



Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel

Degradación electroquímica de 1, 4-Benzoquinona en un reactor electroquímico tipo filtro prensa FM01-LC equipado con electrodos de Diamante Dopado con Boro (DDB)

TESIS

Que para obtener el Título Profesional
de Ingeniera Ambiental

Presenta

Frida Alicia Robles Palacios

Director

Dr. Ever Peralta Reyes

*Nunca ha habido otro comienzo que éste de ahora,
ni más juventud que ésta
ni más vejez que ésta;
y nunca habrá más perfección que la que tenemos
ni más cielo
ni más infierno que éste de ahora.*

-Walt Withman

Agradecimientos

Gracias a mis papás, Soledad y Fabián por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y por abrazarme siempre que lo necesité. Gracias a mis padrinos Beatriz y Álvaro, y a mi prima Dinorah, por darme un hogar todos estos años. A mi hermana Sol, por escucharme y animarme a que siempre vienen cosas mejores.

Gracias a mi mejor amiga Fanny, por siempre estar presente y porque cuando me desanimo siempre me alivia saber que puedo contar contigo. Gracias a mis amigos de la carrera. A Nereida, por ser la más chingona que he conocido, e inspirarme a siempre ser mejor por mí misma. A Lalo, por todo el aprendizaje que compartimos, por las alegrías y por escucharme y compartirme de tu fe cuando más lo necesitaba. A Chucho por apoyarme y animarme a seguir a pesar de las adversidades. A Michel, por los momentos lindos y por ayudarnos a crecer y mejorar como personas. A Liz, Dani, Ale y Luis, por la amistad, por las horas de estudio y todos los momentos lindos que pasamos que me impulsaron a seguir adelante.

Gracias al Dr. Ever Peralta por darme la oportunidad de trabajar con él y apoyarme en todo el proceso de experimentación y escritura de la tesis, al Dr. Alejandro Regalado por las asesorías y todo el apoyo para la realización de este trabajo. A los revisores de este trabajo, el Dr. Carlos Estrada, Dr. Edson Robles y la Dra. Gabriela Roa, por el tiempo que le dedicaron a leer mi trabajo y las observaciones que me ayudaron a mejorar. A Coral, por la amistad, el tiempo y el apoyo para poder realizar mis experimentos. Al Dr. Aitor Aizpuru, por los ánimos y el apoyo para poder culminar este trabajo. Y gracias a mis profesores de la carrera, por todo el conocimiento que aportó a mi crecimiento profesional y académico.

Gracias a mí, por no dejarme a la mitad del camino y tener paciencia de que las cosas siempre pueden mejorar. Y gracias a Jorge Manuel, que pesar de todo no lo hubiera logrado sin ti, gracias por ayudarme a creer en mí y que, aunque estoy chiquita, siempre podré con todo.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
2. Marco teórico	2
2.1. Compuestos Orgánicos Persistentes (COP)	2
2.2. 1, 4-Benzoquinona (1, 4-BQ)	3
2.3. Procesos de Oxidación Avanzada (POA)	8
2.4. Celdas electroquímicas	10
2.5. Tipos de electrodos	12
2.6. Electrodos de Diamante Dopado con Boro (DDB)	13
2.7. Reactores electroquímicos	14
2.7.1. Reactor de flujo pistón (PFR)	15
2.7.2. Reactor de mezcla perfecta por lotes	15
2.7.3. Reactor continuo de tanque agitado (CSTR)	16
2.8. Características del reactor FM01-LC	16
2.9. Diseño de experimentos	17
2.10. Optimización por Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)	19
2.11. Técnicas analíticas	22
2.11.1. Voltamperometría cíclica	22
2.11.2. Análisis de absorbancia	23
2.11.3. Cálculo de los costos del proceso	25
3. Antecedentes	26
3.1. Antecedentes del reactor FM01-LC	30
4. Justificación	32
5. Hipótesis	33
6. Objetivos	33

6.1.	General.....	33
6.2.	Específicos	33
7.	Desarrollo experimental	34
7.1.	Reactivos y soluciones.....	34
7.2.	Análisis de voltamperometría cíclica.....	34
7.3.	Sistema experimental.....	36
7.4.	Metodología de superficie de respuesta (MSR).....	39
7.5.	Análisis de absorbancia	40
7.6.	Cálculo de costos y consumo de energía a las condiciones óptimas	41
8.	Resultados y discusiones.....	42
8.1.	Análisis de voltamperometría cíclica.....	42
8.2.	Resultados de la degradación experimental.....	44
8.3.	Modelo y análisis de varianza.....	45
8.4.	Optimización para la respuesta del D (%)	49
8.5.	Validación del modelo	54
8.5.1.	Determinación de la curva de calibración	54
8.5.2.	Análisis de absorbancia.....	55
8.6.	Cinética de degradación.....	59
8.7.	Consumo de energía y costo de operación.....	60
9.	Conclusiones	61
10.	Bibliografía.....	62
11.	Apéndice 1. Productos obtenidos.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del compuesto 1, 4-BQ (National Center for Biotechnology Information, 2022; NJ Department of Health, 1998).....	4
Tabla 2. Clasificación de los POA (Poyatos, et. al., 2010)	8
Tabla 3. Potencial estándar de las especies oxidantes (Sirés, et. al., 2014).....	9
Tabla 4. Ecuaciones para el cálculo de los costos de operación del proceso. (Zhou, et. al., 2011, Barrera, et. al., 2018).	25
Tabla 5. Resumen de los antecedentes de la degradación de la 1,4-BQ.....	29
Tabla 6. Niveles para las variables independientes.	39
Tabla 7. Diseño experimental de la MSR ($2k + 2 k \pm a$).....	40
Tabla 8. Resultados de la degradación electroquímica de 1, 4- BQ,.....	44
Tabla 9. ANOVA para la respuesta del D (%).	46
Tabla 10. Criterios de restricción para la optimización de la degradación electroquímica de 1, 4-BQ.	49
Tabla 11. Condiciones de operación y resultados de investigaciones sobre la degradación de la 1,4-BQ, incluyendo a este trabajo.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro UV-VIS para la 1,4-BQ, tomado de Talrose, et. al., 2007.	5
Figura 2. Esquema representativo de la toxicodinámica de la hidroquinona derivada del benceno y de las enfermedades que provocan por la presencia de estos en la población de células de la médula espinal. (Tomado de Bolton, et. al., 2000).	6
Figura 3. Esquema de un ejemplo de celda electrolítica (Modificado de Zoski, 2007)	11
Figura 4. Esquema de un ejemplo de celda galvánica (Modificado de Zoski, 2007).....	11
Figura 5. Reacciones de oxidación del agua utilizando electrodos de DDB en medio ácido, con un electrolito soporte de HClO ₄ . (Tomado de Michaud, et. al., 2003).	13
Figura 6. Reactor de flujo pistón (Fogler, 2001)	15
Figura 7. Reactor de mezcla perfecta por lotes (Fogler, 2001).	15
Figura 8. Reactor continuo de tanque agitado (CSTR) (Fogler, 2001)	16
Figura 9. Representación gráfica del sistema experimental para la voltamperometría cíclica.	35
Figura 10. Representación gráfica del sistema experimental para la degradación de 1, 4-BQ.....	36
Figura 11. Reactor FM01-LC utilizado, en tiempo real de operación.....	37
Figura 12. Componentes del reactor FM01-LC.....	37
Figura 13. Arreglo de electrodos para el análisis de Voltamperometría cíclica.	42
Figura 14. Voltamperograma del barrido del Na ₂ SO ₄ 0.15 M (blanco) contra 1, 4-BQ 1x10 ⁻³ M (Compuesto de interés).	43
Figura 15. Diagrama de perturbación.	47
Figura 16. Correlación entre los datos predichos vs. datos experimentales.	48
Figura 17. Gráfico de contornos en 2D para la degradación de 1,4-BQ a partir de la MSR.	50
Figura 18. Gráfico de contornos en 3D para la degradación de 1,4- a partir de la MSR.	50
Figura 19. Región de operación.....	52
Figura 20. Gráfico de deseabilidad.....	53
Figura 21. Curva de calibración para la determinación del coeficiente de extinción molar.	54
Figura 22. Espectro UV obtenido de la degradación experimental de 1,4-BQ a las condiciones óptimas de operación.	55

Figura 23. Degradación de la 1,4-BQ a las condiciones óptimas de operación en términos de la concentración molar (M) con respecto al tiempo (horas).	56
Figura 24. Perfil cinético de la degradación de la 1,4-BQ a las condiciones óptimas de operación.	59
Figura 25. Certificado de la participación en el Twitter Latin American Conference EnvChemPSE	70

1. Introducción

El agua es un recurso natural que abarca aproximadamente el 70% de la superficie del planeta tierra, y es un recurso que juega un papel importante para el desarrollo y bienestar de los seres vivos (Fernández, 2012). Actualmente es difícil cubrir la demanda de recursos hídricos para el uso y consumo humano, ya que existen regiones que pueden acceder al agua de forma sencilla porque la zona está muy enriquecida con este recurso y también debido a que cuentan con la infraestructura y organización para poder suministrarla. Mientras que en otras zonas se observa una escasez muy notoria (De la Peña, *et. al.*, 2013; Samboni, *et. al.*, 2007), esto se debe principalmente al incremento de la población, la urbanización acelerada y la industrialización que, además también han provocado otros problemas como son, la contaminación ambiental, el cambio climático (Şahin & Manioğlu, 2019) y en algunas zonas distintas enfermedades debido a la ingesta de agua contaminada (Díaz, *et. al.*, 2012). Por consiguiente, desarrollar técnicas y procesos para el tratamiento de agua residual provenientes de efluentes industriales se ha vuelto imprescindible para disminuir la contaminación de los cuerpos de agua y las posibles crisis por la falta de abastecimiento de este recurso en el mundo (Guadarrama-Tejas, *et. al.*, 2016).

La electroquímica es una de las alternativas más populares que se han empleado en los últimos años para el tratamiento de aguas residuales (Elgrishi, *et. al.*, 2018). Por lo cual, para realizar un aporte ante esta problemática, en este estudio se realizó la degradación mediante procesos electroquímicos, del compuesto 1, 4-Benzoquinona (1, 4-BQ), el cual, es utilizado principalmente en las industrias de fotografía, cosmética y farmacéutica (Clayton & Clayton, 1982), también se genera como subproducto en la combustión del benceno a hidroquinona y, en los últimos años en el área de la medicina, comenzaron a investigar sobre su aplicación como inhibidor de enzimas promotoras de células cancerosas (Lindsey, *et. al.*, 2004; Singh & Winn, 2008). En consecuencia, se ha demostrado que este compuesto está presente en efluentes de aguas residuales a diferentes concentraciones y esta podría incrementarse debido a sus características persistentes (Pulgarin, *et. al.*, 1994). Por ello, el objetivo de este estudio fue realizar una electrolisis mediante un reactor electroquímico FM01-LC tipo filtro prensa de un solo compartimento equipado con electrodos de DDB, y a partir de esta obtener altos porcentajes de degradación de la 1, 4-BQ.