



UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

INGENIERÍA AMBIENTAL

Modelo Hidrodinámico de una Celda
Electroquímica Tipo Filtro Prensa por Medio
de un Análisis de Distribución de Tiempos de
Residencia

Tesis

Que para obtener el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Presenta

Silvia Rocío Torres Zárate

Director

Dr. Alejandro Regalado Méndez

Puerto Ángel, Oaxaca, México, Febrero de 2018

DEDICADO A:

Mis padres por su apoyo y confianza incondicional, por brindarme la oportunidad de salir a perseguir mis sueños. Mi madre, por su amor, paciencia y consuelo en los momentos difíciles. Mi padre, por sus consejos y por enseñarme a trabajar duro para conseguir mis metas. Eternamente agradecida.

Mis hermanos, en especial para la persona que más admiro, mi hermana Naty, gracias por enseñarme que los grandes sueños requieren de grandes sacrificios, porque siempre tuviste las palabras exactas que me ayudaron a continuar en los momentos difíciles. A mi hermano Pedro, que a la distancia y con grandes sacrificios apoyó en todo momento a la familia. Nunca olvidaré todo lo que has hecho.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por proporcionar la beca para llevar a cabo mi tesis a través del proyecto titulado “Simulación y Control de una Celda Electroquímica Tipo Filtro Prensa en la Degradación de Contaminantes” con número de oficio DSA/103.5/16/10242 y CUP: 2II1605.

A la UMAR, por abrirme las puertas y darme las facilidades para formarme como profesional, por enriquecer mis expectativas de crecimiento en lo laboral y personal. A todos los profesores que compartieron sus conocimientos dentro y fuera del aula de clases, gracias por entregar su tiempo a la noble labor de formar nuevos profesionales.

A mi director de tesis, por la confianza y apoyo para llevar a buen término este trabajo y por el tiempo y paciencia que dedicó a mis labores en el proyecto.

A mis revisores de tesis, Dr. Carlos Estrada Vázquez, Dr. Ever Peralta Reyes, Dr. Juan Mentado Morales, y Dr. Gerardo Martínez Villa, por sus observaciones que ayudaron mejorar este trabajo.

A mis amigas, Yesenia, Guadalupe, Monserrat, Karla y Gabriela que aunque lejos siempre trataron de estar al pendiente de mí, gracias por sus mensajes de apoyo y por no olvidarse de nuestra amistad.

A mis amigos y compañeros de la universidad, gracias por compartir su tiempo conmigo, por las aventuras y los divertidos momentos que vivimos, plasmando una maravillosa época de mi vida. Gracias por coadyuvar a mi progreso como persona y formación como profesional. Mis agradecimientos por brindar lo mejor de ustedes para lograr en conjunto la culminación de esta misión.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo obtener el modelo hidrodinámico de una nueva configuración de la celda electroquímica tipo filtro prensa (FM01-LC), a través de un análisis de distribución de tiempos de residencia. Para llevar a cabo este trabajo, la parte experimental se hizo mediante la técnica estímulo-respuesta, con la inyección por pulso del trazador en la entrada del reactor, y se monitoreó a la salida por dos métodos: a) Resistencia eléctrica y b) Conductividad eléctrica. Los experimentos realizados se efectuaron a cuatro velocidades de flujo; 0.5, 1.0, 1.5 y 1.8 L/min.

El trabajo se encuentra dividido de la siguiente manera, primero se presenta la Introducción, en la que se describe la importancia del estudio de la hidrodinámica de los reactores, y se explican los modelos ideales y reales, así como la teoría del análisis de distribución de tiempos de residencia. Enseguida se presenta el estado del arte, en donde se resume los antecedentes relacionados con el estudio de la hidrodinámica por medio de DTR en celdas electroquímicas tipo filtro prensa FM01-LC, pero bajo diferentes configuraciones. Luego se presenta la justificación del proyecto, la hipótesis, el Objetivo general y específicos. Enseguida se describe la metodología empleada durante el estudio, que incluye la descripción del equipo, material y reactivos. Después se presentan los resultados y la discusión, y por último, las conclusiones de esta investigación.

El análisis de las curvas $E(t)$ y $F(t)$ obtenidas a partir de los datos experimentales muestran que hay poca dispersión dentro de la celda electroquímica, además de la posibilidad de la existencia de un corto circuito y un ajuste al Modelo de Dispersión Axial (MDA). También, se caracterizó el comportamiento hidrodinámico, ajustando los datos al modelo empírico de Wolf-Resnick, a través del cual se encontrando el porcentaje de flujo pistón y flujo de mezcla completamente generados dentro de la celda en función del flujo. El mejor ajuste de los datos experimentales a los modelos propuestos es el flujo volumétrico de 1.5 L/min, con un 71.71% de flujo pistón y un 28.29% de flujo completamente mezclado. Los resultados principales demuestran que es posible caracterizar el flujo dentro de la celda por DTR.

Finalmente en el Apéndice 1 se muestran los resúmenes y constancias de las participaciones en congresos nacionales “XXXIX Encuentro Nacional de la AMIDIQ” e internacionales, del “10th World Congress of Chemical Engineering”. En el Apéndice 2 se presentan los programas que se ejecutaron en Matlab® para obtener los parámetros v , Re , Pe , D_{ax} y para el ajuste de los modelos de Wolf-Resnick y de dispersión axial a los datos experimentales.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	8
1.1.	Reactores	8
1.2	Reactor tipo filtro prensa.....	12
1.3	Distribución de Tiempos de Residencia (DTR)	16
1.4	Curvas de distribución acumulativa F	18
1.5	Técnicas experimentales	19
1.6	Trazadores.....	20
1.7	Modelo matemático.....	21
1.7.1	Modelo de dispersión axial	23
1.7.2	Modelo de tanques agitados en serie	23
1.7.3	Modelos combinados o de compartimentos.....	24
1.7.4	Modelo matemático de Wolf-Resnick para flujo real	25
1.8	Índice de dispersión de Morrill o Morris (IDM)	26
2.	Estado del Arte.....	28
3.	Justificación.....	35
4.	Hipótesis	36
5.	Objetivo General	36
6.	Objetivos Específicos	36
7.	Metodología	37
7.1	Disoluciones y reactivos.....	37
7.2	Materiales y equipo.....	37
7.3	Desarrollo experimental	39
7.4	Obtención de las curvas DTR	39
7.5	Desarrollo del modelo	39
8.	Resultados y discusión.....	44
8.1	Caracterización hidráulica de la celda electroquímica tipo filtro prensa.....	44
8.2	Ajuste de los datos experimentales a los modelos de dispersión axial y de Wolf-Resnick.....	56
9.	Conclusiones.....	58
10.	Nomenclatura.....	59

11. Referencias	61
12. Apéndice 1	65
13. Apéndice 2	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las aplicaciones del reactor electroquímico tipo filtro prensa FM01-LC.	13
Tabla 2. Dimensiones del electrodo DDB del reactor FM01-LC.....	34
Tabla 3. Parámetros obtenidos del análisis de las curvas $E(t)$	48
Tabla 4. Resumen de los valores de los parámetros obtenidos para el modelo de dispersión axial.....	51
Tabla 5. Índice de dispersión de Morrill en la celda electroquímica	52
Tabla 6. Parámetros de desempeño hidráulico del reactor electroquímico.	53
Tabla 7. Resultados del modelo de Wolf-Resnick.....	54
Tabla 8. Eficiencias hidráulicas del reactor FM01-LC.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reactor ideal tipo batch (Levenspiel, 2004).	9
Figura 2: Reactor ideal con tanque agitado (Levenspiel, 2004).	10
Figura 3. Reactor ideal de flujo tipo pistón (Levenspiel, 2004).	11
Figura 4. Esquema del montaje de un reactor tipo filtro prensa. 1) Placas de apriete; 2) Juntas poliméricas; 3) Electrodo; 4) Junta polimérica; 5) Compartimento; 6) Salida de líquido; 7) Entrada de líquido (Frías-Ferrer, 2004).	12
Figura 5: Vista de las piezas del reactor electroquímico FM01-LC (Rivero <i>et al.</i> 2015)	13
Figura 6. (a) Función E y (b) Función F con flujo tipo pistón ideal y flujo de mezclado perfecto, y respuestas con volumen muerto y cortocircuito (Rodríguez et al., 2012).	19
Figura 7. Varias formas de estudiar el patrón de flujo en los reactores (Levenspiel, 2004).	20
Figura 8. Modelos para patrones de flujo en un reactor ideal y uno no ideal (Elaboración propia).	22
Figura 9. Tipos de flujo no ideal que pueden presentarse en equipos de procesos (Levenspiel, 2004).	24
Figura 10. Curva 1-F (t) según el modelo de Wolf-Resnick (Rodríguez et al., 2012).	26
Figura 11. Componentes y configuración del reactor electroquímico tipo filtro prensa empleado en este trabajo (Elaboración propia).	34

Figura 12. Diagrama de la celda electroquímica empleada para los experimentos de DTR. a) Detección del trazador a la salida por resistencia eléctrica y b) detección del trazador a la salida por conductividad eléctrica.	38
Figura 13. a) Condiciones de frontera. Recipiente cerrado-cerrado; b) Condiciones de flujo en $z = 0$	41
Figura 14. Condiciones de frontera de Danckwerts.	42
Figura 15. Señal de impulso de resistencia eléctrica contra tiempo registrada a diferentes velocidades de flujo (Q) a la salida de la celda electroquímica.	44
Figura 16. Curvas de distribución de tiempo de residencia normalizadas que se obtuvieron a partir de los experimentos en que se registró la resistencia eléctrica a la salida de la celda electroquímica tipo filtro prensa.	45
Figura 17. Señal de impulso de conductividad eléctrica contra el tiempo registrada a diferentes velocidades de flujo (Q) a la salida de la celda electroquímica.	46
Figura 18. Curvas de distribución de tiempo de residencia normalizadas que se obtuvieron a partir de los experimentos en que se registró la conductividad eléctrica a la salida de la celda electroquímica tipo filtro prensa.	47
Figura 19. Curvas de distribución acumulativa (F) de los experimentos de resistividad eléctrica para cuatro diferentes velocidades de flujo.	49
Figura 20. Curvas de distribución acumulativa (F) de los experimentos de conductividad eléctrica para cuatro diferentes velocidades de flujo.	50
Figura 21. (a) Gráfica del coeficiente de dispersión axial dividida por la viscosidad cinemática, D_{ax}/ν en comparación con Re , a partir de los datos en que se registró la resistencia eléctrica. (b) Gráfica del coeficiente de dispersión axial dividida por la viscosidad cinemática, D_{ax}/ν , en comparación con Re , a partir de los datos en los que se registró conductividad eléctrica.	52
Figura 22. Curvas para determinar los parámetros θ_{W-R} y $\tan(\alpha)$ por el método de Wolf-Resnick.	54
Figura 23. Ajuste de los datos experimentales a los modelos MDA y Wolf-Resnick.	57