



**Universidad Nacional Autónoma de México**

---

**Facultad de Química**

**Evaluación de humedales artificiales asistidos  
electroquímicamente con diferentes separadores  
entre los electrodos**

**Tesis**

**Que para obtener el título de :**

**Ingeniero Químico**

**Presenta :**

**Alan Alberto Pacheco Ramírez**

**Tutora de tesis :**

**Dra. María Guadalupe Salinas Juárez**

**Ciudad Universitaria, CDMX, 2023**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:** Francisco Javier Garfias Vázquez

**Secretario:** María Rafaela Gutiérrez Lara

**1er. vocal:** María Guadalupe Salinas Juárez

**2do. vocal:** Tatiana Eugenievna Klimova Berestneva

**3er. Vocal:** Aurora de los Ángeles Ramos Mejía

## Lugar donde se desarrolló la tesis:

Laboratorio 7 de la UMIEZ de la FES Zaragoza, UNAM

## Asesor del tema

Dra. María Guadalupe Salinas Juárez \_\_\_\_\_

## Sustentante

Alan Alberto Pacheco Ramírez \_\_\_\_\_

## **Declaratoria**

Declaro conocer el código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la legislación universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o de referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

---

Alan Alberto Pacheco Ramírez

# Agradecimientos

*A los laboratorios 301, 302 y 303 del conjunto E de la Facultad de Química y al programa de ingeniería y química ambiental por prestar sus instalaciones para realizar la síntesis de los materiales.*

*Al financiamiento del proyecto PAPIIT IA 107020 de la Dirección General de Asuntos del Personal Académicos de la UNAM.*

*A la FESZ por proporcionar los espacios, los materiales, equipos e instrumentos que se emplearon en la realización de los experimentos.*

*A mis padres y hermana por su apoyo durante esta época tan difícil, sin su ayuda, esta aventura nunca podría haber llegado a este punto.*

*A los amigos que siempre han estado a mi lado brindándome su apoyo, comprensión y ánimo cuando más lo necesitaba.*

*A la Dra. María Guadalupe Salinas Juárez por su dedicación, paciencia y apoyo; gracias a ella este proceso fue exitoso.*

*Agradezco a Google por permitirme usar sus diversas plataformas para buscar, almacenar, procesar y compartir la información que se generó durante este trabajo de investigación.*

*Un agradecimiento especial a Alexandra Elbakyan, ya que gracias a su trabajo e ideales este proyecto pudo llegar a su culminación.*

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a:

Mi padre, Mario Pacheco, gracias a que él fue mi mayor inspiración para perseguir mi vocación y sentar las bases de mi perfil profesional, ya que ha sido un gran ejemplo de rectitud, profesionalismo, lealtad, honestidad y compromiso.

A mi madre, Reina Ramírez, mujer de temple inquebrantable cuyas enseñanzas me ayudaron a enfrentar las adversidades y, cual guerrero mixteca, mantenerme en pie a pesar de que tener todo en contra.

A mi hermana, Citlalli Pacheco, mujer de corazón sensible, cuya compasión me ha enseñado a confiar poco a poco en las personas e incluso a perdonar a aquellos que han cometido errores.

A los maestros de la facultad de química que, con su esfuerzo y dedicación, me ayudaron a alcanzar mis metas y a definir mi perfil profesional.

A las mascotas que me han acompañado a lo largo de estos 27 años, su amor sincero y lealtad me mantuvo cuando a flote cuando la situación fue adversa.

# Índice de contenido

<b>JURADO ASIGNADO</b> .....	<b>2</b>
<b>DECLARATORIA</b> .....	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>13</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>15</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>1.1 Generalidades sobre el consumo de agua</b> .....	<b>20</b>
<b>1.2 Panorama sobre la contaminación del agua</b> .....	<b>23</b>
<b>1.3 Contaminación generada por la quema de combustibles fósiles en la     producción de electricidad y otros procesos</b> .....	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>30</b>
<b>2.1 Soluciones potenciales al problema de la contaminación cotidiana</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2 Alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados</b> .....	<b>37</b>
2.2.1 Celdas de Combustible Microbianas (CCM) .....	38
2.2.2 Celdas de Combustible Microbianas Vegetales (CCMV) .....	41
2.2.3 La membrana de separación .....	44

<b>2.3 Crecimiento de bacterias en condiciones de laboratorio .....</b>	<b>48</b>
<b>2.4 Generación de electricidad a partir del proceso de tratamiento de aguas .....</b>	<b>50</b>
<b>2.5 Justificación del proyecto .....</b>	<b>51</b>
<b>2.6 Objetivos del proyecto.....</b>	<b>52</b>
<b>2.7 Metas y alcances .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1 Construcción del sitio experimental (invernadero).....</b>	<b>54</b>
<b>3.2 Síntesis de los separadores o “membranas” de separación .....</b>	<b>55</b>
3.2.1 Síntesis del separador de barro con una carga del 5% de CaCO <sub>3</sub> (BaCa) y el separador de barro (Ba).....	57
3.2.2 Síntesis del separador PASH y del separador PAS .....	60
3.2.3 Síntesis del agente sulfonante (sulfato de dietilo).....	61
3.2.4 Síntesis del separador POLS y del separador POL .....	62
3.2.5 Síntesis del separador Gt y del separador GtS.....	63
<b>3.3 Construcción y montaje de los humedales artificiales asistidos electroquímicamente (HAAE o CCMV) .....</b>	<b>64</b>
<b>3.4 Recopilación de los datos experimentales (circuito abierto y circuito cerrado) en los HAAE.....</b>	<b>68</b>
3.4.1 Recolección de los datos para la construcción de las curvas de polarización ...	70
<b>3.5 Análisis de los datos experimentales .....</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>80</b>
<b>4.1 Resultados de la síntesis de materiales .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2 Desempeño promedio de los HAAE en la producción de voltaje .....</b>	<b>81</b>
4.2.1 Desempeño de la celda de control (CC) durante el experimento .....	81

4.2.2 Desempeño de los HAAE que incorporan un separador entre los electrodos durante el experimento .....	83
4.2.3 Hipótesis sobre el crecimiento de poblaciones bacterianas en la zona anódica de los HAAE .....	91
<b>4.3 Resultados del análisis de varianza (ANOVA) .....</b>	<b>92</b>
4.3.1 Resultados de la prueba de Dunnet .....	94
<b>4.4 Análisis de las curvas de polarización de CC, CPOL y CPOLS.....</b>	<b>99</b>
<b>4.5 Resistencia interna de CC, CPOL y CPOLS .....</b>	<b>107</b>
<b>4.6 Parámetros fisicoquímicos adicionales .....</b>	<b>108</b>
4.6.1 Valores de pH registrados en los HAAE .....	108
4.6.2 Temperatura interna (Tc) de los HAAE.....	111
4.6.3 Consumo de solución nutritiva (SN) en los HAAE .....	113
4.6.4 Conductividad eléctrica en los HAAE.....	115
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>5.1 Recomendaciones para futuras líneas de experimentación .....</b>	<b>119</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO 1. ELECTRODOS DE REFERENCIA.....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXO 2. SOLUCIÓN NUTRITIVA (SN).....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXO 3. ANOVA DE LA PRODUCCIÓN DE VOLTAJE EN LOS HAAE.....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXO 4. ESTIMACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA POR MEDIO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO 5. GRUESO DE DATOS EXPERIMENTALES (COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS EN LOS HAAE Y CURVAS DE POLARIZACIÓN).....</b>	<b>141</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Distribución del consumo estimado del agua en México en el año 2018, gráfico elaborado con datos de CONAGUA del año 2018 .....	21
<b>Figura 2</b> Caudal tratado (m <sup>3</sup> /s) en las PTAR a nivel nacional por estado en el 2019, gráfico elaborado con datos de CONAGUA [5].....	26
<b>Figura 3</b> Distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional, gráfico elaborado con datos del INEGyCEI del año 2019 [16] .....	28
<b>Figura 4</b> Capacidad instalada de las PTAR por estado en el 2019; gráfico elaborado con datos de CONAGUA [5].....	31
<b>Figura 5</b> Esquema de un humedal de flujo superficial, elaboración propia.....	35
<b>Figura 6</b> Esquema de un humedal de flujo subsuperficial, elaboración propia .....	36
<b>Figura 7</b> Esquema de una CCM, elaboración propia.....	39
<b>Figura 8</b> Esquema de una CCMV, elaboración propia.....	42
<b>Figura 9</b> Efecto de la membrana en la separación de componentes entre la fase “A” y la fase “B”, elaboración propia .....	44
<b>Figura 10</b> Esquema de una MII de tipo matriz polimérica, elaboración propia .....	45
<b>Figura 11</b> Esquema de una celda unitaria de una MII de tipo red cristalina, elaboración propia .....	46
<b>Figura 12</b> Diagrama de las fases de crecimiento bacteriano en condiciones de laboratorio, elaborado con los datos del modelo predictivo de ComBase [31] .....	50
<b>Figura 13</b> Vista general del invernadero y del criadero de plantas .....	54
<b>Figura 14</b> Activación del PAS con HCl, elaboración propia.....	55
<b>Figura 15</b> Sulfonación del poliestireno con sulfato de dietilo, elaboración propia.....	56

<b>Figura 16</b> Esquema del humedal artificial asistido electroquímicamente a escala laboratorio, elaboración propia .....	64
<b>Figura 17</b> Diagrama de los electrodos, elaboración propia .....	65
<b>Figura 18</b> Sistemas experimentales ensamblados y distribuidos a lo largo de la mesa del invernadero; elaboración propia .....	68
<b>Figura 19</b> Representación esquemática de la toma de datos a circuito abierto con el multímetro 1. Medición del potencial del ánodo, 2. Medición del potencial del cátodo, 3. Medición del voltaje de la celda; elaboración propia .....	69
<b>Figura 20</b> Ejemplo de la toma de pH en las CCMV con el equipo HANNA edge 2020-01, elaboración propia .....	70
<b>Figura 21</b> Ejemplo de una curva de polarización con las 3 zonas que la caracterizan (zona de activación, zona de trabajo y zona de transferencia de masa), elaboración propia ..	73
<b>Figura 22</b> Esquema del sistema para la toma de los datos de la curva de polarización	75
<b>Figura 23</b> Fragmentos de los separadores sintetizados, elaboración propia .....	80
<b>Figura 24</b> Desempeño de la CC con respecto al voltaje y al potencial de los electrodos durante el experimento.....	82
<b>Figura 25</b> Comparativo entre las tendencias de los potenciales anódicos de CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia .....	84
<b>Figura 26</b> Comparativo entre las tendencias de los potenciales anódicos $V_a$ de las CC, CBa y CBaCa durante el experimento, elaboración propia .....	84
<b>Figura 27</b> Voltaje promedio producido en las CCMV durante el experimento, elaboración propia .....	85
<b>Figura 28</b> Eficiencia de las CCMV para el voltaje generado, tomando como referencia a la CC, elaboración propia .....	86

<b>Figura 29</b> Comparativo entre las tendencias de los Vp de las CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia .....	87
<b>Figura 30</b> Concentración promedio de OD (ppm) registrada en las CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia .....	88
<b>Figura 31</b> Comparativo entre las tendencias de los Vc de CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia .....	89
<b>Figura 32</b> Comparativo entre el potencial del ánodo de la CC y las fases del crecimiento bacteriano en condiciones de laboratorio. Gráfico elaborado con los datos del modelo predictivo de ComBase [31] y los datos obtenidos durante el experimento, elaboración propia .....	92
<b>Figura 33</b> Curva de polarización de la CC, elaboración propia.....	100
<b>Figura 34</b> Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente en la CC .....	102
<b>Figura 35</b> Curva de polarización de la CPOL, elaboración propia .....	103
<b>Figura 36</b> Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente para la CPOL .....	105
<b>Figura 37</b> Curva de polarización de las CPOLS, elaboración propia.....	105
<b>Figura 38</b> Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente para la CPOLS .....	107
<b>Figura 39</b> Cambio en el pH de las CCMV durante el experimento, elaboración propia .....	109
<b>Figura 40</b> Diagrama de Pourbaix para la existencia de especies del Fe .....	110
<b>Figura 41</b> Cambio en la temperatura interna (Tc) de las CCMV durante el experimento, elaboración propia.....	112

<b>Figura 42</b> Consumo de SN durante el experimento.....	114
<b>Figura 43</b> Diagrama del circuito de galvanoplastia, 1: pila de 9V, 2: interruptor, 3: cables con terminales de caimán, 4: cátodo (electrodo para recubrir), 5: ánodo (electrodo de sacrificio), 6: vaso de precipitados con la solución 0.05 M; elaboración propia. ....	130
<b>Figura 44</b> Perfiles de DQO en los TA y las CCMV entre el día 70 y 90 del experimento .....	137
<b>Figura 45</b> Remoción de materia orgánica para cada una de los HAAE.....	139
<b>Figura 46</b> Desempeño de las CCMV con respecto a la CC.....	140
<b>Figura 47</b> Evolución de CBa durante el experimento, elaboración propia .....	149
<b>Figura 48</b> Evolución de CBaCa durante el experimento, elaboración propia .....	153
<b>Figura 49</b> Evolución de la CPOL durante el experimento, elaboración propia.....	157
<b>Figura 50</b> Evolución de la CPOLS durante el experimento, elaboración propia .....	161
<b>Figura 51</b> Evolución de la CPAS durante el experimento, elaboración propia .....	165
<b>Figura 52</b> Evolución de la CPASH durante el experimento, elaboración propia .....	169
<b>Figura 53</b> Evolución de la CGt durante el experimento, elaboración propia.....	173
<b>Figura 54</b> Evolución de la CGtS durante el experimento, elaboración propia .....	177
<b>Figura 55</b> Curvas de polarización de CBa, elaboración propia.....	180
<b>Figura 56</b> Curvas de polarización de CBaCa, elaboración propia .....	181
<b>Figura 57</b> Curvas de polarización de CPAS, elaboración propia .....	186
<b>Figura 58</b> Curvas de polarización de CPASH, elaboración propia.....	187
<b>Figura 59</b> Curvas de polarización de CGt, elaboración propia .....	189
<b>Figura 60</b> Curvas de polarización de CGtS, elaboración propia.....	191

# Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Configuración de las CCMV construidas.....	67
<b>Tabla 2</b> Intervalos de resistencia eléctrica para la construcción de las curvas de polarización .....	74
<b>Tabla 3</b> Ecuaciones para el análisis de varianza .....	77
<b>Tabla 4</b> Valores obtenidos a partir de los datos experimentales .....	93
<b>Tabla 5</b> Resultado del ANOVA .....	94
<b>Tabla 6</b> Valores para la prueba de Dunnet.....	94
<b>Tabla 7</b> Resultados de la prueba de Dunnet .....	95
<b>Tabla 8</b> Resultados de la prueba de Dunnet.....	96
<b>Tabla 9</b> Resistencia interna de las celdas .....	108
<b>Tabla 10</b> Valores de pH promedio registrados en los HAAE .....	111
<b>Tabla 11</b> Temperatura interna promedio de los HAAE durante el experimento .....	112
<b>Tabla 12</b> Conductividad eléctrica en los HAAE .....	116
<b>Tabla 13</b> Reactivos necesarios para preparar 1 L de SN.....	134
<b>Tabla 14</b> Datos aleatorios para el ANOVA .....	135
<b>Tabla 15</b> Datos experimentales de la CC recolectados durante el experimento .....	141
<b>Tabla 16</b> Datos experimentales de la CBa recolectados durante el experimento .....	145
<b>Tabla 17</b> Datos experimentales de la CBaCa recolectados durante el experimento....	149
<b>Tabla 18</b> Datos experimentales de la CPOL recolectados durante el experimento.....	153
<b>Tabla 19</b> Datos experimentales de la CPOLS recolectados durante el experimento ...	157
<b>Tabla 20</b> Datos experimentales de la CPAS recolectados durante el experimento.....	161
<b>Tabla 21</b> Datos experimentales de la CPASH recolectados durante el experimento ...	165
<b>Tabla 22</b> Datos experimentales de la CGt recolectados durante el experimento.....	169

<b>Tabla 23</b> Datos experimentales de la CGtS recolectados durante el experimento .....	173
<b>Tabla 24</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CC .....	177
<b>Tabla 25</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CBa .....	178
<b>Tabla 26</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CBaCa.....	180
<b>Tabla 27</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPOL .....	182
<b>Tabla 28</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPOL .....	183
<b>Tabla 29</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPAS.....	184
<b>Tabla 30</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPASH .....	186
<b>Tabla 31</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CGt .....	188
<b>Tabla 32</b> Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CGtS .....	189

# Glosario

<b>Catalizador</b>	Sustancia que disminuye la energía necesaria para que una reacción química se lleve a cabo, sin alterar la estequiometría de esta. Puede tratarse de una molécula ( <i>HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, etc.</i> ), un compuesto iónico (óxidos metálicos soportados en zeolita o alúmina) o de una enzima.
<b>Circuito Abierto</b>	Intervalo que abarca de los días 1 al 18 en el que los HAAE no emplean una resistencia eléctrica para interconectar al ánodo y al cátodo.
<b>Circuito Cerrado</b>	Intervalo que abarca de los días 19 al 90 en el que los HAAE emplean una resistencia eléctrica para interconectar al ánodo y al cátodo.
<b>Matriz de soporte</b>	Material poroso compuesto de arcillas, rocas o lodos. Su función principal es como soporte para las raíces de un organismo vegetal [1] y como medio filtrante para remover partículas de un diámetro mayor a $1\mu m$ [2].
<b>Rizosfera</b>	Zona ubicada en la matriz de soporte o en el suelo, en la que se aloja a las raíces de un organismo vegetal; aquí se aloja a parte de la población bacteriana que participa en la degradación del sustrato [1].
<b>Sustrato</b>	Sustancia que contiene materia orgánica y nutrientes que es susceptible a ser degradada por bacterias y microorganismos. A partir de su degradación se producen protones, electrones, metano, dióxido de carbono y otros productos de la mineralización de la materia orgánica. En algunas referencias de la literatura, la palabra “sustrato” se refiere también al medio de soporte en el que crecen las plantas, en este documento la palabra “sustrato” se refiere como el alimento de las bacterias.

# Nomenclatura

<b>(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Sulfato de dietilo
<b>ANOVA</b>	Análisis de varianza
<b>Ba</b>	Separador sintetizado a partir de barro
<b>BaCa</b>	Separador sintetizado a partir de barro modificado con cristales de carbonato de calcio
<b>C<sub>a</sub></b>	Abreviatura para Circuito Abierto.
<b>Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Fosfato de calcio
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	Cloruro de calcio
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de calcio
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	Sulfato de calcio
<b>Cat</b>	Abreviatura para catalizador
<b>CBa</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador Ba
<b>CBaCa</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador BaCa
<b>C<sub>c</sub></b>	Abreviatura para Circuito Cerrado
<b>CC</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente de control
<b>CCMV</b>	Celda de combustible microbiana vegetal
<b>CGt</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador elaborado con grenetina Gt

<b>CGtS</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador elaborado con grenetina y con tratamiento GtS
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CPOL</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador POL
<b>CPOLS</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente que incorpora el separador POLS
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Estimación de la materia orgánica por medio de la demanda bioquímica de oxígeno en un periodo de 5 días
<b>DQO</b>	Estimación de la materia orgánica por medio de la demanda química de oxígeno
<b>Ej.</b>	Abreviatura para ejemplo
<b>ENH</b>	Electrodo Normal de Hidrógeno
<b>ER</b>	Electrodo de Referencia de Ag/AgCl 3M
<b>Etc.</b>	Abreviatura para etcétera
<b>F</b>	Valor calculado de Fisher para el ANOVA
<b>Fc</b>	Valor crítico de Fisher obtenido a partir de tablas para el ANOVA
<b>FESZ</b>	Facultad de Estudios Superiores Zaragoza
<b>Gt</b>	Separador elaborado con grenetina
<b>Gts</b>	Separador elaborado con grenetina y al que se le aplicó un tratamiento
<b>H<sup>+</sup></b>	Protón

<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido sulfúrico
<b>H<sub>a</sub></b>	Hipótesis alternativa planteada para la elaboración del ANOVA
<b>HA</b>	Humedal artificial
<b>HAAE</b>	Humedal artificial asistido electroquímicamente
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>H<sub>o</sub></b>	Hipótesis nula planteada para la elaboración del ANOVA
<b>I<sub>p</sub></b>	Inundación promedio
<b>m<sub>bs</sub></b>	Masa de barro seco
<b>MIA</b>	Membrana de intercambio aniónico
<b>MIC</b>	Membrana de intercambio catiónico
<b>MII</b>	Membrana de intercambio iónico
<b>NaHCO<sub>3</sub></b>	Bicarbonato de sodio
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto
<b>PAS</b>	Separador sintetizado a partir de poliacrilato de sodio
<b>PASH</b>	Separador sintetizado a partir de poliacrilato de sodio tratado con la solución de HCl 1 M
<b>POL</b>	Separador sintetizado a partir de poliestireno
<b>POLS</b>	Separador sintetizado a partir del tratamiento de poliestireno con (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales
<b>R - COO<sup>-</sup> - H</b>	Grupo funcional carboxilo

<b>R - SO<sub>2</sub>O<sup>-</sup> - H</b>	Grupo funcional sulfonato
<b>SN</b>	Solución nutritiva
<b>SP</b>	Solución precursora
<b>T<sub>a</sub></b>	Temperatura ambiente
<b>TA</b>	Tanques de almacenamiento
<b>T<sub>c</sub></b>	Temperatura al interior de los HAAE
<b>TEE</b>	Transferencia extracelular de electrones
<b>t<sub>m</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar a los tubos de muestreo
<b>V<sub>a</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar al potencial anódico
<b>V<sub>c</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar al potencial catódico
<b>V<sub>p</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar a la producción de voltaje en los HAAE
<b>V<sub>sp</sub></b>	Volumen de disolución precursora
<b>Z<sub>a</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar a la zona anódica
<b>Z<sub>c</sub></b>	Nomenclatura designada para identificar a la zona catódica

# Capítulo 1. Introducción

En esta sección se mencionan los distintos usos que se le da al agua dulce disponible en México y, de manera general, cómo es que se contamina. La información presentada en esta sección es una recopilación de datos provenientes de fuentes gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y periodismo de investigación.

## 1.1 Generalidades sobre el consumo de agua

Para acceder a los bienes y servicios que usamos en nuestra cotidianidad se requiere emplear grandes cantidades de agua. Según los datos del Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FCEA) en el 2016 en México se consumieron aproximadamente 2,716.4 m<sup>3</sup>/s [3]. Este elevado consumo puede atribuirse a que el agua es una pieza fundamental en la mayoría de los procesos de obtención y transformación de la materia. Ya sea cumpliendo el rol de materia prima en la elaboración de: alimentos, bebidas, productos de limpieza e higiene personal, etc.; o como un medio auxiliar en la ejecución de distintos procesos (intercambio de calor, extracción de hidrocarburos, generación de electricidad, etc.).

Lo anterior tiene su fundamento en el artículo “Visión general del agua en México” [4], en dicho documento se menciona que cerca del 89.3% del agua dulce disponible en México se emplea en la iniciativa privada. Como consecuencia de la distribución anterior, para el uso doméstico solo se dispone del 10.7% restante. E incluso se puede inferir que en ciertas zonas del país el porcentaje al que la población puede acceder llega a ser inferior al 5%. De acuerdo con cifras oficiales de diciembre del 2018 [5], se menciona que por cada 84,693 hm<sup>3</sup> de agua, 61,340 hm<sup>3</sup> se destinan al sector agropecuario, 2,694 hm<sup>3</sup> a la industria autoabastecida, 14,731 hm<sup>3</sup> al sector público/urbano y 5,928 hm<sup>3</sup> tienen usos múltiples. Porcentualmente hablando (Fig. 1), la distribución del consumo se da de la siguiente manera: el sector agropecuario consume el 72.4%, la industria autoabastecida el 3.2%, el sector público/urbano el 17.4% y de usos múltiples el 7%.

Cabe recalcar que esta distribución no contabiliza los volúmenes empleados en la generación de electricidad y proyectos de conservación ambiental. Lo anterior se debe a que estos volúmenes se someten a procesos de reúso o de almacenamiento. La distribución de estos volúmenes se da de la siguiente manera: 4,147 hm<sup>3</sup> para el consumo de plantas termoeléctricas, 182,504 hm<sup>3</sup> almacenados en presas hidroeléctricas y solo 9.46 hm<sup>3</sup> para proyectos de conservación ecológica [5].

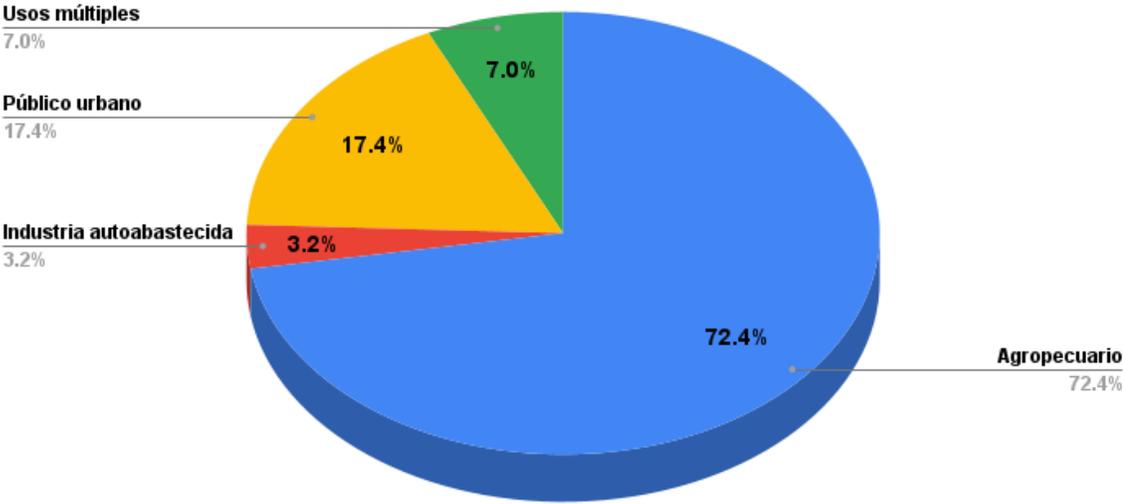


Figura 1 Distribución del consumo estimado del agua en México en el año 2018, gráfico elaborado con datos de CONAGUA del año 2018

Partiendo de la distribución presentada en la Fig. 1 y los datos mencionados anteriormente, el uso del agua se puede clasificar en 2 categorías: en uso público y privado. El sector privado es aquel que emplea el recurso para generar bienes y servicios de valor agregado. Mientras que, el sector público engloba actividades que se enfocan en la calidad de vida de las personas (consumo, limpieza, etc.).

En México, en el consumo privado se puede identificar y describir a 3 grandes consumidores:

**Agroindustria:** El sector agroindustrial es el encargado de producir vegetales, semillas, frutos y fibras. Como consecuencia de esto, se deben emplear aproximadamente 1,853 m<sup>3</sup>/s para la irrigación de los cultivos, con el principal inconveniente de que el proceso de irrigación es ineficiente. Lo anterior se infiere debido a que la mayor parte del agua empleada en la irrigación de los cultivos llega a evaporarse. La evaporación del agua evita que los cultivos puedan aprovechar completamente el agua.

Adicional al agua usada para el proceso de irrigación, en este sector también se debe contabilizar el agua necesaria para procesar los recursos obtenidos. Durante el procesado de los recursos, la etapa en donde se da el mayor consumo de agua es aquella en donde se lleva a cabo el lavado de los productos. Ya que en esta etapa pueden llegar a consumirse hasta 0.6 m<sup>3</sup>/s [6].

**Sector pecuario:** En esta clasificación encontramos a los productores de cárnicos, siendo la etapa del procesado de la carne en donde se emplea la mayor cantidad de agua. De acuerdo con estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), en promedio, se requieren de entre 5,000 a 20,000 litros de agua para la producción de 1 kg de carne [6].

**Industria alimenticia:** Otro de los grandes consumidores de agua es la industria de producción de alimentos y bebidas. Siendo estos últimos de los más grandes consumidores del vital líquido, incluso en zonas de alto estrés hídrico [7]. Debido a que este sector se encuentra contabilizado junto con otras industrias, de manera oficial, se reporta que solo se consumen 201 m<sup>3</sup>/s.

Por otra parte, en México en el sector público encontramos a los sectores:

**Público urbano:** El consumo de agua por parte del sector público contempla el uso del agua para el abastecimiento de fuentes públicas, obras públicas, pérdidas por fuga y, en épocas más recientes, sanitización de espacios. Acorde con datos proporcionados por Expansión Política [8] en el 2018, tan solo en la CDMX, se contabiliza que de cada 63 m<sup>3</sup>/s que se bombeaban, cerca de 21.5 m<sup>3</sup>/s se perdía debido a fugas en el sistema de tuberías.

**Doméstico:** En esta sección se contabiliza a la población en general. Se estima que en este sector se consumen, en promedio, hasta 1.2 m<sup>3</sup>/s [5]. Aquí se contabilizan actividades como: el aseo personal, la limpieza y el mantenimiento del hogar, el aseo de pertenencias y el consumo humano.

Las actividades que se desempeñan en este sector no generan productos o servicios de valor agregado de una manera directa, sin embargo, se consideran vitales para que la población pueda acceder a dichos beneficios.

## 1.2 Panorama sobre la contaminación del agua

Hablar sobre la contaminación del agua, en México y en el mundo, es un tema complejo y delicado, dado que esta problemática se puede abordar desde distintas perspectivas (política, económica, social, etc.). De manera general, se puede inferir que esta problemática encuentra sus raíces en eventos accidentales, incidentales y cotidianos. Estos eventos pueden ser descritos y ejemplificados de la siguiente manera:

**Contaminación accidental:** Eventos que, debido a su naturaleza azarosa e inevitable, no pueden predecirse con certeza y cuyo impacto sólo puede ser minimizado siguiendo protocolos o procedimientos basados en análisis de riesgos (Ej. HAZOP, What if).

Como uno de los ejemplos más representativos de esta categoría, a nivel mundial, se encuentra el accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi (Japón) ocurrido el 11 de marzo del 2011. En este evento la combinación de un terremoto y un tsunami devinieron en fugas de material radiactivo hacia las zonas cercanas. Como consecuencia de las fugas de radiación, las zonas cercanas a la central se clasificaron como zona de desastre. Lo que conllevó en una disminución en la calidad de vida y el desplazamiento forzado de miles de personas. La clasificación de zona de desastre permanecerá hasta que los niveles de radiación alcancen niveles tolerables para el ser humano [9] [10]. En el caso anterior, se tiene un claro ejemplo de cómo la imprevisibilidad de sistemas complejos puede llegar a producir impactos negativos en el medio ambiente y en la salud pública.

**Contaminación incidental:** Acontecimientos que tienen su origen en una incorrecta o nula aplicación de los programas ambientales, de higiene y seguridad o de mantenimiento de instalaciones. El impacto de esta clase de incidentes es visible cuando afecta de manera inmediata a la salud de las personas o cuando sus efectos perjudiciales son inmediatos en el medio ambiente. En lo que respecta a México se tienen ejemplos como: El derrame de ácido sulfúrico hacia el mar de Cortés por parte de Grupo México [11]. Evento en el cual se derramaron cerca de 3 m<sup>3</sup> de ácido sulfúrico hacia el mar de Cortés como consecuencia de un mal funcionamiento del sistema de válvulas. Evento en el cual una mala aplicación de los protocolos generó daños irreversibles en el medio ambiente y la salud pública. Si bien este evento podría clasificarse como un accidente, los pobladores de la región señalan que la empresa no lleva a cabo un correcto manejo de sus residuos y que eventos similares han ocurrido en el pasado dañando la flora y la fauna del estado de una manera irremediable. Otro ejemplo de estas malas prácticas por parte de Grupo México es lo ocurrido el 6 de agosto del 2014 en donde la empresa derramó cerca de 40 mil m<sup>3</sup> de ácido sulfúrico, contaminando el río Sonora y dejando sin agua potable a 25 mil habitantes de siete municipios [12]

Otra muestra significativa de la contaminación incidental, tanto del agua como del ambiente, es el descubrimiento de un tiradero clandestino de medicamentos en el municipio de Chiautempan en el estado de Tlaxcala [13]. El cual fue reportado en varias

ocasiones por los habitantes de la zona y por medios digitales como “El sol de México”. Esto representa un gran factor de riesgo para la población y para el ambiente, ya que a raíz de la descomposición de los medicamentos se da lugar a la contaminación del suelo, de los mantos freáticos y a la generación de microorganismos con una mayor resistencia a los fármacos

**Contaminación cotidiana:** Aquella en la que el agua se contamina como consecuencia de actividades cotidianas (industriales y domésticas). En estas actividades se emplea al agua para cumplir con un determinado objetivo (Ej. aseo, manufactura, consumo, etc.), una vez que el agua ha cumplido con su propósito esta se descarga en una red de alcantarillado o en el ambiente.

Este tipo de emisiones se encuentran reguladas por organismos gubernamentales (Ej. CONAGUA, SEMARNAT, ODAPAS, entre otros) y se clasifican como municipales y no municipales. Las municipales provienen de los centros urbanos y la mayor parte de los contaminantes consiste en residuos de comida, tensoactivos/surfactantes, grasas/aceites, materia fecal y arenas. Por otra parte, las no municipales provienen de la industria autoabastecida. En este tipo de emisiones los contaminantes pueden ser iones de metales de transición, colorantes, residuos de fármacos, soluciones ácidas o básicas, entre otros. Los contaminantes presentes en este tipo de descargas obligan a quien las produce a tratar el agua contaminada antes de realizar descargas a la red de alcantarillado o al medio ambiente.

Las condiciones para realizar la descarga de agua contaminada, el reúso del agua y los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas (municipales y no municipales) se establecen en las Normas Oficiales Mexicanas (Ej. NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997, entre otras). Como complemento a estas normas en la **NMX-AA-028-SCFI-2021** se establece que, para determinar la carga de contaminantes presentes, y por consiguiente la calidad del agua, se debe cuantificar la demanda bioquímica de oxígeno en un periodo de 5 días (DBO<sub>5</sub>).

La DBO<sub>5</sub> mide la cantidad de oxígeno que una población microbiana heterogénea requiere para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua en un periodo de 5 días. Adicional a la DBO<sub>5</sub>, la **NMX-AA-030-2-SCFI-2011** menciona que para hacer un análisis completo de una muestra de agua se debe cuantificar la demanda química de oxígeno (DQO). La DQO cuantifica la cantidad de compuestos orgánicos que son susceptibles a un proceso de oxidación en presencia de un compuesto altamente oxidante (Ej. dicromato de potasio o permanganato de potasio).

Con la información proporcionada por la DBO<sub>5</sub> y la DQO se puede definir el tipo de tratamiento y tiempo de residencia que debe recibir un agua residual antes de ser reutilizada, descargada al ambiente o a los drenajes municipales. Para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, en México se cuenta con 2,643 plantas (Fig. 2) con posibilidades de tratar alrededor de 137.7 m<sup>3</sup>/s [5].

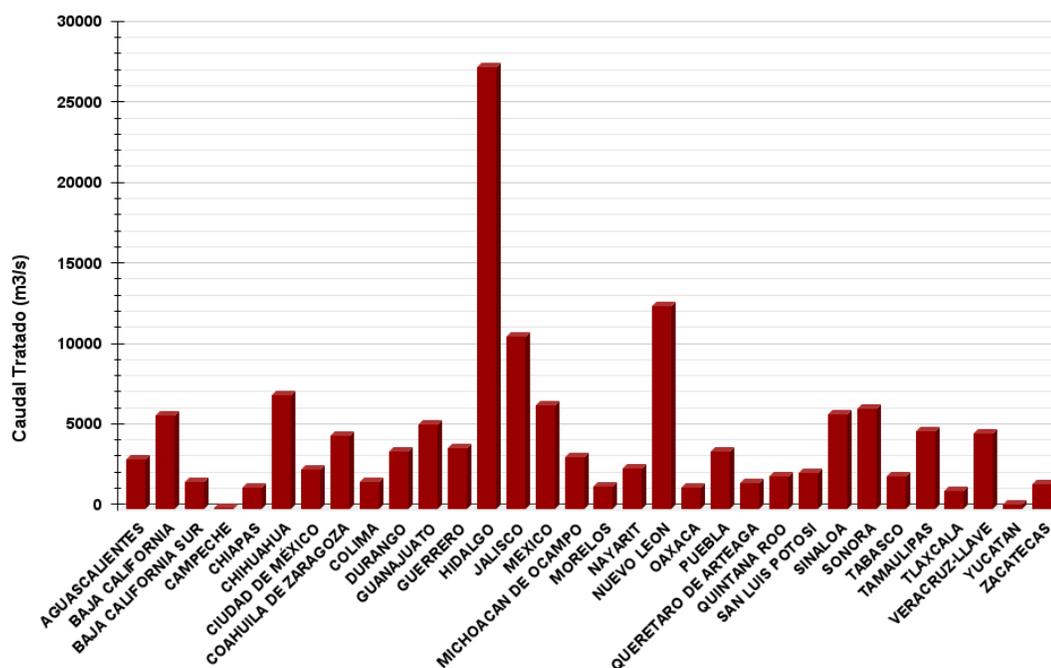


Figura 2 Caudal tratado (m<sup>3</sup>/s) en las PTAR a nivel nacional por estado en el 2019, gráfico elaborado con datos de **CONAGUA** [5]

De las tres categorías de contaminación que se mencionaron anteriormente, la que compete en el presente trabajo es la denominada “contaminación cotidiana”. Lo anterior se debe a que, tanto en México como en el mundo, se cuenta con la infraestructura, la tecnología y la técnica necesaria para llevar a cabo la correcta depuración del agua contaminada.

### **1.3 Contaminación generada por la quema de combustibles fósiles en la producción de electricidad y otros procesos**

Adicional a la contaminación del agua, otra problemática que se debe mencionar es la contaminación que se genera por las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En especial aquellas que se emiten como consecuencia de la producción de electricidad. Lo anterior se respalda en el Reporte de Avance de Energías Limpias [14] proporcionado por la Secretaría de Energía (SENER) y los datos proporcionados por el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI).

En el RAEL se menciona que, hasta octubre del 2020, 25.48% de la producción de electricidad provenía de fuentes renovables (plantas hidroeléctricas, eoloelectricas, fotovoltaicas, nucleoelectricas, geotermicas y bioelectricas). Mientras que, el 75.52% restante provenía de fuentes no renovables altamente contaminantes (plantas carboelectricas, de ciclo combinado, termoeléctricas).

Por otra parte, el INEGyCEI reporta que en el 2019 a nivel nacional se emitieron un total de 432,110 Gigagramos de CO<sub>2</sub> (Gg de CO<sub>2</sub>) como consecuencia de la quema de combustibles fósiles [15]. A su vez, el INEGyCEI menciona que estas emisiones provienen de 4 agentes principales: la industria de la energía, la industria de la manufactura y de la construcción, las redes de transporte masivo de personas/mercancías y otros sectores (Ej. comercios, instituciones públicas, entre otras.). La distribución porcentual de las emisiones de GEIs correspondientes a estos sectores se muestra en la Fig. 3.

Los sectores anteriormente mencionados se describen de la siguiente manera:

**Industria de la energía:** En esta clasificación engloba a los procesos involucrados en el uso y transformación de combustibles fósiles en energía útil para el ser humano (Ej. producción de electricidad, producción de combustibles, entre otros).

En este sector, el principal emisor de GEIs es el proceso de involucra a la producción de electricidad. Estas emisiones se atribuyen a la quema de combustibles fósiles que ocurre en una central eléctrica para producir vapor de agua e impulsar a las turbinas empleadas en la producción de electricidad. Como consecuencia de este proceso, el INEGyCEI reporta que en el 2019 la operación de las centrales eléctricas en México contribuyó con la emisión de 170,956.1 de Gg de CO<sub>2</sub>.

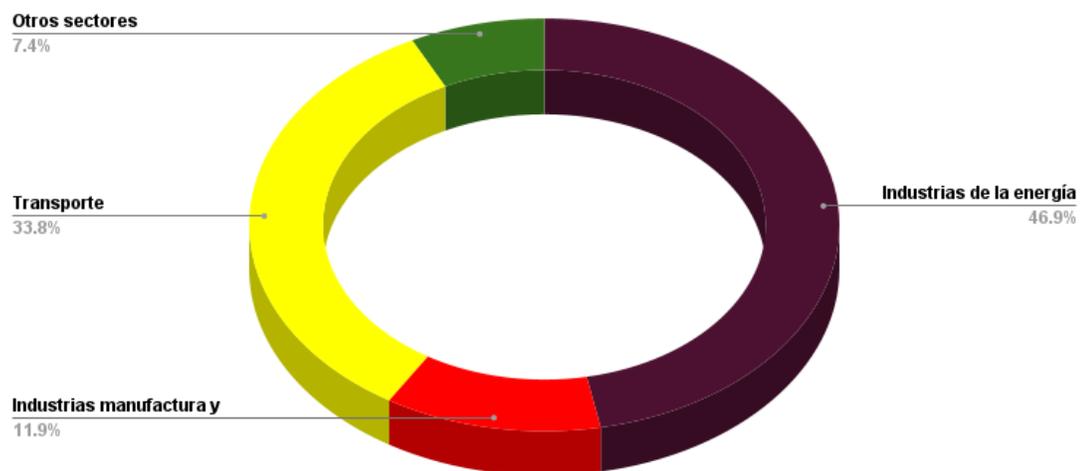


Figura 3 Distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional, gráfico elaborado con datos del INEGyCEI del año 2019 [15]

**Transporte:** El INEGyCEI registra que este sector es el segundo emisor de GEI con una emisión promedio de 146,054.2 Gg de CO<sub>2</sub>. En esta clasificación se engloba al autotransporte (público y privado), la aviación (pública y privada), ferrocarriles y la navegación (marítima y fluvial).

**Industria de la manufactura y de la construcción:** Como su nombre lo indica, aquí se engloba a todas aquellas actividades involucradas en la manufactura de productos de valor agregado y los procesos involucrados en la construcción de inmuebles. Acorde con el INEGyCEI, este sector contribuye con 51,303 Gg de CO<sub>2</sub>

**Otros sectores:** En esta clasificación se contabiliza a comercios e instituciones (públicas y privadas) que prestan distintos servicios (lúdicos, administrativos, formativos, etc.). Se estima que estas entidades contribuyen con 4,661 Gg de CO<sub>2</sub>. En este sector también se engloba a las emisiones provenientes de centros residenciales (16,766 Gg de CO<sub>2</sub>) y a las emisiones provenientes de procesos agroindustriales (10,508 Gg de CO<sub>2</sub>).

Esta alta dependencia de los combustibles fósiles se ve reflejada directamente en la calidad del aire. Ya que, en los primeros cinco meses del 2022 en la CDMX se reportaron 4 contingencias ambientales: 29 de marzo con una duración de un día, 2-4 de mayo con una duración de 3 días, 5 de mayo con una duración de un día y por último la del 20-21 de mayo con una duración de 2 días [16]. Se infiere que la ocurrencia de estos eventos atmosféricos aumenta la frecuencia con la que se presentan enfermedades en las vías respiratorias.

## Capítulo 2. Fundamentos teóricos

En esta sección se menciona a los recursos normativos, tecnológicos y científicos que se emplean para tratar con la contaminación cotidiana del agua. A su vez, también se hace una breve mención a los beneficios que conlleva el aplicar estos recursos.

### 2.1 Soluciones potenciales al problema de la contaminación cotidiana

Una vez que el agua ha cumplido su ciclo de uso esta se convierte en agua residual y, por lo anterior, se debe disponer de esta de una manera adecuada. Por lo general, la disposición del agua residual es a través de descargas (al alcantarillado o al ambiente). Sin embargo, si el agua residual no contiene compuestos tóxicos es posible que esta pueda ser reusada en procesos de irrigación o la limpieza de exteriores. Con lo anterior en consideración, para llevar a cabo un adecuado manejo del agua residual en México se debe cumplir con los criterios especificados por las siguientes normas de observancia obligatoria:

1. **NOM-001-SEMARNAT-2021** (Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales).
2. **NOM-002-SEMARNAT-1996** (Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado).
3. **NOM-003-SEMARNAT-1996** (Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público).

Para cumplir con los criterios mencionados por estas normas, en México se recurre a las

Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR). Las PTAR son instalaciones en las que el agua contaminada se somete a procesos físicos, químicos y/o biológicos para disminuir la carga contaminante antes de descargarla al ambiente o de reusarla.

En México se cuentan con 2,643 plantas con una capacidad instalada para el tratamiento de 194,715 m<sup>3</sup>/s (Fig. 2). Con esta capacidad instalada, a nivel nacional, es posible dar tratamiento a 141,479 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales (Fig. 4), lo que representa un aprovechamiento del 72.7% de la capacidad total instalada del país.

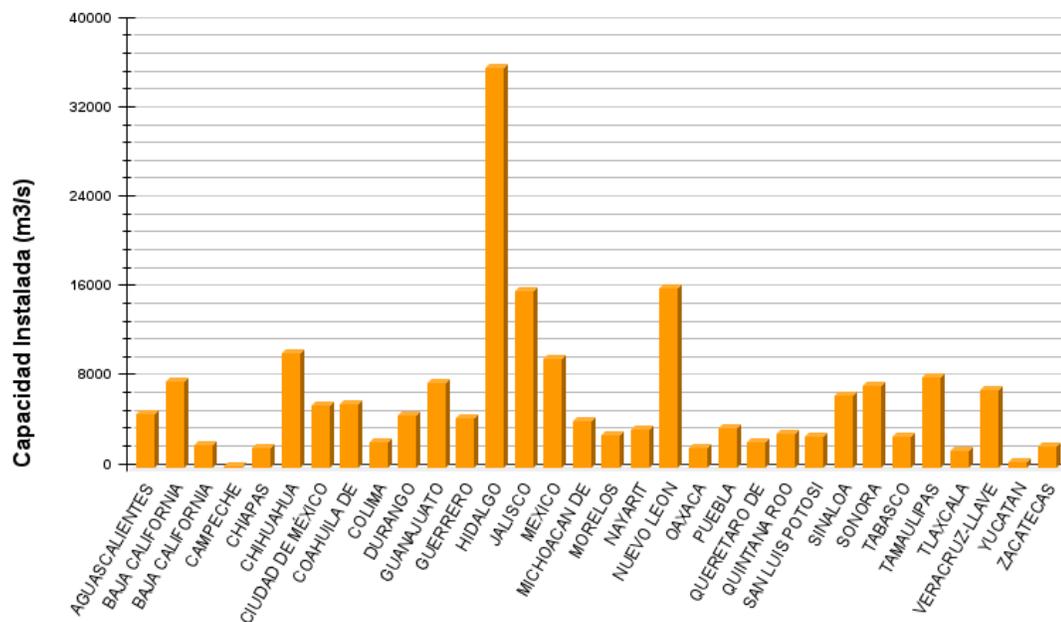


Figura 4 Capacidad instalada de las PTAR por estado en el 2019; gráfico elaborado con datos de CONAGUA [5]

En la Fig. 4 se observa que Hidalgo tiene el potencial para tratar 35,849 m<sup>3</sup>/s, lo anterior representa un 18.4% de la capacidad instalada del país. Esto lo convierte en el estado con la mayor capacidad instalada y, por consiguiente, se estima que en Hidalgo es posible dar el tratamiento a 27,434.32 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales. Lo anterior representa un 19.4% del total de las aguas residuales que se producen a nivel nacional.

En México se tiene al Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del 2015 (MAPAS) como referente para el diseño, mantenimiento y operación de proyectos hidráulicos. Por lo que, para describir al proceso de tratamiento de agua de manera general se hará uso de esta bibliografía [2]. En esta serie de manuales se plantea un proceso de tratamiento de agua residual con 3 etapas: tratamiento físico, tratamiento biológico y tratamiento químico. Sin embargo, en este trabajo solo aborda a las primeras 2 etapas de tratamiento, ya que estas son las más empleadas en la PTAR del país. Estas se describen de la siguiente manera:

**Tratamiento físico o etapa primaria:** La principal finalidad de esta etapa es la de remover partículas mayores a 1  $\mu\text{m}$  (basura, materia orgánica, arenas) y sustancias cuya densidad sea menor a la del agua (grasas y aceites) [2]. La separación de estos contaminantes se da por medio de filtros (de carbón activado o de arena), de cribas o tamices y de sistemas de flotación (en el caso de la remoción de grasas y aceites).

**Tratamiento biológico o etapa secundaria:** En esta etapa se considera la oxidación de materia orgánica, disuelta o en estado coloidal, por medio de la acción de microorganismos mediante el uso de diferentes sistemas biológicos de tratamiento.

Los tratamientos biológicos más empleados en las PTAR del país son:

**Lagunas de estabilización:** Son cuerpos lacustres artificiales en donde se descarga el agua residual proveniente de la primera etapa. Estos sistemas basan su funcionamiento en el aprovechamiento de las cadenas tróficas y redes de competencia observadas en la naturaleza. Mediante estos mecanismos se da la remoción de la materia orgánica y la disminución de organismos patógenos presentes en el agua residual. Estos sistemas se clasifican en lagunas aerobias, anaerobias y facultativas [2].

**Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA):** Es una estructura circular o rectangular cerrada, como su nombre lo indica, es un reactor multifase (líquido-lodo-gas). En estos sistemas la oxidación de la materia orgánica se da anaeróticamente mediante la acción de microorganismos, cuyo metabolismo da como resultado  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y masa microbiana.

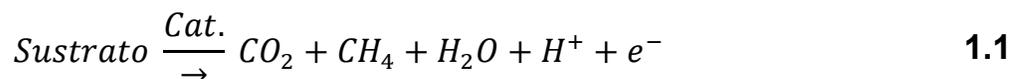
La alimentación de la corriente de agua contaminada es por la parte inferior y, mediante la estructura interna del reactor, esta se dirige hacia la parte superior, en donde se ubican los microorganismos responsables de la oxidación [2].

**Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA):** Se trata de estructuras cilíndricas, cuyo diámetro varía entre los 2 a 8 metros y con alturas que van desde los 3 a los 13 metros.

El funcionamiento de estos sistemas es similar al de los RAFA, con la diferencia de que en los FAFA los microorganismos se encuentran adheridos a filtros distribuidos a lo largo del reactor. En estos equipos la alimentación se da por la parte inferior, lo que facilita que el fluente entre en contacto con el lecho empacado con microorganismos [2].

**Humedales Artificiales (HA):** Los HA son sistemas de depuración de agua que replican las cadenas tróficas y las relaciones simbióticas que se observan en humedales naturales. Los HA se componen de un organismo vegetal, canales por donde fluye el agua residual, tuberías de irrigación/venteo y de medios de soporte/filtración [2].

La [Ec. 1.1] resume el proceso de degradación de la materia orgánica que se lleva a cabo en un HA. En esta se identifica a la materia orgánica como sustrato, el cual en presencia de un catalizador (bacteria) se degrada en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), protones (H<sup>+</sup>) y electrones (e<sup>-</sup>). Los primeros 2 productos son gases inertes que se liberan a la atmósfera mediante el sistema de venteo de los HA. Mientras que, los H<sup>+</sup> y e<sup>-</sup> participan en procesos secundarios como: la fijación de nutrientes en la matriz de soporte, el crecimiento de las poblaciones bacterianas, el crecimiento de las plantas, etc.



Uno de los componentes principales de los HA son los organismos vegetales, los cuales se denominan como macrófitas. Estos organismos son plantas que se han adaptado completamente a los medios húmedos, tales como: estanques, estuarios, lagos, humedales, etc.

En los HA las macrófitas cumplen la función de fijar elementos como carbono, nitrógeno, fósforo y otros nutrientes en sus tallos/hojas y de albergar en las raíces a algunos de los microorganismos necesarios para la oxidación de la materia orgánica. Adicional a la remoción de contaminantes producto de la acción microbiana, las plantas que conforman a los HA tienen beneficios secundarios. Tales como: la obtención de materia prima para la elaboración de artesanías (*Typha angustifolia*), obtención de plantas de ornato (*Zantedeschia aethiopica*) u obtención de forrajes para la alimentación del ganado (*Phragmites australis*) [2].

Un factor importante que influye en la eficiencia de un HA es el diseño hidráulico. Ya que a partir de este parámetro se puede estimar el tiempo de residencia, el tipo de arcillas y/o gravas que conformarán al humedal, el número y la distribución de las tuberías para venteo/irrigación y la ubicación espacial de estos sistemas. Referente al diseño hidráulico, estos sistemas se clasifican en 2 categorías, humedales de flujo superficial y de flujo subsuperficial [17], los cuales se describen de la siguiente manera:

**Humedales artificiales de flujo superficial:** El caudal fluye en forma de una capa delgada que cubre la superficie del humedal, entrando en contacto directo con los tallos de las plantas (Fig. 5). La alimentación puede ser suministrada mediante un sistema de tuberías superficiales que irrigan de manera homogénea a las macrófitas que conforman al HA. Algunos modelos cuentan con un sistema de venteo para liberar a la atmósfera a los gases que se producen como resultado de la degradación de la materia orgánica.

Estos sistemas cuentan con un medio poroso que funciona como soporte y como medio filtrante para la remoción de contaminantes de la corriente. Son comúnmente utilizados en la remoción de nutrientes como el fósforo o el nitrógeno y por lo general alcanzan una profundidad de 0.6 m. Comúnmente, en estos sistemas se emplean macrófitas tales como: *Eichornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Limnobium stoloniferum* que son especies que viven en la superficie del agua y se denominan como flotantes. Adicional a las especies flotantes, también se emplean especies como *Elodea Canadensis* o la *Potamogeton pectinatus*, que son especies que habitan por debajo de la superficie del agua y en donde la película microbiana se ubica en la superficie de las hojas y tallos [2].

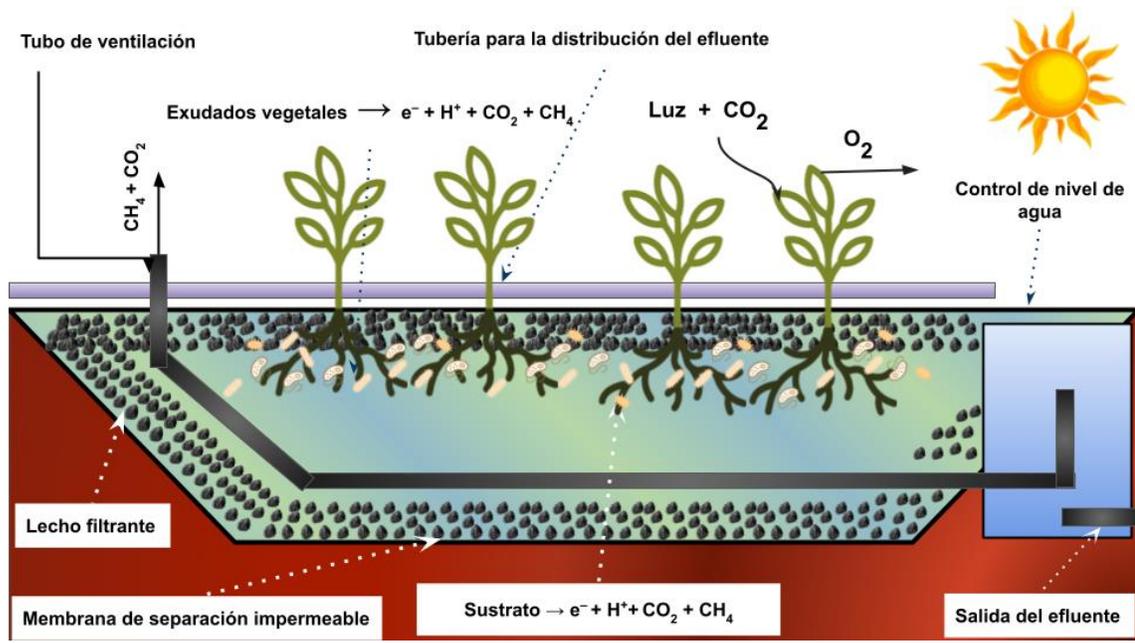


Figura 5 Esquema de un humedal de flujo superficial, elaboración propia

**Humedales artificiales de flujo subsuperficial:** En este sistema el caudal circula a través de un lecho poroso en donde entra en contacto con las raíces de las plantas (Fig. 6), su profundidad depende de la longitud promedio de las raíces. El contacto entre las raíces y el lecho filtrante promueve la remoción de la materia orgánica con la ayuda de un método físico y uno biológico. El flujo puede ser de manera horizontal o vertical, dependiendo de la  $\text{DBO}_5$  y/o de la  $\text{DQO}$  del agua a tratar. En estos sistemas se emplean especies como: *Typha angustifolia*, *Arundo donax*, *Phragmites australis* o *Zantedeschia aethiopica*, organismos denominados como emergentes, cuyas raíces se anclan a la matriz de soporte (Ej. arcillas, gravas) lo que favorece su crecimiento y les permite aprovechar al máximo la luz del sol para realizar sus procesos fotosintéticos. Presentan la ventaja de crecer en una amplia variedad de matrices de soporte y de ser resistentes a diferentes tipos de agua contaminada [2].

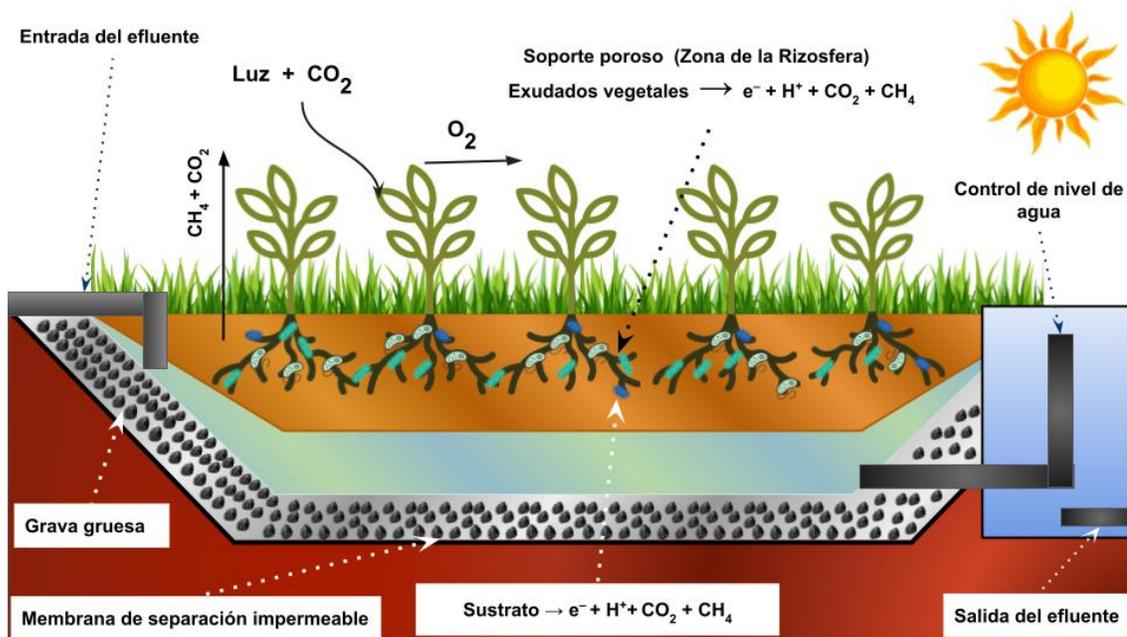


Figura 6 Esquema de un humedal de flujo subsuperficial, elaboración propia

La cantidad de etapas en el proceso de tratamiento puede variar dependiendo de la carga contaminante presente en el agua (DQO y/o DBO<sub>5</sub>), de la ubicación de la PTAR y de sus posibles usos posteriores. En general una PTAR basada en procesos biológicos acopla 2 o más tratamientos biológicos antes de realizar una descarga en la red de alcantarillado o al ambiente. Los subproductos como el biogás o los lodos provenientes de los reactores pueden llegar a tener beneficios adicionales. En el caso del biogás este puede ser usado para generar electricidad y favorecer la autonomía de la PTAR y, en el caso de los lodos, estos pueden ser empleados en la fertilización de campos o como material de relleno sanitario.

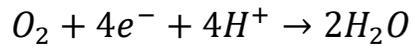
Por parte de los HA se obtienen forrajes, materia prima para artesanías y plantas de ornato, subproductos que, con la debida administración, presentan beneficios económicos en las zonas en donde se implemente esta tecnología. Ya sea subsanando las operaciones de una PTAR, mediante la venta de los forrajes y las plantas de ornato, o en el caso de zonas rurales, generando fuentes de empleo mediante la comercialización de los forrajes y la venta de artesanías.

## 2.2 Alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados

Como se mencionó en el apartado anterior, es posible obtener electricidad mediante la quema de biogás para favorecer la autonomía de una PTAR. Sin embargo, existe una manera de obtener electricidad *in situ* a partir de la degradación de la materia orgánica.

En décadas recientes, se han implementado líneas de investigación enfocadas hacia la obtención de electricidad *in situ* como consecuencia del metabolismo de microorganismos. Lo anterior es posible debido a que en el proceso metabólico de algunas bacterias (Ej. *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella putrefaciens*) se “generan” electrones, los cuales se transfieren extracelularmente de la bacteria a un aceptor de electrones. Este fenómeno se denomina transferencia extracelular de electrones (TEE), y al igual que en un sistema redox estándar, los electrones se transfieren de un donador (bacteria) a un aceptor natural de electrones (ANE) como el oxígeno, los nitratos o los fumaratos [18].

La TEE impulsó a distintos investigadores a buscar maneras de aprovechar el metabolismo bacteriano para generar electricidad de una manera sustentable. Como resultado de estas líneas de investigación se ha descubierto que, si a las bacterias se les coloca en un sistema, en contacto con un electrodo (ánodo), en donde no existen ANE, la TEE será directamente al electrodo. A su vez si el electrodo forma parte de un circuito eléctrico externo, conformado por un ánodo, una resistencia eléctrica y un cátodo, los electrones fluirán a través del circuito generando electricidad. Para que la celda sea apta para generar una corriente eléctrica, y que esta pueda ser aprovechada, es necesario que la celda cuente con electrodos (ánodo y cátodo) de un material poroso con propiedades semiconductoras. Lo anterior se debe a que en la zona que alberga al ánodo se lleva a cabo el crecimiento de poblaciones bacterianas electrogénicas que, a través de su metabolismo, producirán electrones los cuales serán captados por el ánodo. En el caso del cátodo los electrones transferidos a través de la resistencia eléctrica reaccionarán con oxígeno u otro ANE. Si la reacción en la superficie del cátodo se realiza con oxígeno este reaccionará con los  $H^+$  provenientes del ánodo dando lugar a la formación de  $H_2O$  como producto final [Ec. 1.2].



Estos sistemas son conocidos como celdas de combustible microbianas (CCM), las cuales se clasifican como una tecnología emergente con el potencial de hacer más eficientes a los procesos de tratamiento de agua y de generación sustentable de electricidad. Debido a su gran potencial, diferentes investigadores alrededor del mundo han modificado a las CCM para hacerlas más eficientes o rentables. Siendo la modificación más representativa, aquella que se denomina celda de combustible microbiana vegetal (CCMV). Esta variante de las CCM aprovecha las relaciones simbióticas descritas en los humedales artificiales (HA) para la degradación de la materia orgánica y en los principios de las CCM para la generación de electricidad. A continuación, se explicará el funcionamiento de ambos sistemas y su estructura.

### 2.2.1 Celdas de Combustible Microbianas (CCM)

Se define a las CCM como sistemas en donde el ánodo (electrodo negativo) y el cátodo (electrodo positivo) se encuentran separados por una membrana (semi permeable y selectiva al paso de protones). Los electrodos se encuentran enlazados externamente por un circuito en donde fluyen los electrones resultantes del metabolismo de las bacterias (Fig. 7) [19]. La sección que contiene al ánodo se considera como una zona anaerobia en donde se alberga al sustrato (materia orgánica) y a los microorganismos (Ej. *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella putrefaciens*) responsables de la degradación del sustrato y de la producción de electrones. Los cuales, debido a la ausencia de ANE, son transportados al ánodo. En donde, a través del circuito externo, fluyen hacia el cátodo generando una corriente eléctrica que puede ser aprovechada o almacenada según sea el diseño de la celda.

La zona en donde se alberga al cátodo, generalmente, es una zona aerobia en donde protones y electrones, provenientes del ánodo, reaccionan con el oxígeno disuelto en el medio generando agua.

En la Fig. 7 se muestra un diagrama de la estructura interna de una CCM estándar, en esta figura también se muestran las semirreacciones que ocurren en cada zona.

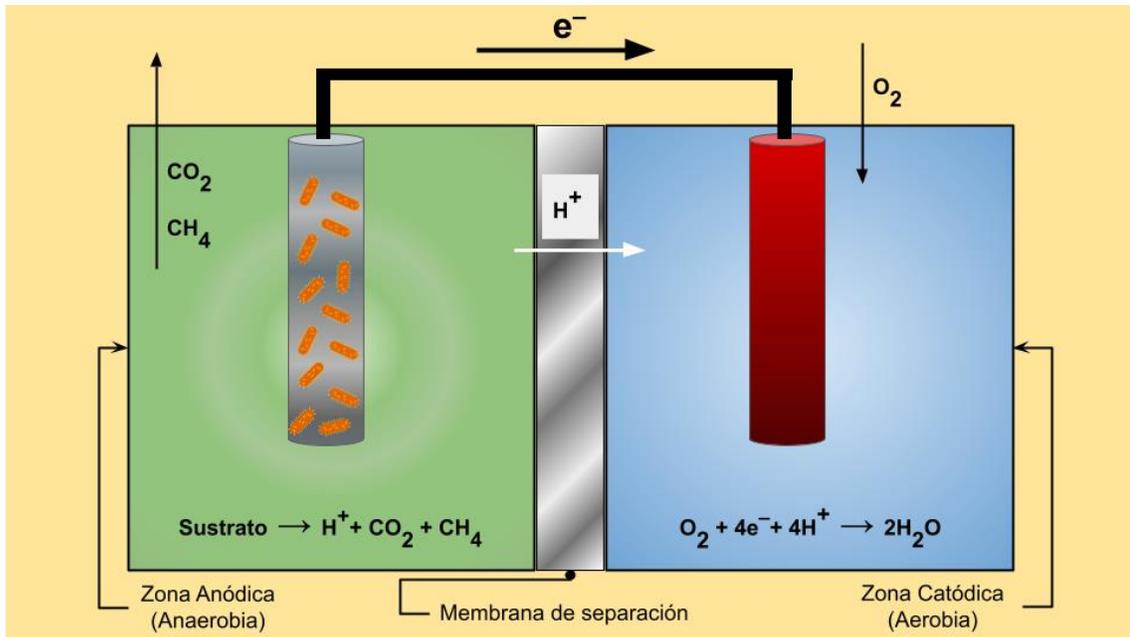


Figura 7 Esquema de una CCM, elaboración propia

En el lado izquierdo del diagrama (Fig. 7) se encuentra la zona anódica, la cual es una zona rica en sustrato y carente de ANEs. Estas condiciones permiten que las bacterias anaerobias crezcan sobre la superficie del ánodo y en otros sitios de la zona anódica. A partir de su metabolismo estas bacterias degradan al sustrato produciendo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}^+$  (en casos en los que haya arqueas y las bacterias adecuadas presentes) y electrones. Estos últimos, al encontrarse en un ambiente carente de ANE, se transfieren directamente hacia el ánodo.

Los subproductos gaseosos como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  se liberan hacia la atmósfera por medio de un sistema de venteo. Mientras que, los  $\text{H}^+$  se difunden hacia la zona del cátodo por medio de la membrana. A la derecha del esquema se encuentra la zona del cátodo la cual, generalmente, se encuentra expuesta a la atmósfera. Aquí los protones y electrones provenientes del ánodo reaccionan en la superficie del cátodo formando agua.

En el caso de la membrana que separa a las zonas anódica y catódica, López [20] menciona que esta tiene la función de disminuir la difusión del oxígeno en la zona anódica y de disminuir la difusión de sustrato de la zona anódica a la catódica. La disminución en la concentración de oxígeno en la zona del ánodo propicia que los electrones sean transferidos directamente al ánodo y el crecimiento de las poblaciones de bacterias electrogénicas. El fenómeno anterior aumenta la cantidad de electrones que pueden ser captados por el ánodo, lo que favorece la producción de electricidad.

La disminución de sustrato en la zona catódica previene la ocurrencia de reacciones parásitas en la superficie del cátodo. Estas reacciones parásitas disminuyen la producción de electricidad en la CCM y, en algunos casos, reducen el tiempo de vida útil del cátodo. Uno de los principales inconvenientes en esta clase de sistemas es el estimar la eficiencia de la CCM. Ya que existen distintos factores que pueden mermar el desempeño del proceso (calidad del sustrato, pH del medio, material de los electrodos y la forma de estos, etc.). Sin embargo, se puede inferir que aquellos que son más relevantes para la producción de electricidad son el material de los electrodos y de la membrana de separación.

López [20] considera que un buen electrodo debe tener una alta conductividad eléctrica, alta estabilidad química, alta resistencia al esfuerzo mecánico y ser posible adquirirlo a un bajo costo. Estas características pueden ser cubiertas por materiales como el grafito o el acero inoxidable, ya que ambos materiales requieren de mínimas modificaciones para que puedan ser empleados en una CCM. Por otra parte, se emplea a la membrana para dividir a la CCM en zona anódica y catódica. La membrana promueve la difusión de los protones de la zona anódica hacia la zona catódica. En donde reaccionaran con el oxígeno atmosférico y con los electrones para formar agua. En un caso ideal, la membrana debe ser capaz de aumentar la velocidad con la que los protones se difunden hacia la zona catódica. Ya que, teóricamente, una de las etapas limitantes en la producción de electricidad en las CCM es la cantidad de protones disponibles en el cátodo. Materiales como el Nafion™ (DuPont Inc; USA) son excelentes conductores de protones gracias a la sulfonación de sus estructuras. Sin embargo, su alto costo y fragilidad evita que pueda ser empleado a gran escala.

## 2.2.2 Celdas de Combustible Microbianas Vegetales (CCMV)

Una CCMV (Fig. 8) es un sistema biológico basado en la relación simbiótica que existe entre un organismo vegetal y una población heterogénea de microorganismos que habitan en la rizosfera de este [1]. Estos sistemas incorporan un circuito eléctrico para aprovechar a los electrones que se producen en la rizosfera y en la zona del ánodo, de tal modo que se pueda producir y aprovechar una corriente eléctrica [21]. Como sistema biológico, con una planta viva y microorganismos, una CCMV se asemeja a un humedal artificial (HA) a una escala menor. Debido a esta característica estos sistemas resultan idóneos para emplearlos en el laboratorio, lo que permite innovar en nuevas maneras de aumentar la eficiencia de un HA.

Al igual que en las CCM, en las CCMV se produce electricidad como resultado de la TEE, fenómeno que ocurre cuando las bacterias anaerobias degradan materia orgánica en un ambiente carente de un ANEs (como es la zona de la rizosfera y la zona anódica). A diferencia de las CCM, en donde podría considerarse que existe una población homogénea de bacterias anaerobias ubicada en una biopelícula formada sobre la superficie del ánodo. En las CCMV se cuenta con una población heterogénea distribuida entre la rizosfera y una biopelícula que se forma en la superficie del ánodo. Nitorisavut [1] describe la arquitectura de estos sistemas en 2 etapas principales: la bioestructura de control (organismo vegetal) y la bioestructura de proceso (población bacteriana). En la bioestructura de control se lleva la síntesis de carbohidratos gracias al proceso fotosintético de la planta, los compuestos obtenidos de este proceso tienen distintos fines. Los cuales van desde el desarrollo de la planta hasta la liberación de nutrientes en la zona de la rizosfera.

Con base en lo anterior, se puede inferir que la eficiencia de una CCMV se encuentra intrínsecamente ligada a la cantidad de luz solar que percibe la planta. Por lo que para obtener una mayor eficiencia en estos sistemas se debe ubicar a la CCMV en un lugar que tenga una alta exposición a la luz solar. De lo contrario, se incrementa la probabilidad de que la planta produzca una menor cantidad de carbohidratos y, en consecuencia, se limite el tamaño de las poblaciones bacterianas en la rizosfera.

Una concentración más baja de bacterias implicaría una menor producción de electricidad, lo que haría que las CCMV no resultasen como una alternativa viable.

Por otra parte, en la bioestructura de proceso es una zona teórica que se distribuiría entre la zona de la rizosfera y la zona anódica. En esta zona se llevaría a cabo la adaptación y crecimiento de las poblaciones bacterianas, las cuales obtendrían energía de los carbohidratos secretados por la planta y la materia orgánica disuelta en el agua residual que se alimenta a la CCMV. Al igual que en las CCM, en las CCMV la actividad bacteriana produce electrones que pueden aprovecharse por el circuito externo para generar electricidad. Otra característica de estos sistemas es que, parte de los electrones que se producen durante el metabolismo bacteriano se emplean en procesos como la fijación de nutrientes en la matriz de soporte (suelo) e incluso en el desarrollo de algunas bacterias. Por lo anterior, la eficiencia de estos sistemas también se ve afectada por el tipo de bacterias que se desarrollen en la CCMV.

En la Fig. 8 se muestra un diagrama de la estructura interna de una CCMV estándar, en esta figura también se muestran las semirreacciones que ocurren en cada zona.

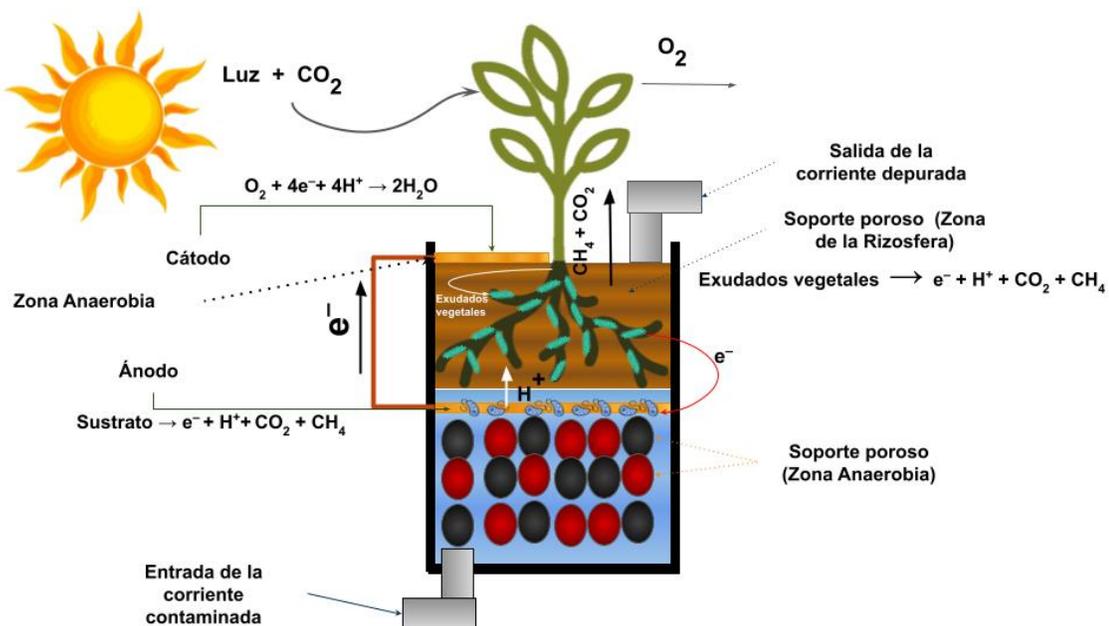


Figura 8 Esquema de una CCMV, elaboración propia

Se divide el esquema (Fig. 8) en 3 zonas: zona catódica (parte superior), rizosfera (parte media) y zona anódica (parte inferior). La zona catódica alberga al cátodo, a los tallos y hojas de la planta.

El cátodo propicia las condiciones necesarias para que el oxígeno atmosférico reaccione con los  $e^-$  y  $H^+$ , provenientes de zonas inferiores, para formar agua. Las hojas permiten que la planta lleve a cabo el proceso de fotosíntesis. En donde la clorofila actúa como catalizador para transformar agua,  $CO_2$  y luz solar en carbohidratos. Los carbohidratos se liberan mediante las raíces hacia la rizosfera, en donde son aprovechados por las bacterias. A su vez, por medio del crecimiento de los tallos y hojas de la planta se lleva a cabo la fijación del  $CO_2$  atmosférico lo que propicia la limpieza del aire.

La zona media corresponde a la rizosfera, aquí se encuentran las raíces de la planta y se ubica a la mayor cantidad de bacterias. A través de las raíces se liberan los productos de la fotosíntesis, los cuales son consumidos por las bacterias para producir  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $e^-$  y fijar nutrientes en la matriz de soporte. Los gases que se producen en la degradación de los carbohidratos se difunden hacia la atmósfera a través de la matriz de soporte.

Los electrones que se producen durante el metabolismo bacteriano tienen 2 posibles destinos: la fijación de nutrientes en la matriz de soporte y la captación de estos en el ánodo. Debido a que esta tecnología aún se encuentra en vías de desarrollo, resulta difícil estimar la cantidad de electrones que se destinan a cada proceso.

La zona anódica contiene al ánodo y a un soporte poroso que provee de estabilidad al organismo vegetal. Por medio del soporte poroso se lleva a cabo la filtración del agua residual que se alimenta a la CCMV, lo que ayuda a disminuir la carga contaminante y facilitar el proceso de depuración. En el ánodo predominan bacterias anaerobias con actividad electroquímica. Las cuales se alimentan de la materia orgánica presente en el agua para generar  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H^+$  y  $e^-$ . Los electrones se transfieren directamente hacia el electrodo, los gases se difunden hacia la atmósfera y los protones se difunden hacia el cátodo.

### 2.2.3 La membrana de separación

Una membrana de separación (fase sólida) es una barrera física entre dos fases líquidas (**A** y **B**), de las cuales, **A** tiene compuestos disueltos que no están presentes en **B** o bien se encuentran en concentraciones bajas (Fig. 9). La fase sólida contiene grupos fijos coordinados con contraiones de carga opuesta, los cuales pueden ser intercambiados con los iones presentes en alguna de las fases líquidas [22].

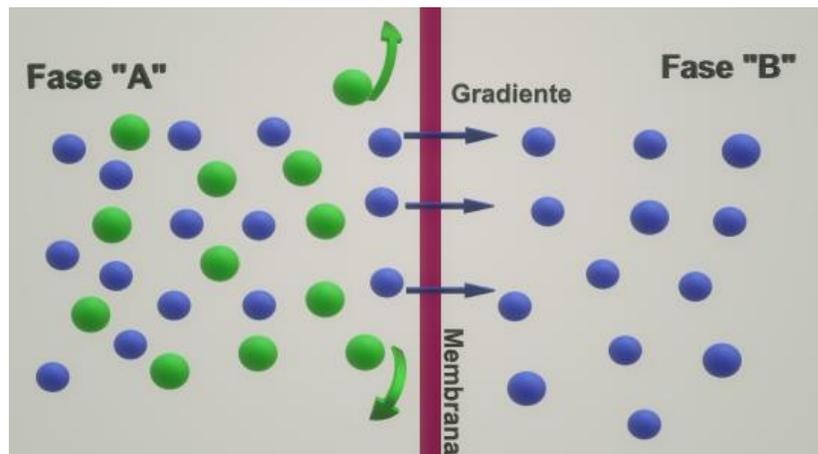


Figura 9 Efecto de la membrana en la separación de componentes entre la fase "A" y la fase "B", elaboración propia

La Fig. 9 ejemplifica la función de una membrana de separación, la cual es semipermeable a la difusión en **B** de algunos de los compuestos presentes en **A**. La membrana es capaz de separar estos compuestos por medio de un gradiente que puede ser de presión ( $\nabla P$ ), concentración ( $\nabla C$ ) o potencial eléctrico ( $\nabla E$ ).

Estos materiales se clasifican en membranas de separación por tamaño ( $\nabla P$ ), por diferencias de solubilidad y difusividad ( $\nabla C$ ) o por efectos electrostáticos ( $\nabla E$ ). De manera general en los procesos de microfiltración, ultrafiltración y de ósmosis inversa se emplea a los gradientes de presión para llevar a cabo la separación de compuestos (Ej. purificación de fármacos, remoción de aceites, purificación de agua).

En los procesos de diálisis se emplean los gradientes de concentración y en los procesos de electrólisis/electrodiálisis se emplean los gradientes de potencial eléctrico. A estas últimas se les define como membranas de intercambio iónico [23]. Las membranas de intercambio iónico (MII) emplean el gradiente de potencial eléctrico entre los iones presentes en la fase líquida y los contraiones presentes en la fase sólida (membrana) para llevar a cabo la separación.

Las MII pueden ser matrices poliméricas (Fig. 10) o redes cristalinas insolubles (Fig. 11) en donde se lleva a cabo un intercambio reversible y estequiométrico, sin un cambio sustancial en la estructura del sólido.

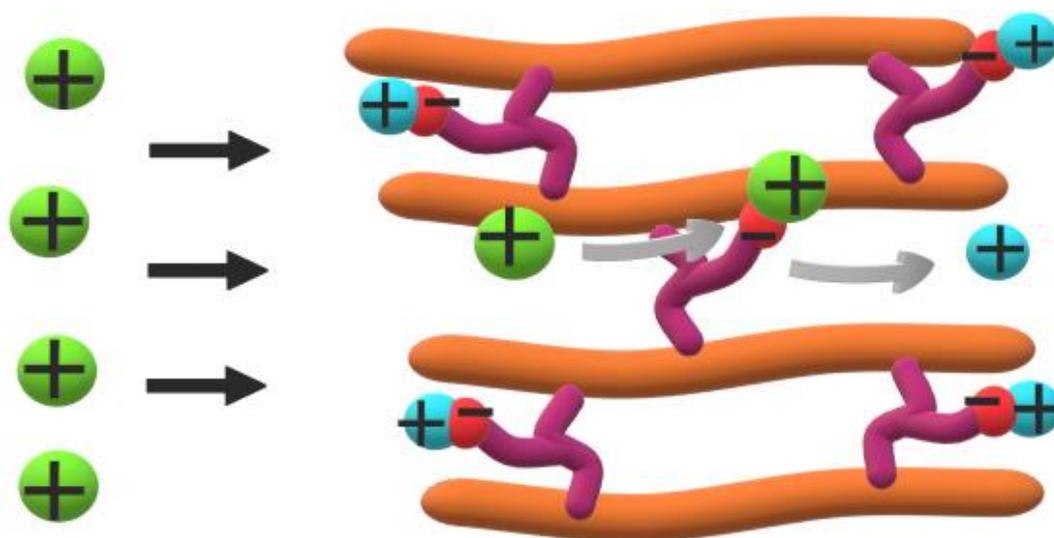


Figura 10 Esquema de una MII de tipo matriz polimérica, elaboración propia

La Fig. 10 es una representación esquemática de una matriz polimérica, en este esquema las cadenas poliméricas (figura anaranjada) se encuentran tejidas por medio de moléculas que contienen a los grupos funcionales (figura en morado) que serán los responsables de remover iones de la fase líquida (figura en verde). En este ejemplo la membrana que se representa es de intercambio catiónico, ya que los grupos funcionales se encuentran coordinados con iones de carga positiva.

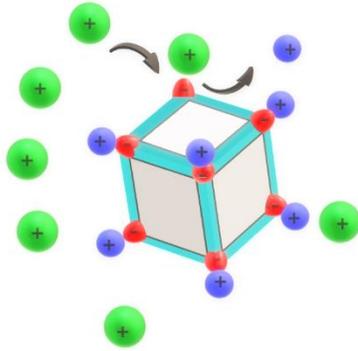


Figura 11 Esquema de una celda unitaria de una MII de tipo red cristalina, elaboración propia

La Fig. 11 es una representación esquemática de una celda unitaria que conforma a una red cristalina, en este ejemplo los aniones (figura roja) se encuentran en los vértices del cubo coordinados con cationes (figura morada), si la red se encuentra en un medio en donde existen cationes (figura verde) que interactúen con mayor fuerza con los aniones de los vértices estos reemplazarán a los cationes que se encontraban previamente en la red.

Dependiendo del tipo de iones que se encuentren fijados en la estructura de la membrana estas se pueden clasificar como de intercambio catiónico (MIC) o aniónico (MIA). Aquellas en donde se intercambian cationes, en los sitios de intercambio, se tienen presentes grupos sulfonato ( $R - SO_2O^- - H$ ) o grupos carboxilo ( $R - COO^- - H$ ) enlazados de manera covalente con contraiones como  $H^+$  o  $Na^+$ .

Los grupos sulfonato se consideran fuertemente ácidos, por lo que son empleados en procesos de ablandamiento de agua proveniente de efluentes mineros [24]. Ya que los iones que predominan en esta clase de caudales son metales de transición (Ej. Cr, Mn, Co, Ni, Fe, etc.), que por su estado de oxidación interactúan fuertemente con los  $R - SO_2O^- - H$  presentes en la estructura de la membrana reemplazando con facilidad a los contraiones anteriores ( $H^+$  o  $Na^+$ ).

Los grupos carboxilo se emplean en procesos de ablandamiento de agua para consumo doméstico [24]. y Ya que los iones que predominan son  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , los cuales interactúan fuertemente con los grupos  $\text{R-COO}^-$  desplazando a los contraiones anteriores ( $\text{H}^+$  o  $\text{Na}^+$ ). En las membranas de intercambio aniónico se tienen presentes grupos amonio. Aquellas que presentan grupos cuaternarios ( $-\text{NR}^{3+}$ ) son consideradas fuertemente básicas y son empleadas para la eliminación de carbonatos y silicatos en los procesos desmineralización de aguas.

Los grupos amonio primario ( $-\text{NR}^{3+}$ ), secundario ( $-\text{NRH}^{2+}$ ) y terciario ( $-\text{NR}_2\text{H}^+$ ) son básicas débiles y se emplean en procesos de eliminación de ácidos orgánicos, ácidos minerales y otros materiales orgánicos. Son altamente resistentes a la suciedad orgánica y por lo general son empleadas en la industria alimenticia en procesos desmineralizadores y decolorativos [22]. En las CCM convencionales el separador más común es una membrana de intercambio catiónico (MIC) de tipo matriz polimérica sulfonada. La cual disminuye la difusión del oxígeno en la zona anódica y evita que el sustrato fluya hacia la zona catódica. Al disminuir la concentración de oxígeno en la zona anódica se promueve que los electrones generados durante el metabolismo bacteriano migren hacia el ánodo promoviendo que estos puedan ser aprovechados en la generación de electricidad.

En la literatura se hace referencia a que el Nafion<sup>TM</sup> 115 (DuPont Inc; USA) es una de las MIC más utilizadas debido a sus propiedades fisicoquímicas. Al ser un copolímero sulfonado proveniente del tetrafluoroetileno presenta una estructura química que le facilita absorber agua y una vez hidratado conducir selectivamente a iones de carga positiva. Sin embargo, también presenta desventajas como: ser altamente permeable al paso de oxígeno hacia la zona anódica, ser semipermeable al flujo de sustrato hacia la zona catódica, promueve la formación de incrustaciones sobre la superficie de la membrana, así como el transporte y acumulación de cationes en la cámara catódica [25] [26]. Estos factores aunados a su alto costo (aproximadamente \$77,347.82 MXN /  $\text{m}^2$  [27]) impiden que este material pueda ser empleado a escala industrial.

La influencia de la membrana de intercambio iónico (MII) en las CCMV y los HAAE no ha sido analizada a profundidad. E incluso existe controversia sobre si el usar una MII en estos sistemas tiene una influencia negativa en la producción de electricidad.

Ejemplos de esta controversia los encontramos en artículos como el de Lei Xu y col. ("*Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell*" [28]) en donde los autores comparan el desempeño de un HAAE en donde se emplea fibra de vidrio como MII contra un HAAE que opera sin membrana. Como resultado se demostró que el HAAE que operaba sin la MII tuvo una producción de 9.29 mW/m<sup>2</sup>, mientras que, el sistema que empleaba la fibra de vidrio como separador solo produjo 1.79 mW/m<sup>2</sup>. A raíz de este experimento Lei Xu y col. concluyeron que la implementación de una MII en esta clase de sistemas sería más un impedimento que una mejora.

En cambio, Sophia y col. [29] en su artículo "*Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator*". Construyeron una CCMV usando como soporte una mezcla de composta y gravas, una cámara anódica, de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro, construida a partir de una mezcla de arcilla de alfarería, caolinita y montmorillonita, un ánodo de carbono y un cátodo hidratado que cubría el área externa de la cámara anódica. Este diseño se planteó con el objetivo de que la cámara anódica fungiese como membrana y se pudiera sustituir a las MIC convencionales de alto costo. Como organismos fotosintéticos se empleó a *Canna stuttgart*, *Trigonella Foenum-graceum* y a *Brassica juncea*. En esta investigación se observó que en todas las pruebas realizadas se obtenía un desempeño estable y óptimo, lo que implicaba que la membrana no interfería negativamente con el desempeño de la CCMV. En conclusión, los autores decidieron profundizar la influencia de su MII en futuras líneas de investigación.

### **2.3 Crecimiento de bacterias en condiciones de laboratorio**

Debido a que en las CCM/CCMV se emplean bacterias es importante hacer mención a la forma en la que estos organismos se desarrollan. De acuerdo con López [30] y con el modelo predictivo ComBase [31] se puede describir al ciclo de vida de las bacterias en 4 fases (Fig. 12):

1. **Latencia:** Esta etapa se encuentra en la primera zona de la curva (Fig. 12), en este periodo las bacterias comienzan a adaptarse al medio y ajustan sus ciclos reproductivos en función de la disponibilidad de alimento, el pH y la temperatura del medio.
2. **Exponencial:** Corresponde a la segunda zona de la curva (Fig. 12), en esta etapa las bacterias comienzan a reproducirse hasta alcanzar un máximo, el cual está delimitado por factores como: la cantidad de espacio y alimento disponibles, la acumulación de productos metabólicos tóxicos, el pH, la temperatura del medio o una combinación de todos los factores anteriormente mencionados.
3. **Estacionaria:** Es la tercera zona de la curva (Fig. 12), en esta etapa se ha alcanzado el número máximo de bacterias que pueden habitar en un espacio determinado por lo que la reproducción se ralentiza y la cantidad de bacterias permanece prácticamente constante.
4. **Muerte:** Se identifica a esta como la cuarta y última zona de la curva (Fig. 12), en esta etapa las poblaciones de bacterias comienzan a decaer hasta alcanzar una población mínima, esta población está conformada por los individuos más resistentes y que han tenido un mayor éxito para adaptarse a los cambios en el medio.

Las fases de crecimiento bacteriano se pueden representar por medio de la Fig. 12, este diagrama ejemplifica el cambio en la cantidad de bacterias con respecto al tiempo. En el laboratorio, el cambio en la cantidad de bacterias se puede medir por medio de métodos directos (gravimétricos, espectrofotométricos, etc.) e indirectos (Bradford) [30].

En este proyecto es probable que las fases 1 y 2 puedan ser identificadas durante los primeros días del experimento. Ya que es cuando las CCMV se encuentran en un estado transitorio y en donde, teóricamente, se detectarían las mayores variaciones en parámetros como pH y potencial anódico ( $V_a$ ). Por otra parte, la fase 3 podría presentarse cuando las CCMV se encuentren en estado estacionario, ya que es la fase en la que los sistemas presentan las menores variaciones en los parámetros antes mencionados.

La fase 4 podría registrarse en las CCMV si ocurren cambios abruptos en el ambiente que den lugar a la muerte de las bacterias, e igual que en los casos anteriores, esto se detectaría por medio de cambios radicales en los parámetros antes mencionados.

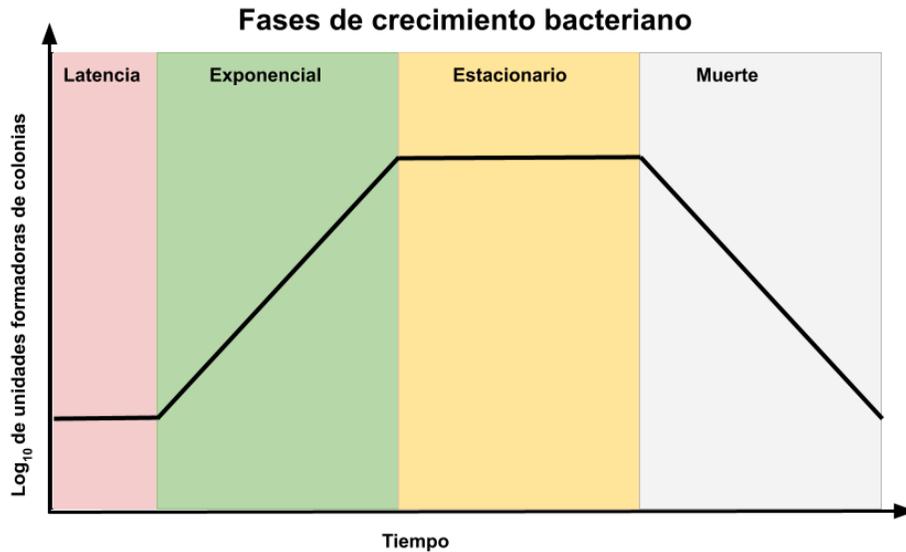


Figura 12 Diagrama de las fases de crecimiento bacteriano en condiciones de laboratorio, elaborado con los datos del modelo predictivo de ComBase [31]

## 2.4 Generación de electricidad a partir del proceso de tratamiento de aguas

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, se pueden obtener diferentes beneficios como resultado del tratamiento de aguas residuales. Siendo uno de los más notables la generación de electricidad, ya sea por la quema del biogás que se produce en los RAFA/FAFA o como producto de la transferencia extracelular de electrones (TEE) en los humedales artificiales (HA) que acoplan una celda de combustible. Siendo estos últimos los que presentan las mayores ventajas, debido a su bajo costo de construcción y de operación.

En décadas recientes se ha profundizado en la forma de aprovechar esta energía a una

escala mayor. Teniendo como uno de los ejemplos más representativos a la compañía holandesa *Plant-e*. Que en 2014 inició un proyecto en las cercanías de Amsterdam, en donde por medio de un panel de 15 m<sup>2</sup> y el empleo de *Oryza Sativa* (arroz) generaron aproximadamente 45 Wh. La electricidad generada en este proyecto resultó ser suficiente para la carga completa de smartphones [32].

Por otra parte, Nitisoravut y col. [1] ha encontrado que la producción de electricidad se encuentra ligada a factores como el tipo de planta, su ciclo de vida, el tipo de suelo, la calidad del efluente y su ubicación. En su artículo "*Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering*" se menciona que los organismos que tienen un mejor desempeño en la generación de electricidad son aquellos que se clasifican como fotosintéticos de C4 (Ej. *Aegiphila anomala*, *Aegiphila calamus*), estos son organismos que cuentan con la mayor actividad fotosintética y por lo tanto producen una mayor cantidad de carbohidratos. La liberación de estos compuestos a través de sus raíces promueve un mayor crecimiento y actividad de las poblaciones bacterianas. Lo que impacta de manera positiva en la producción de electricidad, convirtiendo a esta clase de sistemas en una alternativa viable para generación sustentable de electricidad y, como un beneficio secundario, la remoción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

## **2.5 Justificación del proyecto**

Un humedal artificial asistido electroquímicamente (HAAE) es un biorreactor diseñado para degradar materia orgánica (de manera tanto aerobia como anaerobia) y producir una corriente eléctrica de manera sustentable. La degradación de materia orgánica se realiza por la acción de microorganismos presentes en las raíces de un organismo vegetal y en el resto del biorreactor. Al mismo tiempo, por medio de una celda electroquímica, se captan electrones que resultan del metabolismo microbiano. De acuerdo con la literatura, esta tecnología tiene un gran potencial para emplearse en la etapa secundaria de una PTAR. En donde, empleando a las bacterias como catalizador ocurra la remoción de materia orgánica del efluente y a su vez se genere electricidad como resultado de la ruptura de enlaces moleculares [33].

De manera general, el sistema se compone de una planta, una matriz de soporte (en esta se coloca a la planta y permite el contacto de las raíces con la corriente contaminada), un ánodo y un cátodo (conectados mediante un circuito externo) y, en el caso de este proyecto, un separador o membrana entre los electrodos. Acorde con la investigación realizada por López [20] en el CIDETEQ, la membrana o separador tiene la función de disminuir la difusión del oxígeno en la zona del ánodo como parte del confinamiento de las reacciones y además, la transferencia selectiva de protones. Con el confinamiento de las reacciones se evita que el oxígeno interfiera en los procesos redox que se llevan a cabo en el ánodo.

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar el efecto que tiene en la generación de electricidad el uso de diferentes materiales como separadores entre los electrodos. Los cuales tienen la función de sustituir a una membrana comercial en una celda de combustible microbiana vegetal (CCMV). En este proyecto la CCMV emuló el comportamiento de un HAAE a una escala de laboratorio. Para ello se emplearon materiales asequibles (barro, poliestireno, poliacrilato de sodio y grenetina) con o sin un tratamiento físico químico complementario. Con los resultados obtenidos de esta investigación se planea complementar al estudio realizado por Ortiz Zamora [26] en donde se buscaba identificar un material asequible que fungiera como membrana de separación, beneficiando la producción de electricidad y la degradación de materia orgánica en las CCMV.

## **2.6 Objetivos del proyecto**

### **Objetivo general**

Comparar el desempeño de humedales artificiales asistidos electroquímicamente a escala de laboratorio utilizando diferentes materiales de separación entre los electrodos, por medio del seguimiento de parámetros eléctricos.

### **Objetivos particulares**

- Diseñar y construir el sistema experimental (estructura interna y externa de las CCMV).

- Sintetizar los materiales de separación que fungieron como membranas de intercambio iónico a partir de barro, grenetina, poliacrilato de sodio y poliestireno, así como los reactivos necesarios para modificar la estructura de los materiales.
- Definir las condiciones de operación del sistema experimental.
- Evaluar la generación de electricidad en el sistema experimental por medio de la medición de voltaje y corriente eléctrica.

## **2.7 Metas y alcances**

### **Metas y alcances**

- Construcción del sistema experimental (HAAE) a escala de laboratorio.
- Construcción y mantenimiento del espacio experimental donde se ubicarán los HAAE, este se denominará como “invernadero”.
- Construcción, calibración y resguardo de electrodos de referencia de Ag/AgCl 3M para la cuantificación de los potenciales de los electrodos en los HAAE.
- Los sistemas experimentales se alimentarán con agua residual sintética (solución nutritiva).
- Los HAAE operarán a temperatura ambiente en el espacio denominado como invernadero, a la intemperie, bajo la sombra.
- Los parámetros eléctricos se van a evaluar por medio de la generación de voltaje, densidad de corriente y densidad de potencia, estos últimos por medio del cambio en la resistencia eléctrica del sistema.

## Capítulo 3. Metodología

En este apartado se mencionan los procedimientos, protocolos y condiciones ambientales bajo los cuales se desarrollaron los experimentos. También se describe la metodología empleada en el manejo y análisis de los datos experimentales.

### 3.1 Construcción del sitio experimental (invernadero)

Se designó como espacio experimental al área ubicada frente al humedal artificial (HA) de la FESZ Campus 2. El sitio experimental abarcó un área aproximada de 6 m<sup>2</sup> y en ella se ubicaron 3 mesas sobre las cuales se situaron los sistemas experimentales (Fig. 13). Los experimentos se protegieron de la contaminación externa (lluvia, hojarasca, etc.) mediante lonas y, a su vez, registrando las variaciones en la temperatura ambiente por medio de un termómetro de líquido en vidrio. Los materiales empleados en la construcción del “invernadero”, en su mayoría, se obtuvieron a partir de desechos sólidos urbanos (mesas, ramas y carrizos). Adicional a las mesas designadas para los experimentos, se designó una mesa para emplearla como sitio de desarrollo de plantas (criadero). En esta mesa se adecuaba a los organismos vegetales para soportar las condiciones experimentales y, a su vez, que estos presentaran un tamaño adecuado (Fig. 13). Las plantas que se desarrollaron en el criadero son de la especie *Phragmites australis* y fueron recolectadas del HA ubicado en el campus II de la FESZ.



Figura 13 Vista general del invernadero y del criadero de plantas

### 3.2 Síntesis de los separadores o “membranas” de separación

Como se ha mencionado en la literatura, se requiere que el separador sea física y químicamente estable, asequible y selectivo al flujo de  $H^+$  de la zona anódica ( $Z_a$ ) hacia la zona catódica ( $Z_c$ ). Las características anteriores las podemos hallar en materiales como el barro (Ba), el poliacrilato de sodio (PAS), la grenetina (Gt) y el poliestireno (POL). Se eligió al barro debido a que la mezcla de sales que lo conforman tienen la capacidad de formar estructuras cristalinas insolubles, similares a las que se encuentran en las zeolitas, las cuales actúan como una membrana con la capacidad de disminuir la dureza en una muestra de agua. Existe la posibilidad de que al dopar la mezcla de barro con carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) se promueva la formación de cristales insolubles que faciliten la difusión de  $H^+$  en los humedales artificiales asistidos electroquímicamente (HAAE). Partiendo de esta premisa se sintetizó un separador de barro con una carga del 5% de carbonato de calcio en su estructura. El PAS es un polímero con grupos carboxilo ( $R - COO^-$ ) unidos a iones  $Na^+$  en su estructura. Teóricamente, esta característica lo vuelve apto para ser empleado como separador en este proyecto, ya que al reemplazar el  $Na^+$  por  $H^+$  se obtendría una membrana débilmente ácida. Comercialmente, los  $R - COO^-$  se encuentran presentes en las MIC débilmente ácidas para disminuir la dureza del agua y emplearla con fines de consumo o de uso doméstico. Partiendo de los supuestos anteriores, para reemplazar al  $Na^+$  por  $H^+$  en la estructura del PAS (Fig. 14) se lavó el material con una solución 1 M de HCl. Este proceso se denomina como retrolavado y, en el ámbito comercial, se usa para regenerar a la membrana cuando esta ya no puede remover más iones de una corriente. Una vez completado el proceso de lavado con HCl 1 M este material se denominó como PASH.

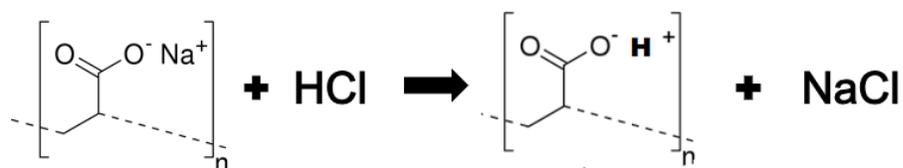
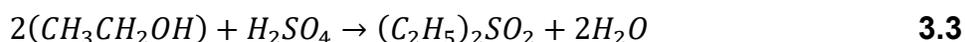


Figura 14 Activación del PAS con HCl, elaboración propia

La gredina al ser un polisacárido natural puede ser susceptible a la sulfonación en algunas partes de su estructura. Bajo esta premisa, se diseñó un experimento en el que la gredina fue sulfonada por medio de sulfato de dietilo ((C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Por medio de este proceso, teóricamente, se convirtió a la gredina en una membrana fuertemente ácida. El poliestireno es un polímero sintético con radicales arilo en su estructura. La presencia de estos radicales abre la posibilidad de sulfonarlos en una posición PARA mediante el uso de (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Teóricamente este proceso se lleva a cabo mediante un mecanismo sustitución electrofílica en el arilo (Fig. 15) y por medio de este proceso, teóricamente, se convertiría al poliestireno en una membrana fuertemente ácida. Para llevar a cabo la sulfonación de los polímeros se sintetizó (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a través de la esterificación doble del etanol con ácido sulfúrico, esta reacción anterior se puede resumir en la [Ec. 3.3].



Se empleó al (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ya que comercialmente, este reactivo se emplea para introducir grupos sulfonato en distintos compuestos [34] (Ej. síntesis de colorantes, síntesis de polímeros, entre otros).

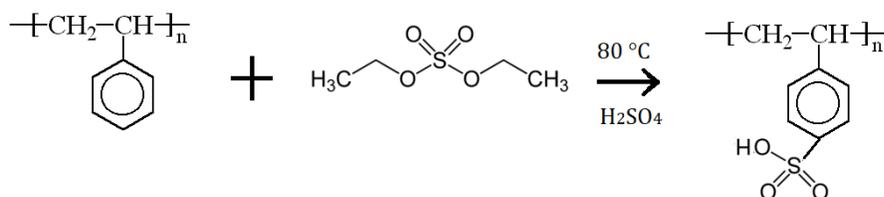


Figura 15 Sulfonación del poliestireno con sulfato de dietilo, elaboración propia

A continuación, se explicará el proceso de síntesis y modificación de los separadores. Los resultados obtenidos se muestran en el **Capítulo 4**.

### 3.2.1 Síntesis del separador de barro con una carga del 5% de CaCO<sub>3</sub> (BaCa) y el separador de barro (Ba)

La síntesis de la membrana BaCa se llevó a cabo modificando el método de impregnación sucesiva descrito por De Jesús [35]. A grandes rasgos este procedimiento consiste en inundar los poros del barro con soluciones precursoras (en adelante, SP) y dar pie a la formación de las estructuras cristalinas de interés. Para este caso se emplearon SP de bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) y cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>). Ya que cuando estas sales interactúan entre sí se da un intercambio iónico que da lugar a la formación de los cristales de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).

Para estimar el volumen necesario de cada una de las disoluciones precursoras, se colocó 1 g del barro previamente secado a 200 °C durante 2 horas en un vaso de precipitados de 150 mL. Después se procedió a gotear agua destilada en el barro hasta que se observó que una gota de agua se mantenía sobre la superficie sin absorberse. Durante el procedimiento anterior, el barro fue mezclado constantemente con ayuda de una espátula. El dato obtenido a partir del experimento anterior se denominó inundación promedio ( $I_p$ ), y experimentalmente se determinó que esta condición se alcanza cuando se han goteado 0.68 mL de agua destilada ( $v_{H_2O}$ ) en el barro seco ( $m_{bs}$ ).

Como resultado de este experimento se planteó la siguiente relación [Ec. 3.4]:

$$I_p = \frac{(v_{H_2O})}{(m_{bs})} \quad 3.4$$

y sustituyendo los datos obtenidos en el experimento se determinó que para nuestro barro se obtiene [Ec. 3.4.1]:

$$I_p = \frac{(0.68\text{mL})}{(1\text{g de barro seco})} = 0.68 \frac{\text{mL}}{\text{g}} \quad 3.4.1$$

Esta relación permite definir el volumen de las disoluciones precursoras ( $V_{sp}$ ) de  $\text{NaHCO}_3$  y de  $\text{CaCl}_2$  necesario para saturar los poros. Y de esta manera, dar lugar a las reacciones de sustitución necesarias para el crecimiento de los cristales de  $\text{CaCO}_3$ .

Para impregnar 100 g del barro con las SP se plantea la siguiente relación [Ec. 3.5], sustituyendo los valores obtenidos en la [Ec. 3.4.1] en la [Ec. 3.5] se obtiene la [Ec. 3.5.1]:

$$V_{sp} = m_{bs}(I_p) \quad 3.5$$

$$V_{sp} = (100g)(0.68 \frac{ml}{g}) = 68ml \quad 3.5.1$$

A partir de la [Ec. 5.1] se establece que para impregnar los 100 g de barro se requieren 68 mL de cada SP.

### **Acondicionamiento del barro para impregnación**

En la síntesis de la membrana se emplearon 100 g del barro secados a 120 °C durante 2 horas. Mediante el secado se garantiza disminuir la presencia de moléculas de agua dentro de los poros del barro. Con el secado del barro se aumenta la probabilidad de que las SP inunden totalmente los poros lo que, teóricamente, permite que una mayor cantidad de sales pueda ser retenida dentro de los poros. Por lo que, a una mayor cantidad de sales dentro de los poros es más probable que ocurra la formación de los cristales de  $\text{CaCO}_3$ .

### **Estimación de la cantidad necesaria de sales para la impregnación del barro seco**

Dado que se plantea obtener una membrana con un 5% de  $\text{CaCO}_3$  se puede estimar que por cada 100 g de la membrana 5 g corresponden a  $\text{CaCO}_3$ . Partiendo de esta suposición se planteó la reacción que describe a la formación del  $\text{CaCO}_3$  [Ec. 3.6].



Con base en la [Ec. 3.6] se plantea la estequiometría para el cálculo de las masas de  $\text{NaHCO}_3$  y de  $\text{CaCl}_2$  [Ec. 3.7] y [Ec. 3.8].

$$5gdeCaCO_3 \frac{(1moldeCaCO_3)}{(100.0869gdeCaCO_3)} \frac{(2moldeNaHCO_3)}{(1moldeCaCO_3)} \frac{(384gdeNaHCO_3)}{(1moldeNaHCO_3)} = 8.4gdeNaHCO_3 \quad 3.7$$

$$5gdeCaCO_3 \frac{(1moldeCaCO_3)}{(100.0869gdeCaCO_3)} \frac{(1moldeCaCl_2)}{(1moldeCaCO_3)} \frac{(110.98gdeCaCl_2)}{(1moldeCaCl_2)} = 5.549gdeCaCl_2 \quad 3.8$$

### **Preparación de las disoluciones precursoras**

El volumen de las disoluciones precursoras se obtuvo a partir de la [Ec. 3.5.1]. Con estos datos se descubrió que de cada disolución se requieren 68 mL por cada 100 g de barro seco. En ambos casos, por medio de una balanza analítica se pesó la cantidad necesaria de sales [Ec. 3.7] y [Ec. 3.8]. Las sales se disolvieron en agua destilada a temperatura ambiente a través de agitación constante.

### **Impregnación del barro seco con las soluciones precursoras**

La impregnación del barro se llevó a cabo en 2 etapas. En la primera etapa se impregnó al barro con la solución de  $\text{NaHCO}_3$ , la cual fue goteada lentamente sobre el barro mientras se mantenía una agitación constante por medio de una espátula. Tras la primera impregnación se dejó reposar al barro durante 12 horas. Posteriormente, fue secado a  $200^\circ\text{C}$  durante 2 horas con la finalidad de eliminar el agua que se absorbió en los poros del barro. Con este proceso se aumenta la probabilidad de que la segunda solución sea absorbida en los poros y se dé lugar a la reacción de sustitución que se planteó en apartados anteriores. En la segunda etapa de impregnación, siguiendo los pasos anteriores, se impregnó al barro con la solución de  $\text{CaCl}_2$ . Terminada la segunda impregnación se moldeó al barro para que adquiriera la forma de un cilindro de 10 cm de diámetro y una altura de 2 cm, en esta etapa se dejó reposar al material por 12 horas.

## Horneado del barro

Una vez terminada la segunda impregnación, se llevó a cabo el horneado del barro a 900° C durante 2 horas. Con este procedimiento se asegura que el barro adquiera estabilidad mecánica, química y, a su vez, que sea permeable al flujo del agua.

En el caso de la membrana Ba, se mezclaron 100 g de barro con 68 mL de agua destilada. La mezcla anterior se amasó hasta que se obtuvo una mezcla homogénea con una consistencia firme y de un color café oscuro. La masa fue moldeada hasta adquirir la forma de un cilindro de 10 cm de diámetro y un grosor de 2 cm; una vez moldeada se dejó reposar por 12 horas y posteriormente se horneó a 900 °C durante 2 horas.

### 3.2.2 Síntesis del separador PASH y del separador PAS

El PAS es un polímero super absorbente procedente de la polimerización del ácido poliacrílico. Fue desarrollado en la década de los 60 por la *DOW Chemical Company* como una alternativa para la retención de humedad en los suelos. Teóricamente, el PAS puede absorber un volumen de agua equivalente a 100 y 1000 veces su propio peso.

El volumen de agua varía en función del contenido de sales, ya que a una mayor concentración de sales menor será la cantidad de agua que será absorbida por el PAS. La presencia de los grupos  $[R - COO - Na]_n$  en la estructura del polímero abre la posibilidad de que el  $Na^+$  pueda ser reemplazados por  $H^+$  mediante un lavado con una solución 1 M de HCl. Mediante este tratamiento se convirtió al PAS en una membrana de intercambio catiónico débilmente ácida.

El PAS fue adquirido de la empresa “Industrias iECSA”<sup>1</sup>, y sus propiedades de absorción se caracterizaron mediante la absorción de agua destilada en 1 g del PAS seco. En este experimento también se determinó la capacidad de este PAS para expandirse y, a su vez, también se identificaron otros factores que podrían llegar a interferir en el desempeño de las CCMV.

---

<sup>1</sup> Industrias iECSA: Empresa dedicada a la venta de productos agroindustriales en México.

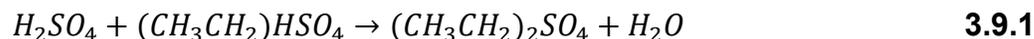
Para cuantificar la capacidad absorbente del PAS, se diseñó un experimento en el que se colocó 1 g de PAS dentro de un vaso de precipitados de 1 L y se procedió a hidratarlo con agua hasta que se observara que una gota de agua se mantuviera sobre la superficie del PAS sin absorberse. A partir de estos experimentos se determinó que 1 g de este PAS es capaz de absorber 480 mL de agua destilada y de expandirse hasta abarcar un volumen aproximado de 600 cm<sup>3</sup>. También se descubrió que este material no presenta estabilidad mecánica y conforme aumenta el flujo de agua el PAS tiende a ser arrastrado con la corriente.

Con el experimento anterior se concluyó que, para emplear el PAS como separador en este proyecto se requiere emplear un aglutinante que le dé estabilidad y porosidad al material. Se seleccionó grenetina como aglutinante debido a: su bajo costo, estabilidad en medios acuosos y estabilidad a temperatura ambiente (en promedio de 25 °C). En la síntesis de estos separadores se emplearon 5 g de PAS, el cual fue hidratado con 100 mL de agua destilada a temperatura ambiente. En el caso del separador PASH, después de ser hidratado con el agua destilada, este fue lavado con 100 mL de la solución 1 M de HCl. Para aglutinar el PAS, en ambos casos, se emplearon 14 g de grenetina, la cual fue previamente hidratada con 125 mL de agua destilada a 30 °C. Posterior al mezclado con grenetina, se depositó a los materiales en un molde cilíndrico de 10 cm de diámetro y con una altura de 1 cm. Dentro del molde, se dejó reposar a las membranas durante 2 horas a temperatura ambiente. Terminado el plazo de 2 horas se almacenó a las membranas en el cuarto frío a -10 °C hasta que estas fueron empleadas en las CCMV.

### **3.2.3 Síntesis del agente sulfonante (sulfato de dietilo)**

Para añadir los grupos  $R - SO_2O - H$  a una cadena orgánica se requiere de una molécula que sea considerada como un buen nucleófilo. Es decir, una molécula cuya electronegatividad pueda compensar la deficiencia electrónica que experimenta un carbono unido a un ion con mayor electronegatividad (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, etc.). En este caso el agente sulfonante idóneo es el sulfato de dietilo ((C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), el cual se puede obtener a partir de la esterificación doble entre el CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH y el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

La esterificación se describe mediante las ecuaciones [Ec. 3.9] y [Ec. 3.9.1]:



Para la síntesis de este reactivo se emplearon 80 mL de etanol y 40 mL de  $H_2SO_4$ , la esterificación se llevó a cabo en un matraz bola de 500 mL con agitación magnética y reflujo constante. Este proceso se llevó a cabo en 2 etapas, en la primera etapa se calentaron los 80 mL de  $CH_3CH_2OH$  hasta  $30\text{ }^\circ\text{C}$  a presión atmosférica con un goteo lento y constante de  $H_2SO_4$ . Lo anterior se debe a que la primera etapa de esta reacción [Ec. 9] es rápida y exotérmica, por lo cual el goteo del  $H_2SO_4$  debe realizarse en un intervalo de 40 a 60 minutos hasta que se completen los 40 mL de  $H_2SO_4$ . Una vez que se adicionaron los 40 mL del  $H_2SO_4$  se elevó la temperatura del sistema hasta  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . El aumento en la temperatura se debe a que la segunda etapa de la reacción [Ec. 9.1] se considera lenta y ligeramente endotérmica. Cuando se alcanzaron los  $90\text{ }^\circ\text{C}$  el sistema permaneció en agitación por 2 horas, y la reacción se consideró concluida cuando se notó un intenso aroma a menta. Lo que, de acuerdo con las fichas de seguridad, es característico del  $(C_2H_5)_2SO_4$  [36].

### 3.2.4 Síntesis del separador POLS y del separador POL

En la síntesis del separador POLS se emplearon 24 g de poliestireno, los cuales fueron disueltos en 200 mL de acetona en un vaso de precipitados de 400 mL. El sistema se mantuvo bajo un régimen de agitación y calentamiento constante hasta alcanzar una temperatura de reacción de  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Cuando se alcanzó la temperatura de reacción se adicionaron 80 mL de  $(C_2H_5)_2SO_4$ , procediendo a dejar reaccionar al sistema por 2 horas.

Al final de la reacción se obtuvo un material sólido, de una forma cilíndrica con un radio de 10 cm y un espesor de 1 cm, con el olor característico de la acetona y con una coloración café. El separador POLS fue enjuagado con agua destilada hasta que el olor de la acetona dejara de ser intenso y, posteriormente, se dejó secar durante dos semanas a temperatura ambiente.

En el caso del separador POL, se emplearon 24 g de poliestireno, los cuales fueron disueltos en 200 mL de acetona a 30 °C. Cuando el poliestireno se encontró completamente disuelto este fue vaciado en un molde cilíndrico de 10 cm de diámetro y con un espesor de 1 cm. El separador POL fue lavado con agua destilada y fue secado a temperatura ambiente durante 2 semanas.

### **3.2.5 Síntesis del separador Gt y del separador GtS**

El separador Gt se obtuvo disolviendo 14 g de grenetina comercial en 125 mL de agua destilada a 80 °C con agitación constante. Cuando la grenetina estuvo disuelta se procedió a vaciarla en un molde cilíndrico de 10 cm de diámetro y con un espesor de 1 cm. El material reposó durante 40 minutos a temperatura ambiente antes de ser almacenado en el cuarto frío a -10 °C hasta su implementación en las CCMV.

En la síntesis del separador GtS se emplearon 14 g de grenetina comercial, los cuales fueron disueltos en 125 mL de agua destilada a 80 °C con agitación constante. Una vez disuelta la grenetina se añadió 1 mL de  $(C_2H_5)_2SO_4$  y se dejó reaccionar al sistema durante 2 horas. Se considera que la reacción ha finalizado cuando la grenetina pasa de un color amarillo a un tono café claro. Terminado el proceso de síntesis se dejó reposar al material durante 40 minutos en un molde cilíndrico de 10 cm de diámetro y con una altura de 1 cm, antes de que este se almacenara a -10°C en el cuarto frío hasta su implementación en las CCMV.

### 3.3 Construcción y montaje de los humedales artificiales asistidos electroquímicamente (HAAE o CCMV)

En este proyecto se emplearon celdas de combustible microbianas vegetales (CCMV) para emular el comportamiento de un humedal artificial asistido electroquímicamente (HAAE) (Fig. 16). Por este motivo, en este proyecto se usan las abreviaciones HAAE o CCMV para describir a los sistemas experimentales.

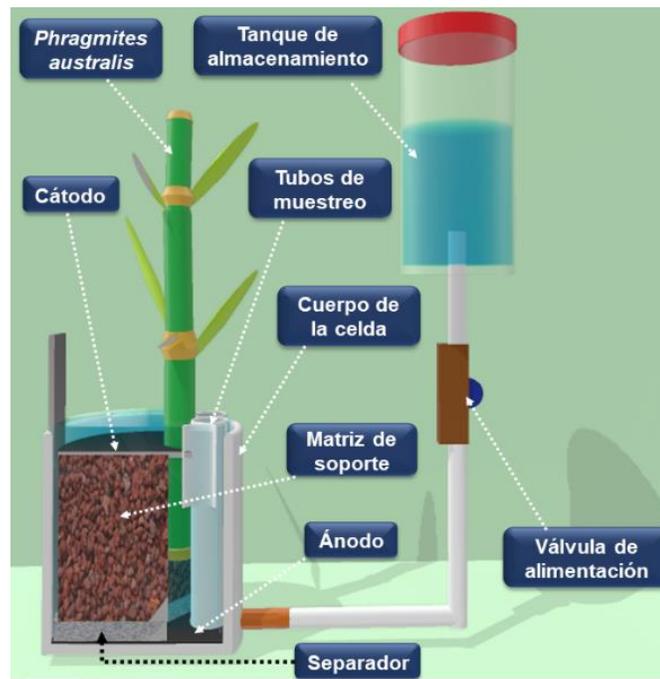


Figura 16 Esquema del humedal artificial asistido electroquímicamente a escala laboratorio, elaboración propia

Los HAAE empleados en este proyecto constan de 8 partes (Fig 16): Cuerpo de la celda, matriz de soporte (tezontle), electrodos (ánodo y cátodo), organismo vegetal (*Phragmites australis*), tubos de muestreo ( $t_m$ ), membrana de separación, tanque de almacenamiento (TA) y válvula de alimentación. El cuerpo de la celda se conforma de un cople, un tubo y una tapa sanitaria de PVC, todos con un diámetro de 10 cm (4 in) y con un volumen total de 785 cm<sup>3</sup>.

Estas piezas fueron unidas con cemento para PVC y las uniones de las piezas se reforzaron con plastilina epóxica. Lo anterior con la finalidad de minimizar la posibilidad de fugas y de aumentar la resistencia del sistema a la corrosión. En la parte inferior del cuerpo de la celda se colocó un tubo de plástico de 5 mm de diámetro y 6 cm de longitud, el cual conectaba al HAAE con el TA por medio de una venoclisis. Esta configuración permitió que el HAAE se alimentara con la solución nutritiva (SN) por medio de un flujo ascendente, los TA y las venoclisis se cubrieron con cinta para minimizar el crecimiento de algas. Mediante este procedimiento se minimizó la influencia negativa que las algas podrían llegar a tener en el desempeño de las HAAE.

Los electrodos se conforman por un colector de electrones y filtro de carbono unidos mediante hilo de acero inoxidable (Fig 17). El colector de electrones empleado en este proyecto fue malla de acero inoxidable aleación 304<sup>2</sup>. Cuando los electrodos estuvieron ensamblados, estos se clasificaron en ánodo y cátodo. Los ánodos se colocaron en la parte inferior de las celdas y sobre estos se colocaron los tubos de muestreo ( $t_m$ ) para el potencial de ánodo y pH.

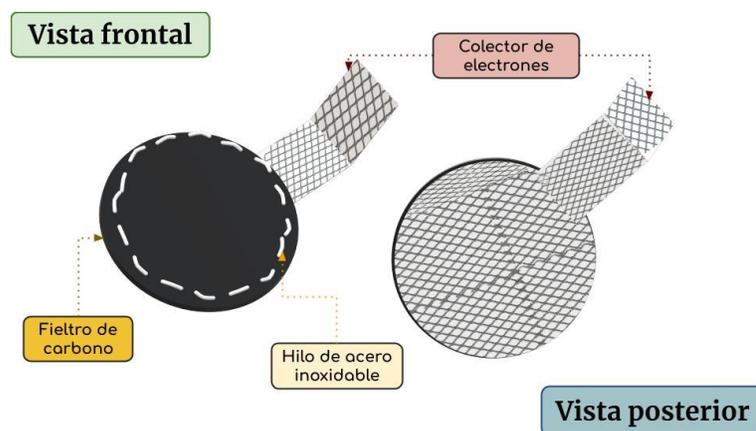


Figura 17 Diagrama de los electrodos, elaboración propia

El  $t_m$  de potencial anódico fue incrustado en la estructura del electrodo, mientras que, el  $t_m$  de pH solo se situó sobre la superficie de este. Cuando los  $t_m$  se hallaron acoplados se espolvoreó aproximadamente 8 gramos de grafito en polvo, con la finalidad de facilitar la

<sup>2</sup> Aceros continental S.A. de C.V.

TEE hacia el ánodo. Sobre el ánodo se colocó la membrana y sobre esta se colocó a la muestra de *Phragmites australis*. Procurando que las raíces de la planta se esparcieran uniformemente por todo el espacio disponible en la celda y sin que estas se dañasen. Sobre las raíces de la planta se colocó un volumen aproximado de 550 cm<sup>3</sup> de tezontle, procurando que este le diera estabilidad a la planta y sin que este dañase las raíces. Terminada esta etapa la celda fue inundada con 400 mL de la solución nutritiva (SN). Esta configuración se mantuvo 10 días, durante los cuales se midió el cambio en el potencial anódico mediante el electrodo de referencia (ER) de Ag/AgCl 3M (**Anexo 1**).

Cuando culminaron los 10 días, se colocaron aproximadamente 158 cm<sup>3</sup> de tezontle y sobre este se colocó al cátodo. El cátodo se acopló a un t<sub>m</sub> para medir las variaciones en el potencial catódico. Una vez acoplado el cátodo, se adicionó SN hasta que el cátodo se encontró cubierto por una capa fina de la solución. Las celdas operaron bajo esta configuración durante 7 días y al término de estos se colocó una resistencia eléctrica externa de 1 kΩ. La incorporación de la resistencia eléctrica completó el circuito eléctrico externo, lo que permitió que los electrones fluyeran entre la zona anódica y catódica. Mediante el flujo constante de electrones se propició la reacción en la superficie del cátodo y, por consiguiente, se aseguró que el HAAE produjera una corriente eléctrica.

En total se construyeron 9 CCMV (Tabla 1) que emulan un HAAE en condiciones de laboratorio. De las 9 celdas construidas se designó a una CCMV como celda control (CC), la cual se empleó como referencia para identificar los cambios producidos por los separadores en otras celdas. La CC es un sistema que incorpora pellón como material de separación entre el cátodo y la matriz de soporte. Esta celda también se construyó acorde con lo explicado con lo explicado en la sección 3.3, con la diferencia de que en esta las raíces de la planta están en contacto directo con el grafito y con el ánodo.

En las 8 CCMV restantes el separador se colocó entre el ánodo y las raíces de la planta, se plantea que con esta configuración se propiciará una disminución en la concentración de oxígeno de la zona anódica y, por consiguiente, la TEE se dé con mayor facilidad hacia el ánodo.

**Tabla 1** Configuración de las CCMV construidas

No. De celda	HAAE	Configuración
1	CBa	Celda con barro como separador entre el tezontle y el ánodo
2	CBaCa	Celda con barro dopado con carbonato de calcio como separador entre el tezontle y el ánodo
3	CC	Celda control con pellón como separador entre el cátodo y el tezontle
4	CGt	Celda con grenetina como separador entre el tezontle y el ánodo
5	CGtS	Celda con grenetina sulfonada como separador entre el tezontle y el ánodo
6	CPAS	Celda con poliacrilato como separador entre el tezontle y el ánodo
7	CPASH	Celda con poliacrilato lavado con ácido como separador entre el tezontle y el ánodo
8	CPOL	Celda con poliestireno como separador entre el tezontle y el ánodo
9	CPOLS	Celda con poliestireno sulfonado como separador entre el tezontle y el ánodo

La distribución de las 9 CCMV en el invernadero se muestra en la Fig. 18, en esta figura se observa que las celdas se distribuyeron sobre una de las mesas del invernadero (parte izquierda) y los TA se colocaron en la parte superior del invernadero (recipientes en color café) por medio de una cuerda de yute.

Las CCMV permanecieron en esta ubicación durante los 90 días que duró el experimento. En la mesa se dejaron espacios libres con la finalidad de que en estos se colocaran los instrumentos para mediciones o libretas para el registro de los datos experimentales.



Figura 18 Sistemas experimentales ensamblados y distribuidos a lo largo de la mesa del invernadero; elaboración propia

### **3.4 Recopilación de los datos experimentales (circuito abierto y circuito cerrado) en los HAAE**

Para evaluar el desempeño de los HAAE se llevó a cabo el registro de: potenciales de electrodos (ánodo y cátodo), voltaje de celda, pH, temperatura interna, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno y oxígeno disuelto. La recolección de estos datos se llevó a cabo en 2 etapas, circuito abierto y circuito cerrado. Se considera que los HAAE operaron en circuito abierto de los días 1 al 10, durante este periodo los HAAE no incorporan una resistencia eléctrica externa y debido a la ausencia de esta se considera que los HAAE no generan una corriente eléctrica.

Al término de los 10 días se añadió una resistencia eléctrica de 1 k $\Omega$  para conectar al ánodo y al cátodo de los HAAE. Motivo por el cual, a partir del día 11 al 90 se considera que los HAAE operaron en circuito cerrado y por consiguiente los sistemas ya generan una corriente eléctrica. Para tomar las mediciones en circuito cerrado se removió temporalmente la resistencia de 1 k $\Omega$  de los HAAE. El registro de los potenciales de ánodo y cátodo fue por medio del ER acoplado al multímetro AMPROBE 38XR-A (Fig. 19) mediante de cables banana-caimán. En la medición de los potenciales de ánodo y cátodo, se colocó al ER en los t<sub>m</sub> correspondientes (Fig. 19, zonas 1 y 2).

La medición del voltaje de celda se llevó a cabo conectando directamente al multímetro a los colectores de electrones del ánodo y al cátodo (Fig. 19, zona 3). A los datos recolectados con el ER se les restaron 220 mV, de modo que estos se reportaran con base al electrodo normal de hidrógeno (ENH). El registro de los datos se llevó a cabo cuando la lectura observada en el multímetro presentó un valor estable, en promedio esta condición se alcanzaba cuando habían transcurrido 3 minutos.

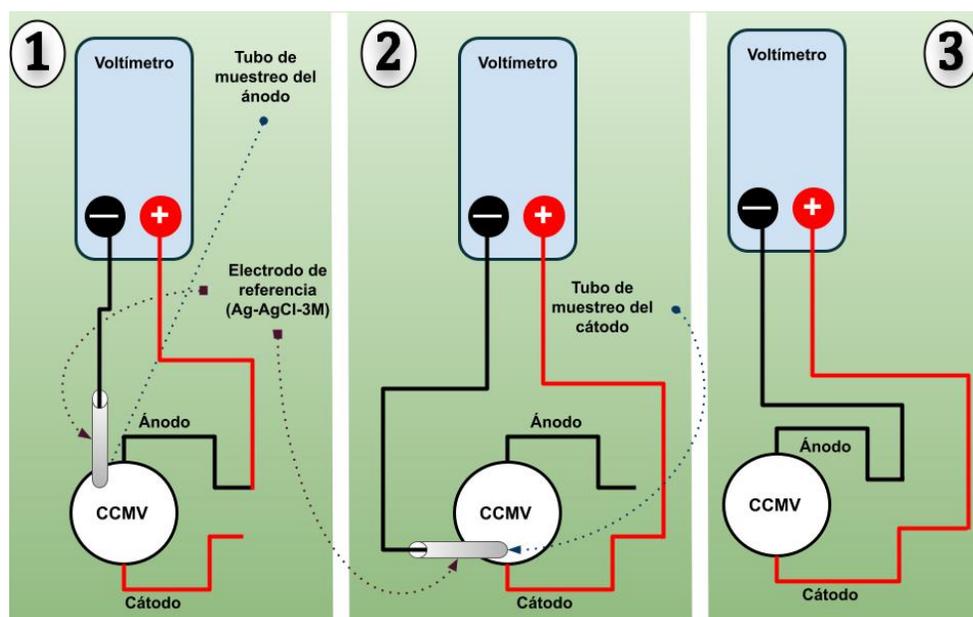


Figura 19 Representación esquemática de la toma de datos a circuito abierto con el multímetro 1. Medición del potencial del ánodo, 2. Medición del potencial del cátodo, 3. Medición del voltaje de la celda; elaboración propia

Los datos como pH, temperatura interna (Tc), conductividad eléctrica (S) y oxígeno disuelto (OD) se midieron con el multiparamétrico HANNA Edge HI2020-01 por medio de: el electrodo HI2020 para pH, el electrodo HI764080 para OD y el electrodo HI763100 para la conductividad eléctrica. De manera análoga a las mediciones de los potenciales, en la medición de estos parámetros se introdujo el electrodo en el t<sub>m</sub> correspondiente. Para la recolección de estos datos se requirió que las lecturas en el multiparamétrico se estabilizaran (Fig. 20), este proceso requirió de al menos 5 minutos.

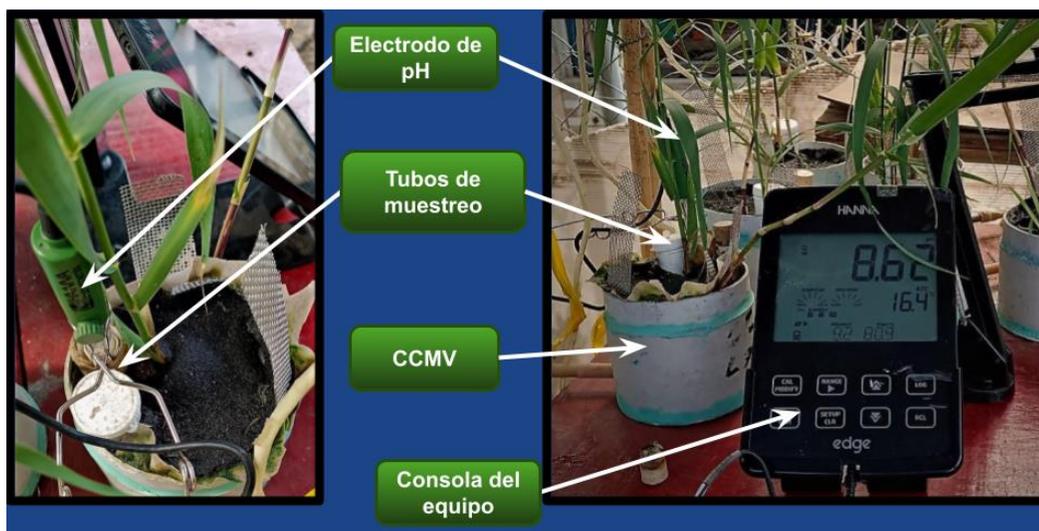


Figura 20 Ejemplo de la toma de pH en las CCMV con el equipo HANNA edge 2020-01, elaboración propia

Los datos de DQO se obtuvieron por medio de la digestión de muestras con dicromato de potasio y de acuerdo con lo descrito en la **NMX-AA-030/2-SCFI-2011**.

### 3.4.1 Recolección de los datos para la construcción de las curvas de polarización

Las curvas de corriente-potencial o "curvas de polarización" son de las herramientas más usadas para evaluar el desempeño electroquímico de una CCM/CCMV (Fig. 21).

Estas curvas muestran cómo que disminuye el voltaje de una celda cuando aumenta la densidad de corriente. La tendencia de estas curvas se divide en 3 zonas (Fig. 21): Activación, Óhmica y transporte de masa [37]. En cada una de estas zonas se hace presente un fenómeno característico que, de acuerdo con la literatura [38] [39] [40], se describe de la siguiente manera:

**Zona de activación:** La presencia de esta zona se ubica cuando los valores de voltaje son altos y las densidades de corriente son bajas (Fig. 21). La forma de esta curva está asociada a la energía necesaria para activar el cátodo y que proceda la reacción química en su superficie. Generalmente en esta zona se puede notar una rápida caída en el potencial y la curva que describe a los datos experimentales, generalmente, presenta un comportamiento exponencial.

**Zona óhmica o de trabajo de la celda:** Esta zona presenta un comportamiento lineal y en ella se describen las pérdidas de potencial ocasionadas por los componentes internos de la celda. Lefebvre y col. [39] mencionan que, de manera teórica, en esta zona es posible calcular la resistencia interna ( $R_{int}$ ) de una CCM convencional a partir de la pendiente de la curva que describe al voltaje.

Lo anterior es posible cuando la CCM produce su máxima densidad de potencia operando bajo una determinada resistencia externa ( $R_{ext}$ ). Experimentalmente es posible determinar que cuando se alcanza la condición anterior  $R_{ext}$  es igual a  $R_{int}$ . Partiendo de esa premisa, en este proyecto se estimó la  $R_{int}$  de las CCMV al despejar la ecuación de la recta que describe al voltaje en la zona óhmica. El planteamiento anterior se realizó de la siguiente manera:

A partir de la ley de Ohm [Ec. 3.10] en donde  $V$  es el voltaje,  $I$  es la intensidad de corriente y  $R$  es la resistencia:

$$V = RI \quad 3.10$$

Para describir la  $R_{int}$  en estos HAAE se realizó una analogía entre la [Ec. 3.10] y la curva que describe el comportamiento del voltaje con respecto al cambio en la densidad de corriente en la zona de trabajo [Ec. 3.11]). Bajo esta premisa los términos RI son equivalentes a los términos  $b - mx$ :

$$V_{CCMV} = b - mx \quad \mathbf{3.11}$$

La [Ec. 11] plantea los valores de RI como una función lineal con una pendiente negativa, ya que en la literatura se menciona que el voltaje en esta zona disminuye conforme crece la densidad de corriente.

De la ecuación anterior se factorizó  $m$  obteniendo la [Ec. 3.11.1].

$$V_{CCMV} = m\left(\frac{b}{m} - x\right) \quad \mathbf{3.11.1}$$

En la [Ec. 3.11.1] se presentan 2 términos ( $m$  y  $\frac{b}{m} - x$ ), los cuales serían análogos a los términos RI de la [Ec. 10]. Siendo  $\frac{b}{m} - x$  el equivalente a  $I$  y " $m$ " el equivalente a  $R$ . Debido a que en este proyecto las curvas de polarización se construyeron en función de la densidad de corriente, " $m$ " se define de la siguiente manera [Ec. 3.12]:

$$m = R_{int}A \quad \mathbf{3.12}$$

En la [Ec. 3.12] " $m$ " se define como el producto entre la  $R_{int}$  y el área del ánodo ( $A$ ), este último es constante en todas las CCMV ya que todas emplean ánodos con el mismo diámetro y espesor.

Por lo que para calcular de manera teórica la  $R_{int}$  en estos HAAE se puede hacer por medio de la [Ec. 3.12.1]

$$R_{Int} = \frac{m}{A}$$

3.12.1

**Zona de transporte:** Se puede identificar a esta zona cuando la densidad de corriente es alta. Experimentalmente, en esta zona se ha identificado que ocurren cambios en la difusión de reactivos/productos en el cuerpo del electrolito y dependiendo de la tendencia que se muestre en las curvas es posible identificar problemas de transferencia de masa.

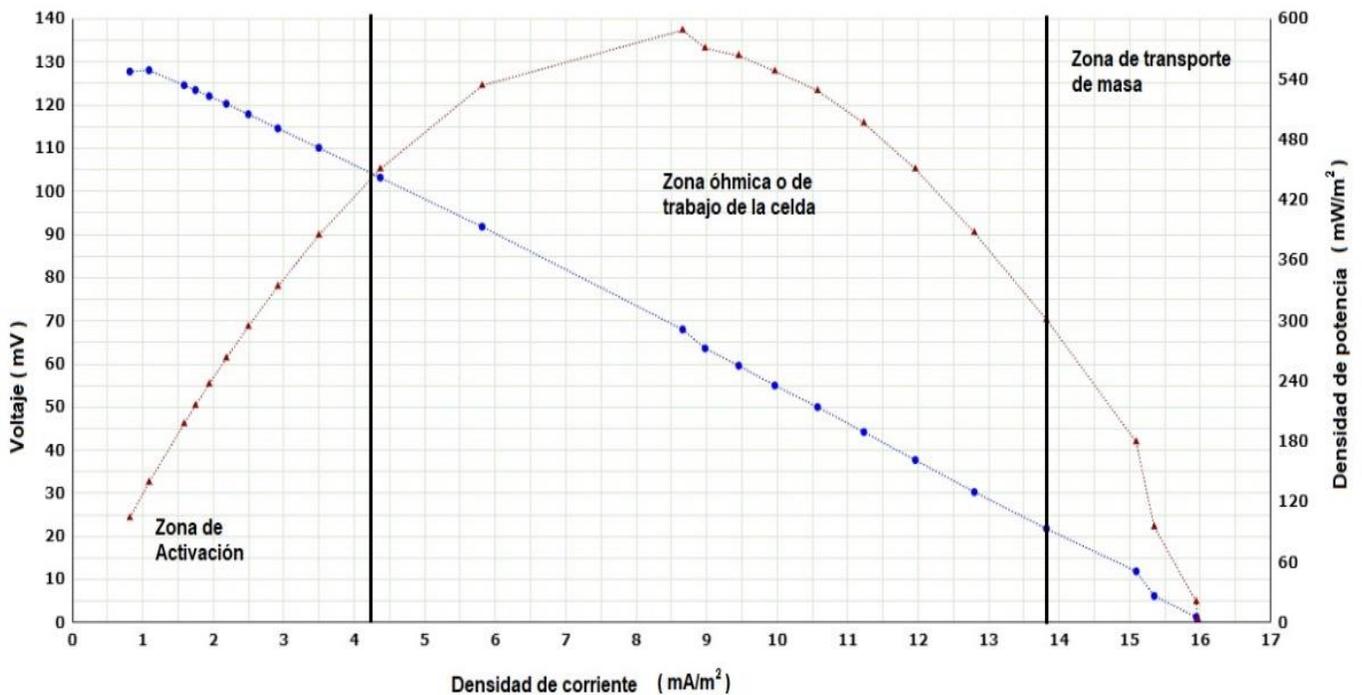


Figura 21 Ejemplo de una curva de polarización con las 3 zonas que la caracterizan (zona de activación, zona de trabajo y zona de transferencia de masa), elaboración propia

Para construir las curvas de polarización se realizaron 24 mediciones (Tabla 2), este procedimiento se realizó conectando a la CCMV a una caja de resistencias EXTECH 380400 (Fig. 22).

Las lecturas se realizaron en el intervalo de  $20\text{ k}\Omega$  a  $1\Omega$  y en la Tabla 2 se describe la cantidad de datos recolectados por cada intervalo.

**Tabla 2** Intervalos de resistencia eléctrica para la construcción de las curvas de polarización

Intervalo de resistencia	Variación entre las mediciones	Cantidad de lecturas por intervalo
20 k $\Omega$	-	1
15 k $\Omega$	-	1
10 k $\Omega$ a 1 k $\Omega$	1 k $\Omega$	10
900 $\Omega$ a 100 $\Omega$	100 $\Omega$	9
50 $\Omega$	-	1
10 $\Omega$	-	1
1 $\Omega$	-	1

Adicional de la caja de resistencias, se empleó un multímetro BK Precision 393 (configurado como amperímetro) y un multímetro BK Precision 390A (configurado como voltímetro). Los multímetros se conectaron en serie por medio de cables banana-caimán a la caja de resistencias. Una vez completado el circuito, este se conectó en paralelo a la CCMV. La distribución de los equipos y las conexiones correspondientes se muestran en la Fig. 22.

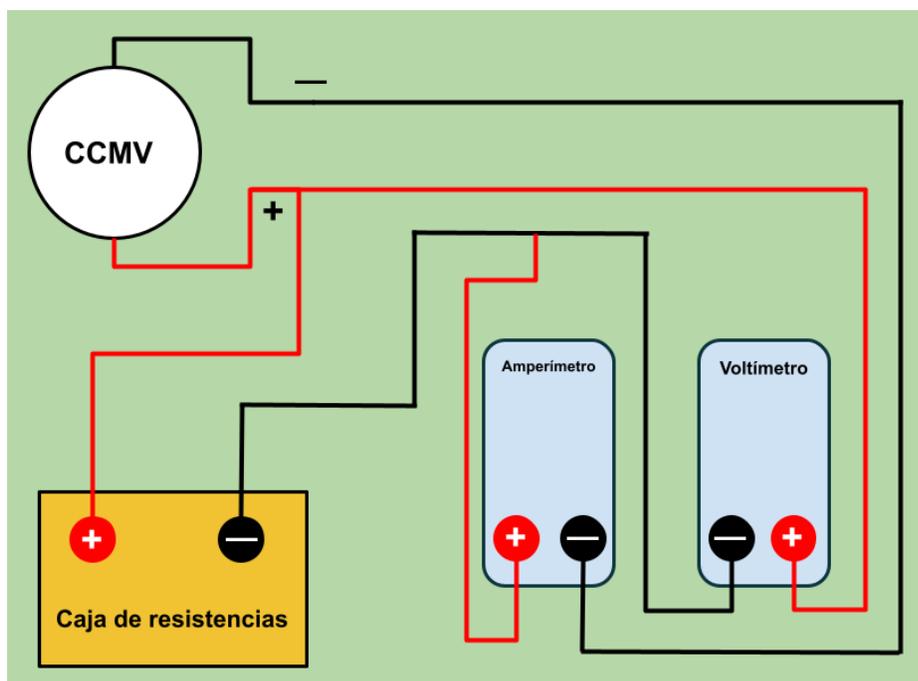


Figura 22 Esquema del sistema para la toma de los datos de la curva de polarización

Paralelo a la recolección de los datos para la construcción de las curvas de polarización, se llevó a cabo un experimento para identificar la transferencia de masa en estos HAAE en función de las variaciones en pH. Este experimento se basa en la premisa de que la difusión de  $H^+$  de la zona anódica a la catódica ocasiona cambios en el pH cuando el HAAE opera con distintas resistencias externas. En este experimento se acopló el multiparamétrico HANNA Edge 2020-1 con el electrodo de pH HI-2020 y se registraron los cambios en el pH con respecto a la variación de la resistencia eléctrica en la caja de resistencias.

### 3.5 Análisis de los datos experimentales

Para tener una mejor perspectiva del desempeño de los HAAE se fijó al desempeño de la celda de control (CC) como referencia. Con la finalidad de identificar a los cambios pudieran presentarse en los HAAE que incorporan un separador entre los electrodos. El análisis estadístico de los datos de voltaje se llevó a cabo por medio de un análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) de una cola con un 95% de confianza.

El cual es una prueba estadística básica para el estudio de uno o más factores sobre la media de una variable. En el contexto de este proyecto la variable a analizar es el voltaje que se genera en cada uno de los HAAE. Se optó por el ANOVA debido a que es la prueba más confiable para el análisis de datos provenientes de 2 o más grupos. Ya que por medio de este es posible detectar diferencias que sean estadísticamente significativas entre las medias de los grupos. Lo anterior se debe a que en este proyecto los grupos de datos provienen de 9 celdas diferentes.

Para realizar el ANOVA se requiere que las muestras de datos cumplan con las siguientes características:

1. **Aleatoriedad de las muestras.** Este requisito se cumplió planteando un algoritmo en el que se generaron 30 números aleatorios sin repetición en el intervalo de 11 a 90. Se designó el intervalo 11 a 90 debido a que estos son los días en los que el HAAE operó a circuito cerrado.
2. **Independencia de las variables.** Durante el experimento se comprobó que factores como el pH o la temperatura no tenían una influencia significativa en la producción de voltaje. Por este motivo se considera que en este proyecto la producción de voltaje es una variable independiente.
3. **Normalidad de las distribuciones.** Este parámetro se confirmó mediante la elaboración del histograma correspondiente, en el cual se observó una distribución normal de los datos.
4. **Igualdad de varianza entre los grupos.** Como se mencionó en el apartado anterior, debido a que los HAAE operaron bajo las mismas condiciones se asume que la única diferencia sustancial entre ellos es el separador. Por lo cual es posible comparar la varianza entre los grupos de datos.

Para realizar el ANOVA se planteó una hipótesis nula ( $H_0$ ) y una hipótesis alterna ( $H_a$ ). En  $H_0$  [Ec. 3.13] se plantea una igualdad entre las varianzas, por lo cual se puede inferir que no existe una diferencia entre un HAAE con separador y la celda de control (CC).

$$H_0: \mu_{CC} = \mu_{CBa} = \mu_{CBaCa} = \mu_{CPOL} = \mu_{CPOLS} = \mu_{CPAS} = \mu_{CPASH} = \mu_{CGt} = \mu_{CGtS}$$

**3.13**

Por el contrario, en la  $H_a$  [Ec. 3.14] se plantea que, existe una diferencia significativa entre las medias y, por lo tanto, existe una diferencia entre un HAAE con separador y la celda de control.

$$H_a: \mu_{cc} \neq \mu_{CBa} \neq \mu_{CBaCa} \neq \mu_{CPOL} \neq \mu_{CPOLS} \neq \mu_{CPAS} \neq \mu_{CPASH} \neq \mu_{CGt} \neq \mu_{CGtS} \quad 3.14$$

Esta prueba también requirió que se plantera la tabla para el análisis de varianza (Tabla 3), en la cual se identifican a las operaciones que se realizaron para la elaboración de esta prueba.

**Tabla 3** Ecuaciones para el análisis de varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	$SC_{HAAE} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$k - 1$	$CM_{HAAE} = \frac{SC_{HAAE}}{k - 1}$	$F = \frac{CM_{HAAE}}{CM_{error}}$
Dentro de las muestras	$SC_{error} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$	$N - k$	$CM_{error} = \frac{SC_{error}}{N - k}$	
Total	$SC_{total} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2$	$N - 1$		

Los componentes de la tabla anterior se definen de la siguiente manera de la siguiente manera:

**Fuente de variación:** son aquellas provenientes de la variación de las medias de los grupos (entre las muestras) y la varianza de los datos (dentro de los grupos).

**Suma de cuadrados:** son las operaciones necesarias para identificar a las fuentes de variación.

**Grados de libertad:** Indica el número de elementos independientes en la suma de los cuadrados.

**Cuadrado medio:** Es el producto de la división entre la suma de cuadrados y los grados de libertad.

**F:** es el estadístico de Fisher, el cual es el cociente entre el cuadrado medio calculado para la varianza entre las muestras y el cuadrado medio calculado para la varianza dentro de las muestras

Otro componente que se debe mencionar es  $F_c$ , el cual es el valor crítico de Fisher y proviene de tablas.

Adicional al ANOVA se analizaron los datos por medio de una prueba *post hoc* de Dunnet para comprobar con un 95% de confianza si existía un cambio estadísticamente significativo al aplicar distintos materiales como separadores entre los electrodos. Se optó por este análisis ya que es una prueba estadística que se emplea para comparar datos provenientes de un grupo de control contra los datos obtenidos de grupos a los que se les aplicó un tratamiento.

Para este análisis se empleó la siguiente nomenclatura:

**$N_{CCMV's}$ :** La cantidad de grupos de datos, en este caso son 9 (CC, CBa, CBaCa, CPOL, CPOLS, CPAS, CPASH, CGt y CGtS)

**k:** La cantidad de grupos de datos sin tomar en cuenta al grupo de control ( $N_{CCMV's} - 1$ )

**$G_{lg}$ :** La cantidad de grados de libertad calculada para el total de los datos, este parámetro se rescató del ANOVA.

**$E_M$ :** Es el cuadrado medio del error, recuperado del ANOVA

**$\alpha$ :** El nivel de confianza bajo el que se realiza la prueba, en este caso es del 95% ( $\alpha=0.05$ )

**$D_c$ :** Es el valor crítico de Dunnet, este valor se obtiene de tablas

**D:** Es el valor calculado de Dunnet a partir de los datos planteados en el ANOVA y la cantidad de grupos de donde se obtienen los datos

Los criterios en la prueba de Dunnet se obtienen a partir del valor absoluto de la resta entre la media de cada una de los HAAE que incorpora un separador entre los electrodos ( $\bar{x}_i$ ) y la media de la celda de control ( $\bar{x}_{cc}$ ) [Ec. 3.15].

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_{cc}| \quad \mathbf{3.15}$$

El valor obtenido de la [Ec. 3.15] se comparó con D, de tal manera que, si  $|\bar{X}_i - \bar{X}_{CC}| > D$  se confirma que la adición de un separador provoca un cambio estadísticamente significativo en la producción de voltaje. Por el contrario, si  $|\bar{X}_i - \bar{X}_{CC}| < D$  se confirma que la adición de un separador no genera un cambio estadísticamente significativo en la producción de voltaje.

## Capítulo 4. Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados del análisis de los datos experimentales, haciendo énfasis en aquellos que se consideran representativos para cada caso. El grueso de los datos se puede consultar en los Anexo 4 y 5.

### 4.1 Resultados de la síntesis de materiales

Al final de los procesos de síntesis se obtuvieron 8 membranas (Fig. 23). Un 50% de ellas tienen como base el material sin ningún tratamiento y el 50% restante se elaboró con los materiales modificados. Estas 8 membranas se situaron en la zona anódica ( $Z_a$ ) justo encima del ánodo de modo que se propiciara un ambiente anódico y se cumpliera con la función de promover el flujo de  $H^+$  desde la  $Z_a$  a la zona catódica ( $Z_c$ ).

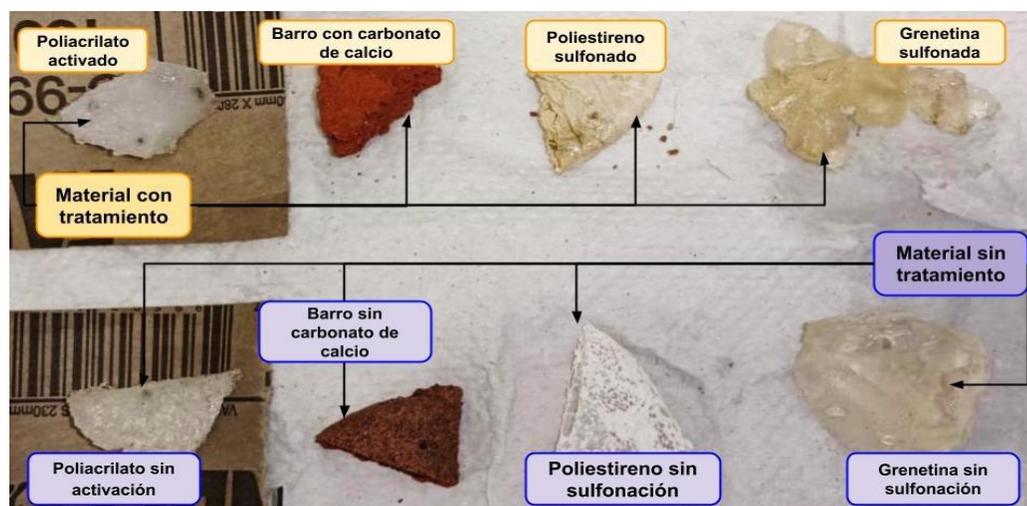


Figura 23 Fragmentos de los separadores sintetizados, elaboración propia

En la Fig. 23 se muestran fragmentos de las membranas sintetizadas, en la parte superior se colocaron a aquellas que presentan un tratamiento. Mientras que, en la parte inferior se colocaron aquellas que no fueron sometidas a ningún tratamiento.

Los materiales que fueron modificados presentan un cambio en la coloración, el cuál es

más notorio en la membrana de barro dopada con calcio (BaCa) y en la de poliestireno sulfonado (POLS), en donde se observa una coloración más intensa.

## **4.2 Desempeño promedio de los HAAE en la producción de voltaje**

En este apartado se presentan y describen los datos más representativos para cada HAAE con sus respectivos gráficos, tablas y/o esquemas. Se hace énfasis en aquellos que presentan resultados positivos en la producción de electricidad e incorporaron un separador entre los electrodos.

### **4.2.1 Desempeño de la celda de control (CC) durante el experimento**

El desempeño de la CC durante el experimento se muestra en la Fig. 24. En esta figura se observa que, de los días 1 al 18 cuando la celda opera en circuito abierto ( $C_a$ ). El potencial anódico disminuye rápidamente en los días 1 al 10, alcanzando el mínimo de -616 mV. Posteriormente, cuando el sistema inicia su operación en circuito cerrado ( $C_c$ ), del día 19 al 30, el potencial anódico ( $V_a$ ) tiende a aumentar alcanzando un promedio máximo de 32 mV (días 30 a 50). La tendencia anterior se mantuvo durante la mayor parte del experimento con leves variaciones, las cuales se atribuyen a factores como la degradación de los colectores de electrones.

La evolución del potencial catódico ( $V_c$ ) en la CC (Fig. 24) presentó 2 comportamientos. De los días 11 al 21 presentó una ligera tendencia a la baja alcanzando un mínimo de -147 mV. Posterior al día 21, el  $V_c$  mostró una tendencia hacia el alza alcanzando un promedio máximo de 100 mV durante la mayor parte del experimento. Referente a la producción de voltaje ( $V_p$ ), cuando la celda opera en  $C_a$  (días 11 a 18) se presentan valores de 590 mV en promedio (Fig. 24). Se atribuye este comportamiento a que durante la operación en  $C_a$  el  $V_a$  registró los valores mínimos.

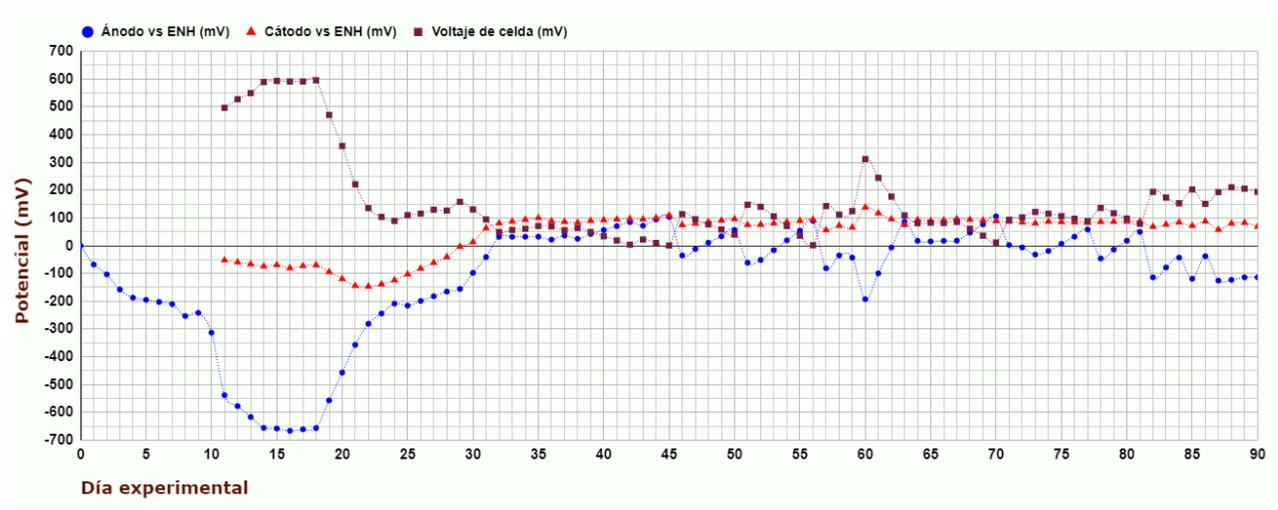


Figura 24 Desempeño de la CC con respecto al voltaje y al potencial de los electrodos durante el experimento

Posteriormente, cuando el sistema operó en circuito cerrado ( $C_c$ ) se presentó una caída en la producción de voltaje. La baja producción de voltaje se mantuvo la mayor parte del experimento excepto el día 60, en dónde se registró un incremento en el  $V_p$  y el  $V_a$ .

Esta anomalía ocurrió debido a que la tarde del día 59 uno de los compañeros de servicio social olvidó conectar las resistencias externas en los HAAE. La influencia de la anomalía se registró el mismo día para el resto de las celdas (ver Anexo 4). Por lo que se concluye que en estos HAAE la  $V_p$  está intrínsecamente relacionada con el  $V_a$  y que la conexión de la resistencia externa tiene una fuerte influencia en el potencial anódico de esta clase de sistemas. A continuación, se realiza el comparativo entre el desempeño de la CC y los HAAE que incorporan un separador entre los electrodos. Recordando que en estos comparativos la producción de voltaje que se registró en CC se considera como la producción máxima que se puede obtener en un HAAE que no incorpora un separador entre los electrodos.

## 4.2.2 Desempeño de los HAAE que incorporan un separador entre los electrodos durante el experimento

En la Fig. 25 se comparan las tendencias en los potenciales anódicos de la CC, la CPOL y la CPOLS. En la Fig. 25, el potencial anódico ( $V_a$ ) en las CPOL y CPOLS siguen una tendencia similar a la observada en la CC (durante los primeros 30 días de operación). Esta tendencia podría indicar que los HAAE se encontraron en un periodo de aclimatación durante los primeros 30 días. En los que pudieron llevarse a cabo fenómenos como el crecimiento y adaptación de los microorganismos y de las plantas.

Cabe resaltar que a partir del día 30 el potencial anódico ( $V_a$ ) de la CPOL presenta tendencias a la baja (Fig. 25) lo que podría indicar, entre otros factores, la presencia de una población de bacterias anaerobias. La cual podría haberse adaptado exitosamente a las condiciones que se presentaban en la zona anódica ( $Z_a$ ) de CPOL. Con base en las tendencias observadas en el potencial anódico (Fig. 25) se sugiere que POL es un material que genera las condiciones necesarias para el desarrollo de poblaciones bacterianas anaerobias.

A su vez, el separador POL previene que las condiciones de la  $Z_a$  presenten cambios abruptos cuando se conecta la resistencia externa al sistema. A su vez, es posible que POL contribuya a la disminución de la difusión del oxígeno hacia la  $Z_a$  de la CPOL, lo que favorece potenciales anódicos más negativos y voltajes mayores. Sobre este fenómeno esto se profundiza más adelante.



Figura 25 Comparativo entre las tendencias de los potenciales anódicos de CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia

Así como la Fig. 25 muestra el comparativo entre las tendencias de los  $V_a$  para las celdas con mejores resultados. La Fig. 26, muestra el comparativo entre las tendencias de los  $V_a$  para las celdas con menor desempeño (las CBa y CBaCa). Aunque inicialmente, el  $V_a$  de estas celdas muestra el mismo comportamiento para las CPOL y CPOLS, después del día 30 el  $V_a$  permanece en valores positivos o cercanos a cero.

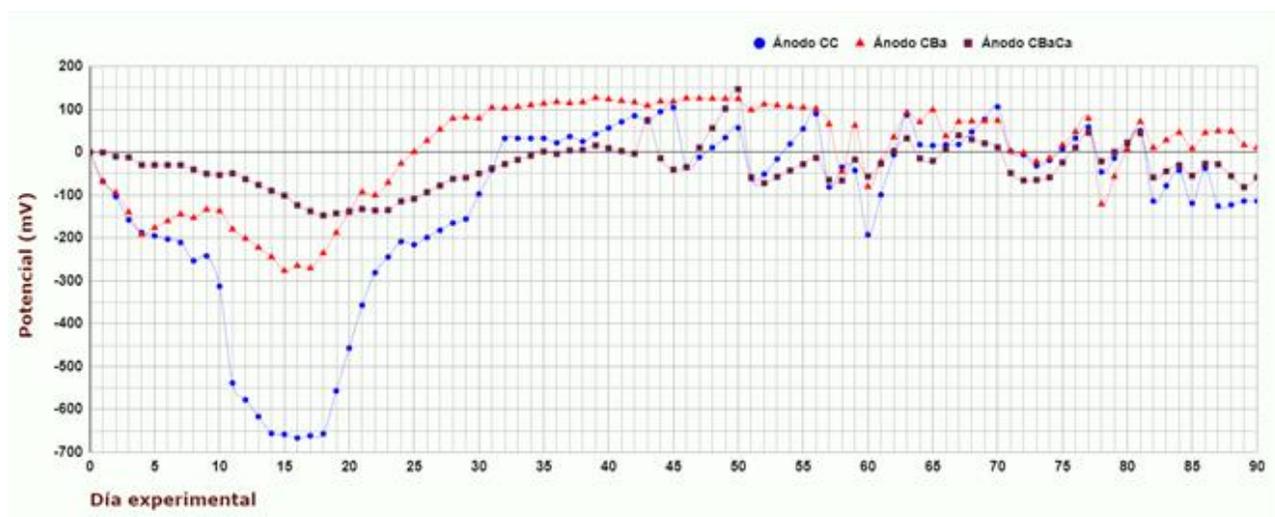


Figura 26 Comparativo entre las tendencias de los potenciales anódicos  $V_a$  de las CC, CBa y CBaCa durante el experimento, elaboración propia

El voltaje producido ( $V_p$ ) promedio de todos los HAAE se muestra en la Fig. 27, en este gráfico se identifica que el  $V_p$  más bajo se presentó en la CBa (26.3 mV) y CBaCa (67.4 mV). Se plantea que este bajo desempeño podría deberse a que los separadores de estos HAAE incorporan materiales cerámicos, los cuales llegan a presentar propiedades antibacterianas que pudieran alterar la biomasa en la zona anódica [41].

Por otra parte, en el caso de CPOL se tiene una  $V_p$  de 244.4 mV (Figura 27), lo que representa un incremento del 53% con respecto a la CC (Fig. 28). Sin embargo, durante el experimento se observó que este sistema (CPOL) requiere de al menos 30 días para producir voltajes superiores a los de CC (Fig. 29).

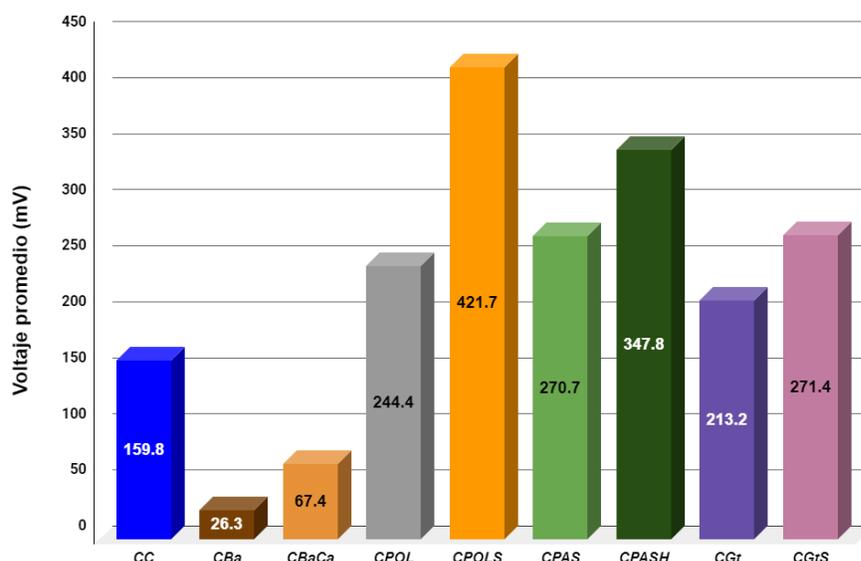


Figura 27 Voltaje promedio producido en las CCMV durante el experimento, elaboración propia

El HAAE que presentó el mejor desempeño fue CPOLS, ya que en este sistema el voltaje promedio fue de 421.74 mV (Fig. 27). A su vez, CPOLS fue el sistema con los  $V_a$  más negativos, en promedio de -420 mV (Fig. 25). Se infiere que este incremento se debe principalmente a dos factores: la modificación del poliestireno por medio del  $(C_2H_5)_2SO_4$  y a la capacidad del poliestireno para propiciar las condiciones para el crecimiento de bacterias anaerobias en la zona anódica.

Esto último se podría relacionar con la capacidad del separador POLS para disminuir la difusión del oxígeno hacia la zona anódica ( $Z_a$ ) de CPOLS. Se infiere que mediante el tratamiento con  $(C_2H_5)_2SO_4$  se logró incorporar grupos  $R - SO_2O - H$  en la estructura del poliestireno (Fig. 15). Sin embargo, se requiere analizar la estructura del material para confirmar esta hipótesis. Por lo que se recomienda seguir esta línea de investigación en futuros proyectos.

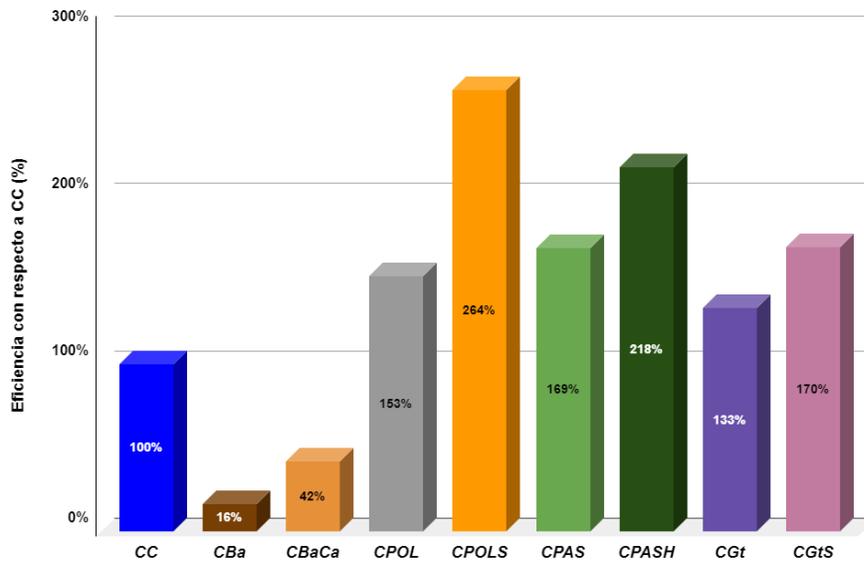


Figura 28 Eficiencia de las CCMV para el voltaje generado, tomando como referencia a la CC, elaboración propia

Siguiendo la premisa anterior, los  $R - SO_2O - H$  en la estructura del separador POLS convertirían a este material en una membrana fuertemente ácida con características similares a las del nafton de *Duppont Corporation*. En donde los  $R - SO_2O - H$  facilitan la transferencia de  $H^+$  desde la  $Z_a$  a la zona catódica ( $Z_c$ ).

El segundo factor que puede explicar el alto desempeño de la CPOLS es que al igual que en la CPOL en la CPOLS se presentan las condiciones apropiadas para el crecimiento y adaptación de las poblaciones bacterianas anaerobias. Lo anterior podría deberse a que el separador POLS minimiza la difusión del oxígeno desde la  $Z_c$  hacia la  $Z_a$ .

Esta característica propicia que bacterias anaerobias puedan desarrollarse apropiadamente en la zona anódica, lo que daría lugar al crecimiento de una población de un tamaño significativo en la CPOLS. Este fenómeno explicaría porqué el potencial anódico ( $V_a$ ) se mantuvo con mínimas variaciones durante el experimento y constantemente en el intervalo de -400 a -600 mV (Fig. 25).



Figura 29 Comparativo entre las tendencias de los Vp de las CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia

Para comprobar la hipótesis anterior se cuantificó la concentración de oxígeno disuelto (OD) en ppm en la  $Z_a$  de la CC, la CPOL y la CPOLS (Fig. 30). En este experimento se registraron valores de 2.7 ppm para la CC, de 1.7 ppm para la CPOL y de 0.7 ppm en la CPOLS, a partir de estos datos se comprobó que en la  $Z_a$  de CPOLS se tuvieron los valores mínimos de OD. Lo que da pie a sugerir que en este HAAE los bajos valores de OD en la  $Z_a$  de CPOLS propiciarían que la TEE se diera de una manera más eficiente en comparación con CC y CPOL y por consiguiente la producción de voltaje en este sistema presentan los mayores valores (Fig. 27).

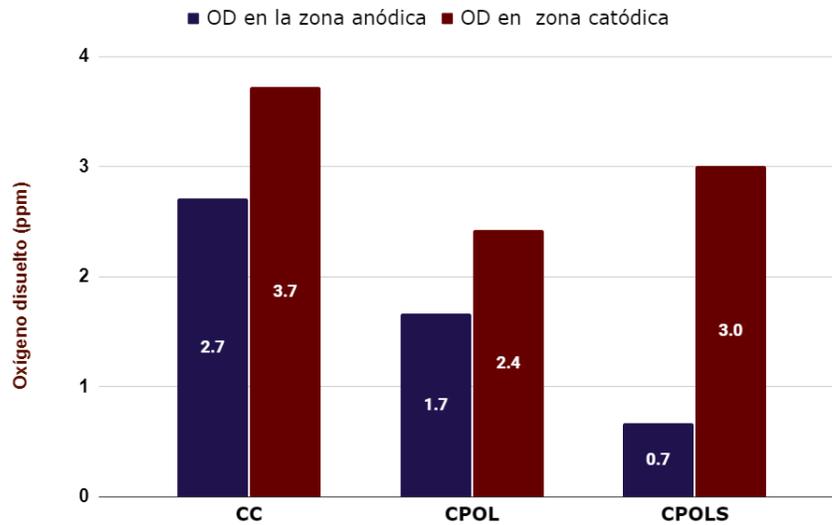


Figura 30 Concentración promedio de OD (ppm) registrada en las CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia

Al comparar los valores de oxígeno disuelto (OD) que se registraron en la zona anódica ( $Z_a$ ) de la CC contra los valores de OD que se registraron en la  $Z_a$  de la CPOLS, se observó una disminución en CPOLS de un 74% con respecto a los valores registrados en la CC.

Las mediciones de OD en la  $Z_a$  de CPOL mostraron que en este sistema el OD promedio fue de 1.7 ppm (Fig. 30), al comparar estos datos de OD contra lo que se registró en la CC, se calcula que el separador POL disminuyó en un 38.7% la concentración de oxígeno en la  $Z_a$  de CPOL. Este comportamiento indica que el separador POL también disminuye la difusión del oxígeno hacia la  $Z_a$ , sin embargo, este separador no es tan eficiente como el separador POLS.

También se cuantificó el OD en la zona catódica ( $Z_c$ ) de la CC, la CPOL y la CPOLS (Fig. 30). En la CC se registraron valores de 3.7 ppm, en la CPOL valores de 2.4 ppm y en la CPOLS, 3 ppm. En la CPOL se presentaron los valores más bajos de OD (2.4 ppm), de acuerdo con Lefebvre [39], esto podría indicar que en este HAAE el oxígeno tiene problemas para difundirse hacia el cátodo. Este fenómeno podría explicar por qué el  $V_c$  de CPOL registra valores mínimos en comparación con los registrados en CC (Fig. 31).

En la CC se registraron los valores más altos de OD (3.7 ppm) y, contrario al caso anterior, se infiere que los altos valores de OD están relacionados con una alta difusión de oxígeno hacia el cátodo. Lo que explicaría por qué el  $V_c$  de la CC registra los valores más altos durante el experimento (Fig. 31). La CPOL muestra valores de 3 ppm, lo que indicaría que en este sistema los problemas de difusividad del oxígeno hacia el cátodo son mínimos.

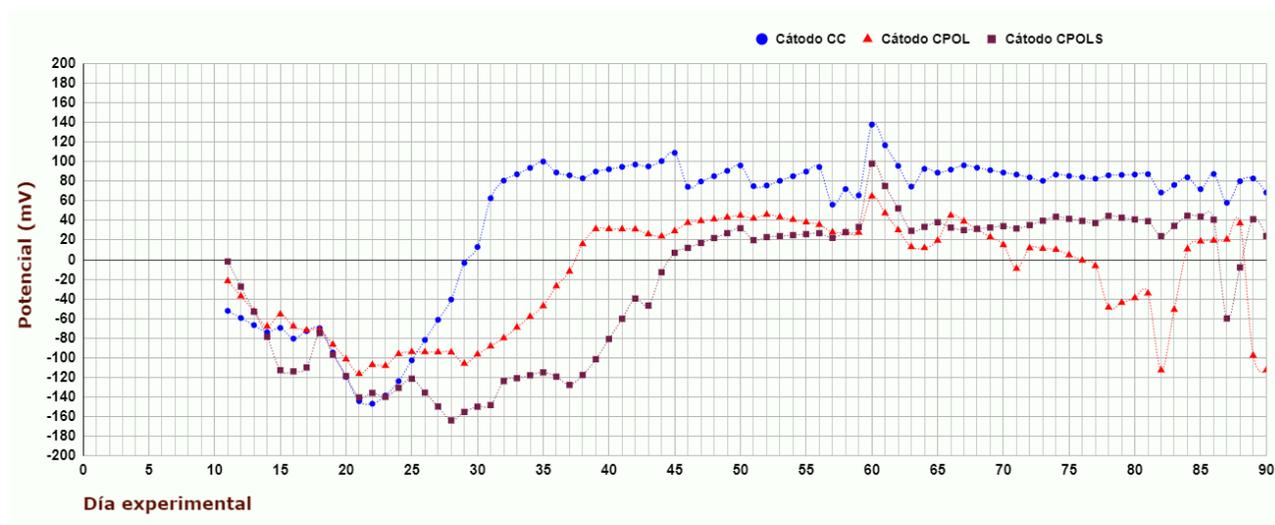


Figura 31 Comparativo entre las tendencias de los  $V_c$  de CC, CPOL y CPOLS durante el experimento, elaboración propia

Al analizar el comportamiento de otros HAAE en la producción de voltaje, se debe recordar que se emplearon distintos separadores. En el caso de la CPAS se empleó poliacrilato de sodio ( $[R - COO - Na]_n$ ) aglutinado con grenetina como separador. Con el uso de este material se tuvo un voltaje promedio de 270.7 mV (Fig. 27), esto representa un incremento del 69 % con respecto a la CC (Fig. 28).

En la CPASH se empleó ácido poliacrílico ( $[R - COO - H]_n$ ) aglutinado con grenetina como separador. Como resultado del uso de este material se tuvo un voltaje promedio de 347.8 mV (Fig. 27) lo que representa un aumento del 118 % con respecto a CC (Fig. 28).

En ambos casos (CPAS y CPASH) se atribuye el aumento en la producción de voltaje a

dos factores: la presencia de los grupos  $R - COO^-$  en la estructura del polímero y el uso de grenetina como aglutinante.

La grenetina representa una fuente de sustrato, por lo que el crecimiento y adaptación de las poblaciones bacterianas se vería beneficiado. Sin embargo, la difusión de materia orgánica de la grenetina hacia el cátodo, afectarían negativamente la producción de voltaje en las celdas. Dando como resultado que CPAS y CPASH presentaran una producción más baja que la registrada en la CPOLS.

A su vez, se infiere que los  $R - COO^-$  del polímero podrían haber facilitado la transferencia de  $H^+$  desde la zona anódica ( $Z_a$ ) a la zona catódica ( $Z_c$ ). Lo anterior se puede inferir al analizar la producción de voltaje en CPAS y CPASH. En este caso se observa que el mejor desempeño se encuentra en la CPASH que implementa el  $[R - COO - H]_n$  como separador. Su alto desempeño podría deberse a que los  $H^+$  presentes en la estructura de este material podrían llegar a aumentar el flujo de los  $H^+$  de  $Z_a$  a  $Z_c$ . Esta teoría se refuerza al observar que en la CPAS que incorpora  $[R - COO - Na]_n$  como separador el voltaje producido es significativamente menor.

Para el caso de la CGt se produjo en promedio un voltaje de 213.2 mV (Fig. 27) lo que representa un aumento del 18% con respecto a la CC (Fig. 28). En CGtS se produjo un voltaje promedio de 271.4 mV (Fig. 27) y representa un aumento del 50 % con respecto a CC (Fig. 28). En el caso de CGtS se infiere que el aumento del 50% en la producción de voltaje se debe a que este material también fue tratado con  $(C_2H_5)_2SO_4$ . Por lo que al igual que en POLS este tratamiento pudo llegar a incorporar grupos  $R - SO_2O - H$  en diversos puntos de la estructura de la grenetina, convirtiéndola en una MII fuertemente ácida. Por lo que al igual que en el caso del separador POLS se recomienda analizar este material en el futuro y profundizar en la modificación de biopolímeros por medio de otra clase de reactivos y rutas de síntesis.

En las 4 CCMV anteriores la presencia de grenetina propició que el potencial de los ánodos se mantuviera en el intervalo de -600 a -700 mV. Por lo que a raíz de esta tendencia se infiere que la descomposición de la grenetina llegó a facilitar el crecimiento y adaptación de múltiples poblaciones bacterianas en la zona anódica ( $Z_a$ ).

Lo que conllevó a una drástica disminución en el potencial anódico ( $V_a$ ). Sin embargo, durante el experimento se observó que la deposición de grenetina en los cátodos mermó la capacidad de las CCMV para producir electricidad. E incluso la descomposición de esta llegó a matar a los organismos vegetales, lo que conllevó un reemplazo constante de estos.

La producción de voltaje aumentó cuando a los cátodos se les removió la grenetina manualmente y estos fueron enjuagados con agua destilada. A partir de los resultados presentados en esta sección se puede obtener como conclusión preliminar que, la CPOLS que incorpora el separador POLS es el HAAE con la mejor producción de voltaje y con la menor concentración de oxígeno disuelto en la zona anódica.

#### **4.2.3 Hipótesis sobre el crecimiento de poblaciones bacterianas en la zona anódica de los HAAE**

Se sugiere que durante el periodo en el que algunos de los HAAE operaron en circuito abierto (días 1 al 18) las poblaciones de bacterias llevaron a cabo sus procesos de adaptación y crecimiento en la zona anódica. Por otra parte, cuando los HAAE operaron en circuito cerrado, de los días 19 al 30 pudo haberse presentado una fase de muerte de las bacterias.

La premisa anterior se formuló cuando se analizaron las tendencias de los potenciales anódicos de los HAAE durante el experimento. Siendo el caso más representativo el caso de la CC en los días 1 a 30. Ya que la figura que forma la curva del potencial anódico ( $V_a$ ) es similar a la curva que describe el crecimiento de bacterias en condiciones de laboratorio (Fig. 32). En donde las primeras 3 fases (latencia, exponencial y estacionario) coinciden en los días 1 a 18.

Por otra parte, se plantea que la fase de muerte bacteriana ocurrió entre los días 19 al 30 como consecuencia del acople de la resistencia eléctrica a los HAAE. La conexión de la resistencia se realizó por la tarde del día 18 y los efectos de este cambio se registraron inmediatamente el día 19. Lo anterior se detectó como un incremento en el potencial anódico.

Con base en lo anterior, se sugiere realizar análisis más específicos para identificar las dinámicas de crecimiento de las poblaciones bacterianas, el tipo de bacterias y las condiciones que se pudieran llegar a presentar en la zona anódica de los HAAE que incorporan y que no incorporan separadores entre los electrodos.

También se sugiere estudiar cómo es que otras sustancias disueltas en el medio y reacciones parásitas afectan el potencial del ánodo en los HAAE.

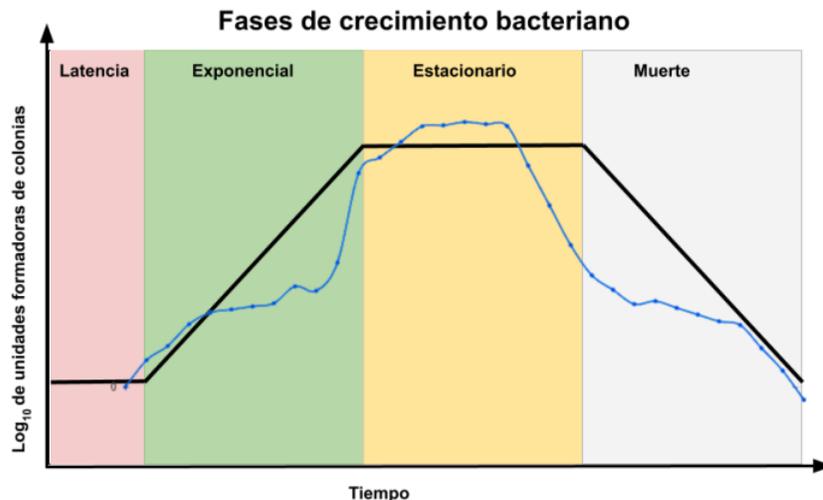


Figura 32 Comparativo entre el potencial del ánodo de la CC y las fases del crecimiento bacteriano en condiciones de laboratorio. Gráfico elaborado con los datos del modelo predictivo de ComBase [31] y los datos obtenidos durante el experimento, elaboración propia

### 4.3 Resultados del análisis de varianza (ANOVA)

Las estadísticas que se presentan en esta sección se realizaron con los datos aleatorios que se seleccionaron por medio de los números aleatorios sin repetición. Por esta razón los datos de esta sección difieren con respecto a lo comentado en secciones anteriores. Con la finalidad de establecer una comparación estadística entre los resultados obtenidos, se realizó el ANOVA con los datos de voltaje de los diferentes HAAE.

En la Tabla 4 se resumen los estadísticos con los que se realizó el ANOVA para el voltaje

en mV (Anexo 3). Siendo  $n$  la cantidad de elementos de cada grupo,  $\bar{X}_i$  el voltaje promedio de cada HAAE y  $\sigma^2$  la desviación estándar de cada grupo.

**Tabla 4** Valores obtenidos a partir de los datos experimentales

No. De CCMV	CCMV	n	$\bar{X}_i$	$\sigma^2$
1	CBa	30	10.4	2171.4
2	CBaCa	30	48.9	2008.1
3	CC	30	114.2	3335.5
4	CGt	30	188.4	17821.2
5	CGtS	30	251.6	28754.5
6	CPAS	30	213.0	27644.4
7	CPASH	30	332.1	12345.2
8	CPOL	30	223.3	24582.2
9	CPOLS	30	390.9	11684.1

La Tabla 5 muestra los resultados del ANOVA con un  $\alpha$  de 0.05, de este análisis se obtuvo una F de 32 y un valor crítico de tablas ( $F_C$ ) de 2. Debido a que  $F > F_C$  se puede rechazar la  $H_0$  con un 95% de confianza. Asegurando que las medias de los voltajes de celdas presentan variaciones significativas al incorporar un separador entre los electrodos. Por esta razón se realizó la prueba de Dunnet para identificar a los HAAE que presentaron una diferencia estadísticamente significativa.

**Tabla 5** Resultado del ANOVA

Fuente de la información	Grados de libertad	Promedio de la varianza	F	FC
Entre grupos	8.0	462852.3	32.0	2.0
Dentro de los grupos	261.0	14483		

### 4.3.1 Resultados de la prueba de Dunnet

El ANOVA mostró que no existe una igualdad entre las medias de los voltajes, por lo que se procedió con la aplicación de la prueba de Dunnet de una cola con un  $\alpha$  de 0.05. En la Tabla 6 se muestran los valores necesarios para la prueba de Dunnet, siendo  $N_{CCMV's}$  la cantidad de experimentos,  $k$  el valor obtenido de la resta de  $N_{CCMV's} - 1$ . Del ANOVA se rescataron los grados de libertad entre grupos ( $G_{lg}$ ), el error medio dentro de los grupos ( $E_M$ ), el nivel de significancia del análisis ( $\alpha$ ),  $D_c$  el valor crítico de Dunnet en tablas y  $D$ , el valor calculado de Dunnet para el cambio en el voltaje.

**Tabla 6** Valores para la prueba de Dunnet

<b>NCCMV's</b>	9
<b>k</b>	8
<b>G<sub>lg</sub></b>	261.0
<b>EM</b>	14483.0
<b><math>\alpha</math></b>	0.05
<b>D<sub>c</sub></b>	2.41
<b>D</b>	74.886

La Tabla 7 incorpora las medias del voltaje ( $\bar{X}_i$ ) de los HAAE, el valor absoluto de la diferencia entre la media de CC y las medias de las HAAE que incorporan un separador entre los electrodos ( $|\bar{X}_i - \bar{X}_{CC}|$ ) y la resolución sustentada en la siguiente premisa:

Si  $|\bar{X}_i - \bar{X}_{CC}| > D$  se confirma que la adición de un separador provoca un cambio estadísticamente significativo en la producción de voltaje, por el contrario, si  $|\bar{X}_i - \bar{X}_{CC}| < D$  se confirma que la adición de un separador no genera un cambio estadísticamente significativo en la producción de voltaje.

**Tabla 7** Resultados de la prueba de Dunnet

No. De CCMV	CCMV	$\bar{X}_i$	$ \bar{X}_i - \bar{X}_{CC} $	Resolución
1	CC	114.2	----	-----
2	CBa	10.4	103.84	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
3	CBaCa	48.9	65.35	No existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
4	CPOL	223.3	109.06	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
5	CPOLS	390.9	276.62	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador

6	CPAS	213.0	98.78	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
7	CPASH	332.1	217.83	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
8	CGt	188.4	74.20	No existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador
9	CGtS	251.6	137.31	Existe un cambio en el voltaje producido cuando se emplea este material como separador

Con base en los resultados de la tabla anterior en la Tabla 8 se analizan las resoluciones de la prueba de Dunnet. Las cuales se comparan contra las  $\bar{X}_i$  de los voltajes producidos ( $V_p$ ) durante el experimento. En el lado izquierdo de la tabla se menciona al HAAE (CCMV) y en la derecha la conclusión obtenida a partir los análisis estadísticos.

**Tabla 8** Resultados de la prueba de Dunnet

No. De CCMV	CCMV	Conclusión
1	CBa	Si bien la prueba de Dunnet demuestra que emplear a Ba como separador genera un cambio estadísticamente significativo en el voltaje producido ( $V_p$ ). Cuando se compara $\bar{X}_{CBa}$ contra $\bar{X}_{CC}$ se comprueba que la producción media de voltaje es menor que en

		CC. E incluso, con base en lo planteado en apartados anteriores, se infiere que este material resulta más un impedimento en el proceso que una mejora. Este HAAE presenta una eficiencia del 9.1 % con respecto al $V_p$ en la CC.
2	<b>CBaCa</b>	Con la prueba de Dunnet se demuestra que el uso de BaCa como separador no genera un cambio estadísticamente significativo en el $V_p$ . Cuando se compara $\bar{X}_{CBaCa}$ contra $\bar{X}_{CC}$ se puede comprobar que al igual que CBa. El uso de este material merma la producción de voltaje. Tomando a CC como referencia, este HAAE solo presenta una eficiencia del 42.8 %.
3	<b>CPOL</b>	En este caso la prueba de Dunnet nos muestra que sí existe un cambio estadísticamente significativo cuando se emplea POL como separador. Al comparar $\bar{X}_{CPOL}$ contra $\bar{X}_{CC}$ se comprueba que el separador CPOL tiene un efecto benéfico en el $V_p$ . Ya que aumenta en un 95.46 % la producción de voltaje con respecto a la CC.
4	<b>CPOLS</b>	La prueba de Dunnet en esta celda nos indica que sí existe un cambio estadísticamente significativo en el $V_p$ . Lo anterior se respalda cuando se compara $\bar{X}_{CPOLS}$ contra $\bar{X}_{CC}$ , ya que con respecto a la CC la implementación del separador POLS en este HAAE aumentó la producción de electricidad en un 242 %.
5	<b>CPAS</b>	En este caso los resultados de la prueba indican que existe un cambio estadísticamente significativo en el $V_p$ . Lo cual se respalda

		al comparar $\bar{X}_{CPAS}$ contra $\bar{X}_{CC}$ . Para este caso se calcula que el voltaje producido incrementó en un 86.5 % con respecto a la CC.
<b>6</b>	<b>CPASH</b>	Los resultados de la prueba de Dunnet para este sistema indican que existe un cambio estadísticamente significativo en el $V_p$ . Lo cual se respalda al comparar $\bar{X}_{CPASH}$ contra $\bar{X}_{CC}$ . Para esta CCMV se calcula que la producción aumentó en un 190.67% con respecto a la CC.
<b>7</b>	<b>CGt</b>	Cuando se compara $\bar{X}_{CGt}$ contra $\bar{X}_{CC}$ se nota que en CGt existe un incremento del 64.95 % en el $V_p$ . Sin embargo, la prueba de Dunnet indica que no existe un cambio estadísticamente significativo cuando se emplea grenetina como separador.
<b>8</b>	<b>CGtS</b>	Contrario a la CGt en la CGtS la prueba de Dunnet nos confirma que sí existe una diferencia estadísticamente significativa en el $V_p$ . Lo cual se respalda al hacer el comparativo entre $\bar{X}_{CGtS}$ contra $\bar{X}_{CC}$ . Para este caso se calcula un incremento del 120.19 % en la producción de electricidad con respecto a la CC.

#### 4.4 Análisis de las curvas de polarización de CC, CPOL y CPOLS

Esta sección está dedicada al análisis de las curvas de polarización de los HAAE con los resultados más representativos.

Para este análisis se seleccionaron CC, CPOL y CPOLS, esto se debe a lo siguiente:

- La celda de control (CC) es la referencia para identificar los cambios que pudieran ocurrir como consecuencia de la incorporación de los separadores.
- La celda con el separador de poliestireno sulfonado (CPOLS) es la celda que presenta la mayor producción de voltaje ( $V_p$ ). Esta incorpora al separador que fue sintetizado a partir de poliestireno y sulfato de dietilo.
- La celda con el separador de poliestirenos (CPOL) se analizó debido a que el separador que incorpora esta celda no fue modificado por medio de sulfato de dietilo. Por este motivo, se requiere comparar el desempeño de CPOL y CPOLS para identificar variaciones que el material original (POL) presente contra el material que fue tratado con sulfato de dietilo (POLS).

En las curvas de polarización que se construyeron para este proyecto se determinó que, para estos HAAE, la zona de activación abarca el intervalo de  $20 \text{ k}\Omega$  a  $3 \text{ k}\Omega$ , la zona de trabajo de  $2 \text{ k}\Omega$  a  $200 \Omega$  y la zona de transferencia de masa de  $100 \Omega$  a  $1 \Omega$ .

En la Fig. 33 se muestra la curva de polarización que corresponde a la CC, en esta se muestran los datos experimentales y los datos teóricos que se modelaron a partir de las tendencias observadas. Esta figura se encuentra dividida en las zonas mencionadas en apartados anteriores (1: activación, 2: óhmica, 3: transferencia de masa).

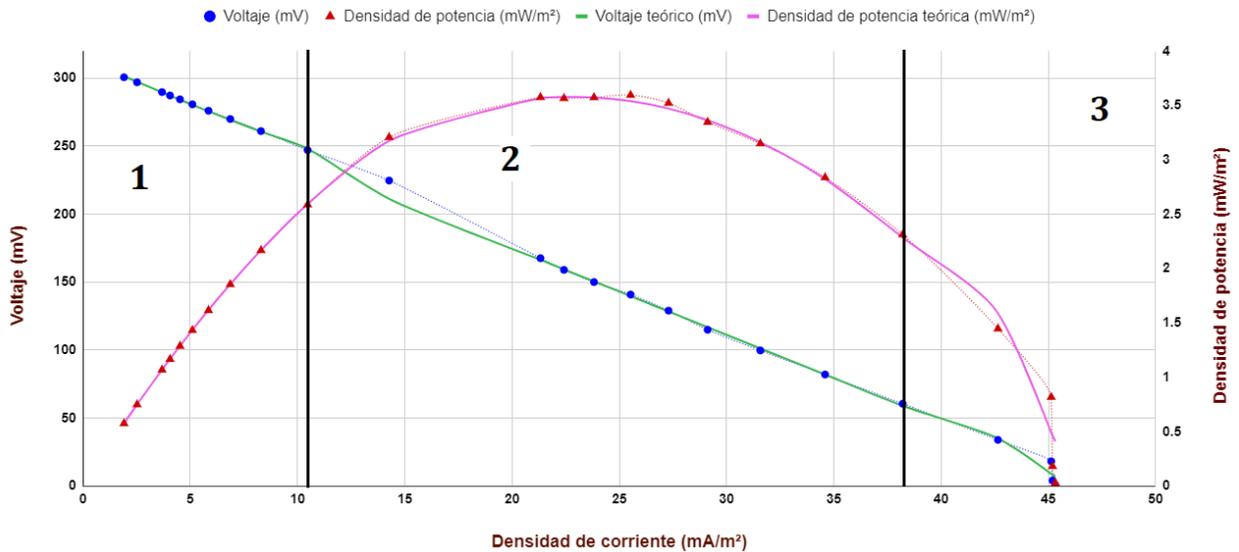


Figura 33 Curva de polarización de la CC, elaboración propia

### Zona de activación (CC)

La ecuación que describe al voltaje ( $f_V$ ) presenta un comportamiento exponencial [Ec. 4.16], lo que es congruente con lo que reportan Vega [38] y Vallejo [37]. En ambos trabajos se menciona que, en la mayoría de los casos, la tendencia que siguen los datos experimentales en la zona de activación es exponencial. Lo que está relacionado con el proceso de polarización que se lleva a cabo en los electrodos. Por otra parte, la ecuación que describe a la densidad de potencia ( $f_{dp}$ ) presenta una tendencia cuadrática [Ec. 4.17] y se infiere que al igual que en el caso del voltaje, este comportamiento se debe a la polarización de los electrodos.

$$f_V(x) = 315e^{-0.0228x} \quad 4.16$$

$$f_{dp}(x) = -0.0019 + 0.314x - 0.00632x^2 \quad 4.17$$

### Zona óhmica (CC)

El voltaje de la zona de trabajo o de pérdidas óhmicas [Ec. 4.18] presenta una tendencia lineal y coincide con lo reportado por Lefebvre y col. [39]. Por otra parte, la densidad de potencia ( $f_{dp}$ ) [Ec. 4.19] mantiene el comportamiento cuadrático observado en la zona

anterior con variaciones en el término independiente y en el término lineal. Se infiere que este comportamiento se debe a que en esta zona se presenta la máxima dp que se puede generar en este sistema. En la zona de trabajo de la CC se obtuvo una dp máxima de 3.6 mW/m<sup>2</sup>, un voltaje de 139.6 mV, una densidad de corriente máxima de 25.5 mW/m<sup>2</sup>; con una resistencia externa de 700 Ω.

$$f_V(x) = 302 - 6.36x \quad \mathbf{4.18}$$

$$f_{dp}(x) = 0.71 + 0.251x - 0.00549x^2 \quad \mathbf{4.19}$$

### **Zona de transferencia de masa (CC)**

En ambos casos las ecuaciones que describen tanto al voltaje ( $f_V$ ) [Ec. 4.20] como a la densidad de potencia ( $f_{dp}$ ) [Ec. 4.21] presentan tendencias logarítmicas y, de acuerdo con la literatura, estos comportamientos están relacionados con problemas de difusividad para un determinado compuesto o ion. En este caso se sugiere que la baja difusividad del H<sup>+</sup> de la zona anódica a la zona catódica es lo que ocasiona que estas curvas presenten estas tendencias.

$$f_V(x) = 1769 - 462\ln(x) \quad \mathbf{4.20}$$

$$f_{dp}(x) = 74.4 - 19.4\ln(x) \quad \mathbf{4.21}$$

Para evaluar la hipótesis anterior se midió el cambio en el pH durante la realización de las curvas de polarización. Esto se debe a que cuando se mide el pH durante la operación en circuito abierto ( $C_a$ ) éste tienden a estabilizarse en un determinado valor. En cambio, si se mide el pH durante la operación a circuito cerrado ( $C_c$ ) éste varía entre 1 y 0.5 unidades con respecto a lo registrado en  $C_a$ .

Como resultado de este experimento se obtuvo la Fig. 34 en donde se plantea el cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente ( $\rho_i$ ). La curva presentada en la Fig. 34 tiene una tendencia al alza con un comportamiento logarítmico.

A partir de este gráfico se plantea que, además de los problemas de transferencia de masa, la producción de  $H^+$  en la zona anódica ( $Z_a$ ) de la celda de control (CC) podría ser mínima y que la reacción química en el cátodo, posiblemente, consuma “rápidamente” los pocos  $H^+$  que se produjeron.

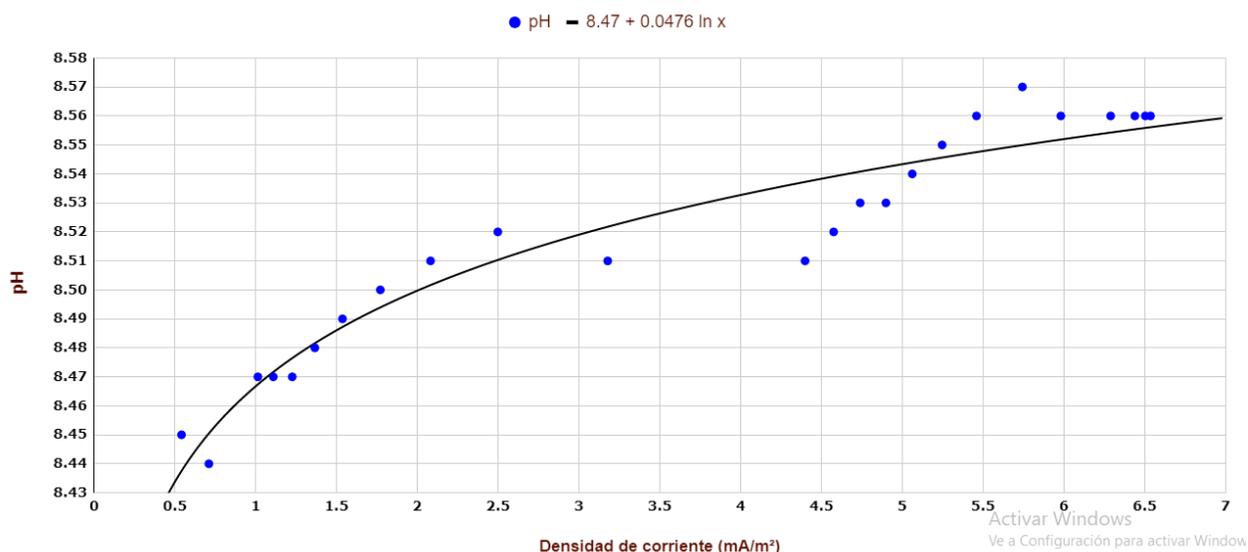


Figura 34 Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente en la CC

Las curvas de polarización de la CPOL se muestran en la Fig. 35, de manera análoga a la CC en esta también se muestran los datos experimentales y los datos teóricos. Esta figura también se encuentra delimitada por las tres zonas mencionadas anteriormente.

En esta figura se observa que los datos experimentales de voltaje (curva en azul) presentan una baja dispersión con respecto a los datos teóricos (curva en verde). Un fenómeno similar se observa en la curva teórica de densidad de potencia (curva en rosa) y los datos experimentales de densidad de potencia (curva en rojo). Sin embargo, al comparar las curvas de densidad de potencia de la CC (Fig. 33) y las de la CPOL (Fig. 35) se observa que en estos sistemas la zona de transferencia de masa presenta una separación entre los valores teóricos y los experimentales.

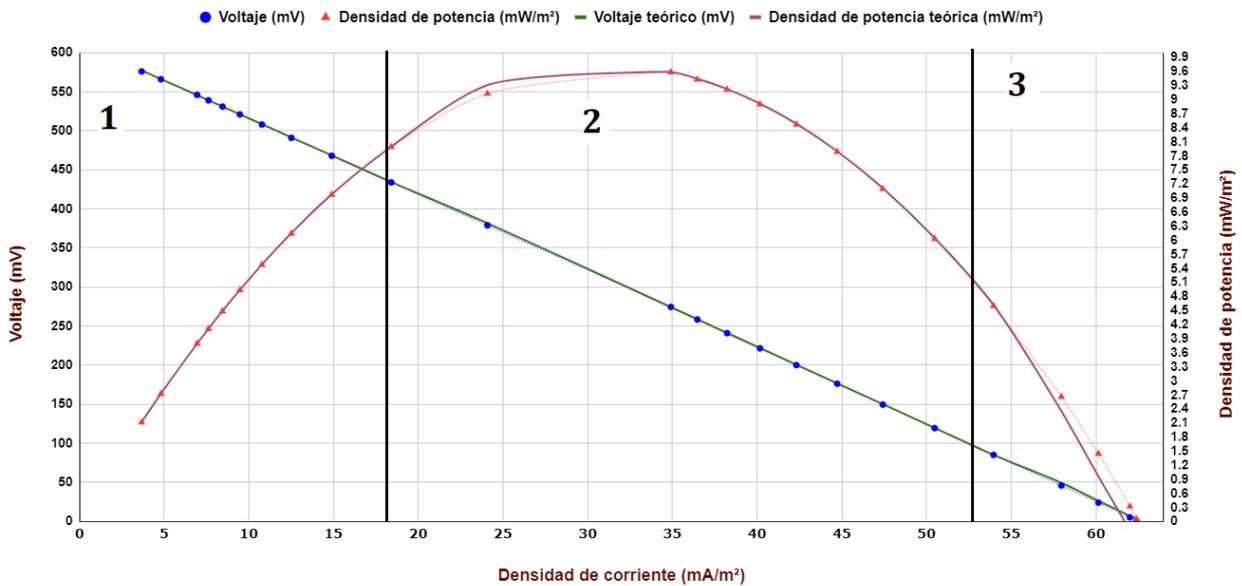


Figura 35 Curva de polarización de la CPOL, elaboración propia

### Zona de activación (CPOL)

En la CPOL se observa que la curva que describe al voltaje [Ec. 4.22] presenta un comportamiento lineal. Lo que se podría sugerir que en este sistema la polarización del ánodo se lleva a cabo con mayor facilidad gracias a la membrana POL. La cual pudo haber favorecido una baja concentración de oxígeno disuelto (OD) y el crecimiento de bacterias anaerobias en la zona anódica de CPOL.

Estos factores propiciarían que la TEE hacia el ánodo se diera de una manera más eficiente. Al igual que en el caso anterior la curva que describe a la densidad de potencia [Ec. 4.23] presenta un comportamiento cuadrático con leves variaciones en el término independiente y en las constantes.

$$f_V(x) = -9.7x + 613 \tag{4.22}$$

$$f_{dp}(x) = -0.00297 + 0.614x - 0.00975x^2 \tag{4.23}$$

### Zona óhmica (CPOL)

De manera análoga a la CC en la CPOL se observa que la curva que describe al voltaje [Ec. 4.24] presenta una tendencia lineal, en el caso de la densidad de potencia [Ec. 4.25] se presenta el mismo comportamiento cuadrático. En este HAAE se tuvo una densidad de potencia máxima de  $9.6 \text{ mW/m}^2$ , un voltaje de  $274.5 \text{ mV}$  y una densidad de corriente de  $94.9 \text{ mA/m}^2$ . Lo anterior se presentó cuando la CCMV operó bajo una resistencia de  $1k\Omega$ .

$$f_V(x) = -9.93x + 621 \quad 4.24$$

$$f_{dp}(x) = 0.601 + 0.593x - 0.00961x^2 \quad 4.25$$

### Zona de transferencia de masa (CPOL)

En ambos casos las curvas de voltaje [Ec. 4.26] y densidad de potencia [Ec. 4.27] presentan tendencias logarítmicas. Lo que estaría relacionado con la dinámica en la transferencia de masa. La curva de pH vs  $\rho_I$  (Fig. 36), presenta un comportamiento logarítmico, por lo que se plantea que esta celda puede presentar problemas de transferencia de masa. Sin embargo, a diferencia de la CC en la CPOL la curva presenta una tendencia a la baja lo que podría indicar que en este sistema la producción de  $H^+$  es mayor que la que se presenta en la CC o, que posiblemente, hay una mayor disponibilidad de  $H^+$ .

$$f_V(x) = 2595 - 627\ln(x) \quad 4.26$$

$$f_{dp}(x) = 155 - 37.6\ln(x) \quad 4.27$$

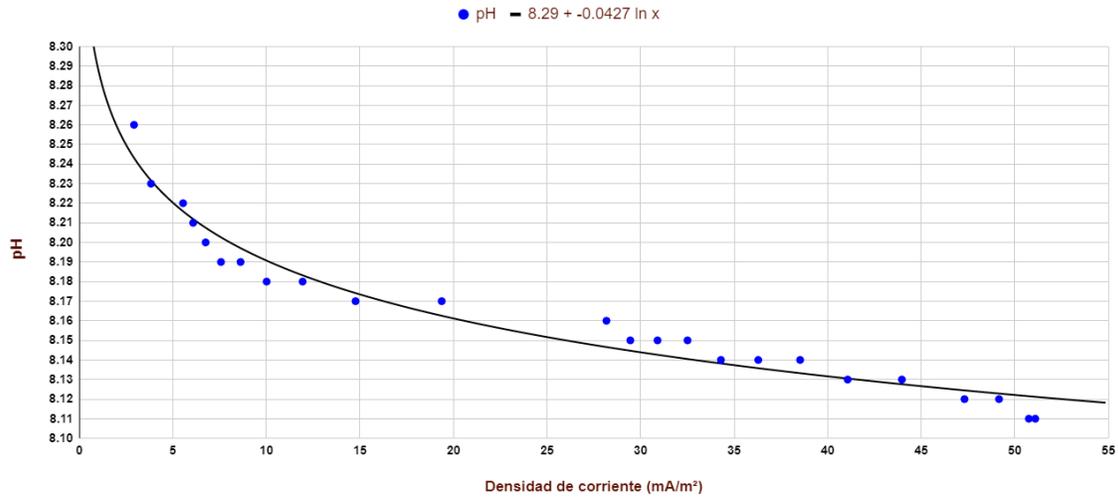


Figura 36 Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente para la CPOL

Las curvas de polarización de la CPOLS se muestran en la Fig. 37. En esta figura se observa que las curvas teóricas presentan una baja dispersión con respecto a los datos experimentales. El ejemplo más representativo es la curva teórica de densidad de potencia para la zona de transferencia de masa (Fig. 37, zona 3). En donde, a diferencia de lo observado en las CC y CPOL la curva teórica pasa por tres de los cuatro puntos que conforman a esta zona.

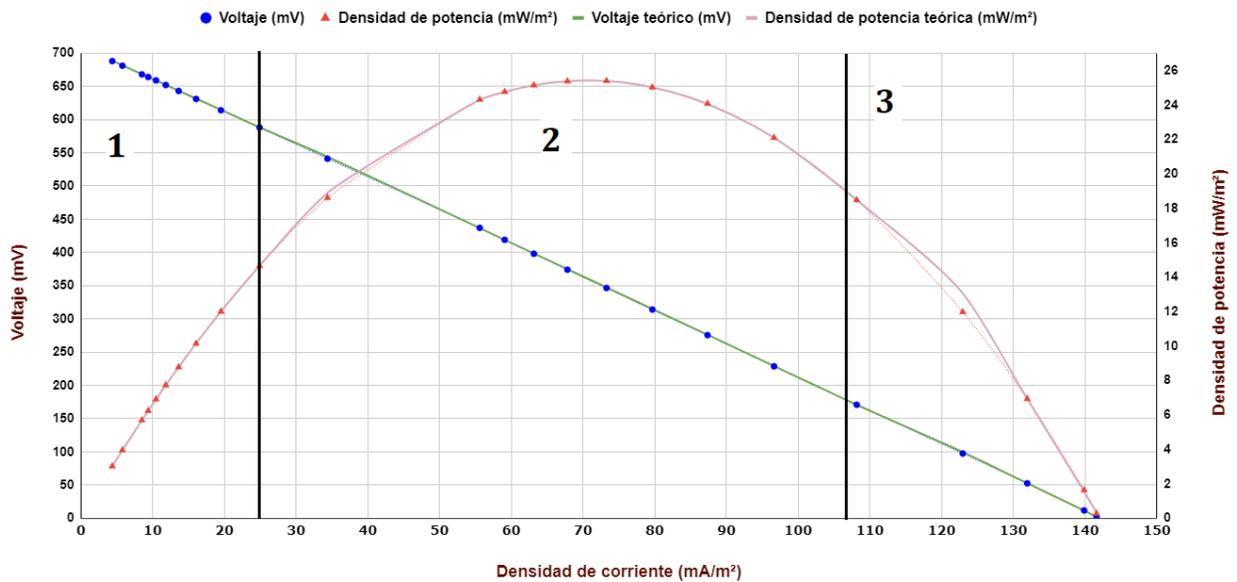


Figura 37 Curva de polarización de las CPOLS, elaboración propia

### Zona de activación (CPOLS)

En este caso la curva que describe al voltaje [Ec. 4.28] en la zona de activación presenta una tendencia lineal lo que implica que de manera análoga a la CPOL en la CPOLS la polarización del ánodo se da con una mayor facilidad. Por lo anterior se sugiere que en ambos sistemas las poblaciones de bacterias podrían presentar una mayor TEE que en las otras CCMV. En el caso de la dp la curva teórica [Ec. 4.29] mantiene la tendencia cuadrática observada en la CC.

$$f_V(x) = -4.88x + 710 \quad 4.28$$

$$f_{dp}(x) = -0.000643 + 0.71x - 0.00489x^2 \quad 4.29$$

### Zona óhmica (CPOLS)

El voltaje [Ec. 4.30] de la zona de trabajo mantiene la tendencia lineal que se observó en la zona de activación. Así mismo, en la curva de densidad de potencia [Ec. 4.31] se mantiene la tendencia cuadrática con cambios en el término lineal y con cambios mínimos en las constantes que multiplican a las variables.

$$f_V(x) = -5.06x + 718 \quad 4.30$$

$$f_{dp}(x) = 0.666 + 0.7x - 0.00495x^2 \quad 4.31$$

En la CPOLS se obtuvo una dp máxima de 25.4 mW/m<sup>2</sup>, un voltaje de 346.5 mV y una densidad de corriente de 73.3 mA/m<sup>2</sup>, operando bajo una resistencia de 600  $\Omega$ .

### Zona de transferencia de masa (CPOLS)

La CPOLS presenta curvas de voltaje [Ec. 4.32] y densidad de potencia [Ec. 4.33] con tendencias lineales lo que podría indicar que en esta CCMV la difusividad del H<sup>+</sup> se podría dar de una manera más eficiente.

$$f_V(x) = 5.21x + 740 \quad 4.32$$

$$f_{ap}(x) = -0.682x + 96.9 \quad 4.33$$

Lo anterior se puede confirmar cuando se analiza la curva de pH vs  $\rho_i$  (Fig. 38), la cual presenta un comportamiento lineal y una tendencia a la baja. A partir de estas observaciones se infiere que la transferencia de masa es más eficiente en este sistema y, debido a la disminución en el pH, la producción de  $H^+$  en la zona anódica de CPOLS es más eficiente que en la CC.

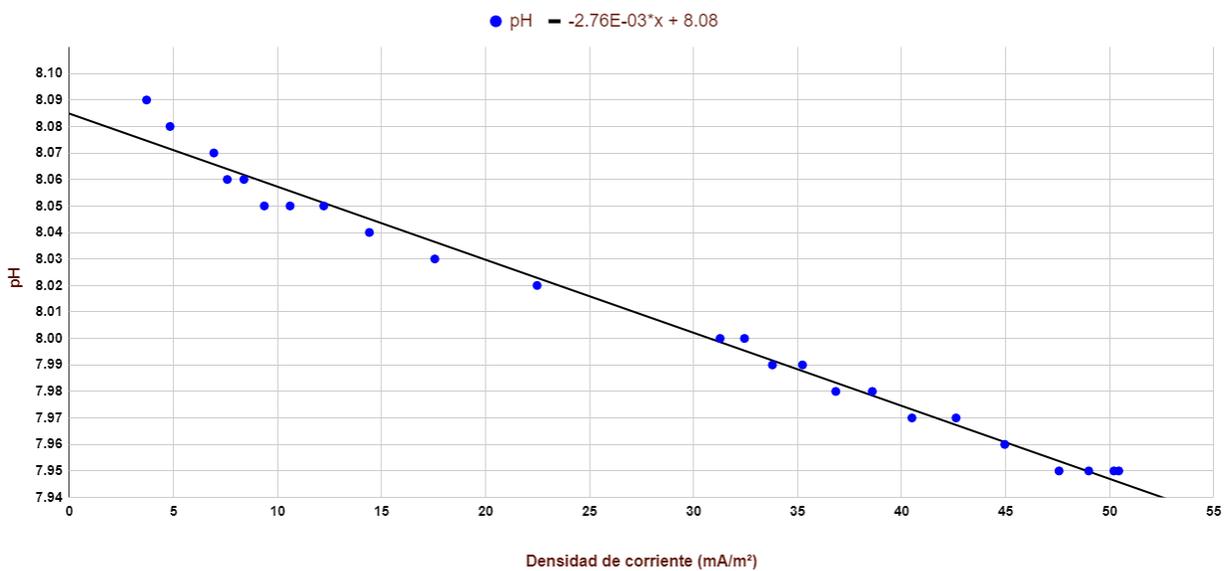


Figura 38 Cambio en el pH con respecto al cambio en la densidad de corriente para la CPOLS

#### 4.5 Resistencia interna de CC, CPOL y CPOLS

A partir de la [Ec. 12.1] planteada en el apartado 3.4 se calculó la  $R_{int}$  de las CC, CPOL y CPOLS (Tabla 9). De estos resultados se concluye que la celda que presenta la mayor  $R_{int}$  es CPOL variando en un 23.5% con respecto a la  $R_{ext}$ .

Lo anterior podría atribuirse a que el separador POL incrementó la  $R_{int}$ , ya que esta fue sintetizada a partir de un material dieléctrico. En la CPOL la resistencia aumenta en un 52.5 % con respecto a la CC.

La  $R_{int}$  en la CPOLS es la más baja de los 3 HAAE, disminuyendo en un 20.5 % con respecto a la CC y en un 47.8% con respecto a la CPOL. Este comportamiento se atribuye al separador POLS el cual, como consecuencia del tratamiento con sulfato de dietilo, propició que la capacidad dieléctrica del poliestireno disminuyera e incluso pudiendo llegar a convertirlo en un material semiconductor. Para confirmar esto último tendría que someterse al separador POLS a los análisis correspondientes.

**Tabla 9** Resistencia interna de las celdas

CCMV	$R_{int}$ ( $\Omega$ )	$R_{ext}$ ( $\Omega$ )	% de variación de $R_{int}$ con respecto a $R_{ext}$
CC	809.8	700	15.7
CPOL	1235	1000	23.5
CPOLS	644	600	7.33

## 4.6 Parámetros fisicoquímicos adicionales

En esta sección se analiza los valores registrados de pH, temperatura interna de los HAAE, conductividad y consumo de solución nutritiva.

### 4.6.1 Valores de pH registrados en los HAAE

Los datos de pH que se recopilieron durante el periodo experimental se muestran en la Fig. 39.

Estos presentan oscilaciones entre un mínimo de 6 y un máximo de 9; la tendencia que se presenta en estos datos se describe mediante un polinomio de tercer grado de la forma  $ax^3 + bx^2 + cx + d$ .

En donde el valor de las constantes y el término independiente cambia para cada HAAE. Se infiere que la variación en estos términos se debe a que en cada HAAE se presentaba una estructura interna distinta. Además de, posibles diferencias en el desarrollo de las poblaciones de bacterias en la zona anódica e incluso una degradación diferente en los colectores de electrones ocasionada por la corrosión.

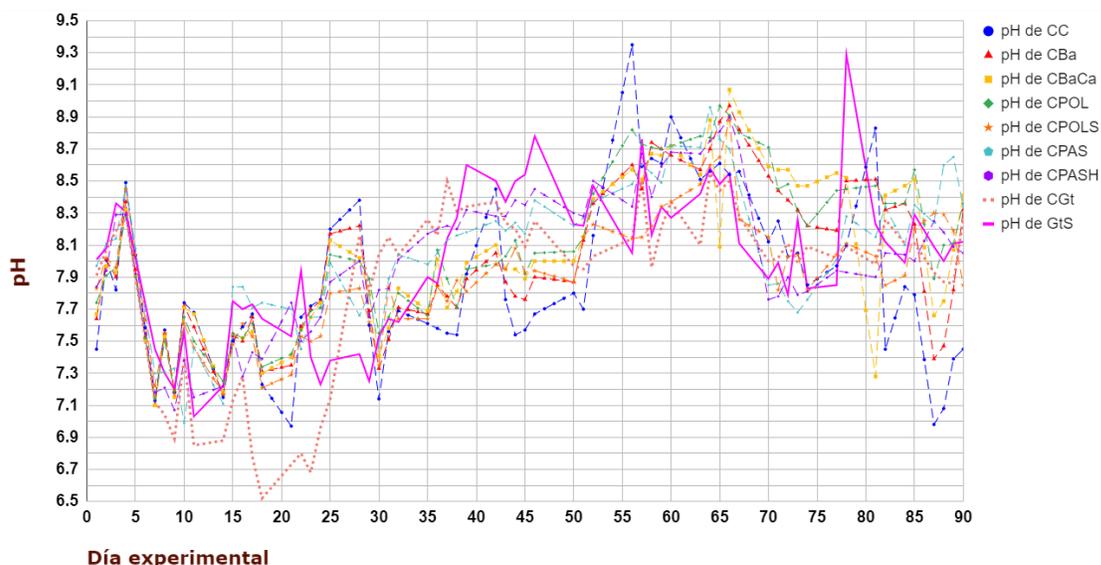


Figura 39 Cambio en el pH de las CCMV durante el experimento, elaboración propia

Durante los días 1 a 18, cuando las celdas operaron en circuito abierto ( $C_a$ ) el pH disminuyó de 8.5 a 7.5. Se sugiere que en este intervalo las poblaciones de bacterias comienzan a crecer, ya que uno de los subproductos del metabolismo bacteriano es  $CO_2$ . El cual al hidratarse da lugar a la formación de  $H_2CO_3$ , lo que podría explicar la acidificación observada en este periodo. Posteriormente, cuando las celdas operan en circuito cerrado ( $C_c$ ) de los días 19 a 65. El pH muestra una tendencia hacia la basificación pasando de 7.5 hasta 9. En este periodo se observó corrosión en los colectores de electrones. Primero apareciendo como manchas de color naranja y posteriormente como flóculos flotando en la superficie de los HAAE. La corrosión indicaría presencia de  $Fe_2O_3$  en los sistemas, esto se respalda al analizar un digrama de Pourbaix (Fig. 40).



**Tabla 10** Valores de pH promedio registrados en los HAAE

HAAE	pH promedio	Desviación estándar
CBa	8.0	0.463
CBaCa	8.0	0.469
CC	7.9	0.522
CGt	7.9	0.539
CPAS	8.1	0.409
CPASH	8.0	0.433
CPOL	8.1	0.468
CPOLS	7.9	0.359
CGtS	8.0	0.461

#### 4.6.2 Temperatura interna ( $T_c$ ) de los HAAE

En este proyecto se determinó que la temperatura interna de los HAAE ( $T_c$ ) se encuentra intrínsecamente relacionada con la variación de la temperatura ambiente ( $T_a$ ). Normalmente la diferencia entre ambas temperaturas era de 4 a 5 grados. En la Fig. 41 se observa que la  $T_c$  de las HAAE presenta una tendencia similar, dicho comportamiento se atribuye a la protección del invernadero. El cual propició que la  $T_a$  presentara un perfil homogéneo durante todo el periodo experimental.

La  $T_c$  promedio se muestra en la Tabla 11 y se confirma que la variación en la temperatura entre cada HAAE es mínima. La desviación estándar entre cada HAAE se atribuye a que algunos de los sistemas se encontraban en puntos en donde la luz solar tenía una mayor incidencia.

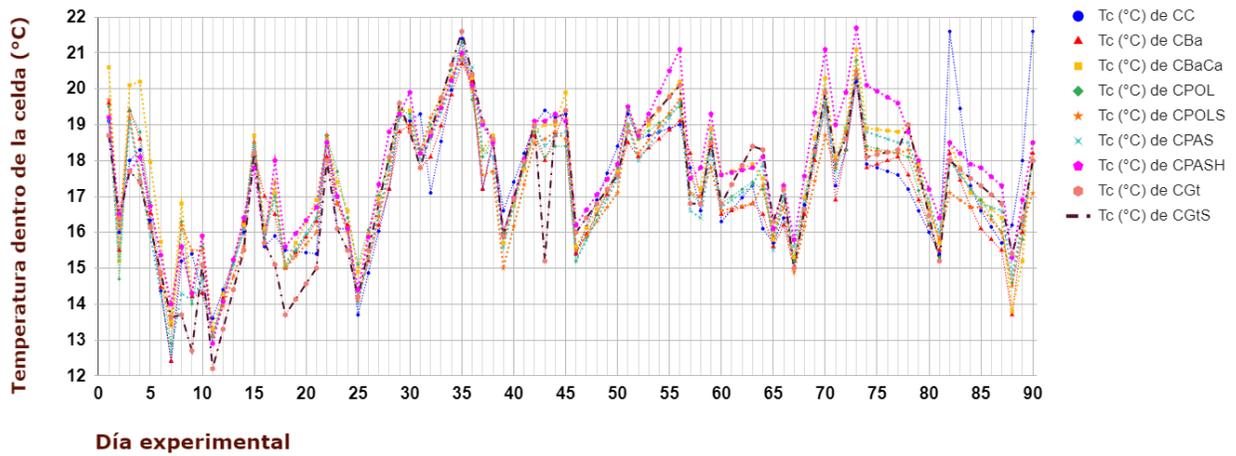


Figura 41 Cambio en la temperatura interna ( $T_c$ ) de las CCMV durante el experimento, elaboración propia

**Tabla 11** Temperatura interna promedio de los HAAE durante el experimento

HAAE	$T_c$ promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )	Desviación estándar
CBa	17.1	1.681
CBaCa	17.6	1.782
CC	17.3	1.839
CGt	17.2	1.936
CPAS	17.2	1.721
CPASH	17.8	1.775
CPOL	17.4	1.701
CPOLS	17.1	1.654
CtS	17.4	1.878

### 4.6.3 Consumo de solución nutritiva (SN) en los HAAE

En la Fig. 42 se muestra el consumo promedio de SN en los HAAE, estos resultados se explican de la siguiente manera:

Durante el periodo experimental se observó que la celda de control (CC) tuvo el mayor consumo de SN (73.7 mL). Este comportamiento se atribuye a 2 factores principales: la pérdida de agua debido a la evaporación y al crecimiento de la planta. Durante el experimento se observó que la planta de la CC presentó el crecimiento más acelerado en cuanto a altura y cantidad de brotes. Pasando de una altura aproximada de 15 cm a una de 19 cm durante los primeros 30 días y con 24 cm de altura con 2 nuevas ramificaciones al término de los 90 días.

La CBa fue la segunda con mayor consumo de SN (57.1 mL), lo cual se atribuye a que la planta de esta celda presentó un aumento significativo en la cantidad de brotes. Pasando de 2 tallos iniciales durante los primeros 30 días a 5 al término del experimento. A diferencia de las ramificaciones de la CC en la CBa los tallos tuvieron una altura promedio de 18 cm.

En la CBaCa la planta comenzó con 2 brotes de una altura promedio de 15 cm y culminó con 4 brotes de 18 cm de altura promedio al término del experimento. Esta tendencia también se observó en la CPOL, lo que es congruente con el consumo de SN en estas celdas (52.4 mL y 53 mL respectivamente).

En la CPOLS, la planta conservó una altura promedio de 16 cm con 2 pequeños brotes durante todo el experimento. Lo que coincide con su bajo consumo de SN (46.4 mL).

Por otra parte, en las celdas CPAS (43.3 mL) y CPASH (44.5 mL), el bajo consumo de SN se atribuye a que el poliacrilato de sodio es un polímero superabsorbente. Esta capacidad lo hace capaz de retener el agua de la SN disminuyendo las pérdidas por evaporación. Lo anterior se infiere debido a que este polímero, en el ámbito comercial, se emplea en la agroindustria para que los cultivos que se encuentran en zonas semidesérticas retengan el agua y las plantas sean capaces de desarrollarse con normalidad.

Un fenómeno similar se observa en la CGt y la CGtS, en donde la grenetina de las membranas pudo haber retenido parte del agua de la SN y disminuir las pérdidas por evaporación.

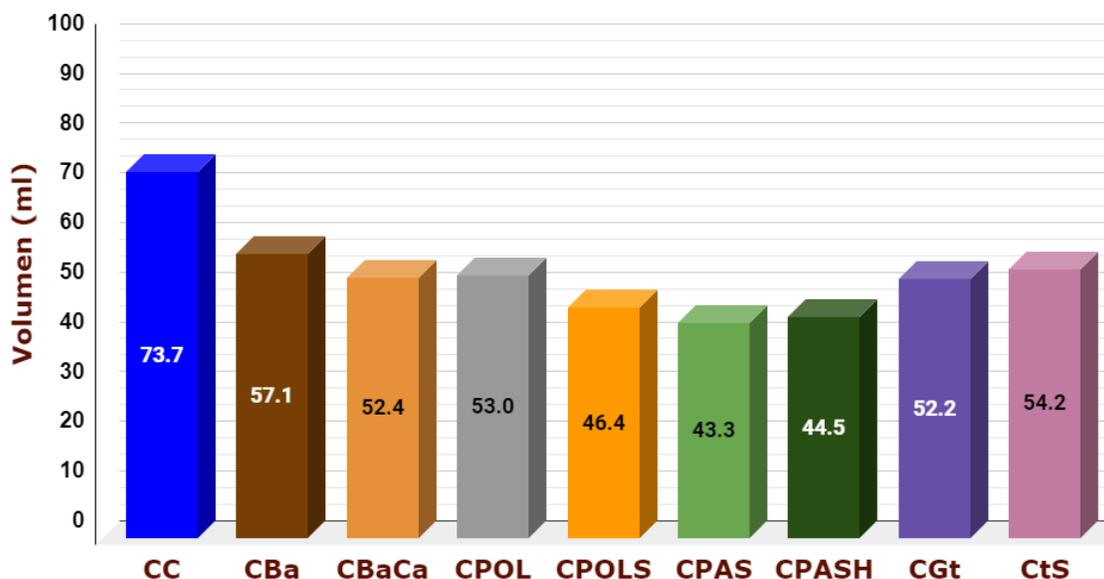


Figura 42 Consumo de SN durante el experimento

Es importante aclarar que en las CPAS, CPASH, CGt y CGtS se realizaron múltiples cambios del organismo vegetal. Ya que estos tendían a sobrevivir alrededor de 5 semanas. Se sugiere que la degradación de la grenetina en estos HAAE fue la causante de la muerte de las plantas. Puesto que al realizar el reemplazo de éstas se identificó que la SN se había tornado de un color negro y con un olor parecido al de la descomposición de materia orgánica (similar al que se encuentra en los canales de aguas negras).

Otra aclaración importante es que, a partir del día 30, en todos los TA se observó un crecimiento de algas. Estas eran removidas periódicamente para evitar que estas influyeran negativamente en el desempeño de los HAAE.

#### 4.6.4 Conductividad eléctrica en los HAAE

Los datos de conductividad eléctrica de los HAAE se muestran en la Tabla 11.

La conductividad eléctrica en estos sistemas podría verse influenciada por factores como: el contenido de sales de la SN, la presencia o ausencia de un separador entre los electrodos, la captura y asimilación de sales/nutrientes por parte de la planta y de los microorganismos presentes.

Sin embargo, a raíz de las observaciones realizadas durante el periodo experimental y los datos recopilados, en estos HAAE los datos de conductividad se explican de la siguiente manera:

En la celda de control (CC) se reporta una conductividad de 2.61 mS/cm, se infiere que lo anterior se debe al contenido de sales en la SN y a la acumulación de estas sales en diversas zonas de esta celda. Por ejemplo, en el pellón que se colocó debajo del cátodo y en la base de la CC.

Se observa que la CBa presenta la conductividad más alta (5.41 mS/cm), lo que podría ser un indicio de que en esta celda la remoción de sales es mínima o incluso nula. Un caso contrario se da en CBaCa en donde la conductividad presenta una disminución del 15%. En este caso se sugiere que los cristales de  $\text{CaCO}_3$  presentes al interior del separador BaCa, dieron lugar a la formación de cristales insolubles de  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  y de  $\text{CaSO}_4$ . La formación de estos compuestos podría explicar la disminución en la conductividad.

Para el caso de CPOL se observa que la conductividad presenta los mismos valores de CBa por lo que se puede suponer que en esta celda tampoco existe una remoción significativa de sales del medio. En cambio, en CPOLS se presenta una disminución del 33% en la conductividad. Se podría asociar la ocurrencia de este fenómeno con la posible remoción de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del medio. Lo que podría indicar que en la estructura de POLS existen grupos  $R - \text{SO}_2\text{O} - H$ . Con base en la premisa anterior se recomienda analizar este material a profundidad en futuras líneas de investigación mediante análisis más especializados.

CPASH presenta una baja conductividad eléctrica. Se podría plantear como un indicio de que, el separador de esta celda tiende a disminuir la concentración de iones ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) en el medio.

El efecto del separador en la reducción de la conductividad se propone debido a que los  $R - \text{COO} - \text{H}$  se encuentran en membranas débilmente ácidas y se usan de manera comercial para disminuir la dureza del agua. Es decir, para remover sales de calcio y magnesio.

**Tabla 12** Conductividad eléctrica en los HAAE

CCMV	Conductividad (mS/cm)
CC	2.61
CBa	5.41
CBaCa	4.60
CPOL	5.41
CPOLS	3.60
CPAS	4.02
CPASH	2.13
CGt	4.37
CGtS	3.93

Un caso contrario se observa en CPAS, en donde la conductividad es 53% más alta que la que se registró en CPASH. Se deduce que este fenómeno ocurre debido a que en esta celda se empleó  $R - \text{COO} - \text{Na}$  en el separador. En este caso, el  $\text{Na}^+$  presente en la estructura del polímero dificultaría la remoción de iones del medio. Ya que acorde con la literatura, el  $\text{Na}^+$  se considera un ion que solo se intercambia con  $\text{H}^+$  a través de un proceso de retrolavados con soluciones ácidas (Ej. HCl 1 M).

De acuerdo con lo observado se conjetura que una parte de los iones  $H^+$ , generados en la zona anódica ( $Z_a$ ) de CPAS, se intercambiaron con una parte de los  $Na^+$  de la membrana.

Lo que daría lugar a la formación de pequeñas cantidades de  $R - COO - H$  en la estructura de la membrana, los cuales tendrían la capacidad de remover iones como  $Ca^{2+}$  o  $Mg^{2+}$  de la solución nutritiva (SN).

En las CGt y CGtS ocurrió un fenómeno similar al observado en la CC. Ya que en la base de estas celdas se observó un crecimiento de cristales, se sugiere que el crecimiento de cristales en la base de las celdas podría ser la causa de los cambios en la conductividad de estas celdas.

## Capítulo 5. Conclusiones

La CCMV con el mejor desempeño fue CPOLS, lo anterior se atribuye a que en esta celda se acopló el separador POLS en la parte inferior de la celda y directamente sobre el ánodo. Esta configuración permitió que el ánodo se confinara en una zona específica propiciado:

- Un incremento estadísticamente significativo y benéfico en la producción de voltaje, lo cual se sustenta con las pruebas estadísticas (ANOVA y prueba de Dunnet)
- El posible desarrollo de poblaciones bacterianas anaerobias en la zona anódica de CPOLS. Lo cual se relaciona con los bajos potenciales anódicos registrados durante el experimento. Ya que los potenciales de ánodo negativos indican una menor concentración de oxígeno, lo que sugiere que en este sistema se presentan mejores condiciones para el crecimiento de microorganismos electrogénicos.
- La disminución en la difusión de oxígeno desde la zona catódica hacia la zona anódica. Ya que la concentración de oxígeno disuelto en la zona anódica de CPOLS disminuyó en un 75.2% con respecto a lo registrado en la CC.
- La difusión de  $H^+$  desde la zona anódica hacia la zona catódica. Esto se infiere en función de los comportamientos observados en la zona 3 de las curvas de polarización y en la variación del pH en función de la densidad de corriente. En donde las curvas presentan tendencias lineales. De acuerdo con la literatura, esto se asocia con una alta difusión de masa.

- La disminución de la concentración de sales en el medio. Ya que al comparar los datos de CPOL contra CPOLS, en la última se observa una disminución del 33% en la conductividad eléctrica.

A partir de lo anterior se infiere que el separador POLS cumple con los requisitos mínimos para ser considerada como una membrana de intercambio iónico que beneficia la producción de voltaje y la degradación de materia orgánica. Lo que la hace apta para ser empleada en estos sistemas e incluso podría ser empleada a nivel industrial. Además, la presencia de POLS en este sistema no tuvo efectos negativos en el organismo vegetal, ya que en esta celda la planta se mantuvo con vida desde el día 0 hasta el día 90.

## 5.1 Recomendaciones para futuras líneas de experimentación

Se recomienda que en futuras líneas de investigación se aborden los siguientes temas:

1. El efecto que tendría la ubicación y el grosor de los separadores en la estructura de los HAAE.
2. El efecto de los separadores en los HAAE que incorporen electrodos con diferentes colectores de electrones.
3. El efecto que tendría el inóculo de *Geobacter sulfurreducens* o *Shewanella putrefanecins* en HAAEs que incorporan un separador POL, POLS, PAS o PASH.
4. La modificación de otros polímeros o biopolímeros por medio de sulfato de dietilo o sulfato de dimetilo. Bajo esta misma idea, también se recomienda emplear otras formas de sulfonar o de adicionar grupos carboxilo a un polímero o biopolímero.
5. En este proyecto se empleó poliacrilato de sodio aglutinado con grenetina obteniendo resultados muy positivos en la producción de voltaje. Sin embargo, la descomposición de la grenetina devino en una merma en la eficiencia del HAAE. Por lo que se sugiere cambiar el aglutinante o empacar al poliacrilato en una estructura que prevenga que este se difunda hacia el medio.

# Bibliografía

- [1] R. R. Rachnarin Nitorisavut, «Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,, vol. 76, pp. 81-89, 2017.
- [2] Comisión Nacional del agua, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, vol. 30, CDMX: Secretaría del medio ambiente y recursos naturales, 2015, pp. 51-54.
- [3] Comisión Nacional del Agua, Atlas del agua en México, CDMX: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016, pp. 92-94.
- [4] Fondo para la comunicación y la educación ambiental A.C., «¿Cuánta agua tiene México?,» [En línea]. Available: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>. [Último acceso: octubre 2022].
- [5] Comisión Nacional del Agua, Atlas del agua, CDMX: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, 2018.
- [6] Fundación AQUAE, «¿Cuánta agua se necesita para producir alimentos?,» [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/cuanta-agua-se-necesita-para-producir-alimentos/>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [7] K. Velázquez, « En México no falta agua, sobra chatarra,» CDMX, 2021.
- [8] B. Yañez, «8 datos que nos dicen por qué México está en la antesala de una crisis de agua,» Expansión Política, CDMX, 2018.
- [9] BBC News Mundo, «Fukushima: Japón aprueba un polémico plan para liberar aguas residuales al océano,» BBC, 2021.
- [10] M. V. Liy, «Las heridas sin sanar de Fukushima: 10 años de un triple desastre y el peor accidente nuclear del siglo XXI,» El país, Pekín, 2021.
- [11] Expansión Política, «Grupo México derrama 3,000 litros de ácido sulfúrico en el Mar de Cortés,» Expansión Política, 2019.
- [12] Animal Político, «Mina de Grupo México contamina río en Zacatecas usado para sembradíos y consumo humano,» Animal Político, 2019.
- [13] E. Tlachi, «Encuentran basurero ilegal de fármacos caducos en Tlaxcala,» El sol de Tlaxcala, Chiautempan, Tlaxcala, 2021.
- [14] Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional, «Anexo 2 Reporte de Avances de Energías Limpías,» CDMX, Secretaría de Energía, 2021, pp. 306-319.

- [15] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, «Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) de México 1990 - 2019,» Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, CDMX, 2019.
- [16] A. Vega, «Poca lluvia, más calor y emisiones sin control traerán más contingencias en CDMX, advierten CAME y expertos,» Yahoo News, CDMX, 2022.
- [17] IWA Specialist Group on use of macrophytes in water pollution control, Constructec wetlands for pollution control, Processes, performance, design and operation, Primera ed., Londres, Inglaterra: IWA Publishing, Alliance house, 2000, pp. 17-20.
- [18] V. I. K. J. O. Kracke Frauke, «Microbial electron transport and energy conservation – the foundation for optimizing bioelectrochemical systems,» *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, 2015.
- [19] D. M. H. N. H. & R. J. O. Revelo, «Celdas de combustible microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica,» *Información tecnológica*, vol. 24, nº 6, pp. 17-28, 2013.
- [20] J. D. L. Hicapié, «Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales,» Centro De Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C., Santiago de Querétaro, 2014.
- [21] M. G. S. Juárez, «Estudio de la generación de electricidad en un humedal artificial asistido electroquímicamente,» Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2016.
- [22] C. Byrne, *Trabajo práctico N° 12 - Intercambio iónico*, Buenos aires, Argentina: Universidad Nacional de La Plata, 2021.
- [23] J. L. García, «Preparación y Caracterización de Membranas de Intercambio Iónico a Partir del Anclaje de Dendrímeros PAMAM en una Base Polimérica de Acetato de Celulosa,» Centro De Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C., Santiago de Querétaro, 2014.
- [24] C. & V. C. & R.-N. J. Solis, «Tecnología de membranas: desarrollo histórico / Membrane technology: historical development,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 19, pp. 89-98, 2016.
- [25] M. L. R. T. Ana del Pilar Pineda Marín, «Estado del arte en celdas de combustible microbianas (CCM) para la producción de bioenergía,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [26] S. I. Ortiz Zamora, «Estudio de separadores de semi-reacciones en humedales artificiales asistidos electroquímicamente,» Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2018.

- [27] Sigma Aldrich, «MERCK,» Sigma Aldrich, [En línea]. Available: [https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/search/nafiction?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=nafiction&type=product\\_name](https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/search/nafiction?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=nafiction&type=product_name). [Último acceso: Octubre 2022].
- [28] Y. Z. C. T. L. D. Lei Xu, «Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell,» *Journal of environmental management*, n° 207, pp. 116-123, 2018.
- [29] S. S. A. Carmalin Sophia, «Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 21, pp. 59-66, 2017.
- [30] L. López, *Curva de crecimiento bacteriano en la producción de proteínas recombinantes*, San Lorenzo, Paraguay: Instituto de investigaciones en Ciencias de la Salud - Universidad Nacional de Asunción, 2016, pp. 1-27.
- [31] Universidad de Salamanca, «Crecimiento bacteriano. Modelos predictivos de ComBase,» [En línea]. Available: [http://coli.usal.es/web/demos/demo\\_alteracion/FactoresCrecimiento/FactoresCrecimiento.html](http://coli.usal.es/web/demos/demo_alteracion/FactoresCrecimiento/FactoresCrecimiento.html). [Último acceso: Abril 2023].
- [32] EcoInventos Green technology, «ecoinventos.com,» Enero 2015. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/plant-e/>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [33] S. A. Ramírez Martínez, «Evaluación de la remoción de materia orgánica y producción de electricidad en una celda de combustible microbiana vegetal a escala de laboratorio,» Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2017.
- [34] A. M. a. N. Weiner, «The Mechanism of the Sulfonation Process,» *Journal of the American Chemical Society*, vol. 58, n° 2, pp. 294-299, 1936.
- [35] A. S. d. Jesús, «Síntesis y caracterización de catalizadores bimetálicos de  $\text{wo}_3\text{-v}_2\text{o}_5/\text{al}_2\text{o}_3$  para el proceso de desulfuración oxidativa (ods),» Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2014.
- [36] New Jersey Department of Health, «Derecho a saber,» Noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0710sp.pdf>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [37] O. V. Puerta, «Ensamble y evaluación de una celda de combustible tipo PEM,» Centro De Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C., Santiago de Querétaro, 2003.
- [38] M. C. V. Reyes, «Diseño y construcción de una celda de combustible solar microbiana para la generación de energía eléctrica y el tratamiento de agua,»

Centro de investigaciones en óptica - Unidad Aguascalientes, Aguascalientes, aguascalientes, 2021.

- [39] A. U. I. S. C. B.-H. K. H. Y. N. Olivier Lefebvre, «Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment-a review and discussion from energetic consideration,» *Applied microbiology and biotechnology*, vol. 89, nº 2, pp. 259-270, 2011.
- [40] M. E. H. Mendoza, «Evaluación de ensambles membrana-electrodo de una celda de combustible tipo PEM,» Centro De Investigación y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C., Santiago de Querétaro, 2004.
- [41] Zschimmer & Schwarz - Tendencias del sector químico, «Producción cerámica y superficies antibacterianas: cómo funcionan y posibles innovaciones,» Zschimmer & Schwarz, Agosto 22. [En línea]. Available: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/produccion-ceramica-y-superficies-antibacterianas-como-funcionan-y-posibles-innovaciones/>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [42] A. Fruh, «Pourbaix diagram of Iron,» 2006.
- [43] M. A. B. a. S. K. H. Shaukatali N. Inamdar, «Construction of Ag/AgCl Reference Electrode from Used Felt-Tipped Pen Barrel for Undergraduate Laboratory,» *Journal of Chemical Education*, vol. 86, nº 3, p. 355, 2009.
- [44] Ministerio del Ambiente, Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador, Ecuador: Gobierno Nacional del Ecuador, 2012.
- [45] P. S. T. S. Shammi Theodore, «Esterification of ethanol with sulfuric acid: A kinetic study,» *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 79, nº 1, pp. 56-64, 2009.
- [46] A. A. H. D. H. L. Christie John Geankoplis, Transport Processes and Separation Process Principles, Quinta ed., New York: Pearson Education, 2018.
- [47] R. N. M. Anthony L. Hines, Mass transfer : fundamentals and application, Edimburgo: Prentice-Hall, 1985.
- [48] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *NOM-001-SEMARNAT-2021*, CDMX: Diario Oficial de la Federación, 2021.
- [49] Secretaría de Economía - Unidad de Normatividad, Competitividad y Competencia - Dirección General de Normas., *NMX-AA-028-SCFI-2021*, CDMX: Diario Oficial de la Federación, 2021.

- [50] Secretaría de Economía - Subsecretaría de Competitividad y Normatividad - Dirección General de Normas - Dirección de Normalización., *NMX-AA-030/2-SCFI-2011*, CDMX: Diario Oficial de la Federación, 2011.
- [51] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales , *NOM-002-SEMARNAT-1996*, CDMX: Diario Oficial de la Federación, 1996.
- [52] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *NOM-003-SEMARNAT-1997*, CDMX: Diario Oficial de la Federación, 1997.

# Anexo 1. Electrodo de referencia

Estos instrumentos se construyeron con base en el artículo "*Construction of Ag/AgCl Reference Electrode from Used Felt-Tipped Pen Barrel for Undergraduate Laboratory*" [43] de Inamdar y col. del 2009. A partir de este documento se obtuvieron las concentraciones de los electrolitos y las soluciones de decapado. El procedimiento de galvanoplastia se modificó a partir de lo mencionado en el "Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador" del 2012 [44].

## Materiales

- Vaso de precipitados de 150 mL
- Vaso de precipitados de 200 mL
- Vaso de precipitados de 50 mL
- Circuito eléctrico para galvanoplastia
- Espátula
- Agitador de vidrio
- Balanza analítica
- Nave de pesaje
- Probeta de 10 mL
- Matraz volumétrico de 10 mL
- Terminales eléctricas con caimán
- Batería de 9V
- Lija de grado 1500 de pulido y
- Marcador indeleble
- Contenedor de 200 mL
- Contenedor ámbar de 10 mL
- Alambres de plata
- Capilar de vidrio con resina de intercambio iónico
- Tapones de goma para capilar
- Guantes de nitrilo
- Goggles de seguridad
- Bata de laboratorio
- Micropipeta de 1 mL o pipeta de 1 mL
- Piseta
- Tiras de Parafilm

- microacabado
- Cinta adhesiva
- Baño de hielo
- Tubo de ensayo

### Reactivos

- Cloruro de potasio (KCl)
- Agua destilada
- Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) 68-70%
- Alcohol etílico al 96%

### Preparación de las disoluciones

Para realizar el proceso de galvanoplastia se requieren 3 soluciones: electrolito para el cuerpo del electrodo (KCl 3 M), electrolito para galvanoplastia (KCl 0.05 M) y solución para decapado (HNO<sub>3</sub> 0.1 M). A continuación, se describen los procedimientos para elaborarlas.

#### Disolución 0.1 M de HNO<sub>3</sub> para decapado

El vaso de precipitados de 200 mL se sumerge en el baño de hielo y se procede a colocar 157 mL de agua destilada; debido a que necesitamos una disolución de una concentración 0.1 M, se estimó el volumen de agua destilada necesario para diluir 1 mL de HNO<sub>3</sub> al 70%.

La [Ec. 36] convierte la concentración del HNO<sub>3</sub> de %V/V a unidades de V/V:

$$70\% \frac{(mldeHNO_3)}{(mlde disolución)} * \frac{1}{100} \% = 0.7 \frac{mldeHNO_3}{mlde disolución} \quad 36$$

Mediante la [Ec. 37], se calcula la masa de HNO<sub>3</sub>:

$$0.7 \frac{mldeHNO_3}{mlde disolución} * 1mlde disolución * 1.4134 \frac{gdeHNO_3}{mldeHNO_3} = 0.9894deHNO_3 \quad 37$$

Del resultado de la [Ec. 37] con la [Ec. 38] se obtiene la cantidad de materia contenida en 1mL de HNO<sub>3</sub> concentrado:

$$0.9894 \text{ g de HNO}_3 * \frac{1 \text{ mol de HNO}_3}{63.012 \text{ g de HNO}_3} = 0.0157 \text{ mol de HNO}_3 \quad \mathbf{38}$$

A partir de la relación de molaridad [Ec. 39] se despeja el volumen [Ec. 39.1]:

$$M = \frac{n}{V} \quad \mathbf{39}$$

$$V = \frac{n}{M} \quad \mathbf{39.1}$$

En [39.1] se sustituye n y M, lo que nos permite calcular el volumen necesario para obtener una solución 0.1 M a partir de una alícuota de 1 mL de HNO<sub>3</sub> al 70% [39.2].

$$V = \frac{0.0157 \text{ mol de HNO}_3}{0.1 \frac{\text{mol de HNO}_3}{L}} = 0.157L \quad \mathbf{39.2}$$

En los 157 mL de agua destilada se diluye la alícuota de 1 mL de HNO<sub>3</sub>, procurando homogeneizar constantemente con el agitador de vidrio; y una vez completado el proceso se procede a envasar y a etiquetar la disolución.

### **Disolución 0.05 M de KCl para recubrimiento de los alambres de plata**

Similar al caso anterior, se fijó un volumen de agua destilada de 150 mL, a partir de este dato se calculó la masa de KCl necesaria para una disolución 0.05 M [Ec. 40].

El KCl se pesó en la balanza analítica por medio de la nave de pesaje y se diluyeron en el agua destilada mediante agitación constante.

$$0.05 \frac{\text{moldeKCl}}{L} * 74.5513 \frac{\text{gdeKCl}}{\text{moldeKCl}} * 0.15L = 0.5591\text{gdeKCl} \quad 40$$

### **Disolución 3 M de KCl para el cuerpo del electrodo**

Para esta disolución se fijó un volumen de 10 mL, a partir de este dato se calculó la cantidad de KCl necesaria para una disolución de concentración 3M de KCl [Ec. 41]. El KCl se pesó en la balanza analítica por medio de la nave de pesaje y se diluyeron en el agua destilada mediante agitación constante.

$$3 \frac{\text{moldeKCl}}{L} * 74.5513 \frac{\text{gdeKCl}}{\text{moldeKCl}} * 0.01L = 2.2365\text{gdeKCl} \quad 41$$

### **Proceso de galvanoplastia y ensamble del electrodo**

Los pasos para el proceso de galvanoplastia se obtuvieron del “Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos del ecuador”, parte 11, del año 2012.

#### **1. Desengrase del material**

En un vaso de precipitados de 200 mL se colocan aproximadamente 100 mL de alcohol etílico. En el cual se procede a sumergir el alambre procurando que este quede completamente sumergido, el alambre debe permanecer sumergido por al menos 30 segundos.

Una vez concluido el paso anterior se debe evitar manipular el alambre sin guantes ya que la grasa de las manos podría contaminar la superficie del alambre. Lo anterior propiciaría la formación de clusters durante el proceso de galvanoplastia y en consecuencia un recubrimiento que se desprendería fácilmente. Los cluster en la superficie del recubrimiento también generan electrodos con una incertidumbre mayor a los 100 mV.

## **2. Lavado de desengrase**

Posterior al desengrase, se debe enjuagar el material con agua destilada, de modo que las impurezas que sean solubles en agua sean removidas junto con las trazas de alcohol.

## **3. Decapado**

El material se sumerge en la disolución ácida, de modo que la capa superficial de  $\text{Ag}_2\text{O}$  se disuelva y se prepare la superficie para realizar el proceso de galvanizado.

## **4. Lavado de decapado**

Terminado el proceso de decapado, el material se enjuaga con agua destilada para eliminar las trazas de  $\text{HNO}_3$  y neutralizar el pH de la superficie, de modo que esto no influya en formación de aglomeraciones (clusters) durante el proceso de galvanoplastia.

## **5. Preparación mecánica de la pieza**

Una vez terminada la etapa de decapado se debe pulir al alambre con la lija. Este proceso se lleva a cabo deslizando la lija desde la parte superior del alambre hasta la inferior, procurando lubricar constantemente con agua destilada. Este proceso se repite hasta que la superficie del alambre adquiera una tonalidad grisácea con cierto grado de brillo.

Por último, se debe verificar que las piezas entren sin problema en los viales. Si alguno de los alambres presenta curvaturas o dificultades para entrar en el vial, esta se debe enderezar hasta que ya no se encuentre dificultad para ingresarla. Con el paso anterior se asegura que la capa depositada en el proceso de galvanoplastia no sufra algún daño durante la etapa de montaje.

## 6. Electrólisis

Para realizar el proceso de galvanoplastia se requiere de 2 alambres, un cátodo en donde se va a depositar la capa de AgCl y un ánodo. El cual tiene la función de cerrar el circuito y fungir como electrodo de sacrificio. Ya que este cederá electrones y iones  $\text{Ag}^+$  para propiciar la formación de AgCl en el cátodo. Una vez que se han identificado a los alambres que fungirán como ánodo y cátodo estos se conectan a los caimanes del circuito de galvanoplastia (Fig. 43) y se procede a sumergirlos en la disolución 0.05 M de KCl.

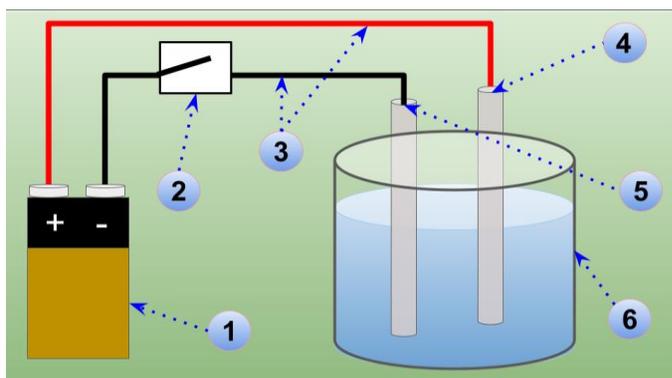


Figura 43 Diagrama del circuito de galvanoplastia, 1: pila de 9V, 2: interruptor, 3: cables con terminales de caimán, 4: cátodo (electrodo para recubrir), 5: ánodo (electrodo de sacrificio), 6: vaso de precipitados con la solución 0.05 M; elaboración propia.

Completado el paso anterior se conecta la batería de 9V al circuito y a dar inicio con el proceso de galvanoplastia. Cuando se opera a 9V la duración del proceso es de 1 minuto y de máximo 1.5 minutos.

Se considera que el proceso fue exitoso cuando se observa que se ha formado una capa uniforme de color blanco sobre la superficie del alambre.

## **7. Ensamble del electrodo**

En esta etapa se debe acoplar el tapón de goma al alambre y se debe llenar al capilar con 1 mL de la solución 3 M de KCl. Completados estos pasos se debe introducir al alambre dentro del capilar procurando no dañar el recubrimiento de AgCl. En el caso de que el recubrimiento se desprenda o se dañe durante el montaje se considera que el electrodo está dañado y por consiguiente se debe iniciar el proceso galvanoplastia nuevamente. Terminada la etapa de montaje se debe colocar al electrodo en un frasco ámbar con disolución 3 M en su interior dejándolo reposar por al menos 12 horas.

## **8. Calibración del electrodo**

Cuando han pasado 12 horas desde que se realizó la galvanoplastia se debe calibrar al electrodo, para esto se requiere de 30 mL de la solución 3 M de KCl, un electrodo de referencia de Ag-AgCl-3M y un multímetro. En este proceso ambos electrodos se colocan en un vaso de precipitados de 50 mL con los 30 mL de KCl 3 M, en esta etapa se debe asegurar que ninguno de los electrodos pueda dañarse o romperse. Una vez que se han asegurado los electrodos se debe conectar el electrodo de referencia a la terminal roja del multímetro y el segundo electrodo a la terminal negra. Al encender el multímetro se registrará la diferencia de potencial entre ambos electrodos.

En un caso ideal la diferencia entre ambos electrodos debería de ser de 0 mV. Sin embargo, se considera que el electrodo es confiable si la diferencia entre ambos electrodos oscila entre 1 y 0.1 mV. Otro aspecto que considerar es la estabilidad de las lecturas en el multímetro. Si estas presentan cambios abruptos o de una duración menor a 10 segundos se considera que el electrodo es inestable y puede que se deba a errores en el proceso de galvanizado o a problemas con la membrana del capilar.

## **9. Almacenamiento de los electrodos**

Para aminorar la evaporación del electrolito en los electrodos se debe colocar una capa fina de Parafilm alrededor del tapón de goma. Procurando evitar cubrir la parte

del alambre que tiene contacto con las terminales del multímetro. Adicionalmente la parte inferior del electrodo, en donde se encuentra la resina de intercambio, se sumerge en el frasco ámbar con 10 mL de la disolución 3M de KCl. Después se cubre la parte superior del tubo de ensayo con una capa fina de Parafilm para evitar la contaminación del electrolito.

## Anexo 2. Solución nutritiva (SN)

En este apartado se mencionan los reactivos y materiales usados para elaborar la SN que se usó a lo largo del experimento.

### Materiales

- Espátula
- Balanza analítica
- Nave de pesaje
- Probeta de 500 mL
- Contenedor de 1 L
- Vaso de precipitados de 500 mL
- Micropipeta
- Puntas para micropipeta
- Cinta adhesiva
- Matraz aforado de 1 L
- Piseta
- Toallas Sanitas
- Marcador indeleble
- Guantes de nitrilo
- Bata de laboratorio
- Goggles de seguridad
- Material de limpieza
- Jabón neutro
- Embudo

### Reactivos

- Sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ )
- Cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )
- Cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ )
- Cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ )
- Fosfato monoamónico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )
- Acetato de sodio ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ )
- Agua destilada

### Procedimiento

Antes de encender la balanza esta debe ser aseada meticulosamente mediante el uso de la brocha. Procurando no mover el plato y el traslado de partículas hacia la zona del mecanismo del equipo. Terminada la limpieza se debe verificar que esta se encuentre correctamente nivelada de modo que se garantice la correcta operación del equipo y no

se invalide la calibración de este. Verificados los puntos anteriores, se procede con el pesaje de los reactivos y se procede a disolverlos mediante agitación constante en el vaso de precipitados en 400 mL de agua. Terminado este proceso se verifica que no haya partículas en el fondo del recipiente y, si no hay sólidos en el medio, con el uso del embudo se traspasa la solución al matraz aforado. Una vez traspasada la disolución se lleva al punto de aforo en donde se homogeniza mediante agitación. Terminado el proceso anterior, la solución se traspasa al contenedor y en el caso de que se requiera un volumen mayor de disolución se debe aplicar la [Ec. 42]. Con esta ecuación planteamos la relación que existe entre una masa inicial (M1) disuelta en un volumen inicial (V1) y la masa necesaria (M2) para tener una concentración similar a un volumen diferente (V2).

$$\frac{M_1}{V_1} = \frac{M_2}{V_2}$$

42

En la Tabla 13 se menciona la cantidad de reactivo que se debe emplear:

**Tabla 13** Reactivos necesarios para preparar 1 L de SN

Compuesto	Cantidad (mg)
MgSO <sub>4</sub>	495
NH <sub>4</sub> Cl	141.3
KCl	38.13
CaCl <sub>2</sub>	1
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	26.22
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NaO <sub>2</sub>	128

## Anexo 3. ANOVA de la producción de voltaje en los HAAE

Debido a que cada celda cuenta con 90 datos de voltaje, para realizar el ANOVA de cada celda se tomaron 30 datos de manera aleatoria (Tabla 14). Para el tratamiento de los datos se planteó en la  $H_0$  [Ec. 43] que las medias de los voltajes entre celdas no presentaban una variación significativa.

$$H_0: \mu_{cc} = \mu_{CBa} = \mu_{CBaCa} = \mu_{CPOL} = \mu_{CPOLS} = \mu_{CPAS} = \mu_{CPASH} = \mu_{CGt} = \mu_{CGtS} \quad \mathbf{43}$$

Mientras que,  $H_a$  [Ec. 44] hizo mención de que existe una diferencia significativa entre las medias de voltaje de cada celda. En la Tabla 14 “n” es la muestra y “DE” es el día experimental.

$$H_a: \mu_{cc} \neq \mu_{CBa} \neq \mu_{CBaCa} \neq \mu_{CPOL} \neq \mu_{CPOLS} \neq \mu_{CPAS} \neq \mu_{CPASH} \neq \mu_{CGt} \neq \mu_{CGtS} \quad \mathbf{44}$$

**Tabla 14** Datos aleatorios para el ANOVA

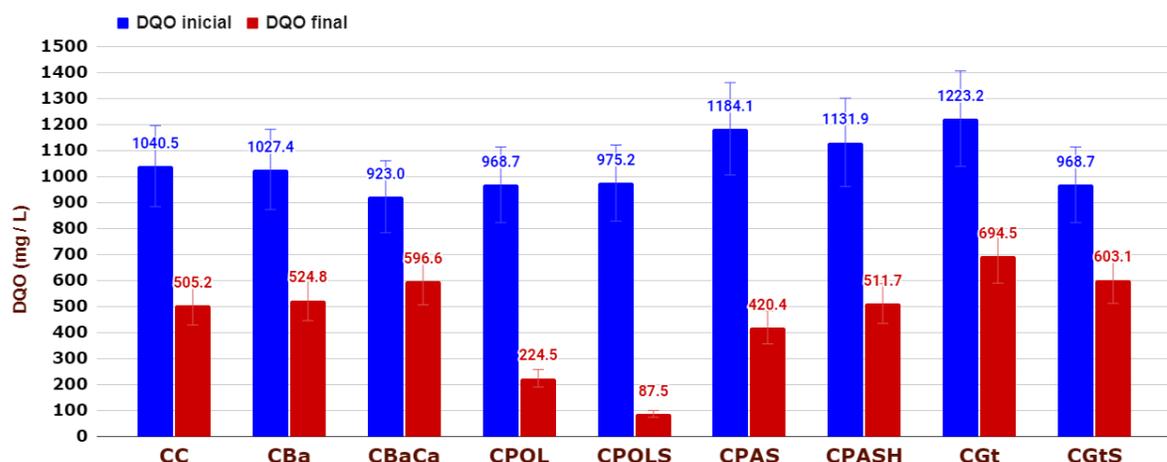
n	DE	CC	CBa	CBaCa	CPOL	CPOLS	CPAS	CPASH	CGt	CGtS
1	15	220.8	-1.8	41.4	82.7	311.3	69.5	264.3	39.5	81.0
2	16	135.1	5.8	49.4	75.0	341.2	85.2	374.1	33.3	167.2
3	18	89.1	-20.8	42.5	44.4	292.9	20.7	499.4	58.6	293.1
4	19	109.8	-18.4	-52.2	43.2	307.3	36.3	452.1	97.3	360.0
5	20	126.1	-31.1	59.8	37.0	235.0	36.3	378.4	-31.4	166.1
6	21	157.5	-24.0	83.3	51.2	269.5	7.1	306.9	26.7	239.0
7	22	130.3	-22.7	85.1	63.4	283.8	29.1	259.6	89.8	277.8
8	24	49.3	-28.4	78.6	79.7	292.9	23.9	199.8	76.8	8.4
9	25	70.9	-29.0	55.2	112.0	290.5	25.4	175.3	86.3	-57.5

10	26	69.5	-23.8	68.0	108.5	268.4	77.2	216.3	249.0	-45.0
11	27	55.5	-15.3	72.1	124.8	258.3	22.3	123.7	63.0	-23.6
12	28	63.5	-14.3	73.3	129.8	260.6	36.7	157.1	105.5	-5.8
13	32	9.8	-20.3	80.2	181.0	355.1	198.5	395.0	36.0	155.6
14	33	0.6	-15.0	105.3	168.5	351.2	258.1	447.0	88.2	156.0
15	34	113.3	-15.6	110.5	160.6	324.8	424.1	510.8	275.4	251.0
16	35	40.0	-32.1	27.1	120.9	408.5	492.0	414.0	471.3	488.9
17	36	147.2	-7.0	124.5	146.4	412.3	446.1	404.0	382.8	454.0
18	47	85.6	-14.8	31.2	270.3	523.0	469.3	330.6	388.4	417.6
19	50	101.7	67.1	78.9	493.9	486.1	427.9	408.2	317.7	415.6
20	51	121.4	67.2	89.9	457.7	496.9	413.3	399.0	303.9	327.2
21	52	115.2	32.1	81.5	452.1	486.9	383.5	463.6	267.7	387.7
22	53	88.2	1.6	-50.4	494.9	583.2	423.8	445.6	285.5	484.0
23	54	135.6	184.0	24.8	455.4	464.2	287.6	395.0	215.5	522.6
24	55	78.7	1.5	-57.2	451.3	609.0	357.4	467.3	261.1	416.7
25	57	152.5	47.2	15.8	394.8	464.0	232.4	286.0	432.7	440.9
26	58	202.2	56.5	27.5	366.1	478.6	203.7	219.8	203.9	260.4
27	59	150.3	46.6	37.9	272.5	505.8	222.5	258.8	211.8	267.6
28	60	192.6	30.8	26.4	282.1	383.5	218.7	252.4	191.6	224.9
29	61	210.0	38.0	32.6	277.6	454.0	222.4	240.8	212.8	235.8
30	62	205.0	68.0	23.7	301.1	527.0	239.6	217.1	212.5	179.4

El ANOVA se construyó con los datos de la Tabla 14 con un alfa de 0.05. Para su realización se empleó el programa *XLMiner Analysis Toolpak* de *frontline solvers* en la aplicación de *google sheets*. Con este programa se obtuvieron se obtuvieron la cantidad de observaciones para cada grupo (n), los promedios ( $\bar{X}_i$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ).

## Anexo 4. Estimación de la materia orgánica por medio de la demanda química de oxígeno (DQO)

En la Fig. 44 se muestra la DQO promedio que se registró para los HAAE. Tanto en los tanques de almacenamiento (TA) como en la superficie de los HAAE. Esta gráfica se construyó a partir de la medición de DQO en 72 muestras que se tomaron entre el día 70 y el día 90. Se tomaron ocho muestras por cada HAAE, es decir, se tomó una muestra del influente y una muestra del efluente de cada HAAE para cuatro días diferentes entre el día 70 y el día 90. Dado que el número de muestras tomadas para DQO es reducido, los resultados se muestran en esta sección de anexos.



**Figura 44** Perfiles de DQO en los TA y las CCMV entre el día 70 y 90 del experimento

La SN se preparó bajo las especificaciones mencionadas en el Anexo 2. Se realizó el análisis de la DQO en la SN antes de alimentarla a los TA ( $DQO_0$ ) y se identificaron valores promedio de 994.8 mg/L. Posteriormente, cuando se analizaron las muestras recolectadas en los TA ( $DQO_{inicial}$ ) estas presentaron valores promedio de 1049.2 mg/L.

Al comparar ambos valores se identificó que la  $DQO_{inicial}$  presentaba un aumento del 5.5% con respecto a la  $DQO_0$ . Se infiere que el incremento en la  $DQO_{inicial}$  se debía a la presencia de fragmentos de algas en los TA.

Los cuales fueron arrastrados al momento de tomar la muestra. A partir de estos resultados se concluye que el crecimiento de algas en los TA genera cambios significativos en la DQO. La DQO de las muestras que se recolectaron en las celdas al término del tiempo de residencia, se denominó como  $DQO_{final}$ .

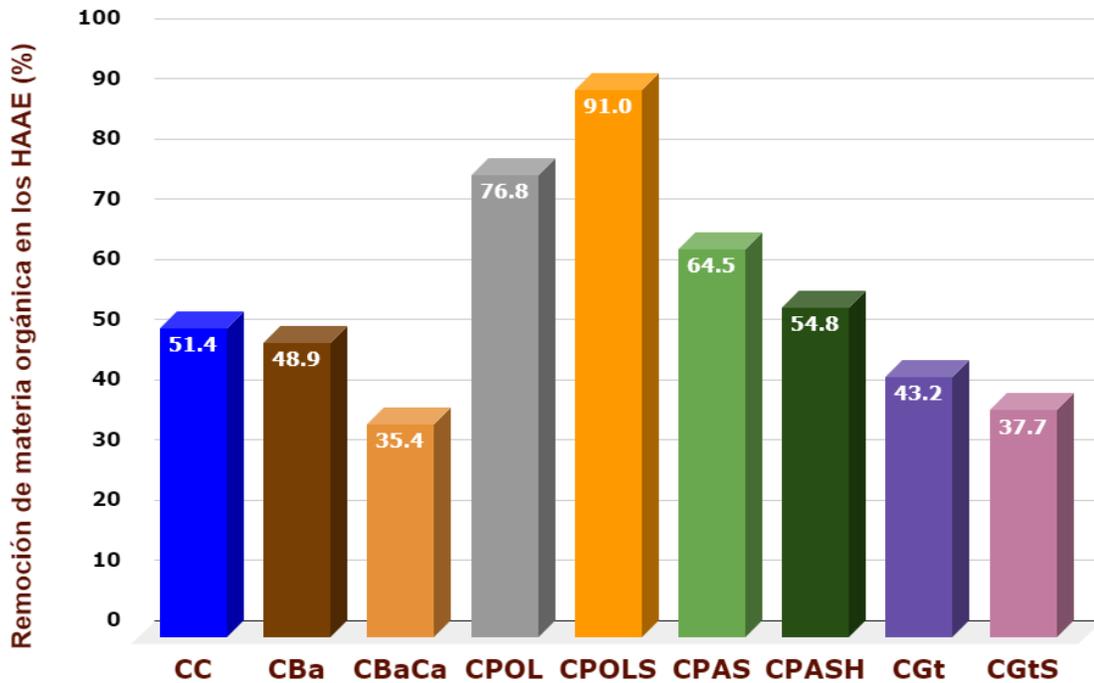
En la CC se presentó una  $DQO_{final}$  de 505.2 mg/L lo que representa una disminución del 51.4% con respecto a la  $DQO_{inicial}$ , este valor se fijó como el 100% de eficiencia (Fig. 45) para un HAAE que no incorpora un separador entre los electrodos y con un colector de electrones de malla de acero inoxidable.

Con base en los datos experimentales se observa que en CBa y CPASH la disminución de la DQO es similar a la observada en la CC. En la CBa la DQO disminuyó en un 48.9% (Fig. 45) y se infiere que en este sistema la mayor parte del consumo de materia orgánica se dio a una velocidad similar y, posiblemente, la mayor parte de la degradación se llevó a cabo en la rizosfera. Ya que como se ha mencionado en apartados anteriores, es probable que en la CBa las poblaciones de bacterias en la zona anódica ( $Z_a$ ) sean pobres y, por lo tanto, su influencia en la degradación de materia orgánica sea mínima. Por el contrario, en CBaCa se da una disminución del 35.4% (Fig. 45), se sugiere que esta disminución se debe a que la degradación de materia orgánica se pudo haber llevado a cabo en la rizosfera y una pequeña parte en la  $Z_a$ .

En la CPASH la DQO disminuyó en un 54.8% (Fig. 45), en este caso se infiere que el valor de la DQO pudo llegar a presentar valores anómalos debido a la presencia de larvas de mosquito. Cuyos desechos podrían haber llegado a incrementar la DQO de este sistema. Lo anterior se infiere debido a que en CPAS la disminución de la DQO fue de un 64.5% (Fig. 45) con la excepción de que en este sistema no se observó la presencia de larvas de mosquito. Por lo que es se encuentra como explicación que la presencia de las larvas en CPASH alterara los valores de DQO.

En CPOLS se registró una disminución del 91% (Fig. 45) y en CPOL una disminución del 76.8%.

Con estos resultados se respalda la teoría de que los materiales empleados como separador en estas celdas favorecen el desarrollo de poblaciones de bacterias en la  $Z_a$  lo que podría explicar el por qué en estas celdas se tiene una remoción tan alta de materia orgánica.



**Figura 45** Remoción de materia orgánica para cada una de los HAAE

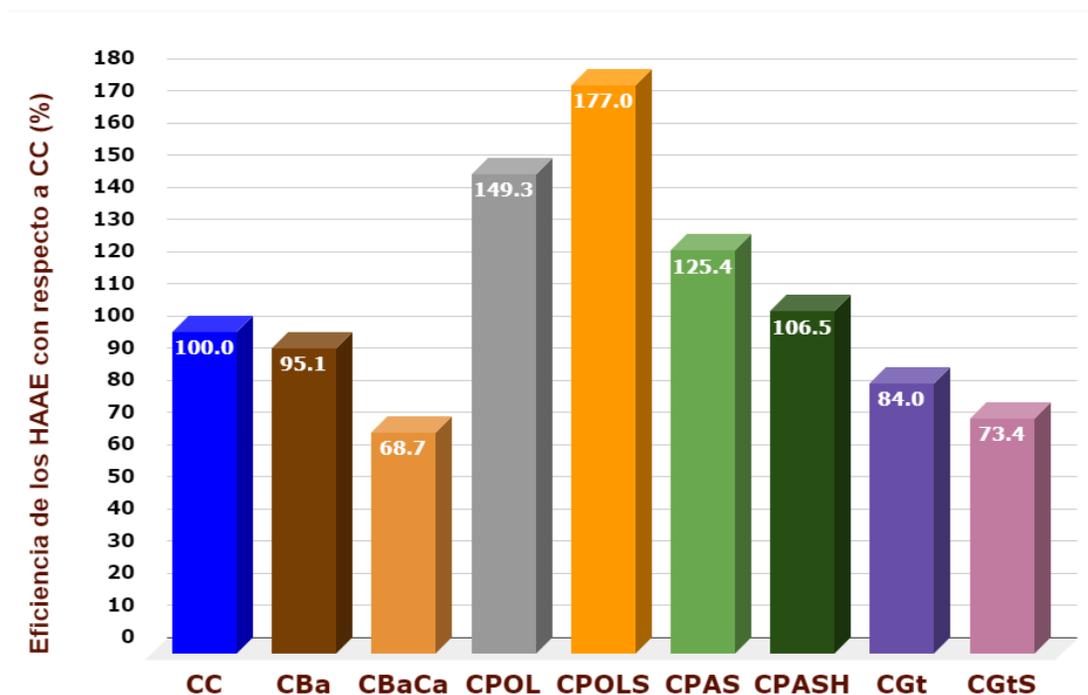
CGt presentó una disminución del 43.2%, mientras que, en CGtS del 37.7%. Se considera que en estas celdas hubo una aportación de materia orgánica por los restos de la grenetina que se observaron al pasar los días de la experimentación. Por último, en la Fig. 46 se comparó el desempeño e incrementos que presentaron los HAAE que incorporan un separador con respecto a la CC.

En este gráfico (Fig. 46) se observa que 4 celdas presentan un incremento en la eficiencia con respecto a CC, estas fueron CPOL con 49.3%, CPOLS con 77 %, CPAS con 25.4% y CPASH con 6.5%.

El incremento en la eficiencia de estas celdas se atribuye a que la degradación de materia orgánica se lleva a cabo tanto en la rizosfera como en la  $Z_a$  e incluso es factible inferir que estos materiales disminuyen la difusión del sustrato hacia la zona catódica ( $Z_c$ ).

Esto último podría haber ocurrido especialmente en las CPOL y CPOLS, observando que sus valores de potencial de cátodo permanecieron similares y con poca variabilidad (Figuras 49 y 50).

A su vez, también se respalda la idea de que en estos sistemas los separadores propician el crecimiento de poblaciones bacterianas anaerobias y que la remoción de materia orgánica podría estar relacionada con la producción de voltaje que se registró durante el experimento en estos sistemas.



**Figura 46** Desempeño de las CCMV con respecto a la CC

Por el contrario, las 4 celdas restantes presentan un desempeño inferior al registrado en las CC. Estas fueron CBa con 95.1%, CBaCa con 68.7%, CGt con 84% y CGtS con 73.3%. Lo anterior sugiere que los separadores implementados en estas celdas tienen un efecto negativo en la eficiencia de los sistemas.

Ya sea generando ambientes poco propicios para el crecimiento de bacterias electrogénicas como es el caso de CBa y CBaCa, o aumentando la cantidad de materia orgánica en el medio como consecuencia de la degradación del separador utilizado, como en el caso de CGt y CGtS.

## Anexo 5. Grueso de datos experimentales (Comportamiento de los parámetros medidos en los HAAE y curvas de polarización)

Esta sección muestra los datos experimentales que no se incluyeron en secciones anteriores debido a su volumen. Aquí se muestran gráficos adicionales y las tablas que contienen al grueso de los datos experimentales de cada HAAE.

### Comportamiento de los parámetros medidos en los HAAE

Los parámetros medidos en la CC se muestran en la Tabla 15, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 24 mostrada en el apartado 4.2.1.

**Tabla 15** Datos experimentales de la CC recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Cátodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3188	7.45	19.10	100.00	152.10	-	-67.90	-	-
2	55011	8.01	16.00	100.00	116.50	-	-103.50	-	-
3	28800	7.82	18.00	0.00	62.00	-	-158.00	-	-
4	39855	8.49	18.30	100.00	32.80	-	-187.20	-	-
5	39300	8.04	16.33	0.00	25.00	-	-195.00	-	-
6	39822	7.58	14.37	0.00	17.20	-	-202.80	-	-
7	38188	7.13	12.40	0.00	9.40	-	-210.60	-	-
8	40866	7.57	15.20	100.00	-33.30	-	-253.30	-	-
9	42044	7.18	15.40	0.00	-22.00	-	-242.00	-	-
10	23733	7.74	14.30	100.00	-93.00	-	-313.00	-	-

11	4111	7.68	13.60	100.00	-318.10	167.80	-538.10	-52.20	496.10
12	4700	7.50	14.40	0.00	-357.33	160.50	-577.33	-59.50	527.03
13	6507	7.33	15.20	0.00	-396.57	153.20	-616.57	-66.80	548.99
14	5877	7.15	16.00	100.00	-435.80	145.90	-655.80	-74.10	588.90
15	10122	7.50	18.70	100.00	-438.10	150.40	-658.10	-69.60	592.90
16	11366	7.59	15.60	100.00	-446.40	139.40	-666.40	-80.60	590.80
17	10966	7.67	15.90	100.00	-441.10	147.10	-661.10	-72.90	590.90
18	8244	7.23	15.50	100.00	-436.60	150.00	-656.60	-70.00	595.10
19	8962	7.14	15.47	0.00	-336.77	125.20	-556.77	-94.80	470.33
20	6134	7.06	15.43	0.00	-236.93	100.40	-456.93	-119.60	358.59
21	10400	6.97	15.40	200.00	-137.10	75.60	-357.10	-144.40	220.80
22	477	7.65	18.70	0.00	-61.10	73.00	-281.10	-147.00	135.10
23	1722	7.72	16.10	50.00	-24.40	81.40	-244.40	-138.60	103.50
24	9644	7.76	16.10	100.00	11.40	96.00	-208.60	-124.00	89.10
25	5155	8.20	13.70	150.00	4.10	117.30	-215.90	-102.70	109.80
26	4666	8.26	14.87	0.00	21.00	137.97	-199.00	-82.03	115.23
27	3539	8.32	16.03	0.00	37.90	158.63	-182.10	-61.37	129.32
28	3688	8.38	17.20	100.00	54.80	179.30	-165.20	-40.70	126.10
29	1285	7.60	19.30	100.00	64.20	216.60	-155.80	-3.40	157.50
30	18855	7.14	19.10	50.00	122.10	232.90	-97.90	12.90	130.30
31	11065	7.56	19.30	300.00	178.80	282.60	-41.20	62.60	94.40
32	6588	7.69	17.10	0.00	252.00	300.60	32.00	80.60	49.30
33	4914	7.66	18.53	0.00	252.07	307.07	32.07	87.07	56.50
34	9898	7.64	19.97	0.00	252.13	313.53	32.13	93.53	60.83
35	1566	7.61	21.40	0.00	252.20	320.00	32.20	100.00	70.90
36	19866	7.58	20.10	10.00	241.60	308.90	21.60	88.90	69.50
37	8711	7.55	17.20	200.00	256.30	306.00	36.30	86.00	55.50

38	11033	7.54	18.50	0.00	244.70	303.00	24.70	83.00	63.50
39	15966	7.92	16.60	100.00	262.00	309.80	42.00	89.80	49.20
40	15311	8.10	17.40	0.00	276.20	312.20	56.20	92.20	33.97
41	16759	8.27	18.20	0.00	290.40	314.60	70.40	94.60	18.73
42	14000	8.45	19.00	200.00	304.60	317.00	84.60	97.00	3.50
43	19655	7.76	19.40	100.00	291.70	315.10	71.70	95.10	22.10
44	4311	7.54	19.20	0.00	314.10	320.50	94.10	100.50	9.80
45	1166	7.57	19.30	100.00	323.80	329.00	103.80	109.00	0.60
46	16400	7.67	15.40	100.00	184.70	294.30	-35.30	74.30	113.30
47	12838	7.70	16.15	0.00	207.68	299.73	-12.33	79.73	94.98
48	9277	7.74	16.90	0.00	230.65	305.15	10.65	85.15	76.65
49	5716	7.77	17.65	0.00	253.63	310.58	33.63	90.58	58.33
50	2155	7.80	18.40	300.00	276.60	316.00	56.60	96.00	40.00
51	1733	7.70	19.30	50.00	158.60	295.00	-61.40	75.00	147.20
52	3688	8.16	18.60	50.00	168.60	295.70	-51.40	75.70	139.90
53	4197	8.46	18.70	100.00	203.78	300.40	-16.23	80.40	105.28
54	4705	8.76	18.80	0.00	238.95	305.10	18.95	85.10	70.65
55	6444	9.05	18.90	0.00	274.13	309.80	54.13	89.80	36.03
56	5722	9.35	19.00	600.00	309.30	314.50	89.30	94.50	1.40
57	9922	8.59	17.80	100.00	138.60	276.10	-81.40	56.10	142.40
58	10644	8.64	16.60	0.00	184.70	292.00	-35.30	72.00	111.70
59	13800	8.61	18.90	0.00	177.20	285.60	-42.80	65.60	124.30
60	6077	8.90	16.30	100.00	27.30	357.80	-192.70	137.80	311.50
61	6100	8.77	16.63	0.00	120.40	336.70	-99.60	116.70	244.00
62	6107	8.64	16.97	0.00	213.50	315.60	-6.50	95.60	176.50
63	6144	8.51	17.30	200.00	306.60	294.50	86.60	74.50	109.00
64	6122	8.56	16.10	100.00	237.50	312.60	17.50	92.60	80.90

65	3011	8.61	15.70	50.00	235.20	308.70	15.20	88.70	82.80
66	6755	8.54	16.40	0.00	237.20	311.80	17.20	91.80	81.40
67	10555	8.56	15.20	100.00	237.90	316.20	17.90	96.20	85.60
68	10003	8.41	16.77	0.00	267.13	313.73	47.13	93.73	60.83
69	10595	8.27	18.33	0.00	296.37	311.27	76.37	91.27	36.07
70	8900	8.12	19.90	200.00	325.60	308.80	105.60	88.80	11.30
71	11777	8.25	17.30	50.00	222.30	306.80	2.30	86.80	93.30
72	10500	8.03	18.30	50.00	213.70	303.90	-6.30	83.90	101.70
73	9133	8.05	20.20	0.00	188.10	300.40	-31.90	80.40	121.40
74	11733	7.85	17.90	100.00	200.90	306.70	-19.10	86.70	115.15
75	11003	7.89	17.80	0.00	226.67	305.33	6.67	85.33	106.17
76	9513	7.93	17.70	0.00	252.43	303.97	32.43	83.97	97.18
77	9544	7.97	17.60	200.00	278.20	302.60	58.20	82.60	88.20
78	6533	8.10	17.20	50.00	174.00	306.00	-46.00	86.00	135.60
79	7137	8.34	16.60	0.00	205.87	306.40	-14.13	86.40	116.63
80	5154	8.59	16.00	0.00	237.73	306.80	17.73	86.80	97.67
81	8344	8.83	15.40	200.00	269.60	307.20	49.60	87.20	78.70
82	1188	7.45	21.60	50.00	106.00	288.50	-114.00	68.50	193.60
83	2081	7.65	19.45	0.00	141.55	296.20	-78.45	76.20	173.05
84	4100	7.84	17.30	200.00	177.10	303.90	-42.90	83.90	152.50
85	3866	7.79	16.60	0.00	100.80	291.90	-119.20	71.90	202.20
86	5288	7.39	16.15	200.00	182.00	307.40	-38.00	87.40	150.30
87	1477	6.98	15.70	0.00	94.30	278.00	-125.70	58.00	192.60
88	1322	7.08	16.20	100.00	97.00	300.00	-123.00	80.00	210.00
89	6955	7.39	18.00	100.00	106.00	302.80	-114.00	82.80	205.00
90	8344	7.45	21.60	0.00	106.00	288.50	-114.00	68.50	193.60

Los parámetros medidos en la CBa se muestran en la Tabla 16, a partir de estos se elaboró la Fig. 47.

**Tabla 16** Datos experimentales de la CBa recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Cátodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3189	7.64	19.60	100.00	151.20	-	-68.80	-	-
2	55011	8.01	15.50	0.00	125.60	-	-94.40	-	-
3	28800	7.90	19.40	0.00	80.00	-	-140.00	-	-
4	39856	8.37	18.60	100.00	28.10	-	-191.90	-	-
5	39300	7.95	16.53	0.00	43.73	-	-176.27	-	-
6	39822	7.52	14.47	0.00	59.37	-	-160.63	-	-
7	38189	7.10	12.40	0.00	75.00	-	-145.00	-	-
8	40867	7.55	15.60	100.00	66.90	-	-153.10	-	-
9	42044	7.19	14.20	0.00	86.00	-	-134.00	-	-
10	23733	7.72	14.30	100.00	82.40	-	-137.60	-	-
11	4111	7.59	13.10	50.00	40.40	197.60	-179.60	-22.40	160.20
12	4700	7.45	14.17	0.00	18.83	188.57	-201.17	-31.43	171.97
13	6507	7.31	15.23	0.00	-2.73	179.53	-222.73	-40.47	194.08
14	5878	7.17	16.30	50.00	-24.30	170.50	-244.30	-49.50	195.50
15	10122	7.54	18.20	0.00	-56.50	175.50	-276.50	-44.50	238.30
16	11367	7.50	17.00	50.00	-45.00	157.00	-265.00	-63.00	206.30
17	10967	7.65	16.50	0.00	-50.50	166.50	-270.50	-53.50	219.70
18	8244	7.31	15.00	100.00	-15.30	152.80	-235.30	-67.20	166.10
19	8963	7.32	15.43	0.00	31.97	143.20	-188.03	-76.80	110.13

20	6135	7.34	15.87	0.00	79.23	133.60	-140.77	-86.40	75.36
21	10400	7.35	16.30	50.00	126.50	124.00	-93.50	-96.00	-1.80
22	478	7.59	18.10	0.00	119.50	128.40	-100.50	-91.60	5.80
23	1722	7.70	16.80	0.00	149.10	139.70	-70.90	-80.30	-4.20
24	9644	7.75	16.20	50.00	193.40	175.00	-26.60	-45.00	-20.80
25	5156	8.17	14.20	100.00	220.60	204.70	0.60	-15.30	-18.40
26	4667	8.19	15.20	0.00	246.60	226.13	26.60	6.13	-22.63
27	3540	8.20	16.20	0.00	272.60	247.57	52.60	27.57	-23.09
28	3689	8.22	17.20	50.00	298.60	269.00	78.60	49.00	-31.10
29	1286	7.69	18.80	0.00	301.30	277.60	81.30	57.60	-24.00
30	18856	7.33	19.00	50.00	298.70	277.00	78.70	57.00	-22.70
31	11066	7.51	17.80	0.00	323.10	242.30	103.10	22.30	-26.70
32	6589	7.71	18.10	100.00	322.00	290.00	102.00	70.00	-28.40
33	4915	7.70	18.97	0.00	325.70	294.70	105.70	74.70	-28.60
34	9899	7.68	19.83	0.00	329.40	299.40	109.40	79.40	-27.00
35	1567	7.67	20.70	100.00	333.10	304.10	113.10	84.10	-29.00
36	19867	7.85	20.20	50.00	337.00	315.00	117.00	95.00	-23.80
37	8711	7.78	17.20	50.00	334.30	319.00	114.30	99.00	-15.30
38	11033	7.71	18.60	50.00	336.30	323.50	116.30	103.50	-14.30
39	15967	7.89	16.00	100.00	346.40	330.10	126.40	110.10	-16.90
40	15311	7.94	16.90	0.00	343.00	325.00	123.00	105.00	-18.50
41	16759	8.00	17.80	0.00	339.60	319.90	119.60	99.90	-20.10
42	14000	8.05	18.70	100.00	336.20	314.80	116.20	94.80	-21.70
43	19656	7.87	18.00	0.00	328.40	320.70	108.40	100.70	-8.40
44	4311	7.78	18.70	50.00	338.20	318.80	118.20	98.80	-20.30
45	1167	7.76	19.40	100.00	337.90	322.00	117.90	102.00	-15.00
46	16400	7.90	15.40	100.00	345.50	330.00	125.50	110.00	-15.60

47	12839	7.89	15.95	0.00	345.13	325.00	125.13	105.00	-19.73
48	9278	7.89	16.50	0.00	344.75	320.00	124.75	100.00	-23.85
49	5717	7.88	17.05	0.00	344.38	315.00	124.38	95.00	-27.98
50	2156	7.87	17.60	200.00	344.00	310.00	124.00	90.00	-32.10
51	1733	8.13	18.50	100.00	318.00	312.20	98.00	92.20	-7.00
52	3689	8.36	18.10	50.00	331.50	320.90	111.50	100.90	-8.40
53	4197	8.42	18.35	100.00	328.88	315.80	108.88	95.80	-9.40
54	4706	8.48	18.60	0.00	326.25	310.70	106.25	90.70	-10.40
55	6444	8.54	18.85	0.00	323.63	305.60	103.63	85.60	-11.40
56	5722	8.60	19.10	200.00	321.00	300.50	101.00	80.50	-12.40
57	9922	8.45	18.20	200.00	285.10	302.40	65.10	82.40	21.60
58	10644	8.74	17.00	0.00	174.60	218.00	-45.40	-2.00	48.40
59	13800	8.70	18.40	0.00	281.80	294.10	61.80	74.10	21.90
60	6078	8.66	16.50	100.00	139.50	305.00	-80.50	85.00	170.90
61	6100	8.63	16.60	0.00	197.13	301.67	-22.87	81.67	107.47
62	6107	8.60	16.70	0.00	254.77	298.33	34.77	78.33	44.03
63	6144	8.57	16.80	100.00	312.40	295.00	92.40	75.00	-19.40
64	6122	8.70	16.50	100.00	290.30	282.40	70.30	62.40	-3.40
65	3011	8.87	15.60	200.00	318.20	280.50	98.20	60.50	-31.00
66	6756	8.97	16.20	0.00	257.20	233.30	37.20	13.30	-26.20
67	10556	8.82	15.00	100.00	290.90	278.50	70.90	58.50	-14.80
68	10004	8.72	16.50	0.00	291.73	283.17	71.73	63.17	-9.83
69	10595	8.63	18.00	0.00	292.57	287.83	72.57	67.83	-4.87
70	8900	8.53	19.50	200.00	293.40	292.50	73.40	72.50	0.10
71	11778	8.44	16.90	50.00	222.20	267.90	2.20	47.90	50.10
72	10500	8.38	18.30	50.00	218.30	280.30	-1.70	60.30	67.10
73	9133	8.32	20.30	0.00	198.00	260.50	-22.00	40.50	67.20

74	11733	8.22	17.80	100.00	205.30	278.10	-14.70	58.10	32.10
75	11004	8.21	17.90	0.00	236.27	283.87	16.27	63.87	21.93
76	9514	8.20	18.00	0.00	267.23	289.63	47.23	69.63	11.77
77	9544	8.19	18.10	200.00	298.20	295.40	78.20	75.40	1.60
78	6533	8.50	17.60	50.00	98.80	270.30	-121.20	50.30	184.00
79	7137	8.50	16.90	0.00	162.73	277.43	-57.27	57.43	123.17
80	5154	8.51	16.20	0.00	226.67	284.57	6.67	64.57	62.33
81	8344	8.51	15.50	200.00	290.60	291.70	70.60	71.70	1.50
82	1189	8.32	18.20	50.00	230.00	292.70	10.00	72.70	69.40
83	2082	8.34	17.45	0.00	247.70	299.35	27.70	79.35	58.30
84	4100	8.36	16.70	200.00	265.40	306.00	45.40	86.00	47.20
85	3867	8.23	16.10	0.00	228.30	274.70	8.30	54.70	56.50
86	5289	7.81	15.80	200.00	264.80	304.80	44.80	84.80	46.60
87	1478	7.39	15.50	0.00	269.00	291.80	49.00	71.80	30.80
88	1322	7.47	13.70	100.00	268.00	298.30	48.00	78.30	38.00
89	6956	7.82	16.00	100.00	236.60	298.30	16.60	78.30	68.00
90	8344	8.32	18.20	0.00	230.00	292.70	10.00	72.70	69.40

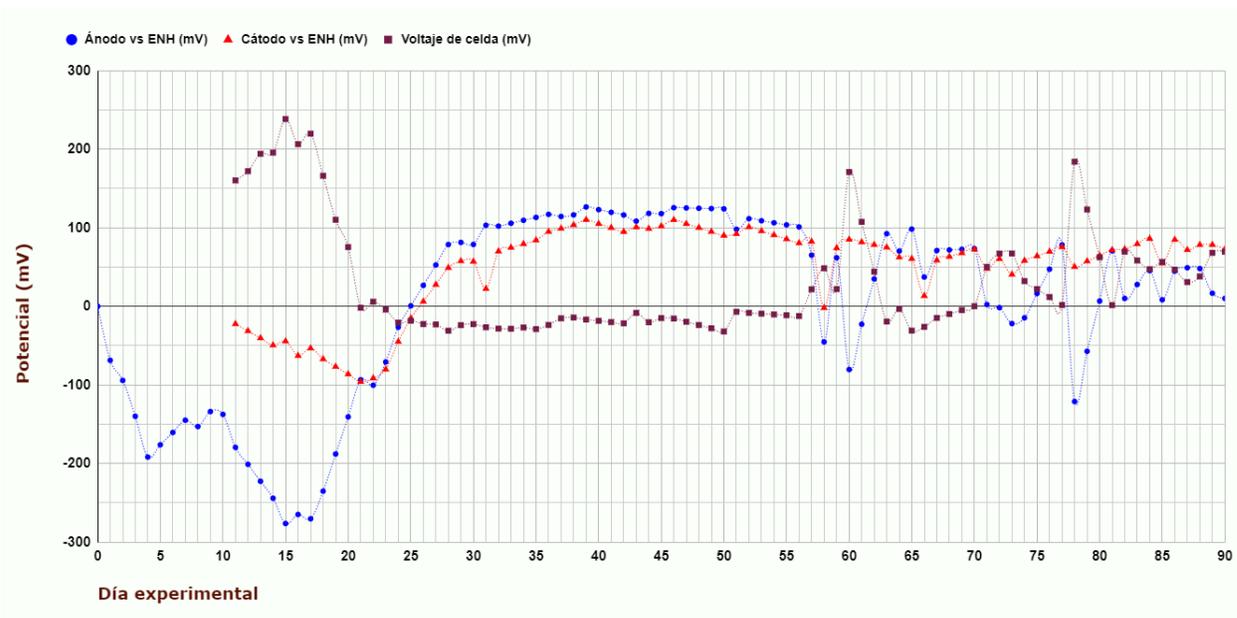


Figura 47 Evolución de CBa durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CBaCa se muestran en la Tabla 17, a partir estos datos se elaboró la Fig. 48.

**Tabla 17** Datos experimentales de la CBaCa recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Cátodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	0.00	-	-
1	3189	7.67	20.60	100.00	219.10	0.00	-0.90	-	-
2	55011	7.97	15.20	0.00	209.80	0.00	-10.20	-	-
3	28800	7.93	20.10	0.00	207.70	0.00	-12.30	-	-
4	39856	8.32	20.20	100.00	190.00	0.00	-30.00	-	-
5	39300	7.91	17.97	0.00	189.90	0.00	-30.10	-	-
6	39822	7.51	15.73	0.00	189.80	0.00	-30.20	-	-

7	38189	7.10	13.50	0.00	189.70	0.00	-30.30	-	-
8	40867	7.53	16.80	100.00	179.50	0.00	-40.50	-	-
9	42044	7.15	14.30	0.00	169.70	0.00	-50.30	-	-
10	23733	7.71	15.90	100.00	166.60	0.00	-53.40	-	-
11	4111	7.67	13.30	50.00	170.40	202.10	-49.60	-17.90	33.50
12	4700	7.51	14.27	0.00	156.93	191.73	-63.07	-28.27	36.53
13	6507	7.34	15.23	0.00	143.47	181.37	-76.53	-38.63	45.19
14	5878	7.18	16.20	50.00	130.00	171.00	-90.00	-49.00	42.60
15	10122	7.53	18.70	0.00	118.60	178.00	-101.40	-42.00	62.50
16	11367	7.52	16.10	50.00	96.30	167.10	-123.70	-52.90	66.30
17	10967	7.56	17.10	0.00	82.30	173.30	-137.70	-46.70	91.60
18	8244	7.30	15.10	100.00	72.40	164.10	-147.60	-55.90	90.50
19	8963	7.33	15.70	0.00	77.37	150.43	-142.63	-69.57	74.13
20	6135	7.37	16.30	0.00	82.33	136.77	-137.67	-83.23	65.89
21	10400	7.40	16.90	50.00	87.30	123.10	-132.70	-96.90	41.40
22	478	7.57	18.60	0.00	84.00	134.80	-136.00	-85.20	49.40
23	1722	7.65	17.40	0.00	84.90	135.00	-135.10	-85.00	47.70
24	9644	7.74	16.60	50.00	105.40	148.00	-114.60	-72.00	42.50
25	5156	8.13	14.90	100.00	111.00	112.30	-109.00	-107.70	-52.20
26	4667	8.09	15.93	0.00	126.50	146.87	-93.50	-73.13	-14.87
27	3540	8.06	16.97	0.00	142.00	181.43	-78.00	-38.57	17.86
28	3689	8.02	18.00	50.00	157.50	216.00	-62.50	-4.00	59.80
29	1286	7.79	19.40	0.00	160.30	245.00	-59.70	25.00	83.30
30	18856	7.41	19.40	50.00	170.00	254.00	-50.00	34.00	85.10
31	11066	7.58	18.20	0.00	182.10	272.50	-37.90	52.50	87.70
32	6589	7.83	18.80	100.00	192.10	265.60	-27.90	45.60	78.60
33	4915	7.78	19.53	0.00	201.83	268.30	-18.17	48.30	70.80

34	9899	7.74	20.27	0.00	211.57	271.00	-8.43	51.00	69.87
35	1567	7.69	21.00	100.00	221.30	273.70	1.30	53.70	55.20
36	19867	8.01	20.30	50.00	215.70	290.00	-4.30	70.00	68.00
37	8711	7.71	18.30	50.00	224.00	300.00	4.00	80.00	72.10
38	11033	7.81	18.70	20.00	225.10	301.10	5.10	81.10	73.30
39	15967	7.99	15.70	100.00	235.50	308.00	15.50	88.00	65.70
40	15311	8.03	16.73	0.00	229.07	301.00	9.07	81.00	69.40
41	16759	8.06	17.77	0.00	222.63	294.00	2.63	74.00	73.10
42	14000	8.10	18.80	50.00	216.20	287.00	-3.80	67.00	76.80
43	19656	7.95	19.00	0.00	294.80	184.30	74.80	-35.70	-110.10
44	4311	7.95	19.00	50.00	205.60	285.00	-14.40	65.00	80.20
45	1167	7.89	19.90	100.00	179.20	291.40	-40.80	71.40	105.30
46	16400	8.00	15.60	50.00	185.00	297.00	-35.00	77.00	110.50
47	12839	8.00	16.13	0.00	230.40	295.55	10.40	75.55	89.65
48	9278	8.00	16.65	0.00	275.80	294.10	55.80	74.10	68.80
49	5717	8.00	17.18	0.00	321.20	292.65	101.20	72.65	47.95
50	2156	8.00	17.70	200.00	366.60	291.20	146.60	71.20	27.10
51	1733	8.15	19.50	100.00	161.40	276.00	-58.60	56.00	124.50
52	3689	8.39	18.60	50.00	147.60	285.90	-72.40	65.90	139.70
53	4197	8.44	19.00	100.00	162.33	283.48	-57.68	63.48	123.85
54	4706	8.48	19.40	0.00	177.05	281.05	-42.95	61.05	108.00
55	6444	8.53	19.80	0.00	191.78	278.63	-28.23	58.63	92.15
56	5722	8.57	20.20	100.00	206.50	276.20	-13.50	56.20	76.30
57	9922	8.51	17.50	50.00	155.10	283.70	-64.90	63.70	134.10
58	10644	8.67	17.20	0.00	153.90	284.40	-66.10	64.40	138.70
59	13800	8.66	18.90	0.00	202.50	283.50	-17.50	63.50	82.50
60	6078	8.72	17.60	100.00	163.20	303.20	-56.80	83.20	148.20

61	6100	8.66	17.70	0.00	192.83	288.50	-27.17	68.50	102.90
62	6107	8.60	17.80	0.00	222.47	273.80	2.47	53.80	57.60
63	6144	8.54	17.90	100.00	252.10	259.10	32.10	39.10	12.30
64	6122	8.88	17.50	100.00	205.30	274.00	-14.70	54.00	66.70
65	3011	8.09	15.80	50.00	199.50	270.70	-20.50	50.70	76.50
66	6756	9.07	17.20	0.00	227.40	276.70	7.40	56.70	53.80
67	10556	8.93	15.30	200.00	259.10	294.50	39.10	74.50	31.20
68	10004	8.82	16.97	0.00	249.77	280.70	29.77	60.70	29.47
69	10595	8.70	18.63	0.00	240.43	266.90	20.43	46.90	27.73
70	8900	8.59	20.30	200.00	231.10	253.10	11.10	33.10	26.00
71	11778	8.57	18.10	50.00	171.10	245.50	-48.90	25.50	71.50
72	10500	8.57	18.90	50.00	154.00	236.50	-66.00	16.50	78.90
73	9133	8.47	21.10	0.00	155.10	244.50	-64.90	24.50	89.90
74	11733	8.47	18.90	100.00	161.00	242.60	-59.00	22.60	81.50
75	11004	8.50	18.87	0.00	195.77	234.80	-24.23	14.80	37.53
76	9514	8.52	18.83	0.00	230.53	227.00	10.53	7.00	-6.43
77	9544	8.55	18.80	200.00	265.30	219.20	45.30	-0.80	-50.40
78	6533	8.52	19.00	50.00	198.40	228.10	-21.60	8.10	24.80
79	7137	8.11	17.90	0.00	220.30	221.63	0.30	1.63	-2.53
80	5154	7.69	16.80	0.00	242.20	215.17	22.20	-4.83	-29.87
81	8344	7.28	15.70	200.00	264.10	208.70	44.10	-11.30	-57.20
82	1189	8.41	18.50	50.00	161.10	199.20	-58.90	-20.80	33.80
83	2082	8.44	17.80	0.00	175.25	200.70	-44.75	-19.30	24.80
84	4100	8.47	17.10	200.00	189.40	202.20	-30.60	-17.80	15.80
85	3867	8.51	16.90	0.00	164.80	187.50	-55.20	-32.50	27.50
86	5289	8.09	16.65	200.00	192.80	231.00	-27.20	11.00	37.90
87	1478	7.66	16.40	0.00	191.50	222.00	-28.50	2.00	26.40

88	1322	7.75	13.80	100.00	164.50	202.40	-55.50	-17.60	32.60
89	6956	8.07	15.20	100.00	138.50	152.60	-81.50	-67.40	23.70
90	8344	8.41	18.50	0.00	161.10	199.20	-58.90	-20.80	33.80

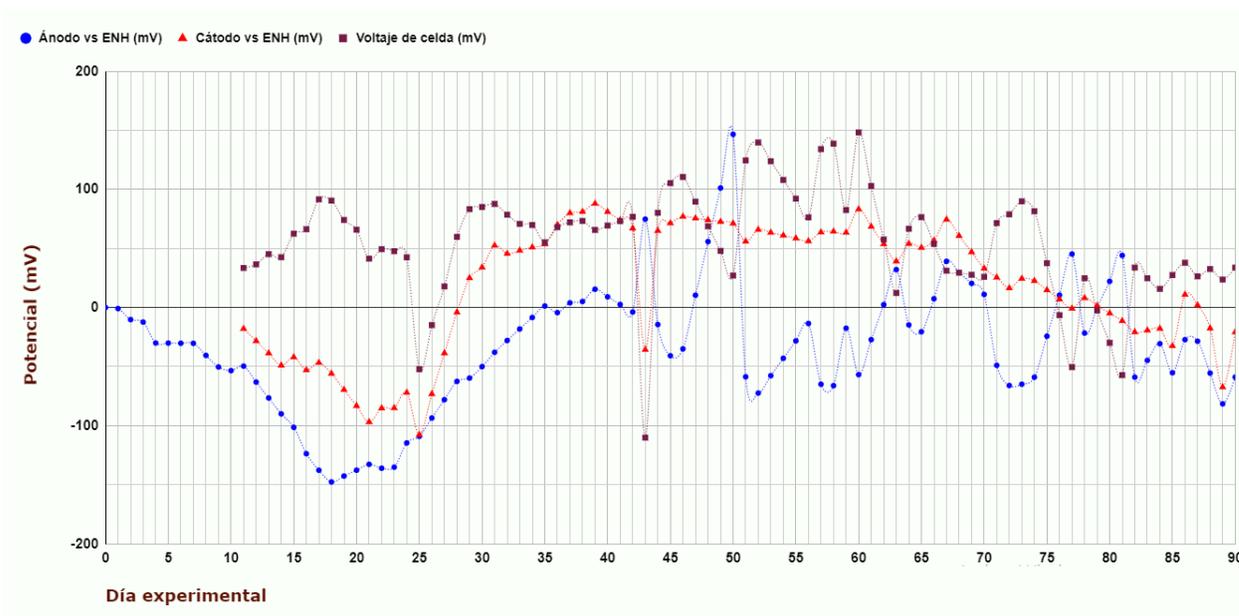


Figura 48 Evolución de CBaCa durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CPOL se muestran en la Tabla 18, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 49.

**Tabla 18** Datos experimentales de la CPOL recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Cátodo vs Ag-AgCl-3M (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	0.00	-	-
1	3189	7.74	19.50	100.00	182.30	-	-37.70	-	-
2	55011	7.91	14.70	0.00	167.00	-	-53.00	-	-
3	28800	7.96	19.40	0.00	152.00	-	-68.00	-	-

4	39856	8.28	18.80	100.00	98.60	-	-121.40	-	-
5	39300	7.90	16.83	0.00	88.97	-	-131.03	-	-
6	39822	7.52	14.87	0.00	79.33	-	-140.67	-	-
7	38189	7.14	12.90	0.00	69.70	-	-150.30	-	-
8	40867	7.50	16.30	100.00	54.60	-	-165.40	-	-
9	42044	7.19	14.00	0.00	48.00	-	-172.00	-	-
10	23733	7.65	15.60	100.00	34.50	-	-185.50	-	-
11	4111	7.50	13.10	100.00	12.60	198.20	-207.40	-21.80	184.20
12	4700	7.42	14.10	0.00	-35.83	182.77	-255.83	-37.23	218.83
13	6507	7.33	15.10	0.00	-84.27	167.33	-304.27	-52.67	266.86
14	5878	7.25	16.10	100.00	-132.70	151.90	-352.70	-68.10	288.10
15	10122	7.55	18.50	0.00	-195.60	164.30	-415.60	-55.70	362.90
16	11367	7.52	15.80	0.00	-225.50	152.00	-445.50	-68.00	382.90
17	10967	7.61	17.00	0.00	-239.40	148.00	-459.40	-72.00	390.40
18	8244	7.34	15.00	100.00	-219.80	148.40	-439.80	-71.60	371.70
19	8963	7.37	15.47	0.00	-138.90	133.43	-358.90	-86.57	275.37
20	6135	7.39	15.93	0.00	-58.00	118.47	-278.00	-101.53	208.58
21	10400	7.42	16.40	0.00	22.90	103.50	-197.10	-116.50	82.70
22	478	7.57	18.70	0.00	35.50	112.70	-184.50	-107.30	75.00
23	1722	7.69	17.70	0.00	54.80	111.80	-165.20	-108.20	58.00
24	9644	7.71	16.40	50.00	78.30	123.80	-141.70	-96.20	44.40
25	5156	8.04	15.10	50.00	81.80	125.90	-138.20	-94.10	43.20
26	4667	8.03	16.07	0.00	83.93	125.77	-136.07	-94.23	41.13
27	3540	8.01	17.03	0.00	86.07	125.63	-133.93	-94.37	44.49
28	3689	8.00	18.00	20.00	88.20	125.50	-131.80	-94.50	37.00
29	1286	7.89	19.40	0.00	73.10	114.00	-146.90	-106.00	51.20
30	18856	7.55	19.30	50.00	60.10	123.40	-159.90	-96.60	63.40

31	11066	7.65	18.30	0.00	73.20	131.70	-146.80	-88.30	56.30
32	6589	7.80	19.00	100.00	67.20	140.00	-152.80	-80.00	79.70
33	4915	7.75	19.77	0.00	72.83	150.90	-147.17	-69.10	90.47
34	9899	7.71	20.53	0.00	78.47	161.80	-141.53	-58.20	96.48
35	1567	7.66	21.30	100.00	84.10	172.70	-135.90	-47.30	112.00
36	19867	8.07	19.70	100.00	87.00	193.00	-133.00	-27.00	108.50
37	8711	7.89	18.10	50.00	84.10	208.00	-135.90	-12.00	124.80
38	11033	7.71	18.60	50.00	106.30	236.00	-113.70	16.00	129.80
39	15967	7.95	16.00	50.00	158.10	251.30	-61.90	31.30	91.20
40	15311	7.96	16.93	0.00	148.40	251.20	-71.60	31.20	102.10
41	16759	7.97	17.87	0.00	138.70	251.10	-81.30	31.10	113.00
42	14000	7.98	18.80	100.00	129.00	251.00	-91.00	31.00	123.90
43	19656	8.03	18.10	50.00	90.10	246.00	-129.90	26.00	156.60
44	4311	8.13	18.40	50.00	60.70	243.80	-159.30	23.80	181.00
45	1167	7.92	18.40	50.00	79.00	249.10	-141.00	29.10	168.50
46	16400	8.05	15.20	100.00	96.00	257.60	-124.00	37.60	160.60
47	12839	8.05	15.85	0.00	109.45	259.45	-110.55	39.45	150.68
48	9278	8.06	16.50	0.00	122.90	261.30	-97.10	41.30	140.75
49	5717	8.06	17.15	0.00	136.35	263.15	-83.65	43.15	130.83
50	2156	8.06	17.80	200.00	149.80	265.00	-70.20	45.00	120.90
51	1733	8.15	19.40	50.00	118.40	262.00	-101.60	42.00	146.40
52	3689	8.42	18.60	0.00	117.60	266.00	-102.40	46.00	151.40
53	4197	8.52	18.83	100.00	104.75	263.40	-115.25	43.40	162.80
54	4706	8.62	19.05	0.00	91.90	260.80	-128.10	40.80	174.20
55	6444	8.72	19.28	0.00	79.05	258.20	-140.95	38.20	185.60
56	5722	8.82	19.50	200.00	66.20	255.60	-153.80	35.60	197.00
57	9922	8.73	17.10	50.00	6.80	248.00	-213.20	28.00	247.80

58	10644	8.71	16.80	0.00	-3.90	247.80	-223.90	27.80	260.40
59	13800	8.70	18.60	0.00	-70.00	247.70	-290.00	27.70	322.60
60	6078	8.72	16.80	100.00	-315.80	284.60	-535.80	64.60	608.30
61	6100	8.74	17.00	0.00	-249.03	267.40	-469.03	47.40	524.37
62	6107	8.76	17.20	0.00	-182.27	250.20	-402.27	30.20	440.43
63	6144	8.78	17.40	100.00	-115.50	233.00	-335.50	13.00	356.50
64	6122	8.77	17.20	100.00	-113.70	232.00	-333.70	12.00	350.60
65	3011	8.97	15.90	50.00	-58.10	239.50	-278.10	19.50	304.80
66	6756	8.91	17.00	0.00	70.70	265.10	-149.30	45.10	196.90
67	10556	8.80	15.20	200.00	-13.70	259.00	-233.70	39.00	270.30
68	10004	8.77	16.67	0.00	-72.43	251.00	-292.43	31.00	324.17
69	10595	8.74	18.13	0.00	-131.17	243.00	-351.17	23.00	378.03
70	8900	8.71	19.60	200.00	-189.90	235.00	-409.90	15.00	431.90
71	11778	8.45	17.90	50.00	-233.30	210.90	-453.30	-9.10	458.70
72	10500	8.48	18.30	50.00	-260.50	231.80	-480.50	11.80	493.90
73	9133	8.31	20.80	0.00	-217.40	231.20	-437.40	11.20	457.70
74	11733	8.22	18.40	100.00	-217.20	230.20	-437.20	10.20	452.10
75	11004	8.29	18.33	0.00	-237.03	224.67	-457.03	4.67	466.37
76	9514	8.37	18.27	0.00	-256.87	219.13	-476.87	-0.87	480.63
77	9544	8.44	18.20	200.00	-276.70	213.60	-496.70	-6.40	494.90
78	6533	8.45	18.10	50.00	-270.10	171.30	-490.10	-48.70	455.40
79	7137	8.46	17.17	0.00	-268.93	176.10	-488.93	-43.90	454.03
80	5154	8.46	16.23	0.00	-267.77	180.90	-487.77	-39.10	452.67
81	8344	8.47	15.30	200.00	-266.60	185.70	-486.60	-34.30	451.30
82	1189	8.36	18.00	50.00	-224.00	107.20	-444.00	-112.80	344.60
83	2082	8.36	17.60	0.00	-191.50	169.00	-411.50	-51.00	369.70
84	4100	8.36	17.20	200.00	-159.00	230.80	-379.00	10.80	394.80

85	3867	8.57	16.90	0.00	-121.00	238.70	-341.00	18.70	366.10
86	5289	8.23	16.45	200.00	-129.40	239.50	-349.40	19.50	272.50
87	1478	7.89	16.00	0.00	-36.40	240.60	-256.40	20.60	282.10
88	1322	8.10	14.60	100.00	-15.00	257.10	-235.00	37.10	277.60
89	6956	8.11	15.80	100.00	-163.20	122.20	-383.20	-97.80	301.10
90	8344	8.36	18.00	0.00	-224.00	107.20	-444.00	-112.80	344.60

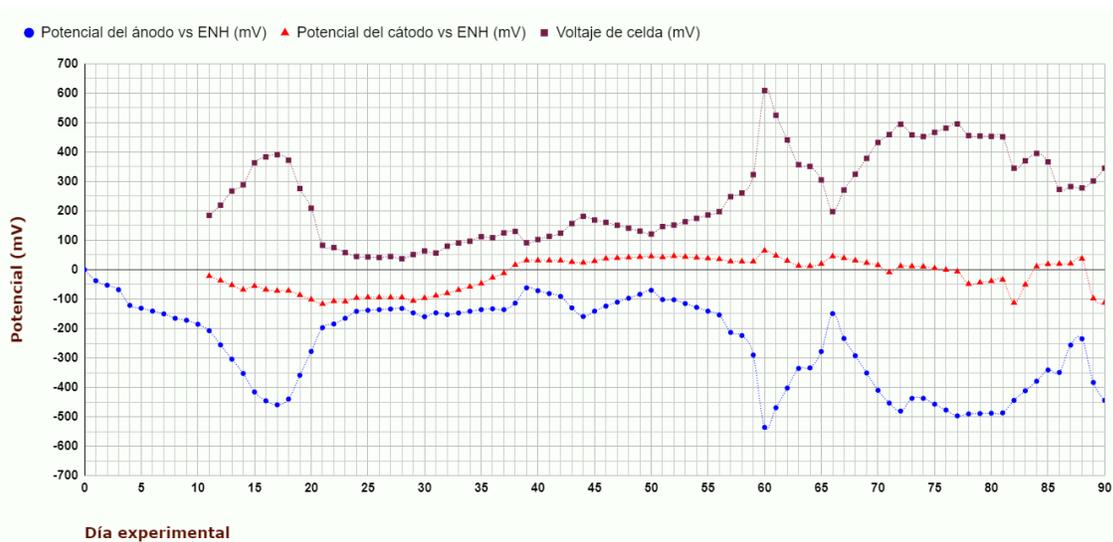


Figura 49 Evolución de la CPOL durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CPOLS se muestran en la Tabla 19, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 50.

**Tabla 19** Datos experimentales de la CPOLS recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	Ánodo vs ER (mV)	Cátodo vs ER (mV)	Voltaje de celda (mV)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	-	-	-	500.00	-	-	-

1	3189	219.60	-	-	7.83	19.70	100.00	-0.40	-	-
2	55011	188.90	-	-	8.02	16.20	0.00	-31.10	-	-
3	28800	173.20	-	-	7.96	19.20	0.00	-46.80	-	-
4	39856	105.40	-	-	8.45	17.60	0.00	-114.60	-	-
5	39300	81.40	-	-	8.04	16.20	0.00	-138.60	-	-
6	39822	57.40	-	-	7.63	14.80	0.00	-162.60	-	-
7	38189	33.40	-	-	7.22	13.40	0.00	-186.60	-	-
8	40867	-6.20	-	-	7.55	16.20	100.00	-226.20	-	-
9	42044	-64.20	-	-	7.17	15.50	0.00	-284.20	-	-
10	23733	-254.80	-	-	7.61	15.50	100.00	-474.80	-	-
11	4111	-372.70	218.10	599.50	7.46	13.10	50.00	-592.70	-1.90	599.50
12	4700	-398.47	192.50	597.73	7.36	13.93	0.00	-618.47	-27.50	597.73
13	6507	-424.23	166.90	586.49	7.27	14.77	0.00	-644.23	-53.10	586.49
14	5878	-450.00	141.30	594.20	7.17	15.60	100.00	-670.00	-78.70	594.20
15	10122	-453.80	107.20	564.00	7.48	18.50	0.00	-673.80	-112.80	564.00
16	11367	-451.40	106.00	558.00	7.61	16.00	0.00	-671.40	-114.00	558.00
17	10967	-453.80	110.00	563.10	7.53	17.40	0.00	-673.80	-110.00	563.10
18	8244	-444.60	145.00	591.10	7.21	15.00	100.00	-664.60	-75.00	591.10
19	8963	-371.43	123.13	497.83	7.24	15.33	0.00	-591.43	-96.87	497.83
20	6135	-298.27	101.27	445.62	7.26	15.67	0.00	-518.27	-118.73	445.62
21	10400	-225.10	79.40	311.30	7.29	16.00	0.00	-445.10	-140.60	311.30
22	478	-253.00	84.00	341.20	7.53	18.70	0.00	-473.00	-136.00	341.20
23	1722	-214.50	80.00	295.20	7.50	16.80	0.00	-434.50	-140.00	295.20
24	9644	-190.50	89.20	292.90	7.53	16.00	20.00	-410.50	-130.80	292.90
25	5156	-197.20	98.50	307.30	7.80	14.10	50.00	-417.20	-121.50	307.30
26	4667	-191.93	84.33	283.20	7.81	15.27	0.00	-411.93	-135.67	283.20
27	3540	-186.67	70.17	278.63	7.82	16.43	0.00	-406.67	-149.83	278.63
28	3689	-181.40	56.00	235.00	7.83	17.60	0.00	-401.40	-164.00	235.00
29	1286	-213.50	64.60	269.50	7.62	19.30	0.00	-433.50	-155.40	269.50

30	18856	-213.40	70.00	283.80	7.35	18.90	0.00	-433.40	-150.00	283.80
31	11066	-183.30	71.60	276.00	7.84	18.20	0.00	-403.30	-148.40	276.00
32	6589	-186.40	96.10	292.90	7.64	19.20	100.00	-406.40	-123.90	292.90
33	4915	-182.27	99.07	292.10	7.64	19.77	0.00	-402.27	-120.93	292.10
34	9899	-178.13	102.03	284.20	7.64	20.33	0.00	-398.13	-117.97	284.20
35	1567	-174.00	105.00	290.50	7.64	20.90	100.00	-394.00	-115.00	290.50
36	19867	-154.30	100.60	268.40	7.84	20.00	50.00	-374.30	-119.40	268.40
37	8711	-151.00	92.20	258.30	7.75	17.60	50.00	-371.00	-127.80	258.30
38	11033	-146.10	102.30	260.60	7.88	17.70	50.00	-366.10	-117.70	260.60
39	15967	-111.40	118.40	240.30	7.81	15.00	50.00	-331.40	-101.60	240.30
40	15311	-136.40	139.03	281.43	7.87	16.17	0.00	-356.40	-80.97	281.43
41	16759	-161.40	159.67	322.57	7.92	17.33	0.00	-381.40	-60.33	322.57
42	14000	-186.40	180.30	363.70	7.98	18.50	100.00	-406.40	-39.70	363.70
43	19656	-155.30	173.10	333.30	7.95	18.60	50.00	-375.30	-46.90	333.30
44	4311	-148.10	207.10	355.10	8.08	18.80	50.00	-368.10	-12.90	355.10
45	1167	-124.00	227.00	351.20	7.93	18.60	50.00	-344.00	7.00	351.20
46	16400	-86.10	232.00	324.80	7.94	15.50	100.00	-306.10	12.00	324.80
47	12839	-102.25	237.00	345.73	7.92	15.90	0.00	-322.25	17.00	345.73
48	9278	-118.40	242.00	366.65	7.91	16.30	0.00	-338.40	22.00	366.65
49	5717	-134.55	247.00	387.58	7.89	16.70	0.00	-354.55	27.00	387.58
50	2156	-150.70	252.00	408.50	7.87	17.10	100.00	-370.70	32.00	408.50
51	1733	-162.40	239.90	412.30	8.15	19.00	50.00	-382.40	19.90	412.30
52	3689	-135.00	243.00	388.60	8.23	18.20	0.00	-355.00	23.00	388.60
53	4197	-177.75	244.00	432.85	8.21	18.58	100.00	-397.75	24.00	432.85
54	4706	-220.50	245.00	477.10	8.19	18.95	0.00	-440.50	25.00	477.10
55	6444	-263.25	246.00	521.35	8.16	19.33	0.00	-483.25	26.00	521.35
56	5722	-306.00	247.00	565.60	8.14	19.70	100.00	-526.00	27.00	565.60
57	9922	-272.70	242.20	528.00	8.15	17.10	50.00	-492.70	22.20	528.00
58	10644	-203.30	248.00	465.50	8.22	17.00	0.00	-423.30	28.00	465.50

59	13800	-292.20	253.30	553.60	8.34	17.80	0.00	-512.20	33.30	553.60
60	6078	-394.90	318.00	714.00	8.37	16.60	100.00	-614.90	98.00	714.00
61	6100	-367.40	295.13	666.10	8.41	16.67	0.00	-587.40	75.13	666.10
62	6107	-339.90	272.27	618.20	8.44	16.73	0.00	-559.90	52.27	618.20
63	6144	-312.40	249.40	570.30	8.48	16.80	100.00	-532.40	29.40	570.30
64	6122	-259.40	253.40	524.50	8.60	17.30	100.00	-479.40	33.40	524.50
65	3011	-203.10	258.10	472.00	8.65	15.90	50.00	-423.10	38.10	472.00
66	6756	-210.20	252.70	475.40	8.88	16.70	0.00	-430.20	32.70	475.40
67	10556	-254.60	250.10	523.00	8.26	14.90	100.00	-474.60	30.10	523.00
68	10004	-265.00	251.43	533.13	8.22	16.17	0.00	-485.00	31.43	533.13
69	10595	-275.40	252.77	543.27	8.19	17.43	0.00	-495.40	32.77	543.27
70	8900	-285.80	254.10	553.40	8.15	18.70	200.00	-505.80	34.10	553.40
71	11778	-248.50	251.80	510.90	7.82	17.80	50.00	-468.50	31.80	510.90
72	10500	-220.30	255.20	486.10	8.03	18.80	50.00	-440.30	35.20	486.10
73	9133	-221.80	259.70	496.90	8.04	20.50	0.00	-441.80	39.70	496.90
74	11733	-214.40	263.80	486.90	7.82	18.30	100.00	-434.40	43.80	486.90
75	11004	-247.83	261.63	519.00	7.89	18.27	0.00	-467.83	41.63	519.00
76	9514	-281.27	259.47	551.10	7.97	18.23	0.00	-501.27	39.47	551.10
77	9544	-314.70	257.30	583.20	8.04	18.20	200.00	-534.70	37.30	583.20
78	6533	-188.40	264.60	464.20	8.11	18.30	50.00	-408.40	44.60	464.20
79	7137	-238.97	262.80	512.47	8.08	17.47	0.00	-458.97	42.80	512.47
80	5154	-289.53	261.00	560.73	8.06	16.63	0.00	-509.53	41.00	560.73
81	8344	-340.10	259.20	609.00	8.03	15.80	200.00	-560.10	39.20	609.00
82	1189	-264.70	244.00	520.80	7.85	17.10	50.00	-484.70	24.00	520.80
83	2082	-224.75	254.40	492.40	7.88	16.90	0.00	-444.75	34.40	492.40
84	4100	-184.80	264.80	464.00	7.91	16.70	200.00	-404.80	44.80	464.00
85	3867	-200.20	263.90	478.60	8.20	16.70	0.00	-420.20	43.90	478.60
86	5289	-230.90	260.80	505.80	8.25	16.35	200.00	-450.90	40.80	505.80
87	1478	-209.80	160.00	383.50	8.30	16.00	0.00	-429.80	-60.00	383.50

88	1322	-226.30	212.10	454.00	8.29	14.50	100.00	-446.30	-7.90	454.00
89	6956	-255.80	261.20	527.00	8.19	16.20	100.00	-475.80	41.20	527.00
90	8344	-264.70	244.00	520.80	7.85	17.10	0.00	-484.70	24.00	520.80

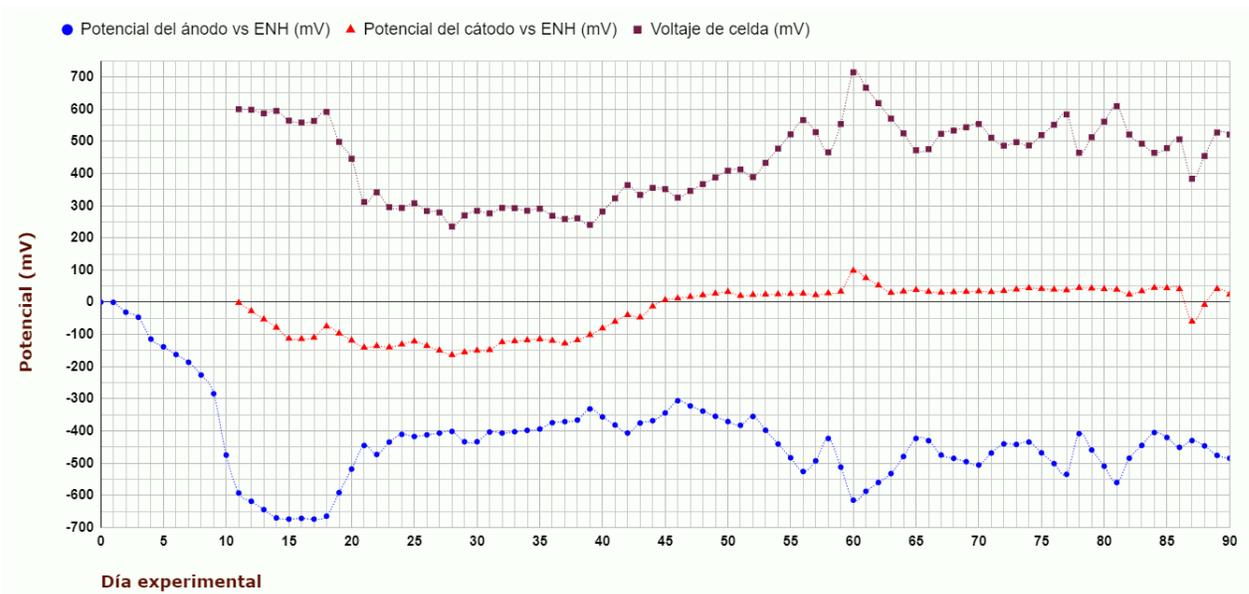


Figura 50 Evolución de la CPOLS durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CPAS se muestran en la Tabla 20, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 51.

**Tabla 20** Datos experimentales de la CPAS recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (Im)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs ER (mV)	Cátodo vs ER (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3189	7.97	19.10	300.00	163.70	-	-56.30	-	-
2	55011	8.11	15.20	0.00	140.10	-	-79.90	-	-
3	28800	8.14	19.10	0.00	51.10	-	-168.90	-	-
4	39856	8.47	17.50	0.00	-45.50	-	-265.50	-	-

5	39300	8.08	15.90	0.00	-125.07	-	-345.07	-	-
6	39822	7.69	14.30	0.00	-204.63	-	-424.63	-	-
7	38189	7.30	12.70	0.00	-284.20	-	-504.20	-	-
8	40867	7.31	14.30	0.00	-305.70	-	-525.70	-	-
9	42044	7.33	14.10	0.00	-319.40	-	-539.40	-	-
10	23733	6.99	14.70	100.00	-350.70	-	-570.70	-	-
11	4111	7.46	13.10	0.00	-358.40	154.30	-578.40	-65.70	510.80
12	4700	7.34	14.10	0.00	-370.27	113.23	-590.27	-106.77	481.43
13	6507	7.23	15.10	0.00	-382.13	72.17	-602.13	-147.83	423.39
14	5878	7.11	16.10	100.00	-394.00	31.10	-614.00	-188.90	422.70
15	10122	7.84	18.40	0.00	-393.60	-14.10	-613.60	-234.10	307.30
16	11367	7.84	16.00	0.00	-390.20	-70.00	-610.20	-290.00	313.50
17	10967	7.71	17.00	0.00	-387.00	-108.20	-607.00	-328.20	249.40
18	8244	7.74	15.10	50.00	-383.90	-110.20	-603.90	-330.20	208.60
19	8963	7.73	15.53	0.00	-380.90	-145.33	-600.90	-365.33	162.23
20	6135	7.71	15.97	0.00	-377.90	-180.47	-597.90	-400.47	136.56
21	10400	7.70	16.40	0.00	-374.90	-215.60	-594.90	-435.60	69.50
22	478	7.45	18.60	0.00	-361.60	-119.60	-581.60	-339.60	85.20
23	1722	7.65	17.00	0.00	-352.00	-29.50	-572.00	-249.50	86.60
24	9644	7.65	16.10	0.00	-366.50	-206.80	-586.50	-426.80	20.70
25	5156	7.99	14.00	100.00	-396.10	-106.70	-616.10	-326.70	36.30
26	4667	7.88	15.27	0.00	-400.67	-93.97	-620.67	-313.97	36.30
27	3540	7.77	16.53	0.00	-405.23	-81.23	-625.23	-301.23	26.57
28	3689	7.66	17.80	50.00	-409.80	-68.50	-629.80	-288.50	36.30
29	1286	7.79	19.20	0.00	-423.30	-164.10	-643.30	-384.10	7.10
30	18856	7.46	19.20	20.00	-435.90	-77.30	-655.90	-297.30	29.10
31	11066	7.89	18.00	0.00	-431.80	-338.70	-651.80	-558.70	19.70
32	6589	8.04	18.60	50.00	-444.00	-194.00	-664.00	-414.00	23.90
33	4915	8.02	19.33	0.00	-448.40	-174.40	-668.40	-394.40	24.40

34	9899	8.00	20.07	0.00	-452.80	-154.80	-672.80	-374.80	42.00
35	1567	7.98	20.80	0.00	-457.20	-135.20	-677.20	-355.20	25.40
36	19867	8.05	20.60	100.00	-445.90	-89.00	-665.90	-309.00	77.20
37	8711	8.13	18.30	0.00	-452.60	-270.00	-672.60	-490.00	22.30
38	11033	8.16	18.10	20.00	-464.50	-164.00	-684.50	-384.00	36.70
39	15967	8.18	15.60	100.00	-464.00	-285.70	-684.00	-505.70	39.80
40	15311	8.20	16.73	0.00	-468.83	-221.57	-688.83	-441.57	62.70
41	16759	8.23	17.87	0.00	-473.67	-157.43	-693.67	-377.43	85.60
42	14000	8.25	19.00	50.00	-478.50	-93.30	-698.50	-313.30	108.50
43	19656	8.19	18.40	0.00	-484.60	-328.50	-704.60	-548.50	64.60
44	4311	8.24	18.70	0.00	-468.60	-136.20	-688.60	-356.20	198.50
45	1167	8.17	18.80	0.00	-453.00	-30.20	-673.00	-250.20	258.10
46	16400	8.38	15.20	50.00	-451.40	28.00	-671.40	-192.00	424.10
47	12839	8.34	15.78	0.00	-455.35	30.65	-675.35	-189.35	441.08
48	9278	8.30	16.35	0.00	-459.30	33.30	-679.30	-186.70	458.05
49	5717	8.26	16.93	0.00	-463.25	35.95	-683.25	-184.05	475.03
50	2156	8.22	17.50	100.00	-467.20	38.60	-687.20	-181.40	492.00
51	1733	8.27	19.00	0.00	-467.20	6.70	-687.20	-213.30	446.10
52	3689	8.37	18.00	0.00	-473.30	28.40	-693.30	-191.60	466.00
53	4197	8.40	18.40	100.00	-473.15	31.25	-693.15	-188.75	474.08
54	4706	8.43	18.80	0.00	-473.00	34.10	-693.00	-185.90	482.15
55	6444	8.45	19.20	0.00	-472.85	36.95	-692.85	-183.05	490.23
56	5722	8.48	19.60	100.00	-472.70	39.80	-692.70	-180.20	498.30
57	9922	8.60	16.60	100.00	-476.50	39.00	-696.50	-181.00	485.00
58	10644	8.55	16.40	0.00	-466.80	-7.70	-686.80	-227.70	445.50
59	13800	8.49	18.20	0.00	-463.90	11.70	-683.90	-208.30	461.60
60	6078	8.72	16.70	200.00	-507.60	71.60	-727.60	-148.40	568.60
61	6100	8.72	16.90	0.00	-485.90	66.33	-705.90	-153.67	537.97
62	6107	8.71	17.10	0.00	-464.20	61.07	-684.20	-158.93	507.33

63	6144	8.71	17.30	100.00	-442.50	55.80	-662.50	-164.20	476.70
64	6122	8.96	17.90	0.00	-446.40	4.80	-666.40	-215.20	444.70
65	3011	8.76	15.50	50.00	-443.70	19.00	-663.70	-201.00	459.90
66	6756	8.70	17.00	0.00	-438.40	21.00	-658.40	-199.00	453.10
67	10556	8.47	15.60	100.00	-440.40	35.60	-660.40	-184.40	469.30
68	10004	8.26	16.90	0.00	-435.77	33.10	-655.77	-186.90	462.33
69	10595	8.06	18.20	0.00	-431.13	30.60	-651.13	-189.40	455.37
70	8900	7.85	19.50	200.00	-426.50	28.10	-646.50	-191.90	448.40
71	11778	7.86	17.70	50.00	-439.30	-52.90	-659.30	-272.90	389.40
72	10500	7.75	18.90	50.00	-429.80	2.60	-649.80	-217.40	427.90
73	9133	7.68	20.30	0.00	-399.30	16.30	-619.30	-203.70	413.30
74	11733	7.76	18.80	100.00	-360.40	24.70	-580.40	-195.30	383.50
75	11004	7.84	18.70	0.00	-366.00	32.03	-586.00	-187.97	396.93
76	9514	7.93	18.60	0.00	-371.60	39.37	-591.60	-180.63	410.37
77	9544	8.01	18.50	200.00	-377.20	46.70	-597.20	-173.30	423.80
78	6533	8.28	18.50	50.00	-245.70	44.70	-465.70	-175.30	287.60
79	7137	8.24	17.67	0.00	-259.67	51.00	-479.67	-169.00	310.87
80	5154	8.19	16.83	0.00	-273.63	57.30	-493.63	-162.70	334.13
81	8344	8.15	16.00	200.00	-287.60	63.60	-507.60	-156.40	357.40
82	1189	8.34	18.00	50.00	-215.70	-32.10	-435.70	-252.10	186.70
83	2082	8.22	17.60	0.00	-206.65	2.00	-426.65	-218.00	209.55
84	4100	8.10	17.20	200.00	-197.60	36.10	-417.60	-183.90	232.40
85	3867	8.35	16.80	0.00	-216.00	-11.70	-436.00	-231.70	203.70
86	5289	8.30	16.70	200.00	-192.00	31.60	-412.00	-188.40	222.50
87	1478	8.24	16.60	0.00	-180.40	35.50	-400.40	-184.50	218.70
88	1322	8.60	14.80	100.00	-162.10	69.00	-382.10	-151.00	222.40
89	6956	8.65	16.30	100.00	-162.40	74.00	-382.40	-146.00	239.60
90	8344	8.34	18.00	0.00	-215.70	-32.10	-435.70	-252.10	186.70

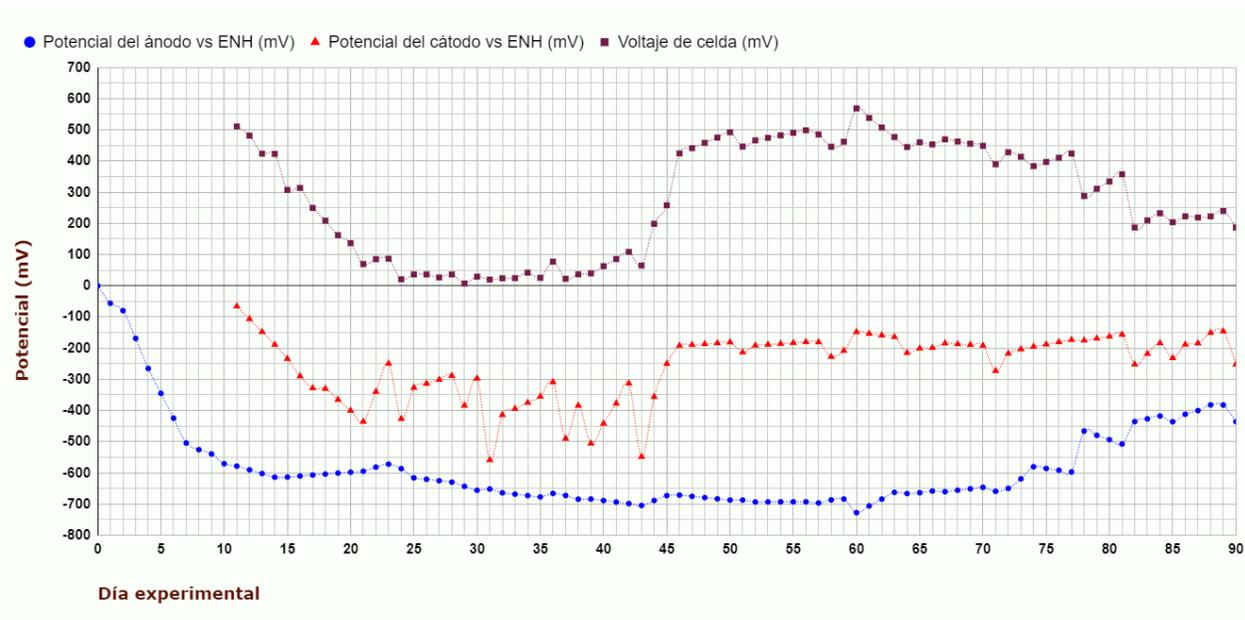


Figura 51 Evolución de la CPAS durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CPASH se muestran en la Tabla 21, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 52.

**Tabla 21** Datos experimentales de la CPASH recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs ER (mV)	Cátodo vs ER (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3189	7.84	19.20	100.00	218.80	-	-1.20	-	-
2	55011	7.94	16.50	0.00	140.80	-	-79.20	-	-
3	28800	8.29	17.70	0.00	73.60	-	-146.40	-	-
4	39856	8.29	18.10	0.00	-50.00	-	-270.00	-	-
5	39300	7.92	16.73	0.00	-158.73	-	-378.73	-	-
6	39822	7.55	15.37	0.00	-267.47	-	-487.47	-	-
7	38189	7.18	14.00	0.00	-376.20	-	-596.20	-	-

8	40867	7.21	15.60	100.00	-419.80	-	-639.80	-	-
9	42044	7.07	14.30	0.00	-417.70	-	-637.70	-	-
10	23733	7.38	15.90	100.00	-422.00	-	-642.00	-	-
11	4111	7.15	12.90	100.00	-411.20	178.30	-631.20	-41.70	590.80
12	4700	7.17	14.07	0.00	-422.37	96.27	-642.37	-123.73	521.03
13	6507	7.20	15.23	0.00	-433.53	14.23	-653.53	-205.77	440.02
14	5878	7.22	16.40	100.00	-444.70	-67.80	-664.70	-287.80	381.50
15	10122	7.53	17.80	0.00	-443.30	-178.20	-663.30	-398.20	278.00
16	11367	7.28	15.70	0.00	-451.00	-229.80	-671.00	-449.80	121.00
17	10967	7.43	18.00	0.00	-454.30	-236.60	-674.30	-456.60	240.00
18	8244	7.39	15.60	100.00	-451.50	-40.00	-671.50	-260.00	405.50
19	8963	7.51	15.97	0.00	-450.17	-79.63	-670.17	-299.63	358.43
20	6135	7.62	16.33	0.00	-448.83	-119.27	-668.83	-339.27	363.66
21	10400	7.74	16.70	0.00	-447.50	-158.90	-667.50	-378.90	264.30
22	478	7.50	18.50	0.00	-437.30	-63.80	-657.30	-283.80	374.10
23	1722	7.56	17.00	0.00	-450.60	-29.30	-670.60	-249.30	445.00
24	9644	7.65	16.10	0.00	-442.70	45.20	-662.70	-174.80	499.40
25	5156	7.87	14.40	100.00	-442.50	-30.00	-662.50	-250.00	452.10
26	4667	7.91	15.87	0.00	-440.10	-48.00	-660.10	-268.00	427.53
27	3540	7.96	17.33	0.00	-437.70	-66.00	-657.70	-286.00	387.32
28	3689	8.00	18.80	0.00	-435.30	-84.00	-655.30	-304.00	378.40
29	1286	7.65	19.30	0.00	-440.60	-116.50	-660.60	-336.50	306.90
30	18856	7.82	19.90	30.00	-435.10	3.40	-655.10	-216.60	259.60
31	11066	7.83	18.20	0.00	-431.80	-206.10	-651.80	-426.10	217.20
32	6589	8.01	18.70	100.00	-428.70	-181.10	-648.70	-401.10	199.80
33	4915	8.06	19.47	0.00	-429.07	-127.83	-649.07	-347.83	191.63
34	9899	8.12	20.23	0.00	-429.43	-74.57	-649.43	-294.57	199.86
35	1567	8.17	21.00	0.00	-429.80	-21.30	-649.80	-241.30	175.30
36	19867	8.20	20.10	20.00	-421.60	-63.00	-641.60	-283.00	216.30

37	8711	8.22	19.00	0.00	-429.30	-231.00	-649.30	-451.00	123.70
38	11033	8.20	18.50	50.00	-428.60	-214.00	-648.60	-434.00	157.10
39	15967	8.32	15.90	50.00	-434.00	-157.70	-654.00	-377.70	175.50
40	15311	8.31	16.97	0.00	-442.37	-220.17	-662.37	-440.17	55.57
41	16759	8.29	18.03	0.00	-450.73	-282.63	-670.73	-502.63	-64.37
42	14000	8.28	19.10	50.00	-459.10	-345.10	-679.10	-565.10	-184.30
43	19656	8.28	19.10	0.00	-470.90	-87.10	-690.90	-307.10	219.60
44	4311	8.38	19.30	0.00	-474.10	-84.20	-694.10	-304.20	395.00
45	1167	8.35	19.10	0.00	-476.10	-89.10	-696.10	-309.10	447.00
46	16400	8.45	16.20	100.00	-471.30	36.00	-691.30	-184.00	510.80
47	12839	8.41	16.63	0.00	-472.28	11.58	-692.28	-208.43	486.60
48	9278	8.38	17.05	0.00	-473.25	-12.85	-693.25	-232.85	462.40
49	5717	8.34	17.48	0.00	-474.23	-37.28	-694.23	-257.28	438.20
50	2156	8.30	17.90	100.00	-475.20	-61.70	-695.20	-281.70	414.00
51	1733	8.28	19.50	0.00	-477.80	-76.60	-697.80	-296.60	404.00
52	3689	8.50	18.70	0.00	-469.80	16.00	-689.80	-204.00	490.60
53	4197	8.46	19.30	100.00	-468.88	1.90	-688.88	-218.10	474.60
54	4706	8.42	19.90	0.00	-467.95	-12.20	-687.95	-232.20	458.60
55	6444	8.38	20.50	0.00	-467.03	-26.30	-687.03	-246.30	442.60
56	5722	8.34	21.10	100.00	-466.10	-40.40	-686.10	-260.40	426.60
57	9922	8.67	17.50	100.00	-461.00	-10.80	-681.00	-230.80	455.00
58	10644	8.40	17.80	0.00	-456.10	-8.40	-676.10	-228.40	449.90
59	13800	8.59	19.30	0.00	-453.30	-10.40	-673.30	-230.40	464.50
60	6078	8.68	17.60	100.00	-497.40	75.70	-717.40	-144.30	575.30
61	6100	8.68	17.67	0.00	-471.63	62.20	-691.63	-157.80	535.77
62	6107	8.67	17.73	0.00	-445.87	48.70	-665.87	-171.30	496.23
63	6144	8.67	17.80	100.00	-420.10	35.20	-640.10	-184.80	456.70
64	6122	8.75	18.10	0.00	-496.10	37.00	-716.10	-183.00	399.10
65	3011	8.81	16.10	50.00	-321.60	43.90	-541.60	-176.10	369.60

66	6756	8.90	17.30	0.00	-270.10	50.00	-490.10	-170.00	320.10
67	10556	8.71	15.80	300.00	-277.70	54.30	-497.70	-165.70	330.60
68	10004	8.39	17.57	0.00	-322.90	37.10	-542.90	-182.90	357.00
69	10595	8.08	19.33	0.00	-368.10	19.90	-588.10	-200.10	383.40
70	8900	7.76	21.10	200.00	-413.30	2.70	-633.30	-217.30	409.80
71	11778	7.78	19.00	50.00	-443.60	7.40	-663.60	-212.60	417.00
72	10500	7.90	19.90	50.00	-448.30	18.10	-668.30	-201.90	408.20
73	9133	7.79	21.70	0.00	-451.90	5.60	-671.90	-214.40	399.00
74	11733	7.81	20.10	100.00	-458.20	25.80	-678.20	-194.20	463.60
75	11004	7.85	19.93	0.00	-458.27	18.73	-678.27	-201.27	457.60
76	9514	7.90	19.77	0.00	-458.33	11.67	-678.33	-208.33	451.60
77	9544	7.94	19.60	200.00	-458.40	4.60	-678.40	-215.40	445.60
78	6533	7.93	18.80	50.00	-451.40	21.00	-671.40	-199.00	395.00
79	7137	7.92	18.00	0.00	-452.90	30.83	-672.90	-189.17	419.10
80	5154	7.91	17.20	0.00	-454.40	40.67	-674.40	-179.33	443.20
81	8344	7.90	16.40	200.00	-455.90	50.50	-675.90	-169.50	467.30
82	1189	8.05	18.50	50.00	-326.00	7.80	-546.00	-212.20	326.90
83	2082	8.05	18.20	0.00	-294.85	16.60	-514.85	-203.40	306.45
84	4100	8.04	17.90	200.00	-263.70	25.40	-483.70	-194.60	286.00
85	3867	8.00	17.80	0.00	-237.60	-16.60	-457.60	-236.60	219.80
86	5289	8.13	17.55	200.00	-234.50	26.10	-454.50	-193.90	258.80
87	1478	8.25	17.30	0.00	-228.80	23.90	-448.80	-196.10	252.40
88	1322	8.18	15.30	100.00	-216.20	26.00	-436.20	-194.00	240.80
89	6956	8.09	16.90	100.00	-240.90	-17.20	-460.90	-237.20	217.10
90	8344	8.05	18.50	0.00	-326.00	7.80	-546.00	-212.20	326.90

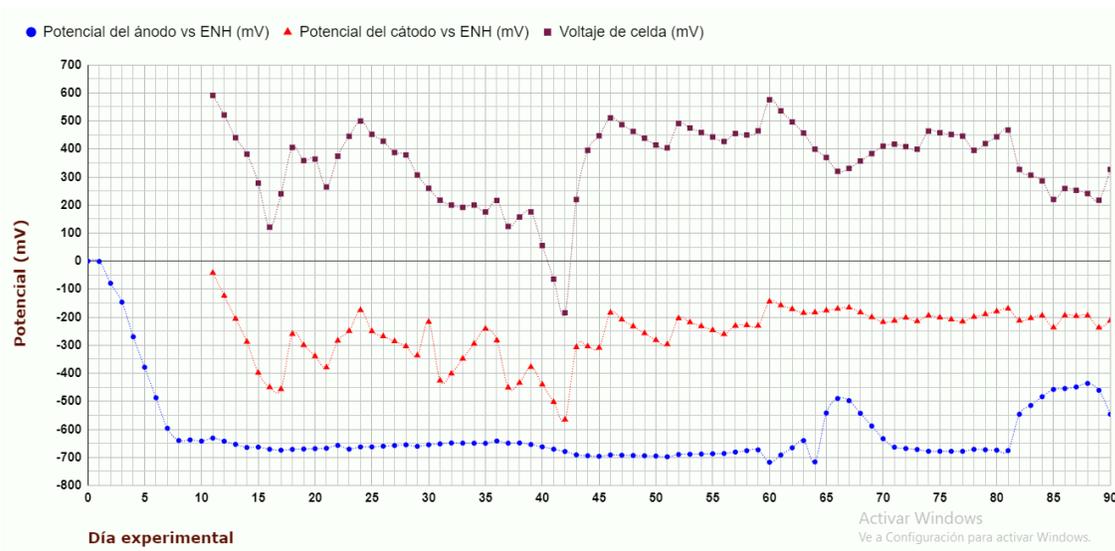


Figura 52 Evolución de la CPASH durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CGt se muestran en la Tabla 22, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 53.

**Tabla 22** Datos experimentales de la CGt recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (lm)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs ER (mV)	Cátodo vs ER (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3189	7.91	18.70	100.00	177.80	-	-22.20	-	-
2	55011	8.07	16.40	0.00	109.00	-	-91.00	-	-
3	28800	8.19	17.70	0.00	5.50	-	-194.50	-	-
4	39856	8.30	17.40	100.00	-108.80	-	-308.80	-	-
5	39300	7.91	16.14	0.00	-169.73	-	-369.73	-	-
6	39822	7.51	14.89	0.00	-230.67	-	-430.67	-	-
7	38189	7.12	13.63	0.00	-291.60	-	-491.60	-	-
8	40867	7.04	13.70	0.00	-291.30	-	-491.30	-	-
9	42044	6.89	12.70	0.00	-298.60	-	-498.60	-	-

10	23733	7.40	15.10	0.00	-305.90	-	-505.90	-	-
11	4111	6.85	12.20	50.00	-78.30	-52.10	-278.30	-272.10	25.10
12	4700	6.86	13.30	0.00	-89.60	-62.70	-289.60	-282.70	24.73
13	6507	6.87	14.40	0.00	-100.90	-73.30	-300.90	-293.30	27.59
14	5878	6.88	15.50	50.00	-112.20	-83.90	-312.20	-303.90	24.00
15	10122	7.13	18.20	0.00	-158.50	-123.50	-358.50	-343.50	33.30
16	11367	7.28	15.70	0.00	-222.80	-75.90	-422.80	-295.90	121.00
17	10967	6.78	15.10	0.00	-202.00	-77.20	-402.00	-297.20	115.00
18	8244	6.52	13.70	100.00	-180.00	-68.70	-380.00	-288.70	105.80
19	8963	6.59	14.13	0.00	-205.13	-120.97	-405.13	-340.97	83.70
20	6135	6.66	14.57	0.00	-230.27	-173.23	-430.27	-393.23	66.90
21	10400	6.73	15.00	0.00	-255.40	-225.50	-455.40	-445.50	39.50
22	478	6.80	18.00	0.00	-295.00	-271.00	-495.00	-491.00	33.30
23	1722	6.68	16.10	0.00	-289.50	-258.10	-489.50	-478.10	40.50
24	9644	6.96	15.50	0.00	-264.50	-208.90	-464.50	-428.90	58.60
25	5156	7.14	14.20	400.00	-267.70	-172.70	-467.70	-392.70	97.30
26	4667	7.48	15.50	0.00	-304.13	-258.57	-504.13	-478.57	54.40
27	3540	7.82	16.80	0.00	-340.57	-344.43	-540.57	-564.43	45.17
28	3689	8.16	18.10	0.00	-377.00	-430.30	-577.00	-650.30	-31.40
29	1286	7.81	19.60	0.00	-378.50	-280.50	-578.50	-500.50	26.70
30	18856	8.04	18.80	30.00	-373.60	-241.70	-573.60	-461.70	89.80
31	11066	8.15	17.80	0.00	-416.60	-443.50	-616.60	-663.50	-5.20
32	6589	8.04	18.80	50.00	-430.80	-264.10	-630.80	-484.10	76.80
33	4915	8.11	19.73	0.00	-437.70	-287.73	-637.70	-507.73	79.97
34	9899	8.19	20.67	0.00	-444.60	-311.37	-644.60	-531.37	136.31
35	1567	8.26	21.60	0.00	-451.50	-335.00	-651.50	-555.00	86.30
36	19867	8.16	20.40	50.00	-442.60	-180.50	-642.60	-400.50	249.00
37	8711	8.50	19.10	0.00	-464.20	-440.00	-664.20	-660.00	63.00
38	11033	8.31	18.60	50.00	-455.50	-406.10	-655.50	-626.10	105.50

39	15967	8.34	15.90	20.00	-464.60	-440.90	-664.60	-660.90	63.70
40	15311	8.35	16.93	0.00	-467.73	-384.60	-667.73	-604.60	111.30
41	16759	8.36	17.97	0.00	-470.87	-328.30	-670.87	-548.30	158.90
42	14000	8.37	19.00	100.00	-474.00	-272.00	-674.00	-492.00	206.50
43	19656	8.24	15.20	0.00	-488.50	-460.60	-688.50	-680.60	47.10
44	4311	8.20	19.10	0.00	-496.00	-475.60	-696.00	-695.60	36.00
45	1167	8.09	19.40	0.00	-485.90	-387.30	-685.90	-607.30	88.20
46	16400	8.25	16.00	400.00	-472.00	-187.20	-672.00	-407.20	275.40
47	12839	8.18	16.40	0.00	-467.93	-136.40	-667.93	-356.40	324.38
48	9278	8.11	16.80	0.00	-463.85	-85.60	-663.85	-305.60	373.35
49	5717	8.04	17.20	0.00	-459.78	-34.80	-659.78	-254.80	422.33
50	2156	7.97	17.60	200.00	-455.70	16.00	-655.70	-204.00	471.30
51	1733	7.95	18.80	0.00	-463.70	92.90	-663.70	-127.10	382.80
52	3689	8.03	18.80	0.00	-463.70	-43.10	-663.70	-263.10	436.90
53	4197	8.06	19.13	100.00	-465.75	-26.75	-665.75	-246.75	450.78
54	4706	8.09	19.45	0.00	-467.80	-10.40	-667.80	-230.40	464.65
55	6444	8.11	19.78	0.00	-469.85	5.95	-669.85	-214.05	478.53
56	5722	8.14	20.10	100.00	-471.90	22.30	-671.90	-197.70	492.40
57	9922	8.51	16.80	100.00	-467.30	-16.00	-667.30	-236.00	452.30
58	10644	7.96	16.80	0.00	-465.80	9.60	-665.80	-210.40	474.60
59	13800	8.21	18.50	0.00	-467.30	7.90	-667.30	-212.10	478.90
60	6078	8.37	16.80	200.00	-487.70	87.30	-687.70	-132.70	569.20
61	6100	8.28	17.33	0.00	-472.77	59.67	-672.77	-160.33	528.47
62	6107	8.19	17.87	0.00	-457.83	32.03	-657.83	-187.97	487.73
63	6144	8.10	18.40	200.00	-442.90	4.40	-642.90	-215.60	447.00
64	6122	8.55	18.30	200.00	-399.10	-3.80	-599.10	-223.80	395.40
65	3011	8.44	16.30	50.00	-403.40	5.00	-603.40	-215.00	408.00
66	6756	8.50	17.20	0.00	-327.80	-10.00	-527.80	-230.00	319.00
67	10556	8.28	15.00	100.00	-382.40	5.50	-582.40	-214.50	388.40

68	10004	8.19	16.63	0.00	-375.67	9.87	-575.67	-210.13	387.17
69	10595	8.09	18.27	0.00	-368.93	14.23	-568.93	-205.77	385.93
70	8900	8.00	19.90	200.00	-362.20	18.60	-562.20	-201.40	384.70
71	11778	8.02	18.00	50.00	-357.60	-43.40	-557.60	-263.40	320.30
72	10500	8.11	18.60	50.00	-358.90	0.00	-558.90	-220.00	317.70
73	9133	7.99	20.40	0.00	-314.90	-18.50	-514.90	-238.50	303.90
74	11733	8.09	18.10	100.00	-278.60	-18.20	-478.60	-238.20	267.70
75	11004	8.07	18.17	0.00	-275.60	-8.57	-475.60	-228.57	273.63
76	9514	8.04	18.23	0.00	-272.60	1.07	-472.60	-218.93	279.57
77	9544	8.02	18.30	200.00	-269.60	10.70	-469.60	-209.30	285.50
78	6533	8.09	19.00	50.00	-210.30	1.40	-410.30	-218.60	215.50
79	7137	8.05	17.73	0.00	-220.73	4.73	-420.73	-215.27	230.70
80	5154	8.02	16.47	0.00	-231.17	8.07	-431.17	-211.93	245.90
81	8344	7.98	15.20	200.00	-241.60	11.40	-441.60	-208.60	261.10
82	1189	8.26	18.00	50.00	-198.40	-30.00	-398.40	-250.00	173.30
83	2082	8.19	17.75	0.00	-271.70	27.50	-471.70	-192.50	303.00
84	4100	8.11	17.50	200.00	-345.00	85.00	-545.00	-135.00	432.70
85	3867	8.11	17.30	0.00	-237.90	-38.50	-437.90	-258.50	203.90
86	5289	8.02	17.05	200.00	-218.20	-11.50	-418.20	-231.50	211.80
87	1478	7.93	16.80	0.00	-203.40	-18.40	-403.40	-238.40	191.60
88	1322	7.87	15.40	100.00	-207.00	1.10	-407.00	-218.90	212.80
89	6956	7.86	16.40	100.00	-220.20	9.50	-420.20	-210.50	212.50
90	8344	8.26	18.00	0.00	-198.40	-30.00	-398.40	-250.00	173.30

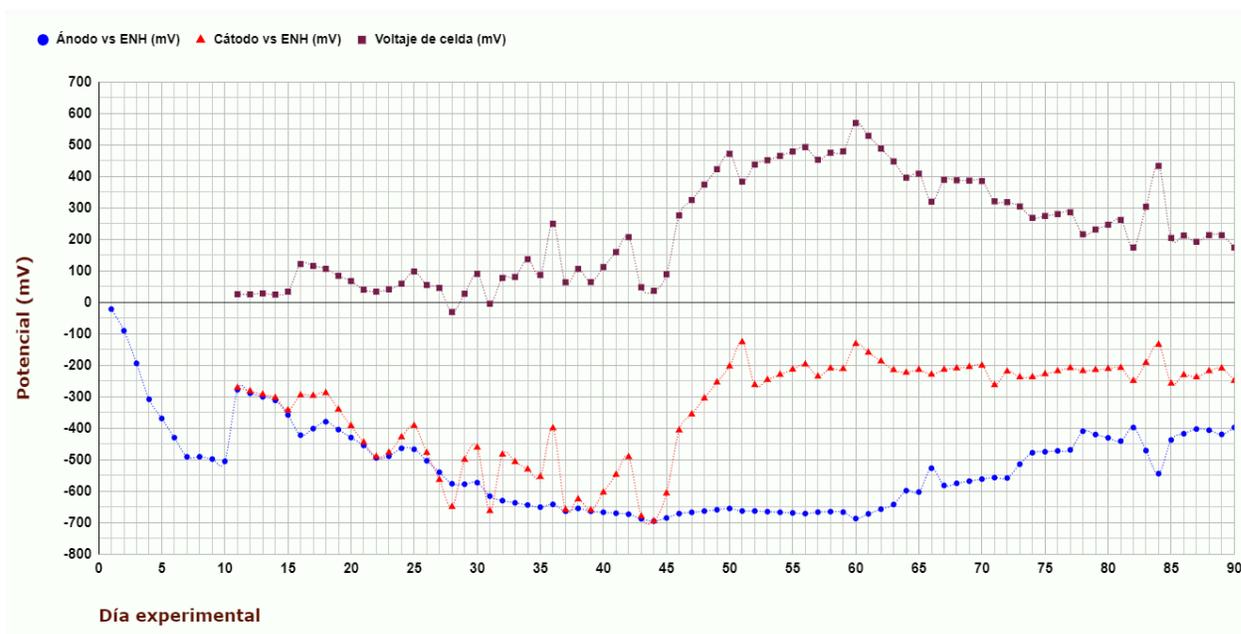


Figura 53 Evolución de la CGt durante el experimento, elaboración propia

Los parámetros medidos en la CGtS se muestran en la Tabla 23, a partir de estos datos se elaboró la Fig. 54.

**Tabla 23** Datos experimentales de la CGtS recolectados durante el experimento

DE	Iluminación (Im)	pH	Tc (°C)	VA (mL)	Ánodo vs ER (mV)	Cátodo vs ER (mV)	Ánodo vs ENH (mV)	Cátodo vs ENH (mV)	Voltaje de celda (mV)
0	-	-	-	500.00	-	-	-	-	-
1	3189	8.01	18.70	500.00	214.90	-	-5.10	-	-
2	55011	8.08	15.70	0.00	174.10	-	-45.90	-	-
3	28800	8.36	17.80	0.00	107.20	-	-112.80	-	-
4	39856	8.31	17.40	100.00	53.70	-	-166.30	-	-
5	39300	8.02	15.93	0.00	19.20	-	-200.80	-	-
6	39822	7.74	14.47	0.00	-15.30	-	-235.30	-	-
7	38189	7.45	13.00	0.00	-49.80	-	-269.80	-	-
8	40867	7.30	13.60	100.00	-62.30	-	-282.30	-	-

9	42044	7.20	13.40	0.00	-80.40	-	-300.40	-	-
10	23733	7.56	14.60	100.00	-102.90	-	-322.90	-	-
11	4111	7.03	12.50	50.00	-131.00	151.30	-351.00	-68.70	281.50
12	4700	7.09	13.80	0.00	-167.57	115.20	-387.57	-104.80	282.03
13	6507	7.16	15.10	0.00	-204.13	79.10	-424.13	-140.90	262.09
14	5878	7.22	16.40	100.00	-240.70	43.00	-460.70	-177.00	283.10
15	10122	7.75	18.00	0.00	-293.10	-73.70	-513.10	-293.70	222.20
16	11367	7.70	14.90	0.00	-333.50	-91.60	-553.50	-311.60	248.70
17	10967	7.73	15.40	0.00	-350.20	-158.50	-570.20	-378.50	192.10
18	8244	7.64	15.30	100.00	-360.00	-80.40	-580.00	-300.40	299.20
19	8963	7.60	15.40	0.00	-357.20	-141.40	-577.20	-361.40	226.47
20	6135	7.57	15.50	0.00	-354.40	-202.40	-574.40	-422.40	206.71
21	10400	7.53	15.60	0.00	-351.60	-263.40	-571.60	-483.40	81.00
22	478	7.94	18.40	0.00	-340.80	-173.50	-560.80	-393.50	167.20
23	1722	7.40	16.70	0.00	-328.50	-82.30	-548.50	-302.30	253.80
24	9644	7.23	15.80	0.00	-304.10	-22.80	-524.10	-242.80	293.10
25	5156	7.38	14.20	100.00	-302.50	58.00	-522.50	-162.00	360.00
26	4667	7.39	15.40	0.00	-303.43	-3.10	-523.43	-223.10	295.37
27	3540	7.41	16.60	0.00	-304.37	-64.20	-524.37	-284.20	276.58
28	3689	7.42	17.80	0.00	-305.30	-125.30	-525.30	-345.30	166.10
29	1286	7.25	19.40	0.00	-311.60	-35.30	-531.60	-255.30	239.00
30	18856	7.53	19.40	100.00	-313.80	-21.80	-533.80	-241.80	277.80
31	11066	7.64	18.30	0.00	-323.10	-335.80	-543.10	-555.80	28.20
32	6589	7.62	18.50	100.00	-342.50	-299.30	-562.50	-519.30	8.40
33	4915	7.71	19.43	0.00	-359.77	-350.20	-579.77	-570.20	-13.57
34	9899	7.81	20.37	0.00	-377.03	-401.10	-597.03	-621.10	-24.04
35	1567	7.90	21.30	0.00	-394.30	-452.00	-614.30	-672.00	-57.50
36	19867	7.86	20.60	10.00	-406.10	-460.20	-626.10	-680.20	-45.00
37	8711	8.14	18.20	0.00	-424.80	-458.00	-644.80	-678.00	-23.60

38	11033	8.27	19.10	20.00	-450.70	-402.60	-670.70	-622.60	-5.80
39	15967	8.60	16.00	50.00	-457.10	-384.30	-677.10	-604.30	19.80
40	15311	8.57	17.17	0.00	-466.97	-336.20	-686.97	-556.20	47.73
41	16759	8.53	18.33	0.00	-476.83	-288.10	-696.83	-508.10	75.67
42	14000	8.50	19.50	50.00	-486.70	-240.00	-706.70	-460.00	103.60
43	19656	8.37	19.30	0.00	-491.00	-429.00	-711.00	-649.00	77.60
44	4311	8.50	19.60	0.00	-501.80	-345.80	-721.80	-565.80	155.60
45	1167	8.54	19.20	0.00	-508.60	-239.50	-728.60	-459.50	156.00
46	16400	8.78	16.40	400.00	-513.20	-153.30	-733.20	-373.30	251.00
47	12839	8.64	16.75	0.00	-501.40	-109.53	-721.40	-329.53	310.48
48	9278	8.51	17.10	0.00	-489.60	-65.75	-709.60	-285.75	369.95
49	5717	8.37	17.45	0.00	-477.80	-21.98	-697.80	-241.98	429.43
50	2156	8.23	17.80	200.00	-466.00	21.80	-686.00	-198.20	488.90
51	1733	8.22	18.60	0.00	-460.00	-7.30	-680.00	-227.30	454.00
52	3689	8.47	18.70	0.00	-470.70	16.40	-690.70	-203.60	488.30
53	4197	8.37	19.13	100.00	-470.38	19.40	-690.38	-200.60	492.25
54	4706	8.26	19.55	0.00	-470.05	22.40	-690.05	-197.60	496.20
55	6444	8.16	19.98	0.00	-469.73	25.40	-689.73	-194.60	500.15
56	5722	8.05	20.40	100.00	-469.40	28.40	-689.40	-191.60	504.10
57	9922	8.76	18.30	200.00	-467.70	24.10	-687.70	-195.90	495.40
58	10644	8.16	17.50	0.00	-179.70	-162.80	-399.70	-382.80	291.80
59	13800	8.34	19.20	0.00	-462.00	-50.90	-682.00	-270.90	385.90
60	6078	8.27	17.60	100.00	-479.20	68.10	-699.20	-151.90	540.40
61	6100	8.32	17.77	0.00	-470.57	56.67	-690.57	-163.33	522.60
62	6107	8.37	17.93	0.00	-461.93	45.23	-681.93	-174.77	504.80
63	6144	8.42	18.10	100.00	-453.30	33.80	-673.30	-186.20	487.00
64	6122	8.58	18.40	100.00	-454.10	42.00	-674.10	-178.00	489.40
65	3011	8.48	15.60	50.00	-436.00	21.10	-656.00	-198.90	456.10
66	6756	8.55	17.60	0.00	-357.20	12.60	-577.20	-207.40	369.40

67	10556	8.11	15.30	100.00	-383.80	26.00	-603.80	-194.00	417.60
68	10004	8.04	16.83	0.00	-399.00	31.60	-619.00	-188.40	439.50
69	10595	7.96	18.37	0.00	-414.20	37.20	-634.20	-182.80	461.40
70	8900	7.89	19.90	200.00	-429.40	42.80	-649.40	-177.20	483.30
71	11778	7.99	17.20	50.00	-409.50	11.30	-629.50	-208.70	428.00
72	10500	7.79	18.70	50.00	-393.20	11.60	-613.20	-208.40	415.60
73	9133	8.26	20.30	0.00	-385.50	-60.30	-605.50	-280.30	327.20
74	11733	7.83	18.60	100.00	-380.10	5.40	-600.10	-214.60	387.70
75	11004	7.84	18.60	0.00	-391.23	26.67	-611.23	-193.33	419.80
76	9514	7.84	18.60	0.00	-402.37	47.93	-622.37	-172.07	451.90
77	9544	7.85	18.60	200.00	-413.50	69.20	-633.50	-150.80	484.00
78	6533	9.29	19.00	50.00	-436.20	50.10	-656.20	-169.90	522.60
79	7137	8.94	18.03	0.00	-406.60	53.73	-626.60	-166.27	487.30
80	5154	8.58	17.07	0.00	-377.00	57.37	-597.00	-162.63	452.00
81	8344	8.23	16.10	200.00	-347.40	61.00	-567.40	-159.00	416.70
82	1189	8.12	18.60	50.00	-263.60	22.50	-483.60	-197.50	292.80
83	2082	8.06	18.10	0.00	-282.10	79.50	-502.10	-140.50	366.85
84	4100	7.99	17.60	200.00	-300.60	136.50	-520.60	-83.50	440.90
85	3867	8.29	17.70	0.00	-249.00	9.90	-469.00	-210.10	260.40
86	5289	8.19	17.05	200.00	-232.20	25.80	-452.20	-194.20	267.60
87	1478	8.09	16.40	0.00	-214.00	15.20	-434.00	-204.80	224.90
88	1322	8.00	15.10	100.00	-200.00	31.70	-420.00	-188.30	235.80
89	6956	8.11	16.10	100.00	-206.20	-27.00	-426.20	-247.00	179.40
90	8344	8.12	18.60	0.00	-263.60	22.50	-483.60	-197.50	292.80

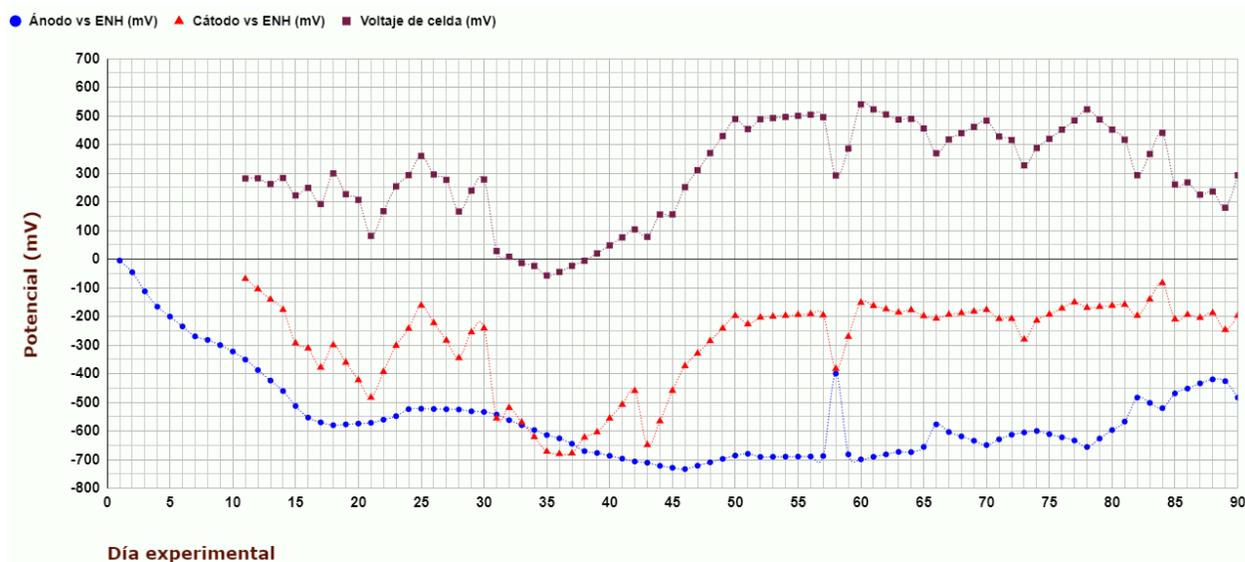


Figura 54 Evolución de la CGTs durante el experimento, elaboración propia

### Curvas de polarización

Los datos con los que se construyeron las curvas de polarización de la CC se muestran en la tabla 24, la curva correspondiente a estos datos es la Fig. 33 en el apartado 4.4.

**Tabla 24** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CC

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )	Potencia (mW)	Densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	Densidad de potencia ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
20000	300.70	15.01	0.0045	1.91	0.57
15000	297.00	19.80	0.0059	2.52	0.75
10000	289.80	28.94	0.0084	3.68	1.07
9000	287.30	31.86	0.0092	4.06	1.17
8000	284.50	35.50	0.0101	4.52	1.29
7000	280.80	40.06	0.0112	5.10	1.43
6000	276.10	45.94	0.0127	5.85	1.61
5000	270.00	53.92	0.0146	6.87	1.85

4000	261.10	65.17	0.0170	8.30	2.17
3000	247.10	82.24	0.0203	10.47	2.59
2000	224.70	112.08	0.0252	14.27	3.21
1000	167.60	167.50	0.0281	21.33	3.57
900	159.00	176.11	0.0280	22.42	3.57
800	150.00	187.10	0.0281	23.82	3.57
700	140.80	200.50	0.0282	25.53	3.59
600	129.00	214.39	0.0277	27.30	3.52
500	114.90	228.70	0.0263	29.12	3.35
400	99.70	248.00	0.0247	31.58	3.15
300	82.00	271.70	0.0223	34.59	2.84
200	60.50	300.12	0.0182	38.21	2.31
100	33.90	335.00	0.0114	42.65	1.45
50	18.10	354.50	0.0064	45.14	0.82
10	4.00	355.00	0.0014	45.20	0.18
1	0.60	356.00	0.0002	45.33	0.03

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CBa de muestran en la tabla 25, con estos datos se elaboró la Fig. 55.

**Tabla 25** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CBa

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )	Potencia (mW)	Densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	Densidad de potencia ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
20000	149.60	7.50	0.0011	0.95	0.14
15000	148.20	9.88	0.0015	1.26	0.19
10000	145.10	14.51	0.0021	1.85	0.27

9000	144.10	16.00	0.0023	2.04	0.29
8000	142.90	17.85	0.0026	2.27	0.32
7000	141.30	20.16	0.0028	2.57	0.36
6000	139.30	23.18	0.0032	2.95	0.41
5000	136.60	27.28	0.0037	3.47	0.47
4000	132.70	33.13	0.0044	4.22	0.56
3000	126.60	42.09	0.0053	5.36	0.68
2000	116.40	58.00	0.0068	7.38	0.86
1000	93.50	93.40	0.0087	11.89	1.11
900	89.00	98.65	0.0088	12.56	1.12
800	84.30	105.03	0.0089	13.37	1.13
700	79.00	112.44	0.0089	14.32	1.13
600	72.90	121.00	0.0088	15.41	1.12
500	66.00	131.40	0.0087	16.73	1.10
400	57.70	143.40	0.0083	18.26	1.05
300	47.70	158.15	0.0075	20.14	0.96
200	35.50	176.28	0.0063	22.44	0.80
100	20.20	199.20	0.0040	25.36	0.51
50	10.80	212.40	0.0023	27.04	0.29
10	2.40	224.25	0.0005	28.55	0.07
1	0.4	226.00	0.0001	28.78	0.01

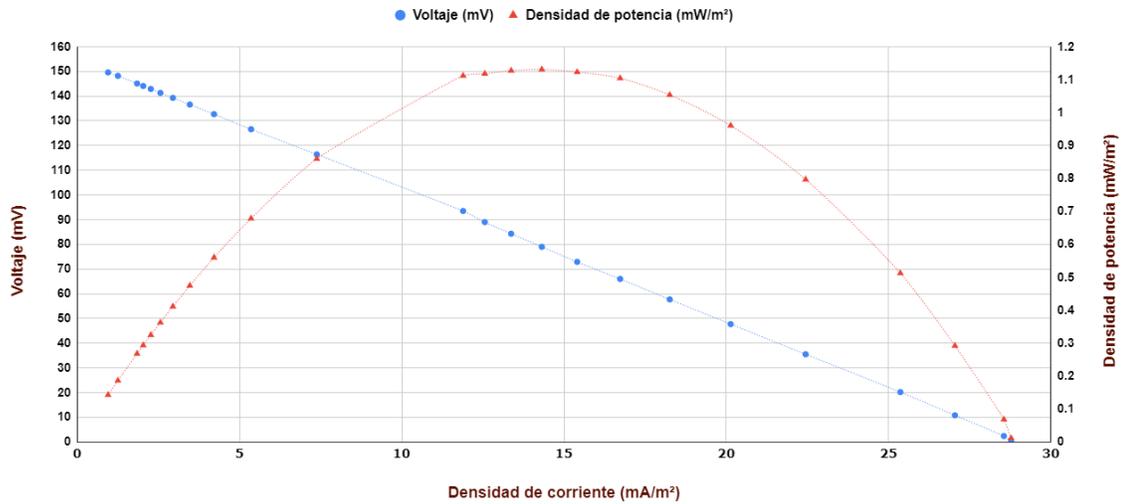


Figura 55 Curvas de polarización de CBa, elaboración propia

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CBaCa de muestran en la tabla 26, con estos datos se elaboró la Fig. 56.

**Tabla 26** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CBaCa

Resistencia (Ω)	Voltaje (mV)	Corriente (μA)	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )
20000	136.7	6.84	0.00094	0.87	0.12
15000	134.9	9.00	0.00121	1.15	0.15
10000	131.6	13.15	0.00173	1.67	0.22
9000	130.1	14.45	0.00188	1.84	0.24
8000	128.9	16.10	0.00208	2.05	0.26
7000	127.0	18.13	0.00230	2.31	0.29
6000	124.7	20.77	0.00259	2.64	0.33
5000	121.7	24.32	0.00296	3.10	0.38
4000	117.4	29.32	0.00344	3.73	0.44
3000	111.0	36.94	0.00410	4.70	0.52

2000	100.1	49.90	0.00499	6.35	0.64
1000	77.2	72.05	0.00556	9.17	0.71
900	73.1	81.04	0.00592	10.32	0.75
800	69.0	85.98	0.00593	10.95	0.76
700	64.2	91.41	0.00587	11.64	0.75
600	58.8	97.64	0.00574	12.43	0.73
500	52.6	104.80	0.00551	13.34	0.70
400	45.4	113.00	0.00513	14.39	0.65
300	37.0	122.80	0.00454	15.64	0.58
200	27.1	134.40	0.00364	17.11	0.46
100	15.0	148.48	0.00223	18.91	0.28
50	8.0	156.50	0.00125	19.93	0.16
10	1.8	163.5	0.00029	20.82	0.04
1	0.3	165.05	0.00005	21.01	0.01

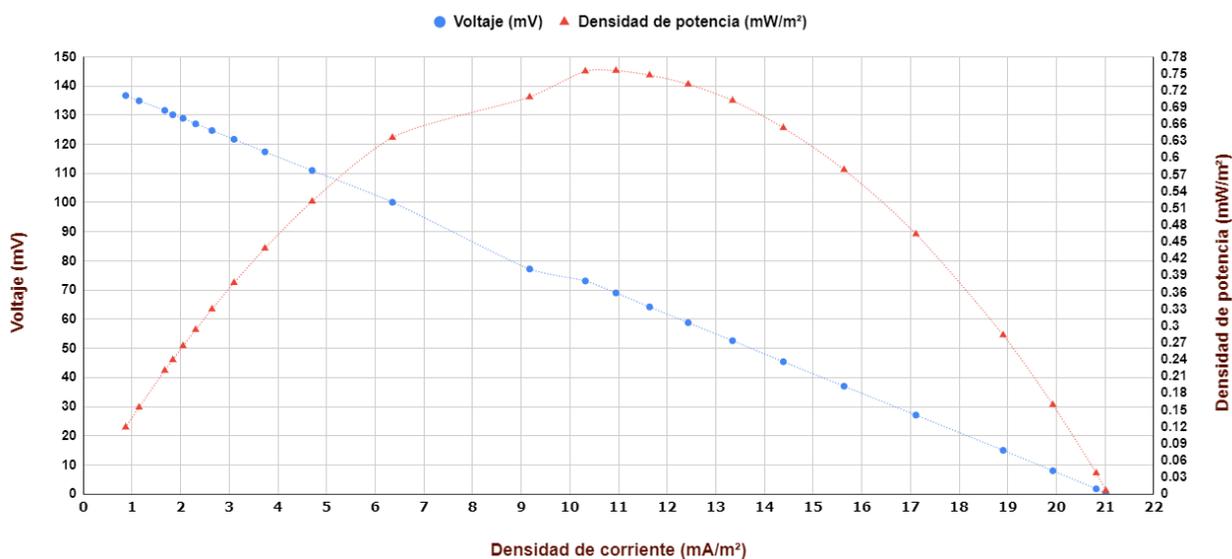


Figura 56 Curvas de polarización de CBaCa, elaboración propia

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CPOL de muestran en la tabla

27, la curva correspondiente a estos datos es la Fig. 35 en el apartado 4.4.

**Tabla 27** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPOL

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )
20000	576.0	28.84	0.01661	3.67	2.12
15000	566.0	37.77	0.02138	4.81	2.72
10000	546.0	54.58	0.02980	6.95	3.79
9000	539.0	59.86	0.03226	7.62	4.11
8000	531.0	66.34	0.03523	8.45	4.49
7000	521.0	74.38	0.03875	9.47	4.93
6000	508.0	84.63	0.04299	10.78	5.47
5000	491.0	98.25	0.04824	12.51	6.14
4000	468.0	117.00	0.05476	14.90	6.97
3000	434.0	144.57	0.06274	18.41	7.99
2000	379.0	189.16	0.07169	24.08	9.13
1000	274.5	274.20	0.07527	34.91	9.58
900	258.5	286.45	0.07405	36.47	9.43
800	241.0	300.27	0.07237	38.23	9.21
700	221.6	315.50	0.06991	40.17	8.90
600	200.1	332.40	0.06651	42.32	8.47
500	176.3	351.28	0.06193	44.73	7.89
400	149.6	372.46	0.05572	47.42	7.09
300	119.4	396.50	0.04734	50.48	6.03

200	85.2	423.80	0.03611	53.96	4.60
100	45.9	455.21	0.02089	57.96	2.66
50	24.0	472.41	0.01134	60.15	1.44
10	5.2	487.00	0.00253	62.01	0.32
1	0.9	490.00	0.00044	62.39	0.06

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CPOLS de muestran en la tabla 28, la curva correspondiente a estos datos es la Fig. 37 en el apartado 4.4.

**Tabla 28** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPOL

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )	Potencia (mW)	Densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )	Densidad de potencia ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
20000	688.0	34.42	0.0237	4.38	3.02
15000	681.0	45.50	0.0310	5.79	3.95
10000	668.0	67	0.0447	8.51	5.69
9000	664.0	73.77	0.0490	9.39	6.24
8000	659.0	82.34	0.0543	10.48	6.91
7000	652.0	93.00	0.0606	11.84	7.72
6000	643.0	107.11	0.0689	13.64	8.77
5000	631.0	126.20	0.0796	16.07	10.14
4000	614.0	153.41	0.0942	19.53	11.99

3000	588.0	195.66	0.1150	24.91	14.65
2000	541.0	270.04	0.1461	34.38	18.60
1000	437.0	436.75	0.1909	55.61	24.30
900	419.0	464.00	0.1944	59.08	24.75
800	398.0	496.00	0.1974	63.15	25.13
700	374.0	532.70	0.1992	67.83	25.37
600	346.5	575.50	0.1994	73.27	25.39
500	314.0	625.70	0.1965	79.67	25.02
400	275.5	686.10	0.1890	87.36	24.07
300	228.6	758.90	0.1735	96.63	22.09
200	170.8	849.40	0.1451	108.15	18.47
100	97.4	965.50	0.0940	122.93	11.97
50	52.5	1036.10	0.0544	131.92	6.93
10	11.7	1098.40	0.0129	139.85	1.64
1	1.9	1112.00	0.0021	141.58	0.27

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CPAS de muestran en la tabla 29, con estos datos se elaboró la Fig. 57.

**Tabla 29** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPAS

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu$ A)	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )
20000	551.0	27.55	0.0152	3.51	1.93

15000	546.0	36.46	0.0199	4.64	2.53
10000	537.0	57	0.0305	7.22	3.88
9000	534.0	59.30	0.0317	7.55	4.03
8000	530.0	66.24	0.0351	8.43	4.47
7000	525.0	74.99	0.0394	9.55	5.01
6000	519.0	86.39	0.0448	11.00	5.71
5000	510.0	101.97	0.0520	12.98	6.62
4000	498.0	124.27	0.0619	15.82	7.88
3000	478.0	159.12	0.0761	20.26	9.68
2000	444.0	221.21	0.0982	28.17	12.51
1000	365.0	363.80	0.1328	46.32	16.91
900	350.3	387.25	0.1357	49.31	17.27
800	334.0	415.31	0.1387	52.88	17.66
700	315.3	447.79	0.1412	57.01	17.98
600	293.4	485.77	0.1425	61.85	18.15
500	267.6	531.07	0.1421	67.62	18.09
400	236.3	585.48	0.1383	74.55	17.62
300	197.9	653.30	0.1293	83.18	16.46
200	149.8	738.50	0.1106	94.03	14.09
100	87.2	850.30	0.0741	108.26	9.44
50	48.3	918.00	0.0443	116.88	5.65
10	12.3	980.40	0.0121	124.83	1.54
1	3.5	994.00	0.0035	126.56	0.44

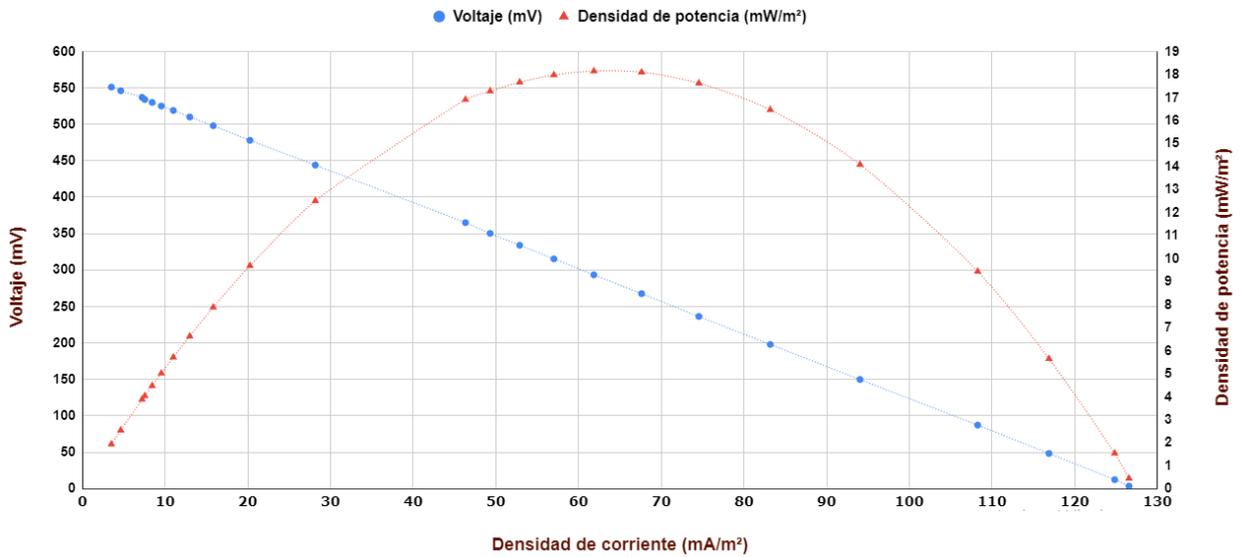


Figura 57 Curvas de polarización de CPAS, elaboración propia

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CPASH de muestras se muestran en la tabla 30, con estos datos se elaboró la Fig. 58.

**Tabla 30** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CPASH

Resistencia (Ω)	Voltaje (mV)	Corriente (μA)	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m²)	Densidad de potencia (mW/m²)
20000	553.0	27.72	0.01533	3.53	1.95
15000	550.0	36.70	0.02019	4.67	2.57
10000	540.0	54	0.02917	6.88	3.71
9000	537.0	59.63	0.03202	7.59	4.08
8000	533.0	66.60	0.03550	8.48	4.52
7000	527.0	75.33	0.03970	9.59	5.05
6000	521.0	86.72	0.04518	11.04	5.75
5000	511.0	102.24	0.05224	13.02	6.65
4000	498.0	124.44	0.06197	15.84	7.89

3000	478.0	158.94	0.07597	20.24	9.67
2000	441.0	220.04	0.09704	28.02	12.36
1000	359.0	358.57	0.12873	45.65	16.39
900	344.1	381.00	0.13110	48.51	16.69
800	327.0	407.27	0.13318	51.86	16.96
700	308.3	436.60	0.13460	55.59	17.14
600	286.0	472.80	0.13522	60.20	17.22
500	259.7	515.30	0.13382	65.61	17.04
400	228.5	566.57	0.12946	72.14	16.48
300	190.2	629.00	0.11964	80.09	15.23
200	142.8	707.10	0.10097	90.03	12.86
100	81.8	808.20	0.06611	102.90	8.42
50	44.7	868.00	0.03880	110.52	4.94
10	10.7	923.00	0.00988	117.52	1.26
1	2.6	934.00	0.00243	118.92	0.31

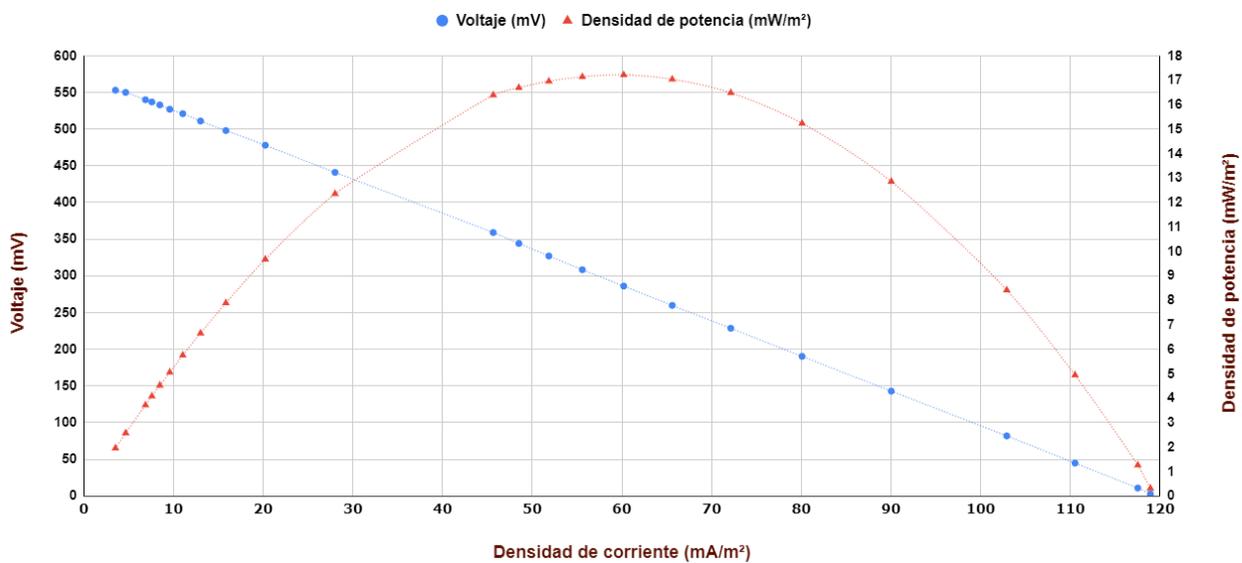


Figura 58 Curvas de polarización de CPASH, elaboración propia

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CGt de muestran en la tabla 31, con estos datos se elaboró la Fig. 59.

**Tabla 31** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CGt

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (mV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (mW/m <sup>2</sup> )
20000	549.0	27.47	0.0151	3.50	1.92
15000	543.0	36.27	0.0197	4.62	2.51
10000	531.0	53	0.0282	6.77	3.59
9000	527.0	58.58	0.0309	7.46	3.93
8000	522.0	65.28	0.0341	8.31	4.34
7000	516.0	73.67	0.0380	9.38	4.84
6000	508.0	84.57	0.0430	10.77	5.47
5000	497.0	99.30	0.0494	12.64	6.28
4000	481.0	120.14	0.0578	15.30	7.36
3000	457.0	152.15	0.0695	19.37	8.85
2000	416.0	207.56	0.0863	26.43	10.99
1000	328.0	327.01	0.1073	41.64	13.66
900	311.6	345.09	0.1075	43.94	13.69
800	294.4	366.44	0.1079	46.66	13.74
700	274.5	390.52	0.1072	49.72	13.65
600	252.0	418.18	0.1054	53.24	13.42
500	226.0	450.00	0.1017	57.30	12.95
400	196.4	488.21	0.0959	62.16	12.21
300	160.9	533.40	0.0858	67.91	10.93
200	118.5	587.79	0.0697	74.84	8.87

100	66.3	654.80	0.0434	83.37	5.53
50	35.3	693.00	0.0245	88.24	3.11
10	8.0	727.00	0.0058	92.56	0.74
1	1.4	732.10	0.0010	93.21	0.13

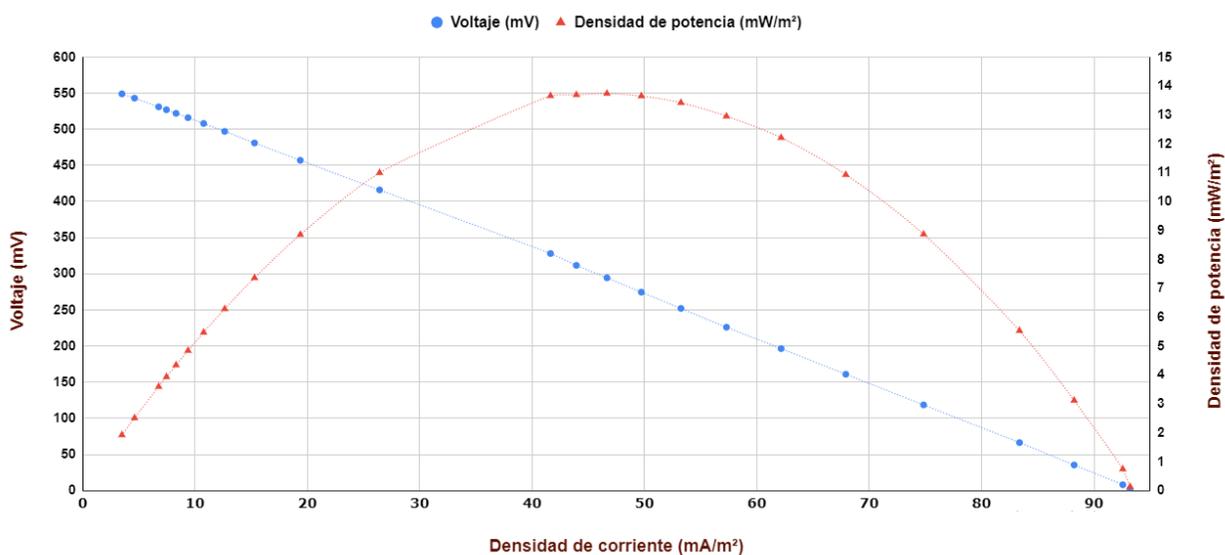


Figura 59 Curvas de polarización de CGt, elaboración propia

Los datos para elaborar las curvas de polarización de la CGtS de muestran en la tabla 32, con estos datos se elaboró la Fig. 60.

**Tabla 32** Datos experimentales para la elaboración de la curva de polarización de la CGtS

Resistencia (Ω)	Voltaje (mV)	Corriente (μA)	Potencia (mW)	Densidad de corriente (mA/m²)	Densidad de potencia (mW/m²)
20000	530.0	26.54	0.014066	3.38	1.79
15000	523.0	34.93	0.018268	4.45	2.33
10000	509.0	51	0.025934	6.49	3.30
9000	505.0	56.09	0.028325	7.14	3.61

8000	499.0	62.38	0.031128	7.94	3.96
7000	492.0	70.25	0.034563	8.94	4.40
6000	483.0	80.41	0.038838	10.24	4.95
5000	471.0	94.10	0.044321	11.98	5.64
4000	454.0	113.34	0.051456	14.43	6.55
3000	428.0	142.42	0.060956	18.13	7.76
2000	384.0	191.65	0.073594	24.40	9.37
1000	295.4	294.80	0.087084	37.54	11.09
900	279.6	309.51	0.086539	39.41	11.02
800	262.3	326.54	0.085651	41.58	10.91
700	243.1	345.66	0.084030	44.01	10.70
600	221.7	367.81	0.081543	46.83	10.38
500	197.8	393.73	0.077880	50.13	9.92
400	170.5	423.99	0.072290	53.98	9.20
300	138.5	459.02	0.063574	58.44	8.09
200	100.9	500.74	0.050525	63.76	6.43
100	55.7	550.37	0.030656	70.08	3.90
50	29.5	577.50	0.017036	73.53	2.17
10	6.6	601.30	0.003969	76.56	0.51
1	1.1	605.10	0.000666	77.04	0.08

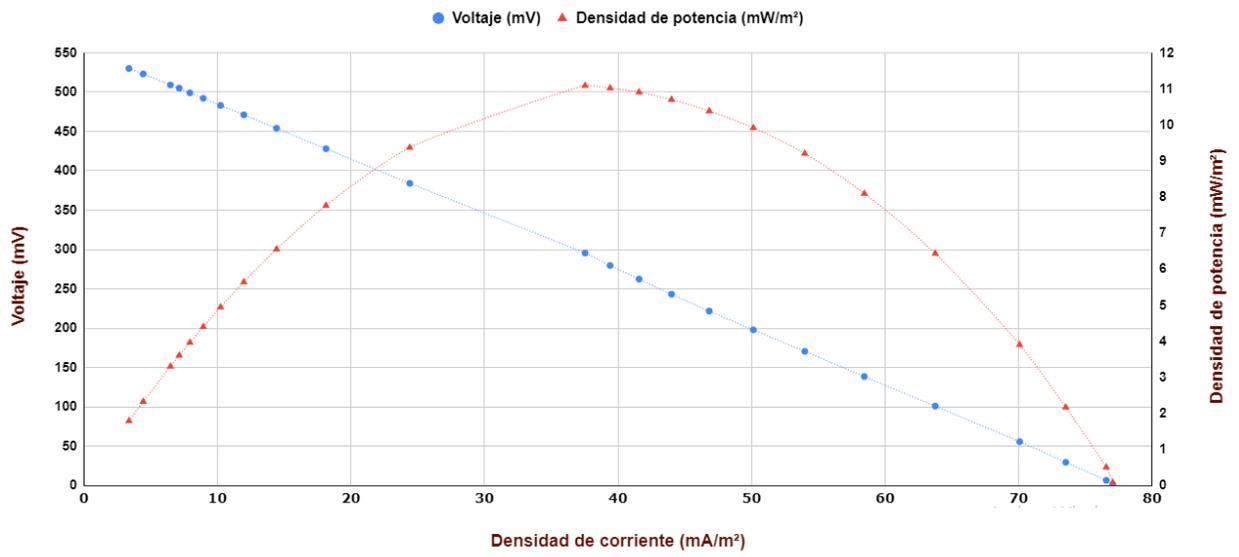


Figura 60 Curvas de polarización de CGtS, elaboración propia