



UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

“Control de Esquemas tipo Petlyuk para Separar una Mezcla de Butano, 2-metilbutano, Pentano y Hexano”

Tesis

Que para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Presenta:

Vicente Vicente Cortazar

Director:

Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández

Dedicatoria

A mis padres: Rosa y Cheyo.

A mis hermanos: Manolo, René, Cinthia y Job.

Agradecimientos

A la Universidad del Mar y profesores, por mi formación profesional y humana.

Al Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández, por darme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección.

Al M.I.Q. César Ramírez Márquez, una excelente persona y profesionista, una pieza elemental de este proyecto.

A la Dra. Rosario Enríquez, quien siempre mostró la disponibilidad para escucharme, ayudarme y asesorarme. Infinitamente, muchas gracias.

A M.C. Cervando Sánchez e Ing. Martín Zúñiga, quienes revisaron y aprobaron este trabajo.

A Juan José y Eduardo, integrantes del equipo de trabajo de Guanajuato, quienes tuvieron una importante participación en este proyecto.

A mis amigos, casi hermanos, Chel, Marlene y Vidal, con quienes he compartido casi nueve años de amistad, y en los cuales hemos vivido un sin número de aventuras.

A mis compañeros de generación: Mayra, Jared, Ángel, Anyeli y Liz, con quienes tuve una buena relación y amistad.

A Lalo Chan y al Q. Saúl, por permitirme trabajar conjuntamente y formarme profesionalmente.

¡Gracias!

Nomenclatura

A: Butano	PI: Controlador Integral
B: 2-Metilbutano	PID: Controlador proporcional e Integral.
C: Pentano	Q: Carga térmica.
D: Hexano	RR: Relación de Reflujo
DWC: Columna de Pared Divisoria.	S1: Secuencia de destilación 1.
Error: Definida como la diferencia entre la variable medida y el valor deseado, a partir de la magnitud, tiempo y velocidad de variación.	S2: Secuencia de destilación 2.
F: Flujo de alimentación.	S3: Secuencia de destilación 3.
h_j: Entalpia de líquido.	S4: Secuencia de destilación 4.
H_j: Entalpia de vapor	S5: Secuencia de destilación 5.
IEA: Integral Absoluto del Error.	SDD: Secuencia de destilación directa.
Kc: Parámetro de ganancia en el controlador.	SDI: Secuencia de destilación Indirecta.
L_F: Flujo de alimentación en fase líquido.	Set point: Punto de ajuste, valor deseado.
L_n: Líquido de retorno.	TCDS-SR: Secuencia de destilación térmicamente con rectificador lateral.
N_{min}: Etapas mínimas	TCDS-SS: Secuencia de destilación térmicamente con agotador lateral.
Offset: Variación constante de la variable de proceso respecto al punto de ajuste.	T_e: Temperatura de entrada.
P: Controlador proporcional	V_F: Flujo de alimentación en fase vapor

Símbolos griegos

α: Volatilidad relativa de los componentes
ϕ: Fracción líquida
Θ: Constante Underwood

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Destilación	4
2.2 Columnas de destilación convencionales	4
2.2.1 Sistemas de ecuaciones que rigen a una columna de destilación.....	6
2.2.2 Diseño de columnas convencionales.....	7
2.3 Destilación convencional de mezclas multicomponentes.....	9
2.4 Columnas térmicamente acopladas.....	11
2.5 Sistemas de control.....	13
2.5.1 Sistema de control a lazo abierto.....	14
2.5.2 Sistema de control a lazo cerrado.....	16
2.6 Controladores retroalimentados convencionales	18
2.6.1 Controlador proporcional (P).....	18
2.6.2 Controlador Proporcional + integral (PI)	19
2.6.3 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID).....	20
2.7 Criterios de desempeño	21
2.8 Selección del tipo de controlador	22
3. ANTECEDENTES.....	23
3.1 Columnas Tipo Petlyuk	23
3.1.1 Columna de Pared Divisoria (DWC)	24
3.1.2 Estudios de diseño y control columna Petlyuk para mezcla ternaria.	25
3.1.3 Estudios de diseño y control columna tipo Petlyuk mezclas cuaternarias	30
3.2 Nuevas configuraciones de Columnas de pared dividida para separar mezclas cuaternarias.	32

3.3 Aplicaciones industriales de la DWC.....	33
4. JUSTIFICACIÓN.....	36
5. HIPÓTESIS	37
6. OBJETIVOS	37
6.1 Objetivo General.....	37
6.2 Objetivos Particulares.....	37
7. METODOLOGÍA.....	38
7.1 Caso de estudio	38
7.2 Secuencias de destilación.....	39
7.3 Optimización de las columnas Petlyuk.....	41
7.4 Análisis dinámico a lazo cerrado.....	42
7.5 Cuantificación de CO ₂	44
8. RESULTADOS	45
8.1 Diseño óptimo de las secuencias en estado estacionario.....	45
8.1.1 Secuencia S1.....	46
8.1.2 Secuencia S2.....	49
8.1.3 Secuencia S3.....	52
8.1.4 Secuencia S4.....	55
8.1.5 Secuencia S5.....	58
8.2 Análisis de las secuencias en estado dinámico	62
8.2.1 Sintonización de los parámetros óptimos a lazo cerrado.....	62
8.2.2 Análisis de Sintonización a lazo Cerrado.....	81
8.2.3 Respuestas dinámicas a cambios de <i>Set Point</i> simultáneos.....	87
8.2.4 Respuestas dinámicas frente a un cambio en la composición de alimentación.....	93

8.2.5 Cuantificación de CO ₂ por secuencia	106
8.2.6 Resumen y análisis comparativo de las secuencias de destilación en relación con la demanda energética y sus propiedades de control.	106
9. CONCLUSIONES	109
9.1 Recomendaciones	110
10. REFERENCIAS.....	111

i. Índice de Tablas

Tabla 7.1. Composición del flujo de alimentación.	38
Tabla 8.1. Especificaciones de diseño óptimo para la secuencia S1.	47
Tabla 8.2. Especificaciones de diseño óptimo para la secuencia S2	50
Tabla 8.3. Especificaciones de diseño óptimo para la secuencia S3.	53
Tabla 8.4. Especificaciones de diseño óptimo para la secuencia S4.	57
Tabla 8.5. Especificaciones de diseño óptimo para la secuencia S5.	60
Tabla 8.6. Resumen de los valores óptimos de sintonización y IAE	82
Tabla 8.7. Valor de IAE con cambios consecutivos de escalón.	88
Tabla 8.8. Modificación de los flujos de alimentación en función del lazo de estudio para la secuencia S2.	94
Tabla 8.9. Modificación de los flujos de alimentación en función del lazo de estudio para la secuencia S2.	96
Tabla 8.10. Modificación de los flujos de alimentación en función del lazo de estudio para la secuencia S3.	98
Tabla 8.11. Modificación de los flujos de alimentación en función del lazo de estudio para la secuencia S4.	101
Tabla 8.12. Modificación de los flujos de alimentación en función del lazo de estudio para la secuencia S4.	103
Tabla 8.13. Cuantificación de CO ₂	106
Tabla 8.14. Jerarquización de las secuencia de destilación.	108

ii. Índice de Figuras

Figura 1.1 Generación de energía por tipo de combustible (IAE, 2015).....	1
Figura 1.2. Emisiones de CO ₂ a nivel mundial (Banco Mundial, 2016).	2
Figura 2.1. Elementos de una columna de destilación convencional.	5
Figura 2.2. Variables que intervienen en una columna de destilación convencional.	7
Figura 2.3. Secuencia de destilación convencional para mezclas ternarias: a) SDD, b) SDI.	10
Figura 2.4. Efecto de remezclado en la SDD.	10
Figura 2.5. Secuencias de destilación térmicamente acoplada: a) TCDS-SS, b) TCDS-SR y c) Petlyuk.	12
Figura 2.6. Variables que intervienen en un proceso.	14
Figura 2.7. Sistema de control a lazo abierto.	15
Figura 2.8. Sistema de control a lazo cerrado (Angulo y Raya, 2004).	17
Figura 3.1. a) Columna Petlyuk; b) Columna de pared divisoria.	25
Figura 3.2. Diseño de una columna Petlyuk.	26
Figura 3.3. a) Columna Petlyuk para mezclas cuaternarias, b) Columna térmicamente equivalente (DWC).	31
Figura 3.4. Configuraciones alternativas al esquema Petlyuk (Madenoor <i>et al.</i> , 2015).	33
Figura 3.5. Fotografía de una columna de 7-m de diámetro transportado a la planta de BASF (Dejanovic, 2010).	34
Figura 3.6. Fotografía de la coraza y el dibujo ilustrando la configuración interna de una DWC para separar una alimentación de cuatro componentes en productos puros (Dejanovic, 2010).	35
Figura 7.1. Diseño de las secuencias alternativas al esquema Petlyuk.	40
Figura 7.2. Diagrama de flujo para la optimización de las columnas.	41
Figura 7.3. Diagrama de flujo para la sintonización del controlador PI en función de IAE mínimo.	43
Figura 8.1. Perfiles de optimización de la Secuencia S1	46
Figura 8.2. Perfiles de optimización de la Secuencia S2.....	49

Figura 8.3. Perfiles de optimización de la Secuencia S3.....	52
Figura 8.4. Perfiles de optimización de la Secuencia S4.....	55
Figura 8.5. Perfiles de optimización de la Secuencia S5.....	59
Figura 8.6. Lazos de control heurísticos para la secuencia S1.	63
Figura 8.7. Sintonización de los parámetros para el lazo A de la secuencia S1. ...	63
Figura 8.8. Sintonización de los parámetros para el lazo B de la secuencia S1. ...	64
Figura 8.9. Sintonización de los parámetros para el lazo C de la secuencia S1. ...	64
Figura 8.10. Sintonización de los parámetros para el lazo D de la secuencia S1.	65
Figura 8.11. Lazos de control heurísticos para la secuencia S2.	66
Figura 8.12. Sintonización de los parámetros para el lazo A de la secuencia S2.	66
Figura 8.13. Sintonización de los parámetros para el lazo A1 de la secuencia S2.	67
Figura 8.14. Sintonización de los parámetros para el lazo B de la secuencia S2.	67
Figura 8.15. Sintonización de los parámetros para el lazo C de la secuencia S2.	68
Figura 8.16. Sintonización de los parámetros para el lazo D de la secuencia S2.	68
Figura 8.17. Lazos de control heurísticos para la secuencia S3.	69
Figura 8.18. Sintonización de los parámetros para el lazo A de la secuencia S3.	70
Figura 8.19. Sintonización de los parámetros para el lazo A1 de la secuencia S3.	70
Figura 8.20. Sintonización de los parámetros para el lazo B de la secuencia S3.	71
Figura 8.21. Sintonización de los parámetros para el lazo C de la secuencia S3.	72
Figura 8.22. Sintonización de los parámetros para el lazo D de la secuencia S3.	72
Figura 8.23. Lazos de control heurísticos para la secuencia S4.	73
Figura 8.24. Sintonización de los parámetros para el lazo A de la secuencia S4.	74
Figura 8.25. Sintonización de los parámetros para el lazo A1 de la secuencia S4.	74
Figura 8.26. Sintonización de los parámetros para el lazo B de la secuencia S4.	75
Figura 8.27. Sintonización de los parámetros para el lazo C de la secuencia S4.	75
Figura 8.28. Sintonización de los parámetros para el lazo D de la secuencia S4.	76
Figura 8.29. Lazos de control heurísticos para la secuencia S4.	77
Figura 8.30. Sintonización de los parámetros para el lazo A de la secuencia S5.	78

Figura 8.31. Sintonización de los parámetros para el lazo A1 de la secuencia S5.	78
Figura 8.32. Sintonización de los parámetros para el lazo A2 de la secuencia S5.	79
Figura 8.33. Sintonización de los parámetros para el lazo B de la secuencia S5.	79
Figura 8.34. Sintonización de los parámetros para el lazo C de la secuencia S5.	80
Figura 8.35. Sintonización de los parámetros para el lazo D de la secuencia S5.	80
Figura 8.36. Comportamiento dinámico del componente A (butano) que sale de la columna principal.	83
Figura 8.37. Comportamiento dinámico del componente B (2-metilbutano).....	83
Figura 8.38. Comportamiento dinámico del componente C (pentano).	84
Figura 8.39. Comportamiento dinámico del componente D (hexano).	85
Figura 8.40. Comportamiento dinámico del componente A (butano) que sale de la segunda columna prefraccionadora.	86
Figura 8.41. Comportamiento dinámico del componente A (butano) que sale de la primera columna prefraccionadora.....	86
Figura 8.42. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente A que sale de la columna principal.	89
Figura 8.43. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente B.	89
Figura 8.44. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente C.....	90
Figura 8.45. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente D.....	91
Figura 8.46. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente A que sale de la segunda columna prefraccionadora.	92
Figura 8.47. Comportamiento dinámico a cambios consecutivos de <i>set point</i> del componente A que sale de la primera columna prefraccionadora.....	92
Figura 8.48. Respuesta dinámica de la secuencia S1, lazo A.....	95
Figura 8.49. Respuesta dinámica de la secuencia S1, lazo B.....	95
Figura 8.50. Respuesta dinámica de la secuencia S1, lazo C	95

Figura 8.51. Respuesta dinámica de la secuencia S1, lazo D.....	95
Figura 8.52. Respuesta dinámica de la secuencia S2, lazo A.....	97
Figura 8.53. Respuesta dinámica de la secuencia S2, lazo A2.....	97
Figura 8.54. Respuesta dinámica de la secuencia S2, lazo B.....	97
Figura 8.55. Respuesta dinámica de la secuencia S2, lazo C	97
Figura 8.56. Respuesta dinámica de la secuencia S2, lazo D	98
Figura 8.57. Respuesta dinámica de la secuencia S3, lazo A.....	99
Figura 8.58. Respuesta dinámica de la secuencia S3, lazo A1	100
Figura 8.59. Respuesta dinámica de la secuencia S3, lazo B.....	100
Figura 8.60. Respuesta dinámica de la secuencia S3, lazo C	100
Figura 8.61. Respuesta dinámica de la secuencia S3, lazo D.....	100
Figura 8.62. Respuesta dinámica de la secuencia S4, lazo A.....	102
Figura 8.63. Respuesta dinámica de la secuencia S4, lazo A1.....	102
Figura 8.64. Respuesta dinámica de la secuencia S4, lazo B.....	102
Figura 8.65. Respuesta dinámica de la secuencia S4, lazo C.....	102
Figura 8.66. Respuesta dinámica de la secuencia S4, lazo D.....	103
Figura 8.67. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo A.....	104
Figura 8.68. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo A1	104
Figura 8.69. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo A2.....	104
Figura 8.70. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo B.....	104
Figura 8.71. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo C.....	105
Figura 8.72. Respuesta dinámica de la secuencia S5, lazo D.....	105
Figura 8.73. Demanda energética requerida por cada secuencia de destilación.	107