



UNIVERSIDAD DEL MAR CAMPUS PUERTO ÁNGEL

“Desempeño Dinámico de Sistemas de Destilación tipo
Petlyuk para la Purificación de Hidrocarburos”

Tesis

Que para obtener el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Presenta:

Evaristo Lucero Robles

Director:

Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández

Puerto Ángel, Oax.

Enero de 2015.

Dedicatoria

Ña tutu ni sá xinoe vichi kúu ña ni sa'e xí amina yuu noó tatae, nanae, xíi ndi'i na ñani ña ni sáxino na ini in kií ni kane ve'e kua'e inca ñoo na xá kua'e. Ni chincheé na yu, ni kandíxa na yu'u. Iyó kií va'a, sava tu kií nóo va, ra na yóo saá xiyo na xí'i ncha ni xa in kií vichi xa ni sá xinoe in ña koni kua'a kií.

Tá kúu ndi'i na ve'e Morga Ojeda ña ni ndakoná na ánima na noó yu, ni chincheé na yu, ni kandíxa na yu'u, saá tu ni sá na'a na yu koe xi'i na táto na ve'e na kua'a ona kuiya vichin.

Con amor y cariño a mi padre, mi madre y a todos mis hermanos por motivarme en cumplir mi sueño cuando me mudé a otro lado para estudiar. Por creer en mí, apoyarme en todo momento hasta la fecha.

A la familia Morga Ojeda porque me abrieron su corazón y me cobijaron cuando más lo necesitaba, confiaron en mí y me hicieron sentir en casa durante los últimos ocho años.

Agradecimiento

“Koóo ví a kuví sa'é ña ndasamé i ña iyo, tu ndií saá kií sa'é sá'a vé. Ña kuachi lo'o iyo kúu ña va'a vaxí noó na yuví xí'i ñoo ná'no vachi, chi ña yó'o vaxía nchaka ña va'a nooindií yó. Noó ña víí ini káku ña nóo va saá tu ña kií nchaka ña ñoo vaxía xía. Ñaká ña kuachí lo'o sá kaku ña va'a, ña nda ni'í yó i ña xaáa xí'i ña nisaa sa'é takua kama sáa ndií. Tá kúu ndi'i na va'a yá'a noó ña cuiachi lo'o va'á sá kinoa na noó mií va na tá kua vava yá'a na noó ña”

Albert Einstein

“No pretendamos que las cosas cambien si siempre hacemos lo mismo. La crisis es la mejor bendición que puede sucederle a personas y países, porque la crisis trae progreso. La creatividad nace de la angustia como el día nace de la noche oscura. Es en la crisis que nacen la inventiva, los descubrimientos y las grandes estrategias. Quien supera las crisis se supera a sí mismo sin quedar superado”

Albert Einstein

A la Jefatura de la Carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad del Mar, por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de alumnos, y a los profesores por todas las enseñanzas, por su empeño en hacer de mí una mejor persona.

Le agradezco infinitamente al Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández, por darme la oportunidad de realizar esta tesis bajo su dirección y por confiar en mí. Gracias por su paciencia y su tiempo invertido en mi aprendizaje.

A los revisores, Dra. Rosario Enríquez, Dr. Héctor Puebla, M. en C. Cervando Sánchez y el Ing. Martín Zúñiga que fueron parte fundamental para el desarrollo de ese trabajo.

A mis amigos de Guanajuato (Benjamín, Brenda, César, Eduardo, Jesús, Juan José, Julián, María, Soraya, Toño, y Valeria), por haberme brindado su apoyo incondicional para la elaboración de esta tesis.

A mis padres por ser parte de este trabajo y hacer realidad mi sueño.

A David Morga y Gloria por aceptarme en su familia cuando más necesitaba ayuda, darme consejos, preocuparse, enseñarme a ser valiente en todo momento. A David, Lucero y Axel por aceptarme como un hermano, por los momentos inolvidables que me regalaron.

A Elizabeth, por llegar a mi vida y enseñarme que siempre hay motivos para disfrutar la vida y que el camino no es difícil como parece. Por ser una persona tan linda conmigo, buena amiga, compañera de clases y obligarme a hacer mis tareas. Sobre todo gracias por la paciencia que me has tenido, y hacerme feliz en cada momento.

De la misma manera a los buenos amigos que conocí (Maleni, Liz, Pablo, Isaías, Kevin, Nancy, Margarita, Esmeralda, y otros), por su apoyo y momentos de alegría. Y a mis compañeros de clases por tenerme paciencia en todo momento.

¡Gracias!

Nomenclatura

A: Ciclopentano.	partir de la magnitud, tiempo y velocidad de variación.
B: Benceno.	
C: Tolueno.	ET: Número de etapas totales.
D: Etilbenceno.	FA: Flujo de alimentación [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
Di: Diámetro [cm].	FD: Flujo de destilado [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
DE: Demanda energética [kW]	FF: Flujo de fondo [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
E: Diciclopentadieno.	FIL1: Flujo de interconexión de líquido 1 [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
EA: Etapa de alimentación.	FIV1: Flujo de interconexión de vapor 1 [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
EC: Energía en el condensador [kW].	FIV2: Flujo de interconexión de vapor 2 [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
EIL1: Etapa de interconexión de líquido 1.	FIL2: Flujo de interconexión de líquido 2 [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
EIV1: Etapa de interconexión de vapor 1.	FPL: Flujo del producto lateral [$\text{kmol}\cdot\text{h}^{-1}$].
EIV2: Etapa de interconexión de vapor 2.	IAE: Integral absoluto de error.
EIL2: Etapa de interconexión de líquido 2.	Kc: Parámetro de ganancia en el control retroalimentado.
EPL: Etapa del producto en la salida lateral.	n/a: No aplica.
ER: Energía en el rehervidor [kW].	Offset: Variación constante de la variable de proceso respecto al punto de ajuste.
Error: Es la diferencia absoluta entre la variable media y el punto de ajuste, a	

P: Controlador proporcional.

PD: Presión del domo [atm].

PF: Presión del fondo [atm].

PI: Controlador proporcional-integral.

PID: Controlador proporcional-integral-derivativa.

RR: Relación de reflujo.

SET POINT: (Punto de ajuste) Valor al que se desea mantener una variable de proceso.

STAD: Sistema térmicamente acoplada directa.

STAI: Sistema térmicamente acoplada indirecta.

SCTACD: Secuencia convencional, térmicamente acoplada, convencional directa.

SCTACI: Secuencia convencional, térmicamente acoplada, convencional indirecta.

SCCTAD: Secuencia convencional, convencional, térmicamente acoplada directa.

STAAL: Secuencia térmicamente acopladas con alimentación lateral directa.

STACCD: Secuencia térmicamente acoplada, convencional, convencional directa.

TD: Temperatura del domo [K].

TF: Temperatura del fondo [K].

$x_{i,po}$: La pureza obtenida para cada componente.

$x_{i,pr}$: La pureza requerida para cada componente.

Símbolos griegos

α : Volatilidad relativa de los componentes.

ϕ : Parámetros del modelo de Underwood.

τ_i : Parámetro del tiempo integral en el control retroalimentado.

Subíndices

i : Número de componentes.

min : Mínimo.

CONTENIDO

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Nomenclatura	v
CONTENIDO	vii
i Índice de Tablas	ix
ii Índice de Figuras.....	x
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	4
1.2 Hipótesis.....	5
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos particulares.....	5
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Columna de destilación convencional.....	6
2.2 Diseño de la columna convencional.....	7
2.3 Sistemas térmicamente acoplados	11
2.4 Optimización de la columna térmicamente acoplada “Petlyuk”	14
2.5 Teoría de control	15
2.5.1 Sistema de control a lazo abierto	16
2.5.2 Sistema de control a lazo cerrado (retroalimentado).....	17
2.5.3 Criterios de desempeño	21
3 ANTECEDENTES	23
4 METODOLOGÍA.....	27
4.1 Especificaciones de diseño.....	27

4.1.1	Secuencia STACCD.....	28
4.1.2	Secuencia SCTACD.....	29
4.1.3	Secuencia SCTACI.....	29
4.1.4	Secuencia SCCTAD.....	29
4.1.5	Secuencia STAAL.....	30
4.2	Diseño de secuencias de destilación propuesta	31
4.3	Optimización de la columna Petlyuk.....	32
4.4	Método para el análisis dinámico a lazo cerrado.....	32
4.4.1	Sintonización del controlador Proporcional-Integral (PI).....	33
4.5	Cuantificación de la emisión del CO ₂	35
5	RESULTADOS	36
5.1	Diseño y optimización de las secuencias en estado estacionario	36
5.1.1	Diseño de las secuencias propuesto	36
5.1.2	Optimización de la demanda de energía en la columna Petlyuk.....	38
5.1.3	Diseño óptimo de las secuencias en estado estacionario	43
5.1.4	Consumo de energía óptima en la operación de los esquemas	49
5.2	Análisis de las secuencias en estado dinámico.....	49
5.2.1	Sintonización de control a lazo cerrado por el método heurístico	49
5.2.2	Análisis de sintonización a lazo cerrado: Método heurístico.....	61
5.3	Cuantificación de la emisión del CO ₂ por secuencia.....	64
5.4	Análisis comparativo de secuencias en relación con la demanda energética, control retroalimentado y emisión de CO ₂	65
6	CONCLUSIONES.....	68
6.1	Recomendaciones.....	69
7	REFERENCIAS.....	70

i Índice de Tablas

Tabla 2.1 Grados de libertad de las columnas térmicamente acopladas [29].	14
Tabla 4.1. Composición de alimentación de las secuencias modelo.....	28
Tabla 5.1 Resultados del diseño de las secuencias por el método corto, FUG.	38
Tabla 5.2. Especificaciones de diseño óptimo de la secuencia STACCD, en estado estacionario.	44
Tabla 5.3. Especificaciones de diseño óptimo de la secuencia SCTACD, en estado estacionario.	45
Tabla 5.4 Especificaciones de diseño óptimo de la secuencia SCTACI, en estado estacionario.	46
Tabla 5.5. Especificaciones de diseño óptimo de la secuencia SCCTAD, en estado estacionario.	47
Tabla 5.6. Especificaciones de diseño óptimo de la secuencia STAAL, en estado estacionario.	48
Tabla 5.22 Resumen de los parámetros óptimos a una respuesta de IAE mínimo en cada producto sintonizado a cada secuencia.	62
Tabla 5.23 Cuantificación de la emisión de CO ₂ por secuencias.....	65
Tabla 5.24 Respuestas óptimas a partir de las diferentes configuraciones en el diseño, cuantificación del CO ₂ y la controlabilidad del esquema.	66
Tabla 5.25 Resumen detallado de las respuestas a cada secuencia estudiada.....	67

ii Índice de Figuras

Figura 1.1 Evolución del concepto de los procesos químicos.	2
Figura 2.1 Esquema general de una columna de destilación, a) las principales partes de una columna y b) las variables de las corrientes.	7
Figura 2.2 Columnas de destilación, a) Convencional, y b) Petlyuk.	12
Figura 2.3 Diseño de la columna térmicamente acoplada "Petlyuk".	13
Figura 2.4 Esquema del control a lazo abierto (sin retroalimentación) [35].	17
Figura 2.5 Sistema del control retroalimentado convencional [35].	18
Figura 3.1 Configuraciones a) STAD, b) STAI, y c) Petlyuk, componentes de la mezcla ternaria A (ligero), B (intermedio) y C (pesado).	23
Figura 4.1 Diagrama del procedimiento de estudio de secuencias de destilación.	27
Figura 4.2. Secuencia STACCD; la columna térmicamente acoplada se encuentra en el inicio con la función de separar los componentes A y B.	29
Figura 4.3. Secuencia SCTACD, con la columna térmicamente acoplada entre dos columnas convencionales con la función de separar los componentes B y C.	29
Figura 4.4 Secuencia SCTACI; la columna térmicamente acoplada es alimentada con el flujo del domo de una columna convencional separando los componentes A, B y C.	30
Figura 4.5 Secuencia SCCTAD; se inicia con una serie de columnas convencionales, finalmente se separa los tres componentes pesados en la columna térmicamente acoplada en una serie directa.	30
Figura 4.6 Secuencia STAAL; una secuencia directa completamente acoplada donde la alimentación de la segunda se realiza en la salida lateral de la primera columna.	31
Figura 4.7. Diagrama de flujo para la optimización de la columna térmicamente acoplada del tipo Petlyuk en función de la Demanda de Energía (DE).	33
Figura 4.8. Diagrama de flujo para la sintonización del control PI en función del IAE, se obtiene los parámetros óptimos de K_c y τ_i	34
Figura 5.1 Diseño preliminar de secuencia como convencionales.	37
Figura 5.2 Optimización de la columna Petlyuk, en la secuencia STACCD.	39

Figura 5.3. Optimización de la columna Petlyuk, en la secuencia SCTACD.....	40
Figura 5.4. Optimización de la columna Petlyuk, en la secuencia SCTACI.	41
Figura 5.5. Optimización de la columna Petlyuk, en la secuencia SCCTAD.....	41
Figura 5.6. Optimización de la primera columna Petlyuk, en la secuencia STAAL. .	42
Figura 5.7. Optimización de la segunda columna Petlyuk, en la secuencia STAAL..	42
Figura 5.8. Demanda energética en cada una de las secuencias estudiadas.....	49
Figura 5.9 Lazos de control heurístico para la secuencia STACCD.....	50
Figura 5.10 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STACCD, para el componente B.	51
Figura 5.11 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STACCD, para el componente C.	51
<i>Figura 5.12</i> Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STACCD, para el componente D.	52
Figura 5.13 Lazos de control heurísticos para la secuencia SCTACD.	52
Figura 5.14 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACD, para el componente B.	53
Figura 5.15 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACD, para el componente C.	53
Figura 5.16 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACD, para el componente D.	54
Figura 5.17 Lazos de control heurísticos para la secuencia SCTACI.....	55
Figura 5.18 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACI, para el componente B.	55
Figura 5.19 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACI, para el componente C.	56
Figura 5.20 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCTACI, para el componente D.....	56
Figura 5.21 Lazos de control heurísticos para la secuencia SCCTAD.	57
Figura 5.22 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCCTAD, para el componente B.	58

Figura 5.23 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCCTAD, para el componente C.	58
Figura 5.24 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia SCCTAD, para el componente D.	59
Figura 5.25 Lazos de control heurísticos para la secuencia STAAL.	59
Figura 5.26 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STAAL, para el componente B.	60
Figura 5.27 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STAAL, para el componente C.	60
Figura 5.28 Representación detallada del IAE a diferentes parámetros de K_c en la secuencia STAAL, para el componente D.	61
Figura 5.29 Comportamiento dinámico a lazo cerrado de la composición del benceno con respecto al tiempo.	63
Figura 5.30 Comportamiento dinámico a lazo cerrado de la composición del tolueno con respecto al tiempo.	63
Figura 5.31 Comportamiento dinámico a lazo cerrado de la composición del etilbenceno con respecto al tiempo.	64