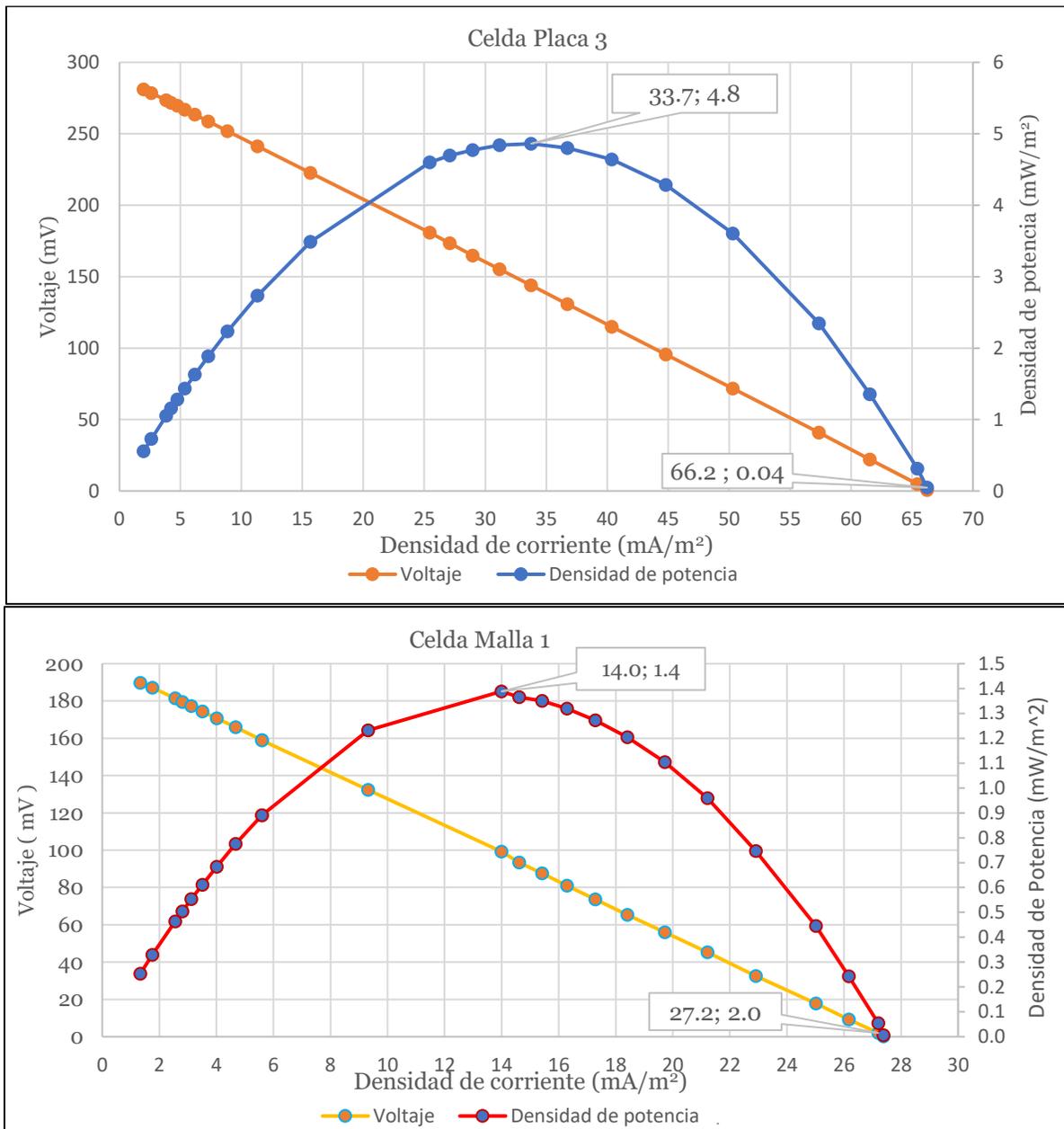


Figura 42. Curvas de polarización para celda de placa 3 y celda de malla 1

6.3 PH Y TEMPERATURA

Diversos autores han comentado la influencia de la temperatura en CCM para una adaptación adecuada por parte del consorcio microbiano en la zona anaerobia, favoreciendo la generación eléctrica (Vázquez, y otros, 2011).

Considerando lo recién comentado, se midió la temperatura ubicada en la zona anaerobia de cada CCMV, así como el potencial del ión hidrógeno (pH) en el electrolito de cada bio-reactor. Estos procedimientos se realizaron al inicio de cada día que se registraron las lecturas eléctricas con la finalidad de conocer las condiciones en que se desarrollaban los dispositivos mencionados.

Los datos de pH obtenidos al inicio de este proyecto fueron mayores de 7.10 exceptuando el dispositivo CT-2 cuyos valores comenzaron a partir de 6.30. Los SBE manifestaron incrementos de pH en el transcurso de los días de la experimentación, incluso llegando a tener un rango entre 8.0 y 9.0 a partir del día 85 de la investigación. El pH está asociado con la disponibilidad de los protones que surgen a partir de la zona anódica (Poggi-Varaldo, Solorsa-Feria, & Vázquez-Larios, 2010), por lo que sugiere que las mismas reacciones pudieron haber ocasionado que el transporte protónico hacia el cátodo fuese lento, provocando un gradiente de pH al inicio de operación por parte de la celda.

Este proyecto se realizó a la intemperie durante los meses que corresponden a la estación de otoño, por lo que el clima exhibía descensos paulatinos de temperatura entre un rango de 18°C y 23°C, influenciando las condiciones térmicas en las que los HA estudiados operaban.

En la tabla **Tabla 20** se presentan los promedios de los parámetros físico-químicos registrados para las configuraciones que tuvieron mayor relevancia en consideración a su desempeño. Debido a que los componentes empleados para el ARS se diluyeron en agua de la llave el promedio de pH se mantuvo dentro de un rango neutro, haciendo notar que las celdas con el material de placa perforada (CP-1, CP-2 y CP-3) manifestaron un pH poco mayor al de las celdas del material malla de alambre (CM-1 y CM-2), por otra parte, los promedios de las réplicas de cada material mantuvieron una similitud.

En cuanto a la temperatura, se registraron cifras muy cercanas entre las configuraciones de malla de alambre, así como un valor ligeramente mayor en comparación con las celdas de placa, evidenciando que, al aumentar la temperatura, el pH de una solución disminuye y viceversa.

Tabla 20. Promedios de valores físico-químicos en CCMV de placa y malla de alambre

Promedio pH				
CP-3	CP-2	CP-1	CM-2	CM-1
7.57±0.38	7.72±0.35	7.61±0.32	7.48±0.35	7.49±0.34
Promedio Temperatura				
CP-3	CP-2	CP-1	CM-2	CM-1
20.17±1.98	20.01±1.92	20.38±2.37	21.90±2.66	21.97±2.62

6.4 OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno contenido en el agua proviene principalmente de la atmósfera y es denominado como oxígeno disuelto, el cual es necesario para los microorganismos aerobios. Como se comentó anteriormente, en la región anódica se pretende tener la ausencia de oxígeno para obtener una corriente eléctrica proveniente de bacterias aisladas de este aceptor natural, permitiendo que el material colocado como colector de corriente sea el aceptor de electrones más favorecido.

En la **Tabla 21.** se presentan los registros de este parámetro junto con su promedio para las configuraciones de los materiales placa perforada y malla de alambre 14x14. Para las configuraciones de placa perforada, la celda CP-1 presentó una ausencia más notoria de oxígeno disuelto en su electrolito en comparación con sus réplicas. De forma coherente, este fue el dispositivo de mayor relevancia en cuanto a producción eléctrica y cuya especie vegetal no se cambió durante el tiempo experimental. Las repeticiones de este material (CP-2 y CP-3), manifestaron concentraciones de oxígeno más cercanas entre ellas.

Durante los días en que se midió este parámetro en las configuraciones de malla de alambre, la celda asignada como CM-1 mostró una presencia baja de oxígeno en la parte anódica a diferencia de las celdas CM-2 y CM-3, cuyos valores fueron muy superiores y cercanos al oxígeno

presente en la parte del cátodo, revelando un promedio distante entre estas dos configuraciones y el promedio de la celda CM-1.

Tabla 21. Oxígeno Disuelto en celdas con placa perforada y malla de alambre

Asignación	CP-1		CP-2		CP-3	
Día experimental	Ánodo (ppm)	Cátodo (ppm)	Ánodo (ppm)	Cátodo (ppm)	Ánodo (ppm)	Cátodo (ppm)
64	1.40	3.04	2.01	2.21	0.75	1.75
65	0.19	1.45	0.06	1.90	0.09	2.08
85	0.58	1.46	1.20	1.48	1.20	1.48
92	0.72	0.49	0.96	0.96	1.51	2.15
93	0.65	0.79	0.14	1.30	0.52	1.78
96	0.68	1.68	1.57	1.71	0.90	1.55
97	0.09	0.81	0.06	1.90	1.03	2.33
98	0.81	1.00	1.72	2.01	2.10	3.13
99	0.48	0.94	1.42	2.17	0.50	0.88
Promedio	0.62±0.38	1.30±0.76	1.01±0.76	1.74±0.42	0.95±0.60	1.90±0.63

Asignación	CM-1		CM-2	
Día Experimental	Ánodo (ppm)	Cátodo (ppm)	Ánodo (ppm)	Cátodo (ppm)
64	0.21	1.08	0.37	2.91
65	0.50	2.28	0.50	2.10
85	1.50	2.58	1.96	2.69
92	0.43	1.00	1.57	1.93
93	0.21	1.20	2.23	2.33
96	0.21	1.32	2.60	3.00
97	2.23	3.32	3.15	3.40
98	1.20	1.60	1.92	2.56
99	0.18	0.58	1.05	1.43
Promedio	0.74±0.73	1.66±0.88	1.70±0.93	2.48±0.60

Las siguientes figuras (43 y 44) presentan los valores de los potenciales de ánodos y cátodos en los días experimentales en que se monitoreó el oxígeno disuelto para las celdas de placa perforada y malla de alambre más sobresalientes (CP-1 y CM-1).

Este parámetro en la zona del ánodo de la celda CP-1 registró una concentración de 0.72 ppm de oxígeno cuyo potencial anódico fue de -478.5 mV durante el día 92 experimental; esta fecha presentó un nivel bajo de su electrolito debido a que la planta requiere absorber esta

solución como fuente vital. Cuando el electrolito se encontraba con un nivel bajo, las concentraciones del oxígeno disuelto en las regiones anódicas de las CCMV se mostraban con un incremento a diferencia de los días en que se hallaban con adecuado nivel de SN, siendo favorables las condiciones para el registro de este dato. Lo anteriormente comentado se puede sostener notando los días 96 y 98 de la experimentación cuyas concentraciones fueron de 0.68 y 0.81 ppm respectivamente, días en que la celda presentaba nivel bajo de su anolito a comparación de los días en que era adecuado para evitar que el oxígeno ambiental estuviera más próximo a la zona del ánodo, como fueron los días 93, 97 y 99, registrando concentraciones de 0.65, 0.09 y 0.48 ppm respectivamente. La concentración de oxígeno en el cátodo durante el día 92 experimental presentó 0.49 ppm, cifra menor en comparación con las siguientes fechas debido a la alteración por la disminución del nivel de la solución.

El comportamiento del oxígeno disuelto en la celda CM-1, cuya configuración era de malla de alambre, fue distinto con respecto a CP-1, debido a que su especie vegetal presentaba signos de mayor vitalidad en las fechas que se valoró el oxígeno disuelto. Las primeras concentraciones al tomar lecturas del oxígeno disuelto para la celda CM-1 fueron de 0.43 y 0.21 ppm en la zona del ánodo, sin embargo, esta celda presentó fuga de su anolito en el día 97, provocado por el desgaste en la vía de suministro de la SN, como se explicó anteriormente para la **Figura 36**, causando que la concentración fuese de 2.23 ppm en este día experimental, estabilizando su concentración el día 99, con una concentración de 0.18 ppm en su concentración de oxígeno cuyo nivel de SN fue más favorable para realizar esta acción.

Las concentraciones de oxígeno disuelto presente en el catolito estuvieron entre los rangos de 1.00 y 1.32 ppm, sin embargo, la anomalía que presentó la celda debido a la fuga que se mencionó, también alteró la concentración de oxígeno en esta región, ya que para esta fecha se registró de 3.32 ppm de oxígeno; este dato es elevado porque el catolito estuvo más expuesto al oxígeno proveniente del ambiente, al no tener suficiente nivel de solución nutritiva en la celda y

estabilizándose con valores más confiables en días posteriores, en donde el nivel de solución era más adecuado.

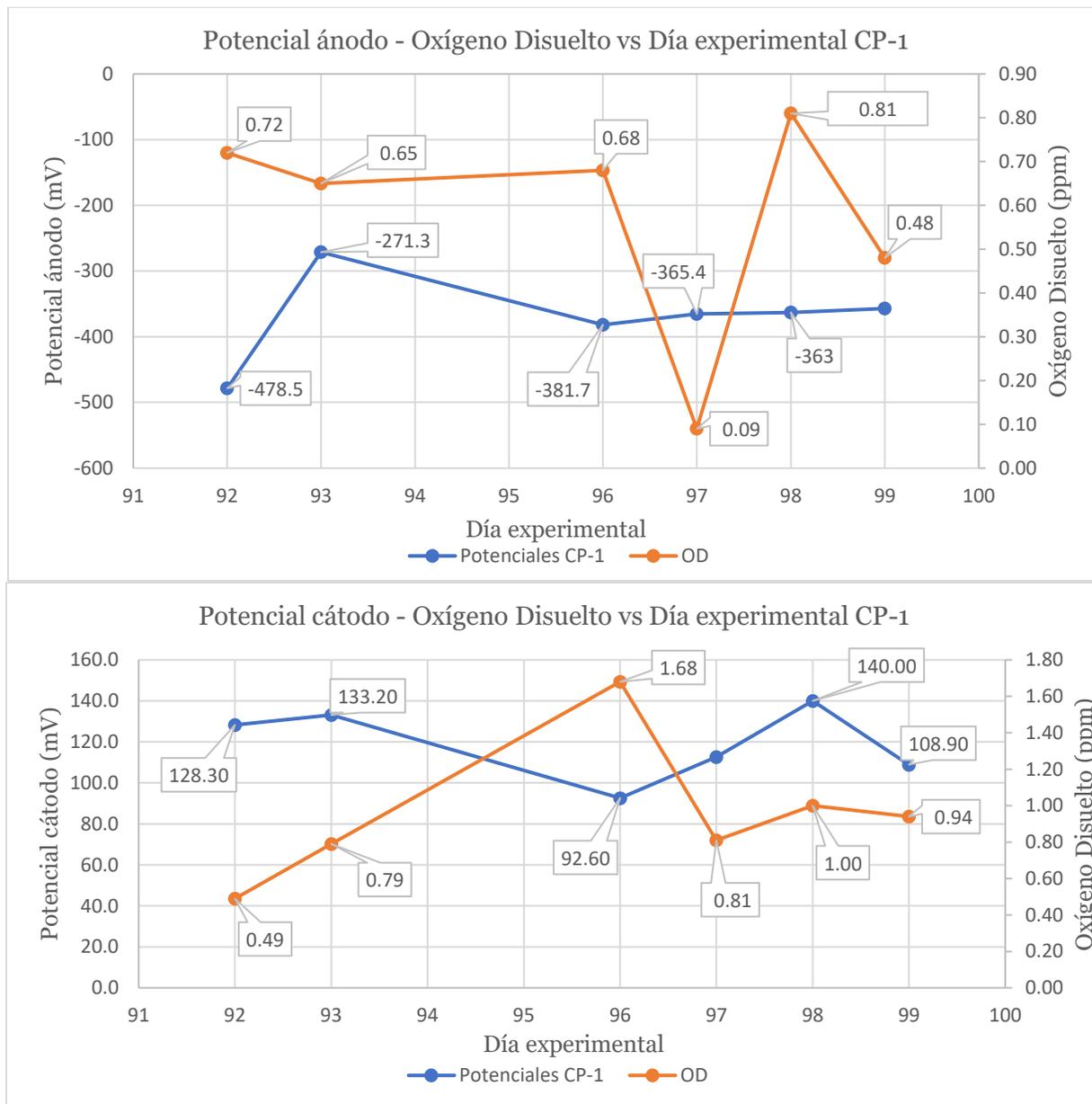


Figura 43. Potenciales de ánodo y cátodo con concentraciones de oxígeno disuelto en celda de combustible microbiana vegetal de placa 1

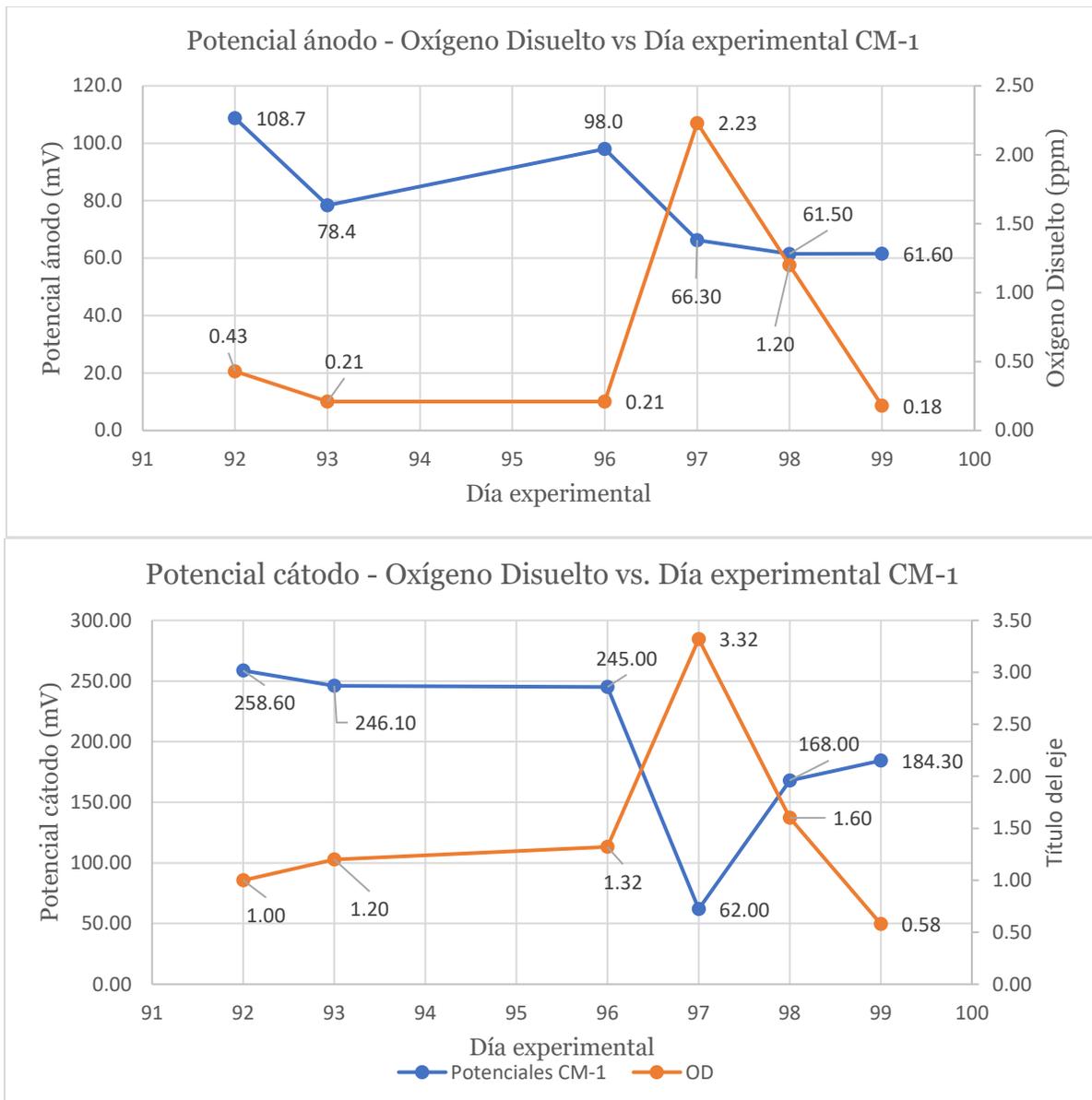


Figura 44. Potenciales de ánodo y cátodo con concentraciones de oxígeno disuelto en celda de combustible microbiana vegetal de malla 1

CAPÍTULO VII

Conclusiones y recomendaciones

7.1 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se enlistan las conclusiones más importantes producto de la investigación desarrollada, agregando algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, el material más apto para construir CCMV en HA-AEQ es la placa de acero inoxidable aleación 316, seguida de la malla de acero inoxidable 14x14 aleación 304. El tipo de aleación fue determinante debido a que, al tener un menor contenido de hierro, el efecto de la corrosión es menor y la conductividad eléctrica mejora.
- Los materiales no recomendados como colectores de corriente, son la malla de acero 150x150 y el alambre. En el caso de la malla, aunque su aleación es 304, el diámetro de los alambres hace que sea frágil y tenga más exposición a la corrosión. Por otro lado, el alambre tiene una aleación con mayor contenido de hierro lo que la hace más susceptible a la corrosión, lo anterior es evidente en los primeros días de experimentación. La presencia de los productos de corrosión en los electrodos (ánodo y cátodo) alteró determinantemente los potenciales y el voltaje de la celda proporcionando los valores de voltaje y corriente eléctrica más bajos.
- La mayor DP de los HA-AEQ fue obtenida por parte de las configuraciones del material de placa, destacando la celda designada como CP-1, que registró 7.2 mW/m^2 , correspondiendo a un voltaje de 225.5 mV. Por otra parte, las celdas configuradas con malla de alambre (14x14) obtuvieron una DP de $1.4 \text{ (mW/m}^2)$ con un voltaje de 99.2 mV.
- El mayor voltaje producido en circuito abierto por parte de la celda CP-1, se presentó en el día 100 de la investigación con 645.2 mV, sin embargo, para estas fechas la especie vegetal se mostraba con escasos signos de vitalidad. El voltaje máximo registrado considerando que la vitalidad de la planta fuese adecuada fue de 556.9 mV en el día 17 de noviembre correspondiendo al día experimental 40. Lo

anterior es un indicio de que la materia orgánica en descomposición proporciona una fuente que los microorganismos presentes pueden aprovechar para la producción eléctrica.

- Los materiales utilizados como colectores de corriente, al tener características diferentes, pudieron haber tenido un efecto distinto en las variables de respuesta registradas. Por ejemplo, la placa perforada puede haber presentado mayor área en su superficie, a diferencia de la malla de alambre, la cual tiene un área superficial menor. Estas características pudieron haber influido en la conducción de los electrones provenientes de la transferencia extracelular por parte de los microorganismos, beneficiando la producción eléctrica por parte de las configuraciones de placa.
- Puesto que la generación eléctrica en los HA-AEQ inicia a partir de organismos cuyas condiciones son anaerobias, la ausencia de oxígeno es un factor que propicia que el ánodo sea el único aceptor final de la TEE, por lo que, el colector de corriente, al tener una estructura más sólida y rígida puede ser una barrera para que el oxígeno se transfiera a regiones distintas de la parte catódica, resultando en un mayor potencial por parte del ánodo como se mostró en el Capítulo VI.
- Por otra parte, las configuraciones donde se empleó malla de alambre 150x150, la cual se ha referido como “tela de malla”, no reportan resultados favorables para la generación de electricidad. Este material resultó conveniente para emplearse en este tipo de investigaciones por su fácil manejo y, aunque un HA-AEQ presentó resultados favorables en los primeros días de experimentación, tanto en el colector de corriente anódico como en el catódico presentaron corrosión. La corrosión dañó el colector impidiendo la valoración de los parámetros eléctricos en estos HA-AEQ por la inestabilidad mostradas en estas mediciones.

7.2 RECOMENDACIONES

De una forma general, los HA-AEQ que se desarrollaron en este proyecto son sistemas biológicos que dependen de diversos factores para su operación. Las condiciones climáticas a las que estos sistemas son expuestos son un factor importante para el crecimiento adecuado de su especie vegetal, la cual, además de requerir precaución al colocarse, es necesario mantener vivo la especie vegetal para obtener resultados óptimos. Por ejemplo, la falta de suministro del ARS altera los parámetros físico - químicos medidos. El ARS debe mantenerse en un nivel tal que no inunde por completo el dispositivo para así evitar desbordamientos, previniendo mediciones erróneas de los parámetros físico-químicos. Por lo anterior se recomienda establecer, desde la fase previa al experimento, las condiciones idóneas que requiere la especie vegetal para su correcta sobrevivencia.

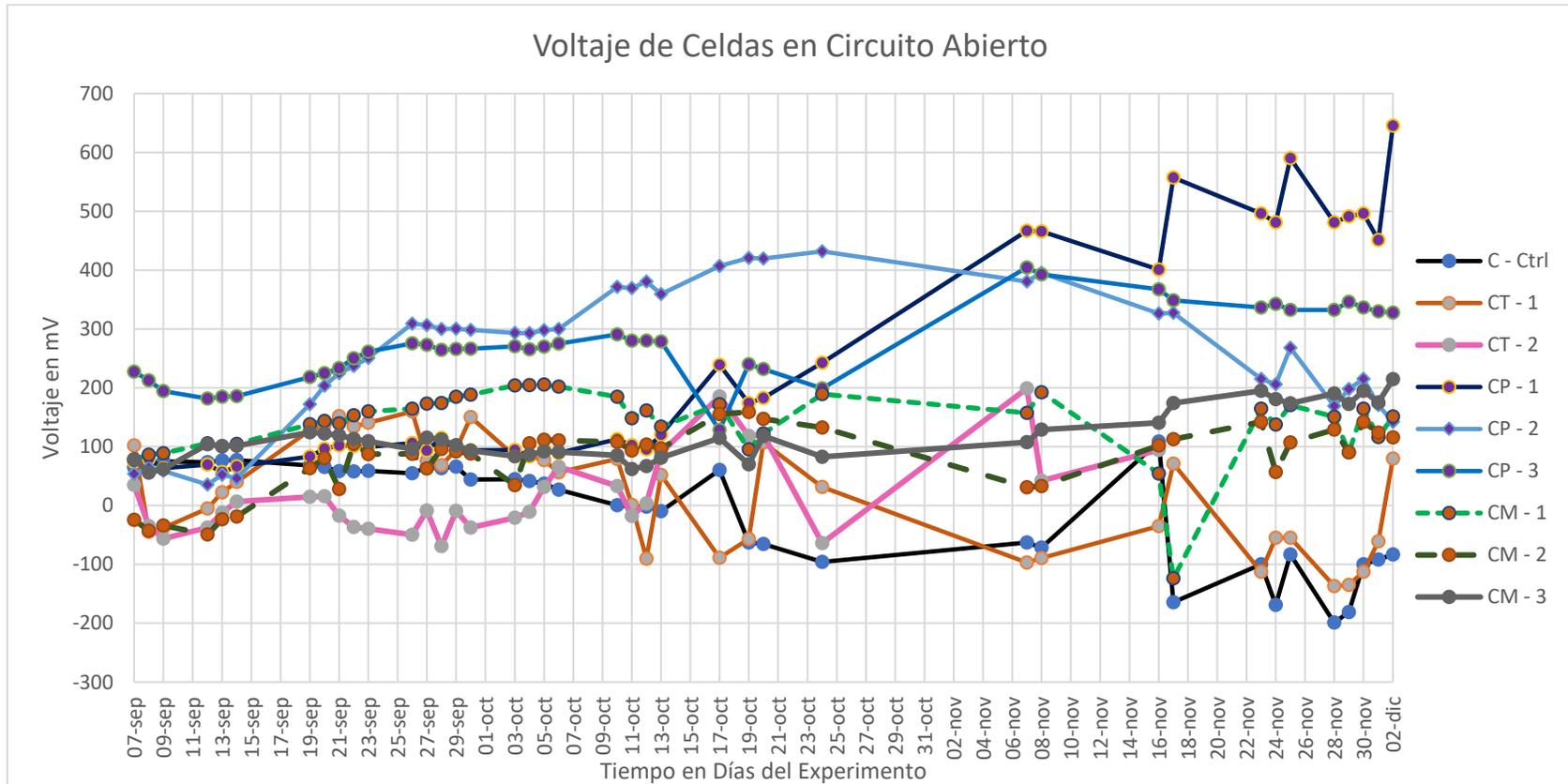
Por otra parte, se corre el riesgo de que el cátodo sea contaminado con agentes provenientes del entorno, por ejemplo: polvo, hojas de árbol, entre otros. Por lo que se recomienda mantener una constante limpieza del cátodo y evitar que dichos factores aumenten la resistencia eléctrica propia del material.

Con respecto a la activación de los electrodos constituidos por fieltro de carbono, es necesario tener precaución en el momento de realizar el tratamiento térmico para evitar que se desgaste por la exposición a alta temperatura durante el procedimiento. También se recomienda evitar alterar la estructura de los bio-electrodos durante el la unión del material empleado como colector de corriente con los fieltros de carbono.

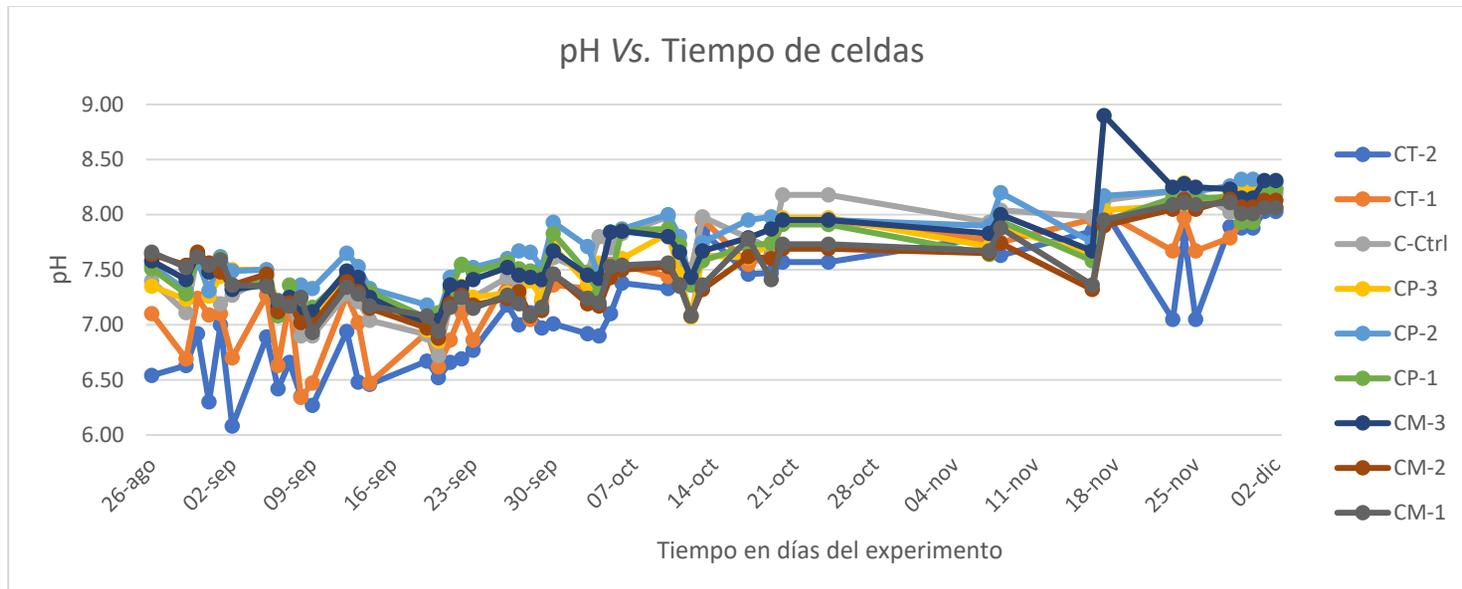
CAPÍTULO VIII

Anexos

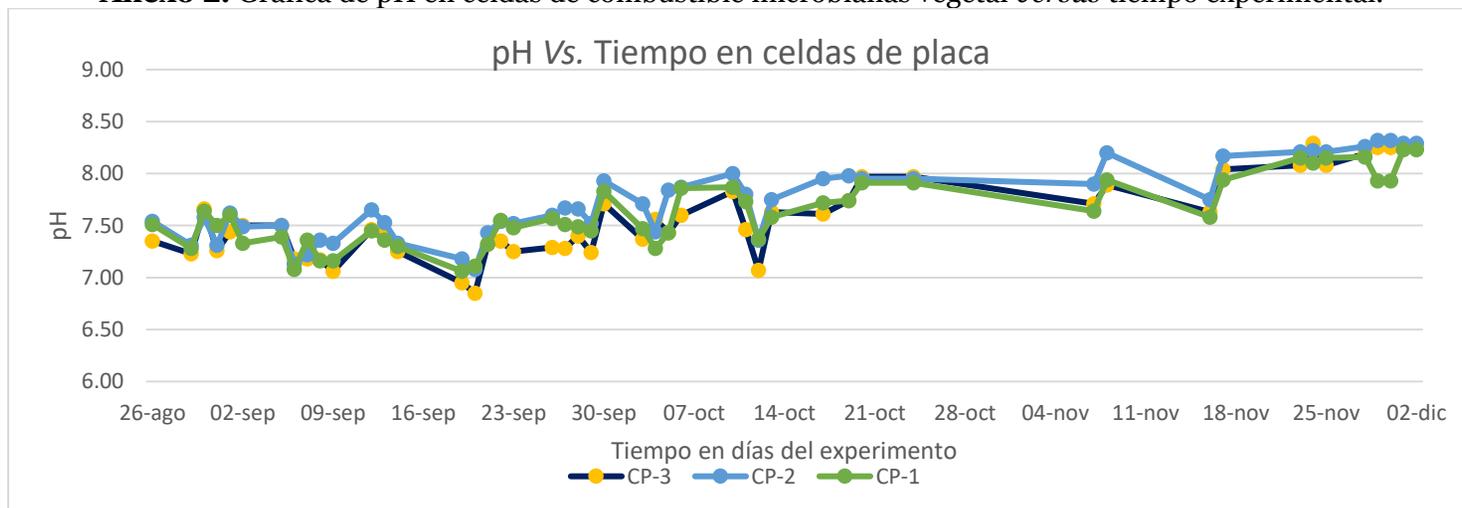
En este capítulo se muestran algunas gráficas que no se incluyeron en la sección de resultados por ser consideradas de menor influencia en las variables de respuesta principales, pero que han ayudado a sustentar las conclusiones finales.



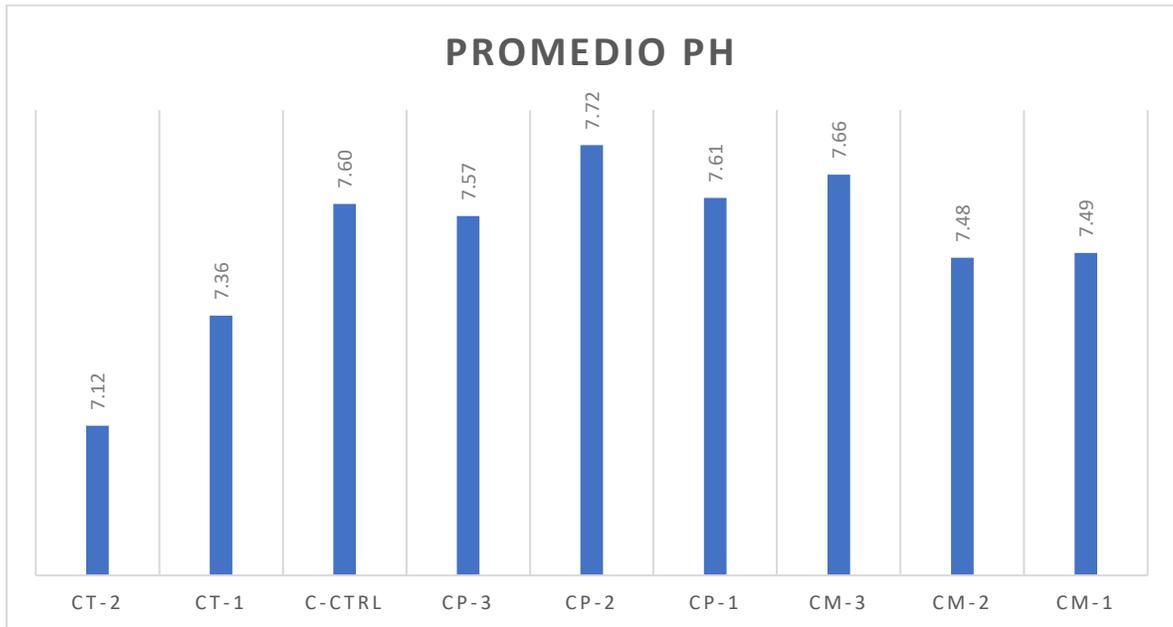
Anexo 1. Voltaje en circuito abierto de celdas de combustible microbianas vegetal *versus* tiempo experimental



Anexo 2. Gráfica de pH en celdas de combustible microbianas vegetal *versus* tiempo experimental.



Anexo 3. pH de configuraciones de celdas placa



Anexo 4. Promedio de pH de configuraciones de celdas de combustible microbianas

REFERENCIAS

- Agence France-Presse. (12 de junio de 2021). *Consumo de energías fósiles es 80% del total, igual que hace 10 años; principal responsable del calentamiento global*. Obtenido de El Economista: <https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Consumo-de-energias-fosiles-es-80-del-total-igual-que-hace-10-anos-el-principal-responsable-del-calentamiento-global-20210615-0009.html>
- Angulo, A., Galindo, A., Avendaño, R., & Pérez, C. (2012). *Biología Celular*. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Cercado-Quezada, B., Marie-Line, D., & Bergel, A. (2006). Electrochemical micro-structuring of graphite felt electrodes for accelerated formation of electroactive biofilms on microbial anodes. *ScienceDirect*, 512-518.
- Cházaro-Ruiz, L., Cercado, B., Razo-Flores, E., Ruiz, V., López-Prieto, I., & Buitrón, G. (2013). Biotic and abiotic characterization of bioanodes formed on oxidize carbon electrodes as a basic to predict their performance. *Biosensors anda Bioelectronics*, 373-384.
- Consejo Consultivo del Agua (CCA). (2022). *Situación y contexto de la problemática del agua en México*. Obtenido de Centro Virtual de Información del Agua: <https://www.aguas.org.mx/sitio/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua.html>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia: Nelson Antequera.
- Ediciones Larousse, S.A. de C.V. (2023). *Larousse diccionario esencial Química*. México : Larousse Editorial, S. L.
- ENERGÍAS RENOVABLES. (16 de junio de 2022). *ENERGÍAS RENOVABLES. El periodismo de las energías limpias*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-renovables-crecen-un-1-en-una-20220615>

- Erazo, G. (2015). Evaluación de medios de empaque para un reactor que simula un humedal artificial asistido electroquímicamente. *Tesis de Licenciatura*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- F.C.E.A. (19 de febrero de 2018). *Aguas residuales y contaminación en México*. Obtenido de Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental: <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico>
- Farias, N. (octubre de 2016). Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la producción de energías alternas. *Tesis que para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*. Querétaro, Santiago de Querétaro, México: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
- Franks, A., & Nevin, K. (2010). Microbial fuel cells, a current review. *Energies*, 899-919.
- Fuquene, S., & López, L. (abril de 2017). Análisis del modelo matemático de una celda de combustible de óxido sólido (SOFOC) empleando como combustible el gas de síntesis, producido en la gasificación de biomasa. *Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero Químico*. Bogotá, Colombia.
- García, L. (31 de agosto de 2018). *Problemáticas económicas del agua en México*. Obtenido de Divulgación de la ciencia Universidad Nacional Autónoma de México (DGDCUNAM): <http://ciencia.unam.mx/leer/775/problematicas-economicas-del-agua-en-mexico>
- García-Guel, Y., Múzquiz-Ramos, E., & Ríos-Hurtado, J. (2019). Telas de carbón activado: generalidades y aplicaciones. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 1-16.
- Gaurav, K., Singh, R., Tiwari, B., & Srivastava, R. (2019). Novel proton exchange membranes based on PVC for microbial fuel cells. *Polymer Engineering*, 360-367.
- Ibarra, R. (30 de Abril de 2020). El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano.

SciELO, 569-597. Obtenido de SciELO México:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0041-86332018000200569#aff1

INDURA S.A. (2010). *Manual Aceros inoxidable*. Cerrillos, Chile.

Jarabo, F., Pérez, C., Elortegui, N., Fernández, J., & Macías, J. (1988). *El Libro de las Energías Renovables*. Madrid: S.A. de Publicaciones Técnicas.

Logan, B., & Rabaey, K. (2012). Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies. *sciencemag*, 686-689.

Luviano-Vigueras, J. (2020). Caracterización electroquímica de celdas de combustible microbianas vegetales para la producción de energía renovable. . *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química Industrial* . México, México: Instituto Politécnico Nacional.

Marín, J., & Hernández, M. (2013). *Los humedales, sus funciones y su papel en el almacenamiento de carbón atmosférico*. Obtenido de Instituto de Ecología: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/172-los-humedales-sus-funciones-y-su-papel-en-el-almacenamiento-del-carbono>

Matex. Materiales Textiles, S.A. de C.V. (2020). *Catálogo Mallas Metálicas*. México.

Merino, M. (agosto de 2009). Diseño de humedales artificiales de flujo libre superficial y subsuperficial para el tratamiento de agua residual doméstica. *Tesis que para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias en la especialidad de Ingeniería Ambiental*. Querétaro, Santiago de Querétaro, México: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

MILENIO. (16 de febrero de 2021). *¿Cómo se genera y distribuye la electricidad en México?* Obtenido de MILENIO: <https://www.milenio.com/negocios/energia-electrica-genera-distribuye-electricidad-mexico>

Miranda-Méndez, O. (julio de 2017). Producción de electricidad en sistemas de humedales artificiales asistidos electroquímicamente: Flujo continuo versus flujo intermitente. *Tesis*

- que para optar por el grado de: Maestro en Ingeniería.* Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Montenegro-Rosero, k., Fernández , L., Villamar-Ayala, C., & Espinoza-Montero, P. (2019). HUMEDALES ARTIFICIALES Y CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANAS COMO SISTEMAS INDIVIDUALES Y COMBINADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: UNA REVISIÓN. *Info ANALÍTICA*, vol. 7, núm. 2.
- Moselle, B., Padilla, J., & Schmalensee, R. (2010). *Electricidad verde energías renovables y sistema eléctrico.* Barcelona: Marcial Pons.
- Nairobi. (20 de octubre de 2021). *Los planes de producción de combustibles fósiles de los gobiernos están peligrosamente fuera de sincronía con el Acuerdo de París.* Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP): <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/los-planes-de-produccion-de-combustibles-fosiles-de-los>
- OLADE. (2020). *Generación eléctrica mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y su impacto en el sector energético por la pandemia producida por el COVID – 19.* Obtenido de Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe (sieLAC): www.olade.com
- Poggi-Varaldo, H. M., Solorsa-Feria, O., & Vázquez-Larios, A. L. (2010). *Celdas de combustible microbianas.*
- Ramírez, S. (2017). Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio. *Tesis: que para obtener el título de Química.* México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la real academia española.* Obtenido de Asociación de Academias de la Lengua Española: <https://dle.rae.es>

- Revelo, Dolly, M., Hurtado, Nelson, H., & Jaime, O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 17-28.
- Rodríguez, F., Solorza, O., & Hernández, E. (2010). *Celdas Microbianas*. Canadá: Rodríguez, Solorz, Hernández.
- Salinas-Juárez, M. (noviembre de 2016). Estudio de la generación de electricidad en un humedal artificial asistido electroquímicamente. *Tesis que para optar por el grado de Doctorado en Ingeniería*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Salinas-Juárez, M., Cruz-Martínez, h., & Solorza-Feria, O. (2022). Humedales Artificiales Asistidos Electroquímicamente. En M. Salinas-Juárez, M. Tellez, H. Alfaro, & H. Cruz, *Contribuciones destacadas en conversión y almacenamiento de energía* (págs. 137-167). México: Salinas-Juárez, Tellez, Alfaro, Cruz.
- Schallenberg, J. C., Piernavieja, P., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M., . . . Subiela, V. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias.
- Secretaría de Energía. (2021). *Marco Jurídico del Reporte de Avance de Energías Limpias*. Ciudad de México. Obtenido de gobierno de México.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *LINEAMIENTOS TÉCNICOS*:. México.
- Secretaría del Medio Ambietne (Sedema). (06 de mayo de 2023). *Secretaría del Medio Ambiente*. Obtenido de Gobierno de la ciudad de México: <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agua%20residual>
- Shaukatali, N., Moshin, A., & Shantosh, K. (2018). Construction of Ag/AgCl Reference Electrode from Used Felt-Tipped Pen Barrel for Undergraduate Laboratory. *Chemical Education*, 355.
- Stanier, R., Ingraham, J., Wheelis, M., & Painter, P. (1992). *Microbiología*. Reverté.

Tyler-Miller, J. G. (2002). *Introducción a la Ciencia Ambiental, desarrollo sostenible de la Tierra*. Thomson Editores, S.A. de C.V.

Universidad Nacional Autónoma de México. (13 de agosto de 2018). *En México, sólo solo el 57% de las aguas residuales son tratadas correctamente*. Obtenido de iAgua: <https://www.iagua.es/noticias/unam/investigadores-unam-senalan-necesidad-tratar-aguas-residuales-mexico>

Vázquez, A., Solorza, O., Vázquez, G., Ríos, E., Poggi , H., & Rinderknecht, N. (2011). Internal Resistance and performance of Microbial Fuel Cells: Influence of Cell Configuration and Temperature. *New Materials for Electrochemical Systems*, 099-105.

Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable (RINDERESU)*, 41-58.

PARTICIPACIÓN EN EVENTOS ACADÉMICOS

- “Séptimo Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos 2021”, 1 y 2 de octubre de 2021 (en línea).
Laboratorios de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, Facultad de Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México
- XXI Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno 2021 (en línea). Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca
- “Simposio Ambiental y Bioenergía 2022”, 13 de octubre de 2022 (en línea).
Asociación de Biotecnología, Ingeniería Ambiental y Energías Renovables.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), México
- “17° Congreso de Investigación”, 10 de diciembre de 2021 (en línea).
División de Estudios de Posgrado e Investigación de FESZ. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México, México
- “5° Encuentro Estudiantil de Ingeniería Química 2022”, 9 de diciembre de 2022. (presencial). Consejo Académico del Área de las Ciencias Físico Matemáticas y de las Ingenierías. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
Primer lugar en cartel.