

# Tabla de contenido

<b>Índice de tablas</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Panorama energético . . . . .	1
1.2. Tratamiento de aguas residuales . . . . .	2
1.3. Energía consumida en el tratamiento de aguas residuales . . . . .	4
1.4. Celdas de combustible . . . . .	5
1.5. Celdas de combustible microbiológicas . . . . .	8
1.6. Objetivo general . . . . .	9
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>10</b>
2.1. Fundamentos de electroquímica . . . . .	10
2.1.1. Termodinámica de una reacción electroquímica: ecuación de Nernst . . . . .	10
2.1.2. Concepto de sobrepotencial y generación de corriente en un sistema . . . . .	11
2.2. Metabolismo y crecimiento microbiológico . . . . .	12
2.2.1. Metabolismo microbiano . . . . .	12
2.2.2. Crecimiento microbiano . . . . .	13
2.2.3. Fases del crecimiento microbiano . . . . .	15
<b>3. Antecedentes bibliográficos</b>	<b>17</b>
3.1. Microorganismos utilizados en celdas de combustible microbiológicas y su mecanismo de transferencia de electrones . . . . .	17
3.2. Combustibles utilizados en las CCMs . . . . .	18
3.3. Materiales utilizados en la fabricación de ánodos de CCMs . . . . .	19
3.4. Materiales utilizados como cátodos de CCMs . . . . .	21
3.5. Recapitulación y objetivos específicos . . . . .	22
<b>4. Metodología</b>	<b>23</b>
4.1. Preparación de soluciones . . . . .	23
4.1.1. Medio de cultivo para <i>Acidiphilium cryptum</i> . . . . .	23
4.1.2. Medio de cultivo para <i>Acidiphilium cryptum</i> con ion férrico . . . . .	24
4.1.3. Buffer fosfato pH 4 . . . . .	24
4.1.4. Solución para hidratación de membrana Nafion® 117 . . . . .	25
4.2. Preparación de electrodos . . . . .	25
4.2.1. Conductividad del CVR . . . . .	26

4.2.2.	Construcción del electrodo . . . . .	27
4.2.3.	Limpieza del electrodo . . . . .	27
4.3.	Cultivos microbiológicos . . . . .	28
4.3.1.	Cultivo de <i>Acidiphilium cryptum</i> en matraz Erlenmeyer . . . . .	28
4.3.2.	Cultivos de <i>Acidiphilium cryptum</i> en tubos Falcon® . . . . .	29
4.3.3.	Curva de crecimiento microbiano con recuento al microscopio . . . . .	30
4.3.4.	Curva de crecimiento microbiano con densidad óptica . . . . .	30
4.4.	Montaje experimental . . . . .	31
4.4.1.	Celda electroquímica utilizada . . . . .	31
4.4.2.	Hidratación membrana Nafion® 117 . . . . .	31
4.4.3.	Armado de la celda . . . . .	32
4.4.4.	Mediciones electroquímicas con bacterias en solución . . . . .	33
4.4.5.	Mediciones electroquímicas con bacterias en electrodo . . . . .	34
4.5.	Técnicas utilizadas . . . . .	36
4.5.1.	Método de las cuatro puntas (conductividad de un material) . . . . .	36
4.5.2.	Recuento directo al microscopio (concentración de microorganismos) . . . . .	37
4.5.3.	Densidad óptica (concentración de microorganismos) . . . . .	39
4.5.4.	Voltametría cíclica . . . . .	39
4.5.5.	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) . . . . .	40
4.5.6.	Microscopia electrónica de barrido . . . . .	41
<b>5.</b>	<b>Resultados y discusiones</b>	<b>42</b>
5.1.	Diseño de celda electroquímica utilizada . . . . .	42
5.2.	Diseño del electrodo de trabajo . . . . .	43
5.3.	Cultivos microbiológicos . . . . .	44
5.4.	Determinación de parámetros para voltametrías cíclicas . . . . .	48
5.5.	Mediciones electroquímicas con bacterias en solución . . . . .	50
5.6.	Mediciones electroquímicas con bacterias adheridas al electrodo de trabajo . . . . .	55
5.7.	Micrografías a electrodos con bacterias adheridas . . . . .	58
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>62</b>
	<b>Anexos</b>	<b>66</b>
<b>A.</b>	<b>Voltametrías con barrido entre -0,5 y 1,5 V</b>	<b>67</b>
<b>B.</b>	<b>EIE a celda con bacterias en solución, ajuste al modelo 1</b>	<b>69</b>
<b>C.</b>	<b>EIE a celda con bacterias en solución, ajuste al modelo 2</b>	<b>71</b>
<b>D.</b>	<b>EIE a celda con bacterias adheridas al electrodo, primer caso</b>	<b>73</b>
<b>E.</b>	<b>EIE a celda con bacterias adheridas al electrodo, segundo caso</b>	<b>76</b>

# Índice de tablas

1.1. Tipos de celdas de combustible . . . . .	8
3.1. Sustratos utilizados en celdas de combustible microbiológicas . . . . .	20
4.1. Reactivos medio de cultivo <i>Ac. cryptum</i> . . . . .	23
4.2. Reactivos medio de cultivo <i>Ac. cryptum</i> con ion férrico . . . . .	24
4.3. Reactivos para la preparación de buffer fosfato . . . . .	25
4.4. Reactivos para solución de hidratación de membrana . . . . .	25
4.5. Volumen y factor de cada cuadro en la cámara Neubauer . . . . .	38
5.1. Resultados del ajuste al modelo 1 . . . . .	53
5.2. Resultados del ajuste al modelo 2 . . . . .	54
5.3. Resultados del ajuste al modelo 2, primer caso . . . . .	56
5.4. Resultados del ajuste al modelo 2, segundo caso . . . . .	58

# Índice de figuras

1.1.	Distribución matriz energética chilena . . . . .	1
1.2.	Distribución de fuentes de energía en Chile . . . . .	2
1.3.	Lugar de descarga de efluentes de plantas de tratamiento en Chile . . . . .	3
1.4.	Diagrama general del proceso de tratamiento de aguas residuales . . . . .	4
1.5.	Distribución porcentual de energía contenida en aguas residuales . . . . .	5
1.6.	Esquema básico de una celda de combustible . . . . .	6
1.7.	Esquema del funcionamiento de una celda de combustible de hidrógeno (CCH) . . . . .	8
1.8.	Esquema básico de una celda de combustible microbológica . . . . .	9
2.1.	Crecimiento exponencial de un microorganismo . . . . .	14
2.2.	Curva de crecimiento de un microorganismo . . . . .	15
3.1.	Mecanismos de transferencia de electrones de forma: (a) directa y (b) indirecta . . . . .	18
4.1.	Conexiones utilizadas para el método de las cuatro puntas . . . . .	26
4.2.	Esquema del electrodo de trabajo utilizado . . . . .	27
4.3.	Celda utilizada en los experimentos electroquímicos . . . . .	32
4.4.	Montaje de la celda para los experimentos electroquímicos . . . . .	35
4.5.	Rejilla de la cámara de Neubauer . . . . .	38
4.6.	Gráficos obtenidos desde una voltametría cíclica . . . . .	39
4.7.	Gráficos obtenidos desde una espectroscopia de impedancia electroquímica . . . . .	40
5.1.	Esquema de la celda electroquímica utilizada en el estudio . . . . .	42
5.2.	Imágenes de MEB al carbono vítreo reticular . . . . .	45
5.3.	Curvas de potencial vs corriente obtenidas con configuraciones AB-CD y BC-DA . . . . .	46
5.4.	Curvas de crecimiento de <i>Ac. cryptum</i> utilizando: (a) recuento directo, y (b) densidad óptica . . . . .	47
5.5.	Curvas de crecimiento de <i>Ac. cryptum</i> con y sin mediador determinadas utilizando el método de densidad óptica . . . . .	47
5.6.	Voltamograma con inóculo de bacterias a distintos tiempos de crecimiento . . . . .	48
5.7.	Voltamograma con inóculo de 7 horas de crecimiento . . . . .	49
5.8.	Voltametrías realizadas con el nuevo rango de potenciales . . . . .	50
5.9.	Voltametrías cíclicas con inóculos a distintos tiempos de crecimiento . . . . .	51
5.10.	Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 4 horas de crecimiento . . . . .	52
5.11.	Circuito equivalente modelo 1 . . . . .	52
5.12.	Ajuste del modelo 1 a los datos experimentales . . . . .	52
5.13.	Circuito equivalente modelo 2 . . . . .	53

5.14. Ajuste de los modelos 1 y 2 a los datos experimentales obtenidos con un inóculo de 4 horas . . . . .	54
5.15. Voltametrías cíclicas utilizando electrodos de trabajo con bacterias adheridas, primer caso . . . . .	55
5.16. Voltametrías cíclicas utilizando electrodos de trabajo con bacterias adheridas, segundo caso . . . . .	57
5.17. Imágenes MEB a electrodos de trabajo con 4 horas de crecimiento . . . . .	59
5.18. Imágenes MEB a electrodos de trabajo con 4 y 6 horas de crecimiento . . . . .	59
A.1. Voltamograma con inóculo de 0 horas de crecimiento . . . . .	67
A.2. Voltamograma con inóculo de 3 horas de crecimiento . . . . .	68
A.3. Voltamograma con inóculo de 25 horas de crecimiento . . . . .	68
B.1. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 0 horas de crecimiento con ajuste del modelo 1 . . . . .	69
B.2. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 6 horas de crecimiento con ajuste del modelo 1 . . . . .	70
B.3. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 8 horas de crecimiento con ajuste del modelo 1 . . . . .	70
C.1. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 0 horas de crecimiento con ajuste del modelo 2 . . . . .	71
C.2. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 6 horas de crecimiento con ajuste del modelo 2 . . . . .	72
C.3. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con inóculo de 8 horas de crecimiento con ajuste del modelo 2 . . . . .	72
D.1. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo sin bacterias, con ajuste del modelo 2 . . . . .	73
D.2. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 4 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	74
D.3. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 6 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	74
D.4. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 8 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	75
E.1. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo sin bacterias, con ajuste del modelo 2 . . . . .	76
E.2. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 4 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	77
E.3. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 6 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	77
E.4. Gráfico de Nyquist correspondiente a una EIE con electrodo extraído de un cultivo de 8 horas, con ajuste del modelo 2 . . . . .	78