

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Procesos de desinfección	3
1.2.	Desinfección electrolítica.....	4
1.3.	Objetivos	6
2.	Marco Teórico	7
2.1.	Equilibrio químico	7
2.2.	Energía libre de Gibbs	7
2.3.	Reacciones electroquímicas	9
2.4.	Celdas electroquímicas y fenómenos en los electrodos.....	10
2.5.	Ecuación de Nernst	11
2.6.	Cinética de reacciones electroquímicas	12
3.	Estado del arte	15
3.1.	Celdas electroquímicas para desinfección de agua.....	15
3.1.1.	Microorganismos modelo y mecanismos de desinfección electroquímica	16
3.1.2.	Componentes de una celda electroquímica para la desinfección de agua	16
3.2.	Electrodos de platino soportado.....	20
3.2.1.	Electroless plating	20
4.	Caso de estudio.....	24
4.1.	Caracterización del agua	24
4.2.	Diagrama Eh-pH: Determinación del potencial de desinfección.....	26
5.	Metodología experimental.....	28
5.1.	Pretratamiento de la malla	28
5.2.	Síntesis del catalizador.....	28
5.3.	Fabricación del ánodo	29
5.4.	Caracterización del electrodo.....	30
5.5.	Experimentos de desinfección	32
5.5.1.	Análisis fisicoquímico	33
5.5.2.	Análisis microbiológico.....	33
6.	Resultados experimentales	37
6.1.	Fabricación del ánodo de bajo costo.....	37

6.1.1.	Selección de las condiciones de síntesis del catalizador: Tipo de agitación y uso de etilendiamina	37
6.1.2.	Caracterización morfológica	39
6.2.	Caracterización cinética del ánodo: Efecto de la carga de platino.....	40
6.2.1.	Actividad catalítica para la reacción de evolución de oxígeno	40
6.2.2.	Actividad catalítica para la producción de cloro libre	41
6.3.	Desinfección electroquímica de agua de pozo naturalmente contaminada	43
6.3.1.	Inactivación de microorganismos y consumo energético.....	43
6.3.2.	Análisis teórico de los subproductos de la desinfección	47
6.3.3.	Desinfección residual	49
7.	Diseño de un dispositivo para la desinfección electrolítica de agua	51
7.1.	Diagrama de bloques del proceso	51
7.2.	Caso base	52
7.3.	Escalamiento de celda de laboratorio	53
7.4.	Control automático del dispositivo	55
7.5.	Componentes del dispositivo	58
7.6.	Dimensionamiento de panel fotovoltaico y batería	61
7.7.	Modelo 3D del dispositivo de desinfección electroquímica de agua.....	63
7.8.	Costo de construcción del dispositivo	67
8.	Conclusiones.....	70
9.	Bibliografía.....	72
10.	Anexos.....	79
10.1.	Anexo 1: Diagrama de distribución de cloro libre en solución acuosa.....	79
10.2.	Anexo 2: Diagrama Eh-pH.....	80
10.3.	Anexo 3: <i>SEM</i> y <i>EDS</i>	83
10.4.	Anexo 4: Voltametría cíclica.....	84
10.5.	Anexo 5: Fotografías de montajes experimentales	86
10.6.	Anexo 6: Cronoamperometría.....	88
10.7.	Anexo 7: Método colorimétrico de DPD para la medición de cloro libre	88
10.8.	Anexo 8: Medios de cultivo	90
10.9.	Anexo 9: Código en Arduino para el sistema de control automático del equipo.....	92
10.10.	Anexo 10: Información adicional sobre componentes del dispositivo de desinfección electroquímica	94

10.11. Anexo 11: Estimación del consumo eléctrico de una lampara led y un cargador de teléfono celular	95
10.12. Anexo 12: Dimensiones del dispositivo de desinfección electroquímica	95

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos de desinfección utilizados en procesos municipales de potabilización de agua.	2
Tabla 2. Caracterización química del agua modelo.....	24
Tabla 3. Parámetros empleados en voltametrías cíclicas	31
Tabla 4. Densidad de microorganismos según el método NMP.....	36
Tabla 5. Análisis <i>EDS</i> de las muestras de catalizador sintetizado.....	40
Tabla 6. Eficacia de desinfección y requerimiento energético del proceso de desinfección electrolítica utilizando diferentes ánodos	45
Tabla 7. Recomendación de la OMS para la ingesta diaria de agua	53
Tabla 8. Componentes del dispositivo de desinfección electroquímica.....	60
Tabla 9. Consumo eléctrico de los componentes del dispositivo de desinfección electroquímica	62
Tabla 10. Costos de fabricación del ánodo.....	67
Tabla 11. Costos de construcción del dispositivo de desinfección electroquímica.....	69
Tabla 12. Datos termodinámicos	81
Tabla 13: Concentración inicial de especies en diagrama Eh-pH	82
Tabla 14. Parámetros voltametría cíclica de ejemplo.....	85
Tabla 15. Composición de caldo lauril sulfato de sodio	90
Tabla 16. Composición caldo lactosa bilis verde brillante.....	91
Tabla 17. Composición de agar R2A.....	91
Tabla 18. Dimensiones de los componentes del dispositivo de desinfección electroquímica	94

Índice de ilustraciones

Figura 1. Tasas de incidencia de la fiebre tifoidea y paratifoidea en Chile durante los años 1980-2010	1
Figura 2. Esquema de una celda de desinfección electrolítica de agua.....	5
Figura 3. Esquema de una reacción general en un electrodo.....	10
Figura 4. Dispositivo de desinfección electroquímica AQUADES-EL®	15
Figura 5. Esquema de la formación de agentes oxidantes en ánodos para desinfección electroquímica mediante (A) enlaces hidroxilos en superficie y (B) formación de radicales de hidroxilo	18
Figura 6. Eficiencia de producción de cloro libre por parte de diferentes ánodos en función de la concentración de cloruro	18
Figura 7. Vida útil de electrodos implementados en proceso de desinfección electrolítica de agua	19
Figura 8. Esquema del proceso de reducción de un ion metálico por la acción de un agente reductor en un medio con alcohol.....	21
Figura 9. Compuestos de coordinación Pt-EN	22
Figura 10. Diagrama de distribución del sistema cloro libre-agua a 25 °C y 1 atm.....	25
Figura 11. Diagrama Eh-pH del sistema cloro-agua a 25 °C y 1 atm	26
Figura 12. Malla pretratada de acero inoxidable: (A) antes de su revestimiento con el catalizador soportado y (B) revestida con el catalizador soportado.....	29
Figura 13. Esquema de construcción del electrodo	30
Figura 14. Esquema del montaje experimental utilizado en los ensayos de voltametría	31
Figura 15. Esquema del montaje experimental utilizado en los experimentos de desinfección ...	32
Figura 16. Esquema de la disposición de campana de Durham al interior de los tubos de ensayo	35
Figura 17. Voltamogramas obtenidos para la <i>OER</i> en electrodos de Pt/C fabricados utilizando el catalizador sintetizado con agitación ultrasónica y magnética (sin etilendiamina).....	37
Figura 18. Voltamogramas obtenidos para la <i>OER</i> en electrodos de Pt/C fabricados utilizando el catalizador sintetizado con agitación ultrasónica y con y sin etilendiamina (EN)	38
Figura 19. Electrodo fabricado (4%Pt/C).....	39
Figura 20. Imágenes de <i>SEM</i> de la malla de acero inoxidable: antes del pretratamiento (A y B), después del pretratamiento (C y D), y revestida con el catalizador de 4%Pt/C (E y F).....	39
Figura 21. Voltamogramas obtenidos para la <i>OER</i> en electrodos de Pt/C fabricados utilizando catalizador con diferentes cargas de platino (%Pt/C).....	41
Figura 22. Concentración de cloro libre antes (0 min), durante y después (90 min) de la desinfección electrolítica de agua (expresada como $\text{mg l}^{-1} \text{Cl}_2$).....	42
Figura 23. Imágenes de microscopía óptica de muestras de células presentes en el agua tratada: (A) objetivo de 10x, (B) objetivo de 40x y (C) objetivo de 100x (Imágenes (B) y (C) corresponden a la colonia indicada con el círculo discontinuo)	44
Figura 24. Imágenes de <i>SEM</i> de los microorganismos presentes en las muestras de agua tratada: (A) antes del proceso de desinfección y (B) después del proceso de desinfección.....	44

Figura 25. Imágenes de <i>SEM</i> de un electrodo 4%Pt/C: (A) antes del proceso de desinfección y (B) después de 10 ciclos de desinfección	46
Figura 26. Fotografía del cátodo de acero inoxidable AISI 304: (A) antes de ser utilizado en el proceso de desinfección electrolítica de agua y (B) luego de 5 ciclos de desinfección de agua...	47
Figura 27. Concentración residual de cloro libre en agua tratada después del proceso de desinfección electrolítica	50
Figura 28. Diagrama de bloques del funcionamiento del dispositivo de desinfección electroquímica	52
Figura 29. Semejanza de proporciones geométricas en el escalamiento de la celda electroquímica	54
Figura 30. Diagrama de control automático para el dispositivo de desinfección electroquímica .	56
Figura 31. Circuito del sistema de control automático para el dispositivo de desinfección electroquímica	59
Figura 32. Vistas isométricas del modelo 3D del dispositivo de desinfección electrolítica	64
Figura 33. Vista frontal de la celda de desinfección en el dispositivo de desinfección electroquímica	65
Figura 34. Vista isométrica (sin carcasa frontal) del dispositivo de desinfección electroquímica	66
Figura 35. Ejemplo de espectro de rayos X obtenido mediante <i>EDS</i>	84
Figura 36. Ejemplo de variación del potencial aplicado en función el tiempo durante un experimento de voltametría cíclica.....	85
Figura 37. Voltamograma característico	86
Figura 38. Fotografía montaje experimental experimentos de voltametrías cíclicas (<i>CVs</i>).....	87
Figura 39. Fotografía montaje experimental experimentos de desinfección electrolítica	87
Figura 40. Ejemplo de curva en un experimento de cronoamperometría.....	88
Figura 41. Descomposición de DPD en presencia de cloro libre	89
Figura 42. Espectro de absorción del colorante de Würster	89
Figura 43. Dimensiones dispositivo de desinfección electroquímica vista isométrica	95
Figura 44. Dimensiones dispositivo de desinfección electroquímica vista superior	96
Figura 45. Dimensiones dispositivo de desinfección electroquímica vista frontal	96