



UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

**OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA DEL REFORMADO
ELECTROQUÍMICO DE GLICEROL EN UN REACTOR BATCH
EQUIPADO CON ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE
PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

DIEGO ANTONIO VIZARRETEA VÁSQUEZ

DIRECTOR:

Dr. ALEJANDRO REGALADO MÉNDEZ

Ciudad Universitaria, Puerto Ángel, Oaxaca, México, 2022.

Contenido

RESUMEN	6
CAPÍTULO 1	7
1.1 MARCO TEÓRICO	7
1.1.1 Biodiesel	7
1.1.2 Glicerol	8
1.1.3 Hidrógeno	8
1.1.4 Celdas electroquímicas	9
1.1.5 Reformado electroquímico de glicerol	11
1.1.6 Electrodo de acero inoxidable	13
1.1.7 Metodología de superficie de respuesta	14
1.1.8 Diseño central compuesto centrado en sus caras (DCCCF)	17
1.2 ANTECEDENTES	18
CAPÍTULO 2	24
2.1 JUSTIFICACIÓN	24
2.2 HIPÓTESIS	25
2.3 OBJETIVO GENERAL	25
2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
CAPÍTULO 3	26
3.1 METODOLOGÍA	26
3.1.1 Construcción de la celda electrolítica	26
3.1.2 Construcción del sistema de enfriamiento	27
3.1.3 Construcción de las tapas con los electrodos (sistema de cierre)	27
3.1.4 Prueba del reactor	29
3.2 Disoluciones y reactivos	30
3.2.1 Configuración experimental	31
3.2.2 Electro-oxidación de glicerol	32
3.2.3 Mediciones analíticas	34
3.2.4 Mediciones analíticas	34
3.2.5 Proceso de optimización	35
CAPÍTULO 4	36
4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1.1 Primera parte. Determinación de los parámetros de la electro-oxidación	36
4.1.2 Segunda parte. Optimización de los parámetros de operación	40

4.1.2.1 Ajuste del modelo y ANOVA	40
4.1.2.2 Interacciones entre factores	42
4.1.2.3 Análisis de varianza	43
4.1.2.4 Optimización de la producción de hidrógeno	47
4.1.2.5 Validación del modelo	52
4.1.2.6 Costo total de operación.....	52
CAPÍTULO 5	55
5.1 CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA	56
Lista de Productos obtenidos en el desarrollo del presente proyecto de tesis	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura típica de una celda electrolítica donde se realiza la electrólisis del agua (Fuente: Chang, 2002).....	11
Figura 2. (a) Una superficie de respuesta tridimensional que muestra el rendimiento esperado en función de la temperatura y la presión. (b) Un gráfico de contorno de una superficie de respuesta (Fuente: Montgomery, 2013).....	16
Figura 3. DCC con (a) dos factores y (b) tres factores.....	18
Figura 4. Diagrama esquemático de la carcasa del reactor cilíndrico de PVC.	27
Figura 5. Diagrama esquemático del sistema de enfriamiento.	28
Figura 6. Sistema de cierre reactor-chaqueta de enfriamiento.	29
Figura 7. Sistema experimental utilizado, para la electro-oxidación de glicerol en este estudio.....	32
Figura 8. Gráfica de comportamiento de electro-oxidación de glicerol de 0 a 120 min.	37
Figura 9. Concentraciones de H ₂ y O ₂ obtenidas durante la electrólisis del agua y la electro-oxidación de glicerol, comparadas con la concentración de oxígeno en el aire.	38
Figura 10. Perfiles de CH ₂ y CO ₂ generados por el proceso electrolítico a diferentes concentraciones iniciales de glicerol (G).	39
Figura 11. Coorrelación entre valores predichos y valores experimentales para las respuestas: a) η_{CH_2} y b) η_{CO_2}	45
Figura 12: Diagramas de perturbación para (a) η_{CH_2} y (b) η_{CO_2}	46
Figura 13. Gráfica de contorno para la respuesta η_{CH_2} para C _G e I.	49
Figura 14. Gráfica 3D para la respuesta η_{CH_2} para C _G e I.	49
Figura 15. Gráfica de contorno para la respuesta η_{CO_2} para C _G e I.	50
Figura 16. Gráfica 3D para la respuesta η_{CO_2} para C _G e I.	50
Figura 17. Barras de deseabilidad.....	51
Figura 18. Gráfica de región óptima para C _G e I.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Carga de los electrodos en cada uno de los dos tipos de celdas electroquímicas.	10
Tabla 2. Resumen de condiciones de operación en varios experimentos con reactores para la electro-oxidación de hidrógeno.	23
Tabla 3. Serie de experimentos sugeridos por el FCCCD.	30
Tabla 4. Información técnica sobre el glicerol.	31
Tabla 5. Niveles de los factores.	34
Tabla 6. Resultados de la optimización del proceso experimental de electro-oxidación del glicerol.	41
Tabla 7. ANOVA para la producción de hidrógeno.	44
Tabla 8. Valores del índice de sensibilidad SXi (para η_{CH_2} y η_{CO_2}).	47
Tabla 9. Criterios restrictivos para la optimización del proceso de producción de hidrógeno.	48
Tabla 10. Condiciones óptimas de funcionamiento del proceso de producción de hidrógeno.	52
Tabla 11. Tabla comparativa de varios procesos de reformado electroquímico de glicerol para la producción de hidrógeno bajo diversas condiciones de operación.	54

PALABRAS CLAVE

Biodiesel; Electro-oxidación; hidrógeno, Glicerol; Optimización Paramétrica, Metodología de superficie de respuesta.

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS	SIGNIFICADO
C_{H_2}	Concentración de hidrógeno (mg/L)
C_{O_2}	Concentración de oxígeno (mg/L)
C_G	Concentración de glicerol (M)
E_{Con}	Consumo de energía específico (kWh kg ⁻¹ H ₂)
F	Constante de Faraday (96.485 C/mol)
H ₂	Hidrógeno
I	Intensidad de corriente (A)
M	Masa molecular del hierro (g/mol)
$Masa_{H_2}$	Masa de hidrógeno (kg)