



# Universidad del Mar

*Campus Puerto Ángel*

Modelo paramétrico de la electro-oxidación de 2-clorofenol en un reactor de flujo continuo, equipado con electrodos de diamante dopado con boro (DDB).

Tesis

Que para obtener el Título Profesional  
de Ingeniería Ambiental

Presenta

Guadalupe Ramos Hernández

Director

Dr. Alejandro Regalado Méndez

Puerto Ángel, Oaxaca

Noviembre, 2023

## **DEDICADO A:**

### **MI FAMILIA**

Especialmente a mi padre **Maximino Ramos Ruiz**, aunque ya no estás conmigo, siempre recordaré lo que me dijiste - que el estudio es la mejor herencia que te puedo dejar -, y a mi madre **Juana Dolores Hernández García**, por ser un pilar grande en mi familia, te agradezco mucho por dejarme soñar durante todo este camino, gracias por hacerme fuerte e independiente, por regalarme la oportunidad de sobresalir y confiar en mí siempre. No existe mejor regalo en esta vida que haberlos tenido como padres y por hacerme magnífica ante cualquier circunstancia, este logro es suyo, gracias de todo corazón. Gracias también a ustedes; **Iván David, Eduardo Francisco, Esmeralda** mis amados hermanos y hermanita, no solo por su apoyo absoluto, sino también por aconsejarme y levantarme los ánimos cada que empezaba a rendirme por las diversas circunstancias, son los mejores. También le doy las gracias mi tío abuelo **Agustín** y mi bisabuelita **María Alberta** por el apoyo incondicional a mi familia y a mí en el momento más oportuno, a mis padrinos **Eva y Pedro**, por recibirme un tiempo en su hogar en un capítulo crucial, a **Luis Juárez y Martha Alicia García** ustedes fueron los seres más amables y considerados al permitirme tener un lugar donde vivir y trabajar, mi agradecimiento más profundo los quiero mucho, a mis tíos: **Nancy, Raquel, Gumaro, Cuauhtémoc, Caín, Agustín, Ulises, Anahí, Jesús, Beto**, a los que también son parte de haber cumplido esta meta. A mis primos **Ana Isela, Carlos Andrés, Kevin, Paola, Noe, Damián, Denilson, África, Caín, Dustín** y los que me faltan, gracias por su amistad, cariño y ayuda en momentos que los necesite. Y a mis **sobrinitas y sobrinitos** que este sea un regalo para que en un futuro puedan leer algo de su tía Lupita, sean mejores que nosotros. Y sobre todo a tí **Martín Ruiz Martínez** por ser mi mejor amigo, confidente y mi familia, por creer en mí, por saber que decirme, aconsejarme, por siempre estar ahí cuando lo necesitaba, gracias de todo corazón.

## **AGRADECIMIENTOS:**

### **A MI DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. Alejandro Regalado Méndez**, no sólo por dirigir esta tesis y brindarme nuevos conocimientos, sino por su apoyo durante el desarrollo de ésta investigación, pero principalmente por su paciencia, consejos y su amistad durante todo este tiempo, gracias por tenerme esa confianza y creer en mí, lo cual recordaré siempre **GRACIAS POR TODO**.

### **A MIS REVISORES**

**Dr. Ever Peralta Reyes, Dr. Edson Edinho Robles Gómez, Dr. Carlos Javier Escudero Santiago**, y **Dr. Mario Edgar Cordero Sánchez** por su colaboración en la revisión de este trabajo de investigación y mejorar aún más el presente documento.

### **A LA UMAR**

Por brindarme la oportunidad de ser partícipe de diversas experiencias que enriquecieron mis conocimientos y deseos de seguir progresando en esta rama de la ciencia, gracias por las facilidades prácticas, técnicas y la formación brindada, al conjunto académico que me impartió clases durante la licenciatura de Ingeniería Ambiental; María del Rosario Enríquez, María del Rocío Gutiérrez, Martín Zúñiga, Belem Espinoza, Susana García, Javier Salinas, Aitor Aizpuru, Cervando Sánchez, Carlos Estrada Vázquez, Juan Mentado, Eustacio Ramírez, Edgar Robles, Jorge Castro, German Enrique, Luis Antonio López, Minerva E Isis Camacho, Cristobal Santos, Ildefonso Figueroa, Bárbara Zavala, Concepción Martínez, Eduardo Juventino, Alberto Soto, Ricardo Rodrigo Hernández. Y también a otros profesores de la UMAR que en su momento aprendí de ellos; Mayra Mendoza, Cristian Hernández, Gerardo Martínez Villa, Gelia Sandoval, María Nieves Trujillo, Ivonne Sandra Santiago, Ángel Cuevas, Darla Torres y a los docentes de idiomas; Lic. Derek Joe, Mtro. Jeff William, Mtra. Claudia Mamet. Gracias por seguir mi travesía, así como:

A las doctoras que me dieron la oportunidad y confianza en mi primera estancia profesional en la UAMEX (CCIQS), Dra. Ruby Romero, Dra. Reyna Natividad, de igual manera a mis compañeras de laboratorio, gracias por su amistad, compañerismo y enseñanzas que me serán fundamentales en mi desarrollo profesional.

Por último pero no menos importante a mis amigos; Sol Marleth Ordaz Franco, Amairani Herrera López, Lizbeth Ortiz, Gibrán López Lucero, José Eduardo Arellano Hernández, Fabián López Martínez, María de los Ángeles Cruz Altamirano, Ezequiel Rodríguez,

Navidad Escamilla, Alberto Olmos, Héctor Hernández, Alberto Emmanuel, Luis Fernando Tapia, Abraham Cordero, Ricardo Canseco, Guereny Donaji, María de los Ángeles Olmedo, Guadalupe Enríquez, Danae Narany, Citlaly Farias, Edgar Cruz Jarquín, Abraham Matus, Roberto y muchos más... y de la UMAR; Ana Cecilia Najera, Luis Marvin, Dulce Gaspar, Juanito, Alma, Elva, Iván Méndez, Luis Enrique, Elva, Omar, Alexis Chimeo, Aylin Ramírez Salinas, Andrea Elizabeth, Michelle, Eduardo Salazar, Laurita, Luis Gonzalo, Diego, Pedro, Jesús, Hugo, Ángel de los Santos, Juan Manuel, Gandí, Quero, Noé, Perla, Silvia, Dany, Diego, Fernando, Tania, Dali, Magda y a todos mis compañeros de la universidad que en su momento compartieron algunas de sus experiencias conmigo.

A cada uno de ustedes: ¡gracias!...

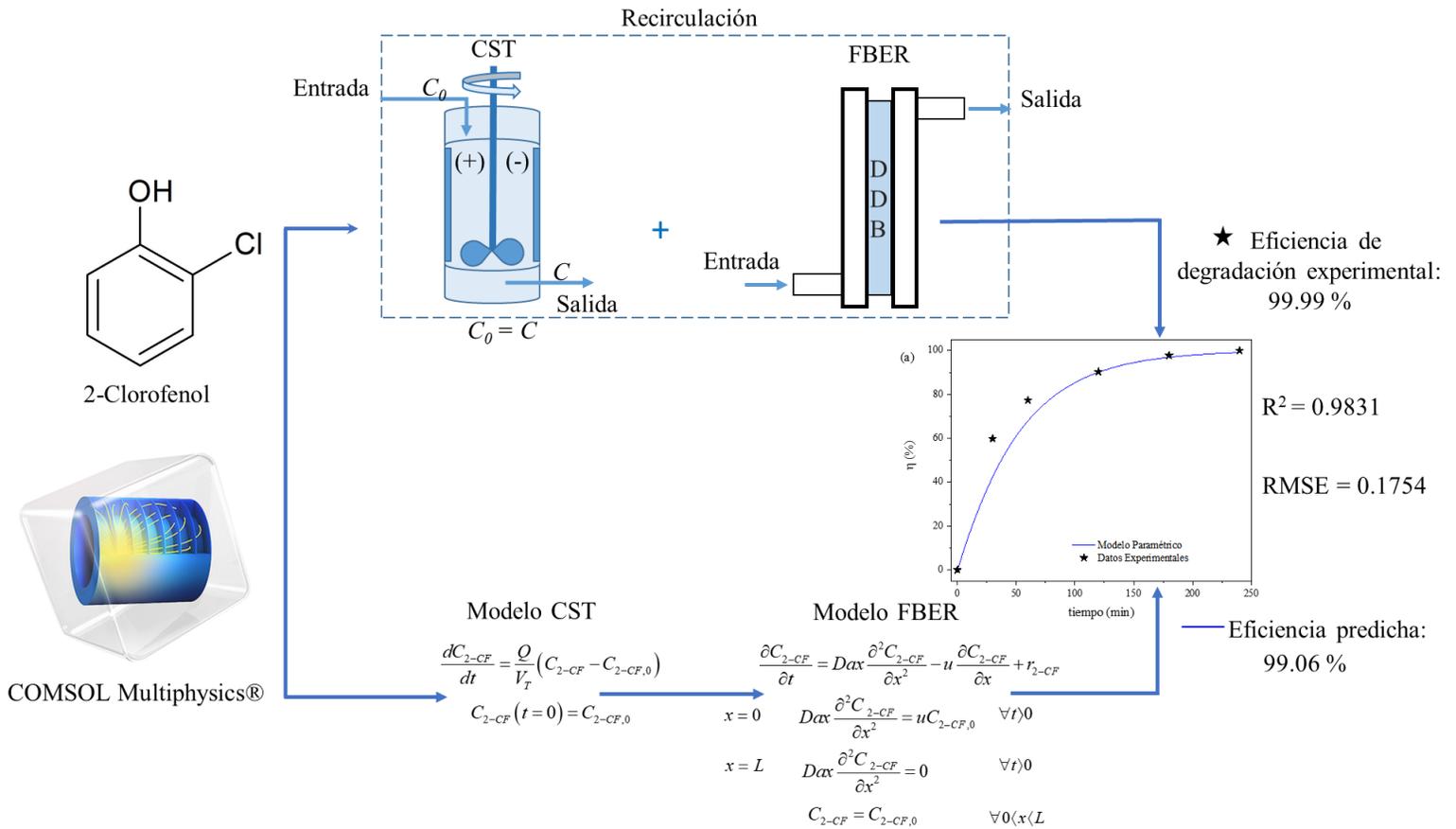
## RESUMEN

El actual trabajo describe un modelo matemático paramétrico de la electro-oxidación de 2-clorofenol (2-CF) mediante un reactor de flujo continuo, tipo filtro prensa FM01-LC, equipado con electrodos de diamante dopado con boro (DDB). El modelado paramétrico de 2-CF se resolvió numéricamente utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics® 5.3. Para el sistema completo de electrólisis se basó en el modelo de dispersión axial (modelo del reactor electroquímico de flujo (FBER, por sus siglas en inglés)), acoplado a un tanque de recirculación, empleando el modelo del tanque de agitado continuo (CST, por sus siglas en inglés), para obtener la eficiencia del proceso de electro-oxidación.

Las dimensiones del FBER son de 0.234 m de longitud total  $\times$  0.048 m de ancho, con una longitud efectiva de 0.20 m, provisto de electrodos DDB (0.2 m), y un espesor de canal de 0.005 m. El volumen del CST es de 3.5 L y el volumen de la solución sintética de agua residual tratada de 2-CF (1 mol/m<sup>3</sup> en 0.1 M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> como soporte electrolítico con una conductividad de 16.230  $\mu$ S/cm) de 2.5 L. La degradación electroquímica de 2-CF sigue una pseudocinética de reacción de primer orden ( $k_{ap} = 1.19178 \text{ h}^{-1}$ ), a un pH inicial de 7.3 y una densidad de corriente de 0.14 A/m<sup>2</sup>. Mientras tanto, los parámetros hidrodinámicos son el coeficiente de dispersión de  $5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , la velocidad lineal de 0.0947 m/s y el caudal volumétrico de líquido de 1.0 L/min. El modelado paramétrico de 2-CF se resolvió numéricamente utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics® 5.3, donde el modelo que representa la FBER es la ecuación de transferencia de masa para especies diluidas acoplada a una ecuación diferencial global (EDO's y EDA's) que representa al CST.

Los resultados indican que el modelo paramétrico está muy de acuerdo con los resultados experimentales por su valor del coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.9831$ ) y el valor del error cuadrático medio reducido (RMSE = 0.1754). Asimismo, la eficiencia de degradación del 2-CF estimada por el modelo paramétrico fue del 99.06 %, mientras que la eficiencia de degradación experimental alcanzada fue del 99.99 %, con un error relativo del 0.93 %. Basado en lo anterior, se confirma la capacidad predictiva del modelado paramétrico propuesto en esta tesis, brindando así una alta eficiencia de electro-oxidación del 2-CF.

# RESUMEN GRÁFICO DEL PROCESO



# ÍNDICE

RESUMEN .....	VI
RESUMEN GRÁFICO DEL PROCESO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	XIII
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIV
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	2
2.2. CONTAMINANTES EMERGENTES (CE).....	3
2.3. 2-CLOROFENOL (2-CF).....	4
2.3.3. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE 2-CLOROFENOL .....	4
2.4. ELECTROQUÍMICA.....	5
2.5. MÉTODOS DE TRATAMIENTO EN AGUAS RESIDUALES .....	5
2.6. PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA (POAs).....	6
2.6.3. VENTAJAS DE LOS POAs .....	7
2.6.4. DESVENTAJAS DE LOS POAs.....	7
2.7. PROCESO ELECTROQUÍMICO DE OXIDACIÓN AVANZADA (PEOAs).....	7
2.7.3. VENTAJAS DE LOS PEOAs .....	7
2.8. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA O ELECTRO-OXIDACIÓN .....	8
2.9. ELECTRODOS .....	9
2.9.3. TIPOS DE ELECTRODOS.....	9
2.10. ELECTRODOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO (DDB) .....	11
2.11. CELDA ELECTROQUÍMICA.....	11
2.12. CELDA ELECTROLÍTICA .....	12
2.13. ELECTRO-OXIDACIÓN DEL AGUA CON ELECTRODOS DDB .....	13
2.14. REACTORES .....	14

2.14.3.	TIPOS DE REACTORES .....	15
2.14.4.	REACTORES ELECTROQUÍMICOS .....	17
2.15.	REACTOR TIPO FILTRO PRENSA FM01-LC .....	18
2.15.3.	APLICACIONES DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO FM01-LC .....	20
2.16.	DIFINICIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARAMÉTRICO.....	22
2.17.	ETAPAS DE UN MODELADO MATEMÁTICO PARAMÉTRICO.....	23
2.17.3.	ETAPA DE CONSTRUCCIÓN.....	23
2.17.4.	ETAPA DE ESTUDIO.....	23
2.17.5.	ETAPA DE PRUEBA O EVALUACIÓN .....	24
2.17.6.	ETAPA DE USO O APLICACIÓN.....	24
2.18.	MODELADO PARA UN PROCESO ELECTROQUÍMICO.....	24
2.18.3.	FENÓMENO TERMODINÁMICO .....	25
2.18.4.	FENÓMENO CINÉTICO .....	25
2.18.5.	FENÓMENO HIDRÁULICO .....	25
2.18.6.	FENÓMENO DE TRANSPORTE DE MASA Y CALOR .....	25
2.19.	DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD).....	26
2.20.	CÓDIGOS PARA LA SIMULACIÓN EN CFD.....	28
2.20.3.	PRE-PROCESADOR.....	28
2.20.4.	SOLUCIONADOR.....	29
2.20.4.1.	MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO .....	29
2.20.5.	POST-PROCESADOR.....	29
2.21.	COMSOL MULTIPHYSICS®.....	30
CAPÍTULO III .....		31
3.	ANTECEDENTES.....	31
3.1.	MODELADO DE UN REACTOR ELECTROQUÍMICO TIPO FILTRO PRENSA (FM01-LC), CON CFD .....	31
3.1.3.	ANTECEDENTES SOBRE EL MODELADO A TRAVÉS DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD) PARA FM01-LC.....	31
CAPÍTULO IV .....		39
4.	JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS.....	39
4.1.	JUSTIFICACIÓN .....	39

4.2.	HIPÓTESIS .....	40
4.3.	OBJETIVOS .....	40
4.3.3.	OBJETIVO GENERAL .....	40
4.3.4.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	40
CAPÍTULO V .....		41
5.	METODOLOGÍA .....	41
5.1.	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL DE 2-CLOROFENOL EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO FM01-LC .....	41
5.1.3.	AGUA RESIDUAL SINTÉTICA CON 2-CLOROFENOL .....	42
5.2.	ESTUDIO DE LA ELECTRÓLISIS EXPERIMENTAL DE 2-CLOROFENOL EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO .....	42
5.3.	ANÁLISIS DTR Y DISPERSIÓN AXIAL EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO .....	43
5.4.	DESARROLLO DEL MODELO PARAMÉTRICO EN COMSOL MULTIPHYSICS® 5.3 .....	46
5.4.3.	PRE-PROCESO .....	48
5.4.3.1.	DEFINICIONES GLOBALES .....	48
5.4.3.1.1.	PARÁMETROS .....	48
5.4.3.2.	COMPONENTE .....	49
5.4.3.2.1.	GEOMETRÍA .....	49
5.4.3.2.2.	MATERIALES .....	49
5.4.3.2.3.	TRANSPORTE DE ESPECIES DILUIDAS (tds) .....	49
5.4.3.2.4.	EDO's y EDA's GLOBALES (ge) .....	50
5.4.3.2.5.	ESTUDIO (paso 1: Temporal) .....	50
5.4.4.	SOLUCIÓN .....	50
5.4.5.	POST-PROCESO .....	50
5.5.	CONSIDERACIONES DEL MODELO PARAMÉTRICO EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE FLUJO CONTINUO, EQUIPADO CON ELECTRODOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO (DDB) .....	50
5.6.	MODELO DE DIPERSIÓN AXIAL PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE FLUJO CONTINUO (FBER) .....	51
5.7.	MODELADO PARA EL TANQUE DE AGITADO CONTINUO (CTS) DEL TANQUE DE RESERVA .....	52

5.8. SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO PARAMÉTRICO .....	52
5.9. VALIDACIÓN DEL MODELO CINÉTICO Y PARAMÉTRICO .....	53
CAPÍTULO VI .....	54
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
6.1. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA Y DISPERSIÓN AXIAL .....	54
6.2. MODELO PARAMÉTRICO DE LA ELECTRO-OXIDACIÓN DE 2- CLOROFENOL VERSUS DATOS EXPERIMENTALES, Y MODELO CFD (REGALADO-MÉNDEZ ET AL. 2019).....	54
CAPÍTULO VII.....	59
7. CONCLUSIONES .....	59
7.1. TRABAJOS A FUTURO .....	60
REFERENCIAS .....	61
ANEXOS .....	71
ANEXO 1. GRÁFICA SIMULADA EN COMSOL MULTIPHYSICS® 5.3 DEL MODELADO PARAMÉTRICO DE LA ELECTRO-OXIDACIÓN DE 2-CF. ....	71
ANEXO 2. GRÁFICA DISEÑADA EN ORIGIN, QUE COMPARA LA DEGRADACIÓN DE 2-CF A 4 HORAS DE TRATAMIENTO, MODELO PARAMÉTRICO ( $C_0 = 0.0094333 \text{ MOL/M}^3$ ), MODELO CFD (REGALADO ET AL. 2019) ( $C_0 = 0.0013 \text{ MOL/M}^3$ ) Y DATOS EXPERIMENTALES ( $C_0 = 0.0001 \text{ MOL/M}^3$ ). .....	71
ANEXO 3. USO DE MATLAB® PARA ENCONTRAR LOS NÚMEROS DE PECLET. ....	72
ANEXO 4. USO DE MATLAB® PARA EL ANÁLISIS COMPLETO DEL DTR. ..	73
ANEXO 5. USO DE MATLAB® PARA LA VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS DTR. .....	74
ANEXO 6. LICENCIA DE PERMISO DE REIMPRESIÓN DE LA TABLA 4 DEL ARTÍCULO; “MODELING AND HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF A FILTER-PRESS-TYPE ELECTROCHEMICAL REACTOR BY USING RESIDENCE TIME DISTRIBUTION ANALYSIS AND HYDRAULIC INDICES”, POR REGALADO-MÉNDEZ ET AL., 2018, WALTER DE GRUYTER AND COMPANY, VOLUMEN (16), PÁG.20170210 [91]. ....	76
APÉNDICE: PRODUCTOS OBTENIDOS .....	77
PRODUCTO DE INVESTIGACIÓN .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de tratamiento de aguas residuales .....	6
Figura 2. Interacción soluto-disolvente, proceso que ocurre al adicionar la especie $i$ a una disolución acuosa. ....	9
Figura 3. Electrodo formado al ponerse en contacto un metal con una solución acuosa. ....	10
Figura 4. Electrodo formado al poner en contacto una membrana semipermeable en solución acuosa de la especie $i$ . ....	10
Figura 5. Celda electroquímica típica [27].....	11
Figura 6. Proceso de disociación en celda electrolítica (electrólisis).....	12
Figura 7. Proceso de electro-oxidación del agua en el electrodo DDB [30]. ....	13
Figura 8. Clasificación de los retores de acuerdo al patrón de flujo: ideales y no ideales [35].....	15
Figura 9. Reactor Batch .....	16
Figura 10. Reactor de tanque de agitado continuo (CSTR).....	16
Figura 11. Reactor PFR. ....	17
Figura 12. Rector de lecho empacado o con catalizador.....	17
Figura 13. Reactor tipo filtro prensa FM01-LC.....	18
Figura 14. Montaje de un reactor electroquímico tipo filtro prensa 1) placas de apriete; 2) juntas poliméricas; 3) electrodos; 4) junta polimérica; 5) compartimento; 6) salida de líquido; 7) entrada de líquido [28]. ....	19
Figura 15. Orden de las piezas del reactor electroquímico FM01-LC [42] .....	19
Figura 16. Diagrama de flujo de las etapas del modelado[52].....	23
Figura 17. Especificaciones para diseñar un modelo matemático de un reactor electroquímico [54].....	24
Figura 18. Mecanismos de transporte de masa al electrodo[59]. ....	26
Figura 19. Módulos que integran COMSOL Multiphysics® 5.3 [7]. ....	30
Figura 20. Geometría del electrodo 3D carbón vítreo reticulado a) electrolito que se alimenta perpendicularmente al canal, configuración real. b) electrolito que se alimenta paralelo al canal, CFD.....	32
Figura 21. Modelo geométrico de reactor FM01-LC, paso de fluido en el canal [68]. ....	32
Figura 22. a) Configuración 3D del reactor FM01-LC; b) Configuración geométrica de electrodos de 5 mallas promotora de turbulencia [69]. ....	33
Figura 23. Simulación de la sección transversal de la distribución de potencial primario dentro del reactor electroquímica FM01-LC [70] .....	34
Figura 24. Componentes y la configuración del reactor electroquímico tipo filtro prensa FM01-LC [63]. ....	35
Figura 25. Esquema de la configuración experimental de la degradación electroquímica de 2-CF .....	42

Figura 26. Diagrama del reactor electroquímico empleado para los experimentos del análisis DTR, inyección del trazador. ....	44
Figura 27. Asistente de modelo, a) icono correspondiente a la selección del asistente de modelo, b) icono para la selección de la dimensión del espacio de trabajo. ....	46
Figura 28. Selección física; a) Transporte de especies químicas, a1) Transporte de especies diluidas (tds), b) Matemática → Interfaz EDO y EDA → EDO's y EDA's globales (ge), c) Al finalizar la selección de la interfaz físicas se selecciona → Estudio. ....	47
Figura 29. Selección de estudio; a) Estudios generales → Temporal, b) Se abre la ventana de trabajo, empezando por agregar las definiciones globales → Parámetros (variables de modelo matemático paramétrico). ....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de 2-CF[18] .....	5
Tabla 2. Especies con su poder oxidativo ( $E^\circ$ )[15].....	8
Tabla 3. Reactores electroquímicos tipo filtro prensa FM01-LC y sus aplicaciones.....	20
Tabla 4. Dimensiones del electrodo DDB del reactor FM01-LC. ....	35
Tabla 5. Comparación de estudios de índices hidráulicos en reactores electroquímicos tipo filtro prensa FM01-LC [6] ANEXO 6. ....	36
Tabla 6. Valores de la dispersión axial .....	46
Tabla 7. Parámetros del modelo paramétrico.....	48
Tabla 8. Parámetros obtenidos del análisis de la distribución de tiempos de residencia (DTR). ....	54
Tabla 9. Resumen de los valores de los parámetros obtenidos para el modelo de dispersión axial. ....	54
Tabla 10. Comparación de la electro-oxidación de 2-CF, datos experimentales, modelo CFD (Regalado et al. 2019), modelo paramétrico (este trabajo). ....	58

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Validación la curva de concentración del pulso trazador del modelo de dispersión axial en COMSOL Multiphysics® 5.3 mediante el ajuste de los datos experimentales dados por el análisis DTR a un caudal de flujo ( $Q$ ) de 1 L/min. ....	55
Gráfica 2. Eficiencia de la degradación de 2-CF, modelo paramétrico ( $\eta = 99.06\%$ ), modelo CFD (Regalado et al. 2019) ( $\eta = 99.87\%$ ), datos experimentales ( $\eta = 99.99\%$ ). ....	56
Gráfica 3. Paridad de la eficiencia de degradación de 2-CF, modelo matemático paramétrico versus datos experimentales. ....	57

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**2-CF:** 2-clorofenol  
**DDB:** Diamante dopado con boro  
**FBER:** Reactor electroquímico de flujo (Flow-By Electrochemical Reactor)  
**CST:** Tanque de agitado continuo (Continuous Stirred Tank)  
**FM01\_LC:** Filtro monopolar 01\_celda de laboratorio (Filter Monopolar 01 Laboratory Cell)  
**PTAR:** Planta tratadora de agua residual  
**CE:** Contaminantes emergentes  
**COE:** Contaminantes orgánicos emergentes  
**POAs:** Proceso de oxidación avanzada.  
**PEOAs:** Proceso electroquímico de oxidación avanzada.  
**DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno  
**DQO:** Demanda química de oxígeno  
**EDO's:** Ecuaciones diferenciales ordinarias  
**EDA's:** Ecuaciones diferenciales parciales  
**•OH:** Radical hidroxilo  
**CFD:** Dinámica computacional de fluidos (Computational Fluid Dynamic)  
**ISE:** Electrodo de ion selectivo (Ion Selective Electrodes)  
**DTR:** Distribución del tiempo de residencia  
**UHPLC:** Cromatografía líquida de ultra alta resolución (Ultra High Performance Liquid Chromatography)  
**SCI:** Índice de cortocircuito (Short-Circuiting Index)  
**MVE:** Eficiencia volumétrica de Morrill  
**MDI:** Índice de dispersión de Morrill  
**MDA:** Modelo de dispersión axial  
**RMSE:** Error cuadrático medio reducido (Root-Mean-Square Error)  
**DSA:** Ánodo dimensionalmente estable (Dimensionally Stable Anode)  
**pH:** Escala logarítmica de acidez o basicidad adimensional  
**rpm:** Revoluciones por minuto  
**vs:** Versus (comparación)

## LISTA DE SÍMBOLOS

***u:*** Velocidad del fluido de líquido (m/s)  
***D<sub>ax</sub>:*** Coeficiente de dispersión axial (m<sup>2</sup>/s)  
***Q:*** Caudal de flujo volumétrico (L/min)  
***R<sup>2</sup>:*** Coeficiente de determinación (adimensional)  
***k<sub>ap</sub>:*** Constante de velocidad aparente (h<sup>-1</sup>)  
***μS:*** Micro Siemens  
***Pe:*** Número de Peclet (adimensional)  
***Re:*** Numero de Reynolds (adimensional)  
***j:*** Densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>)  
***V:*** Volumen del recipiente (L o m<sup>3</sup>)  
***V<sub>a</sub>:*** Volumen del reactor de espacio muerto (L o m<sup>3</sup>)  
***A:*** Área (m<sup>2</sup>)  
***μ :*** Viscosidad dinámica del fluido (kg m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>)

**$t$** : Tiempo, (horas (h), minutos (min), segundos (s))  
 **$t_m$** : Distribución del tiempo de residencia media o primer momento  
 **$\tau_{teórico}$** : Tiempo de residencia teórico (s)  
 **$s^3$** : Tercer momento o  $\sigma^3$   
 **$F$** : Distribución acumulada del tiempo de residencia (s)  
 **$dx$** : Derivada de una variable (x)  
 **$dt$** : Derivada de tiempo (t)  
 **$C_0$** : Concentración inicial (mg/L)  
 **$C$** : Concentración en el tiempo t (mg/L)  
 **$C_{paso, Máx}$** : Concentración máxima del paso (mg/L)  
 **$C_{paso}$** : Concentración del paso (mg/L)  
 **$C_{pulso}$** : Concentración del pulso (mg/L)  
 **$C_{2-CF}$** : Concentración de 2-clorofenol ( $\text{mol m}^{-3}$ )  
 **$C_{2-CF,0}$** : Concentración inicial de 2-clorofenol ( $\text{mol m}^{-3}$ )

### SÍMBOLOS GRIEGOS

**$\nu$** : Viscosidad cinemática del fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 **$\sigma^2$** : Varianza ( $\text{s}^2$ ) o segundo momento  
 **$\tau$** : Tiempos dimensionales (dimensional)  
 **$\partial C_{2-CF} / \partial x$** : Proceso de transporte por convección  
 **$\partial^2 C_{2-CF} / \partial x^2$** : Proceso de transporte por difusión  
 **$\lambda$** : Eficiencia hidráulica  
 **$\nabla$** : Gradiente  
 **$\Delta$** : Incrementar o cambiar  
 **$\forall$** : Para todo  
 **$\xi$** : Avance de la reacción en términos de la concentración  
 **$N$** : Número adimensional de unidad de transferencia de masa  
 **$f^*$** : Radio de retención adimensional  
 **$e$** : Porcentaje de volumen útil ( $e = t_p / \tau_{teórico}$ ) (adimensional)