



Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel

**“DESEMPEÑO DINÁMICO DE COLUMNAS TIPO
PETLYUK PARA LA PURIFICACIÓN DE UNA MEZCLA DE
CUATRO COMPONENTES”**

TESIS

Que como requisito para obtener el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Presenta

Anyeli Yajaira Angelina Martínez

Director

Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández

Puerto Ángel, Oaxaca a Marzo del 2017.

Dedicatoria

A mis padres: Elia y David. Por todos los sacrificios que han hecho, con el único propósito de hacer de sus hijos personas de bien. ¡Gracias por todo!

A mis hermanos Bilma, Christian y David.

A una gran persona: Kristen. Quien desde su llegada ha llenado de risas y amor esta vida 😊.

“He buscado a través de lo físico, lo metafísico, lo delirante,... y vuelvo a empezar. Y he hecho el descubrimiento más importante de mi carrera, el más importante de mi vida. Sólo en las misteriosas ecuaciones del amor, puede encontrarse alguna lógica”

John Nash

Agradecimientos

Al Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández por permitirme formar parte de su grupo de trabajo y por la oportunidad dada para realizar este proyecto de tesis bajo su dirección.

A César, por la amistad brindada y por estar en todo momento para dar respuesta al gran número de dudas que surgieron a lo largo de este proyecto.

A los revisores, gracias por las observaciones realizadas, todas con el fin de mejorar.

M.I.Q. César Ramírez Márquez

Ing. Martín Zúñiga Ramírez

M. en C. Cervando Sánchez Muñoz

Dra. María del Rosario Enríquez Rosado.

A Eduardo, Brenda y Juan José, compañeros de la UG.

A mis compañeros de generación: Ángel, Liz, Jared, Juan Manuel, Vicente y de manera especial a Mayra.

A los integrantes del tan entrañable "Club de los Vasos Rojos": Ale Honda, Lalo Chan, Iván, Abril, Olmo, Carlos, Diana y Jared. ¡Por todos los buenos momentos! =D

A Dani...

A todas aquellas personas que de algún modo han formado parte de este proyecto que comenzó hace más de 5 años.

Contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Destilación	5
2.2 Principios de la destilación	6
2.2.1 Presión de vapor.....	6
2.2.2 Volatilidad relativa	7
2.2.3 Equilibrio Líquido-Vapor.....	8
2.3 Tipos de columnas de destilación por tipo de operación	8
2.3.1 Columnas batch.....	9
2.3.2 Columnas continuas	9
2.4 Diseño de una columna de destilación	10
2.4.1 Métodos gráficos.....	10
2.4.2 Métodos cortos	10
2.4.3 Métodos rigurosos	11
2.5 Destilación con ahorros de energía.....	11
Capítulo 3 DESEMPEÑO DINÁMICO A LAZO CERRADO	16
3.1 Sistemas de Control.....	16
3.1.1 Sistema de control a lazo abierto.....	17
3.1.2 Sistema de control a lazo cerrado.....	17
3.1.3 Elementos de un lazo de control.....	18
3.2 Tipos de controladores.....	19
3.2.1 Controlador Proporcional (P)	19
3.2.2 Controlador Proporcional-Integral (PI)	20
3.2.3 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	21
3.3 Selección del tipo de controlador	22
3.4 Criterios de estabilidad	22
3.4.1 Integral absoluta del error (IAE).....	23
3.4.2 Integral cuadrada del error (ISE)	23
3.4.3 Integral absoluta del error ponderada con el tiempo (ITAE)	23
3.4.4 Integral cuadrada del error ponderada con el tiempo (ITSE).....	23
Capítulo 4 ANTECEDENTES	24
4.1 Secuencias de destilación para mezclas ternarias	25
4.1.1 Ahorros energéticos	25
4.1.2 Diseño de Columnas Térmicamente Acopladas	25

4.1.3	Control de Columnas Térmicamente Acopladas	27
4.2	Secuencias de destilación para mezclas cuaternarias.....	29
Capítulo 5 JUSTIFICACIÓN.....		31
Capítulo 6 HIPÓTESIS		32
Capítulo 7 OBJETIVO.....		33
7.1	Objetivo general.....	33
7.1.1	Objetivos particulares	33
Capítulo 8 METODOLOGÍA.....		34
8.1	Caso de estudio	34
8.2	Optimización de la carga térmica.....	37
8.3	Cuantificación de la emisión de CO ₂	39
8.4	Análisis dinámico a lazo cerrado	40
Capítulo 9 RESULTADOS		42
9.1	Especificaciones de diseño	42
9.2	Optimización de la carga térmica y CO ₂	43
9.2.1	Secuencia A	43
9.2.2	Secuencia B.....	44
9.2.3	Secuencia C.....	46
9.2.4	Secuencia D	48
9.2.5	Secuencia E.....	50
9.3	Cambios de set point individual	53
9.4	Cambios de set point consecutivo	57
9.5	Variación en el flujo de alimentación.....	61
9.5.1	Secuencia A	61
9.5.2	Secuencia B.....	63
9.5.3.	Secuencia C.....	65
9.5.3	Secuencia D	67
9.5.4	Secuencia E.....	69
Capítulo 10 CONCLUSIONES.....		72
Capítulo 11 ANEXOS.....		73
Capítulo 12 BIBLIOGRAFÍA.....		78

Índice de Figuras

Figura 1.1. Tasa media anual de crecimiento de la población para el año 2015. Fuente: State World Population, 2013.	1
Figura 1.2. Emisiones de CO2 por sector, 2009. Fuente: Balance Nacional de Energía, SENER.	2
Figura 2.1. Diagrama de una columna de destilación.....	6
Figura 2.2. Diagrama de equilibrio liquido-vapor para una mezcla binaria.....	8
Figura 2.3. Secuencias de destilación térmicamente acopladas: a) con rectificador lateral, b) con agotador lateral, c) con acoplamiento térmico total o Petlyuk.	13
Figura 2.4. Columna de Pared Divisoria (DWC).....	14
Figura 2.5. a) Secuencia de destilación convencional directa y b) Perfil de concentraciones para una secuencia de destilación directa.	15
Figura 3.1. Diagrama de un sistema.....	16
Figura 3.2. Diagrama de un sistema a lazo cerrado.	17
Figura 3.3. Elementos de un lazo de control.....	18
Figura 3.4. Esquema que representa el problema de offset en un controlador Proporcional.	19
Figura 8.1. Secuencias de destilación alternativas a la columna Petlyuk propuestas por Madenoor, et. al. (2015).....	36
Figura 8.2. Diagrama de flujo para la optimizar la carga térmica de las secuencias de destilación alternativas a la columna Petlyuk en estado estacionario.	38
Figura 8.3. Diagrama de flujo para la sintonización y obtención de los parámetros óptimos del controlador PI.	41
Figura 9.1. a) Corrientes de interconexión modificadas en la minimización de la carga térmica en la secuencia A y b) Carga térmica mínima de la secuencia A.	43
Figura 9.2. Corrientes de interconexión modificadas en la minimización de la carga térmica en la secuencia B.	44

Figura 9.3. Valores de carga térmica obtenidos en la modificación de los flujos de interconexión de la secuencia B.	45
Figura 9.4. Corrientes de interconexión modificadas en la minimización de la carga térmica en la secuencia C.	46
Figura 9.5. Valores de carga térmica obtenidos en la modificación de los flujos de interconexión de la secuencia C.	47
Figura 9.6. Corrientes de interconexión modificadas en la minimización de la carga térmica en la secuencia D.	48
Figura 9.7. Valores de carga térmica obtenidos en la modificación de los flujos de interconexión de la secuencia D.	49
Figura 9.8. Corrientes de interconexión modificadas en la minimización de la carga térmica en la secuencia E.	50
Figura 9.9. Valores de carga térmica obtenidos en la modificación de los flujos de interconexión de la secuencia E.	51
Figura 9.10. Respuesta dinámica del Butano para un cambio de setpoint individual.	54
Figura 9.11. Respuesta dinámica del Hexano para un cambio de setpoint individual.	54
Figura 9.12. Respuesta dinámica del Octano para un cambio de setpoint individual.	55
Figura 9.13. Respuesta dinámica del Decano para un cambio de setpoint individual.	55
Figura 9.14. Respuesta dinámica del Butano para un cambio de setpoint consecutivo.	58
Figura 9.15. Respuesta dinámica del Hexano para un cambio de setpoint consecutivo.	58
Figura 9.16. Respuesta dinámica del Octano para un cambio de setpoint consecutivo.	59
Figura 9.17. Respuesta dinámica del Decano para un cambio de setpoint consecutivo.	59
Figura 9.18. Respuesta dinámica de la secuencia A al variar el flujo de alimentación.	62
Figura 9.19. Respuesta dinámica de la secuencia B al variar el flujo de alimentación.	64
Figura 9.20. Respuesta dinámica de la secuencia C al variar el flujo de alimentación.	66
Figura 9.21. Respuesta dinámica de la secuencia D al variar el flujo de alimentación.	68
Figura 9.22. Respuesta dinámica de la secuencia E al variar el flujo de alimentación.	70

Índice de Tablas

Tabla 8.1. Mezcla cuaternaria de hidrocarburos analizados.	34
Tabla 8.2. Composición en la corriente de salida y fracción mol de la corriente de alimentación de las secuencias analizadas para un flujo de alimentación de 100 kmol/h.	34
Tabla 9.1. Especificaciones de diseño de las columnas alternativas.	42
Tabla 9.2. Carga térmica y emisiones de CO ₂ para cada una de las secuencias analizadas.	52
Tabla 9.3. Valores de IAE para las secuencias estudiadas al realizar una perturbación de 0.5 % en la pureza de salida.	56
Tabla 9.4. IAE por componente de cada una de las secuencias analizadas.	60
Tabla 9.5. Máxima variación en el flujo de alimentación realizada a cada secuencia.	71