

**ESTUDIO DE UN NUEVO CONCEPTO DE COLUMNA DE  
DESTILACIÓN: COLUMNA DE DESTILACIÓN CON  
INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR (HIDiC)**

**AUTOR: JEFFREY LEON PULIDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2008**

**ESTUDIO DE UN NUEVO CONCEPTO DE COLUMNA DE  
DESTILACIÓN: COLUMNA DE DESTILACIÓN CON  
INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR (HIDiC)**

AUTOR: JEFFREY LEÓN PULIDO

ORIENTADOR: Prof. Dra. MARIA REGINA WOLF MACIEL

CO-ORIENTADOR: Ing. EDGAR LEONARDO MARTINEZ

Faculdade de Engenharia Química

Universidade Estadual de Campinas(UNICAMP)

Campinas, Brasil

LECTOR: Phd. RAMIRO MARTINEZ REY

CALIFICADOR: Ing. LUIS ENRIQUE FUENTES

Facultad de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Santander

Trabajo presentado a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander para optar por el título de Ingeniero Químico.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2008**

## Dedicatoria

*A mi padre "Francisco León Cantillo" y mi madre "Jazmine Pulido Atvillaneda"  
por sus incansables esfuerzos, sus sacrificios, sus palabras y su apoyo  
con los que logre culminar este proyecto.*

*En memoria a mi Abuelo "Hipólito Pulido Sosa"  
por su entrega incondicional, su fuerza, sus consejos y su luz  
las cuales me guiaron en el camino pedregoso con su presencia como un ángel.*

## Agradecimientos

En primera instancia agradezco a Dios, por permitirme crecer como persona, por no dejarme solo y llevarme siempre de su mano.

A mi familia a quienes dedico este trabajo, por su apoyo incondicional ya que sin ellos no estaría escribiendo estas líneas.

A Robinson Avellaneda, Nery Avellaneda, Faride Avellaneda que con sus esfuerzos y buenos deseos, permitieron que este viaje fuera posible.

A la Universidad Industrial de Santander, la Seccional Socorro, la Facultad de Ingenierías Físico-químicas y la Escuela de Ingeniería Química por la formación recibida.

Al Prf. Rubens Maciel Filho y a la Prof. Maria Regina Wolf Maciel, por la confianza y el apoyo durante el proyecto y por todo el conocimiento compartido para esta gran experiencia.

A Leonardo Martínez y Arturo Gonzales, por su amistad incondicional y sincera, sus palabras de aliento y compañía en este viaje.

A Gina Vera, Vaneza Pulido, Nicole Chemas, June Mow, Camilo Pedraza, Julian Sanabria, John Casas, Sergio Lopez, Orlando Ochoa, Marcos Antonio da Silva Eleoterio, Tiago Cesar da Silva Eleoterio, Vinicius Rocha Biscaro, Edney Silva, Tassia Lopes, Mario, Carlos Diaz, Julian Prada, por estar de alguna manera u otra apoyándome incondicionalmente en este viaje.

A mis compañeros de ingeniería química que dejaron huella en este proceso formativo.

A los colegas del LOPCA y LDPS por su colaboración en la permanencia en Brasil.

Gracias a todos.

## ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	IX
LISTADO DE TABLAS.....	X
LISTADO DE ANEXOS.....	XI
ABREVIATURAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. Introducción a la Integración Interna de Calor.....	4
1.1 Resumen.....	4
1.1.1 Método de Efectos Múltiples.....	4
1.1.2 Acoplamiento Térmico.....	5
1.1.3 Recompresión Directa de Vapor.....	5
1.1.4 Destilación Convencional Diabática.....	6
1.1.5 Columna de Destilación con Integración Interna de Calor...6	6
1.2 PERSPECTIVA EN COLUMNA HIDiC.....	7
1.3 COLUMNA DE DESTILACIÓN, CON INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR (Heat Integrated Distillation Column - "HIDiC").....	8
1.3.1 Estudios Desarrollados.....	8
1.3.2 Principio Columna HIDiC (Heat Integrated Distillation Column).....	9
1.3.3 Análisis Termodinámico.....	11
1.3.4 Eficiencia Termodinámica de HIDiC.....	12
1.3.5 Potencial Ahorro Energético Ideal HIDiC.....	14
CAPITULO II Opciones para el Diseño de Columnas con Integración Interna de Calor.....	15
2.1 Resumen.....	15
2.2 Columnas Inter Acopladas.....	15
2.3 Columna con Muro de Partición.....	16
2.4 Columna Concéntrica.....	16
2.5 Columna Tubo y Carcasa.....	17
2.6 Intercambio de Calor en Columna de platos.....	17
2.7 Columna Concéntrica con Paneles de Calor.....	17
CAPITULO III Características de unidades Transferencia de Calor y Masa en Columna con Integración Interna de Calor Concéntrica.....	18
3.1 Resumen.....	18
3.2 Paneles de Transferencia Experimentales.....	19
3.3 Condensación de Componentes Puros y Mezclas Binarias.....	20
3.4 Caída de Presión.....	21
3.5 Modelos de Transferencia de Masa.....	22
3.6 Definición de Eficiencia en Bandejas.....	23
3.7 Punto de Eficiencia.....	23
3.8 Eficiencia Total de Bandeja.....	23
CAPITULO IV Diseño de Columna de Destilación con Integración Interna de Calor.....	24
4.1 Resumen.....	24
4.2 Efectos de Configuración.....	25
4.3 Transferencia de Energía.....	25

<b>CAPITULO V Simulación Columna HiDiC y Columna Convencional.....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 Resumen.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2 Determinación de parámetros y datos de la Simulación.....</b>	<b>27</b>
<b>5.3 Resultados obtenidos de los modelos presentados.....</b>	<b>28</b>
<b>5.4 Discusión de resultados.....</b>	<b>31</b>
<b>5.5 Conclusiones.....</b>	<b>32</b>

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Representación Columna HIDiC.....	10
Figura 2. Sección Transversal Columna HIDiC con Paneles de Calor.....	18
Figura 3. Representación Columna de Destilación con Integración Interna de Calor.....	18
Figura 4. Ubicación de Paneles en Sección de Agotamiento.....	19
Figura 5. a) Panel de Calor, b) Baffle distribuidor de liquido, c) Set de Paneles de Calor usando una Sección de Intercambio.....	20
Figura 6. a) Ubicación paneles de transferencia de Calor en "Downcomer", b) Diseño de conjunto de paneles de calor en la sección activa.....	20
Figura 7. Representación esquemática de los paneles de calor.....	22
Figura 8. a) Columna Convencional, b) Columna HIDiC.....	28
Figura 9. A) Transferencia de calor Caso I, b) Transferencia de calor Caso II, c) Transferencia de calor Caso III.....	29
Figura 10. Grafica Temperatura vs Plato Caso I.....	30
Figura 11. Grafica Temperatura vs Plato Caso II.....	30
Figura 12. Grafica Temperatura vs Plato Caso III.....	31
Figura 13. Modelo Vaporización y Reflujo Secundario.....	39
Figura 14. Ideal HIDiC.....	41
Figura 15. Estructura General de HIDiC.....	43
Figura 16. Respuesta transitoria con duración en el tiempo Ideal HIDiC.....	45
Figura 17. Configuraciones HIDiC.....	46

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la Simulación.....	27
Tabla 2. Resultados Casos de estudio.....	29
Tabla 3. Calor Transferido.....	29
Tabla 4. Equipos Usados en columna HIDiC.....	40

## LISTADO DE ANEXOS

ANEXO I	Metodología del proyecto.....	38
ANEXO II	Vaporización con Reflujo Secundario o Recompresión Directa.....	38
ANEXO III	Equipos Usados en columna HIDiC.....	40
ANEXO IV	Integración Interna de Calor en Columna de Destilación Ideal (Ideal Heat Integrated Distillation Column - "Ideal - HIDiC").....	41
ANEXO V	Posibles Configuraciones de Columnas de destilación con Integración Interna de Calor (HIDiC).....	46

## ABREVIATURAS

HIDiC: Heat Integrated Distillation Column

SRV: Vaporización con Reflujo Secundario

## NOMENCLATURA

$E_{max}$	Eficiencia maxima termodinamica (-)
$F$	Flujo de alimento (mol/s)
$H$	Entalpia (J/mol)
$P_{in}$	Presión a la entrada del compresor (kPa)
$P_{out}$	Presión a la salida del compresor (kPa)
$Q_{min}$	Energía mínima requerida (J/s)
$R$	Constante de los gases (J/mol·K)
$S$	Entropía (J/mol·K)
$T$	Temperatura (K)
$V$	Flujo a través del Compresor (mol/s)
$W_{compressor}$	Calor transferido del Compresor (J/s)
$W_{min}$	Trabajo mínimo para que se de la separación (J/s)
$x_i$	Fracción molar del componente i (-)
$\Delta H_{vap,B}$ (J/mol)	Entalpia de vaporización en el producto de fondo
$K$	Relación específica de calor de la constante de presión con respecto a la constante de volumen (-)
$Re$	Número de Reynolds
$h_{z,lw}$	Coeficiente local de transferencia local de condensación en régimen laminar
$g$	Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$L$	La longitud del tubo (m)
$D$	Diámetro del tubo (m)
$F$	Factor de fricción
$u$	Velocidad del vapor (m/s)
$y$	Fracción molar del componente vapor ligero.
$y_n$	Fracción molar del componente vapor ligero, en equilibrio con la concentración de liquido X.
$n$	Número total de platos

## LETRAS GRIEGAS

$\alpha_{12}$	Volatilidad Relativa de los componentes 1 y 2 (-)
$\lambda_i$	Conductividad térmica (W/mK)
$\Gamma$	Flujo másico de liquido por unidad kg/s .m
$\mu$	Viscosidad del líquido (Pa.s)

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE UN NUEVO CONCEPTO DE COLUMNA DE DESTILACIÓN: "HIDiC". COLUMNA DE DESTILACIÓN CON INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR. \*

**AUTOR:** JEFFREY LEON PULIDO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** DESTILACIÓN, INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR, DISEÑO DE PROCESOS, INTEGRACIÓN DE PROCESOS, OPERACIÓN DE PROCESOS.

## COTENIDO

El presente estudio se aplica al diseño y obtención de información que permita el desarrollo de nuevas tecnologías de integración interna de calor para la transformación de materias primas en columnas de destilación. Las columnas de destilación son los equipos industriales más importantes para separaciones de mezclas vapor-liquido, estas utilizan gran cantidad de la energía requerida en el proceso. Arreglos en la configuración interna de la columna de destilación, usando el principio de la columna fraccionadora, están en desarrollo por importantes grupos japoneses y holandeses en la actualidad. Los estudios de la nueva columna de destilación hasta ahora, han sido realizados a nivel experimental. Básicamente, la nueva configuración trata de una columna de destilación concéntrica, que transfiere el calor de la sección de rectificación la cual trabaja a mayor presión y temperatura, hacia la sección de agotamiento, configuradas anularmente y formando una columna fraccionadora conocida en la literatura como "Heat Integrated Distillation Column" (HIDiC). HIDiC ofrece un grande potencial en la reducción de energía para separaciones complejas. El concepto fue introducido en los años 70 por Mah et al. y una cantidad razonable de investigaciones han sido realizadas desde entonces, esto actualmente no es una realidad en la industria. La principal causa de esto es la complejidad del proyecto de la columna y la falta de datos experimentales a una escala suficientemente grande. Esto justifica los trabajos de simulación y modelaje adelantados en este proyecto de grado, analizando las ventajas que presenta la columna HIDiC frente a la convencional debido a su ahorro energético. En Latinoamérica y mas específicamente en Colombia, aun no se habla de esta tecnología, por su aplicabilidad este estudio posee gran importancia para aportar mejoras en el área petrolera y alcoholquímica.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química,  
**ORIENTADORA:** Prof. Doc. MARIA REGINA WOLF MACIEL

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF A NEW CONCEPT OF DISTILLING COLUMN: HEAT INTEGRATED DISTILATION COLUMN (HIDIC) \*

**AUTHOR:** JEFFREY LEON PULIDO\*\*

**KEY WORDS:** DISTILLATION, INTERNAL HEAT INTEGRATED, PROCESS DESIGN, INTEGRATING PROCESS, OPERATING PROCESS.

## CONTENT

This study applies to the design and procurement of information allowing the development of new technologies for internal integration of heat for the processing of raw materials in distillation columns. The distillation columns are the most important industrial equipment for separation of vapor-liquid mixtures, they used a large amount of energy required in the process. Arrangements in the internal configuration of the distillation column, using the top of the column installments are in development by major Japanese and Dutch groups at present. The studies of the new distillation column so far, have been made at the pilot plat. Basically, the new configuration is a concentric column distillation, which transfers heat from the rectifying section of correction which works at higher pressure and temperature, into the stripping section, and forming an annular shaped column known in the literature as "Heat Integrated Distillation Column (HIDiC). HIDiC offers a big potential in reducing energy for complex separations. The concept was introduced in the 70s by Mah et al. and a reasonable amount of research has been conducted since then, this is currently not a reality in the industry. The main cause is the complexity of the project of the column and the lack of experimental data on a sufficiently large scale. This justifies the work of simulation and modeling advanced degree in this draft, analyzing the advantages of column HIDiC compared to the conventional due to their energy savings. In Latin America and more specifically in Colombia, not even talking about this technology, its applicability to this study holds great significance to make improvements in the oil and alcool-chemical.

---

\*Proyect of degree

\*\*Physicochemical Faculty, School of Chemical Eengeenering, **DIRECTORA:** Prof. Doc. MARIA REGINA WOLF MACIEL

## INTRODUCCIÓN

“Pienso que la vida es una sumatoria de procesos que van ocurriendo a medida que las condiciones para su desarrollo surgen, por esto sus mejoras están ligadas a las necesidades” o como describía el visionario Leonardo da Vinci en una de sus frases célebres “Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento, madre de toda certidumbre”, palabras que hoy retoman su fuerza en cada uno de los desarrollos tecnológicos que se ven nacer. A pesar de que el cambio de conceptos y la implementación de nuevas ideas en algunos casos son tildadas de descabelladas, al final rompen todo esquema y precedente, para dar un nuevo rumbo que permita mejorar los diferentes procesos y por ende las industrias.

La destilación es un proceso que se remonta a los orígenes de la civilización, siendo un hecho fácil de reconocer que al calentar una mezcla de alcohol y agua, la fase vapor es más rica en alcohol que en agua. En la actualidad la destilación desarrollada en una sola etapa es usada para la producción de bebidas alcohólicas, sin embargo en el siglo XIX se desarrollo la destilación por varias etapas o también llamada destilación fraccionada, mejorando el proceso en un modo superlativo. La destilación fraccionada es una operación clave para la calidad y la obtención de los productos fabricados.

La eficacia de la separación depende de múltiples factores como la diferencia de punto de ebullición entre los componentes de la mezcla, la presión de trabajo y parámetros fisicoquímicos de los componentes, a demás del diseño y construcción del equipo. El corazón del sistema de destilación fraccionada, es la columna de fraccionamiento, de cuyas características (diseño, tamaño, número

de platos, tipo de relleno, diámetro, etc.) depende en gran medida el éxito de la separación.

El objetivo principal en la columna HiDiC es el ahorro energético, aunque al igual que la columna convencional, busca separar una mezcla de varios componentes aprovechando las volatilidades relativas, para la obtención del componente más volátil en forma pura.

En este trabajo se estudia la mezcla binaria benceno-tolueno, para ser tratadas en un nuevo modelo de columna de destilación con integración interna de calor, por medio de arreglos internos en la columna para aprovechar el calor de la sección de retificación, la cual opera a temperaturas y presiones altas, con el fin de calentar la fase líquida presente en la columna de agotamiento. La configuración de las dos secciones es concéntrica, implementando un compresor y una válvula para mantener las presiones y temperaturas deseadas. La destilación consta de múltiples contactos entre las fase líquida y vapor, cada contacto es la mezcla entre dos fases para producir la distribución de especies, seguida de la separación de fases. Los contactos se realizan sobre platos horizontales (Llamados etapas), distribuidos a lo largo de la columna.

HiDiC ofrece un grande potencial de ahorro energético y disminución de emisiones al ambiente para separaciones complejas, mejorando la eficiencia de la columna de destilación convencional, la cual usa altas temperaturas en el rehedidor, ocasionando altas emisiones de CO<sub>2</sub>.

Este trabajo esta organizado por capítulos: en el Capítulo I Introducción a la Integración Interna de Calor, se describen los diferentes conceptos que llevaron al modelo de columna HiDiC.

Seguidamente en el Capítulo II se presentan algunas opciones para el diseño de columnas con integración de calor. En el Capítulo III se describen características de la transferencia de calor y masa en columna concéntrica con integración interna de calor. Posteriormente el Capítulo IV enuncia el diseño de una columna de destilación con integración interna de calor y finalmente en el Capítulo V se expone el caso de estudio comparando la columna HiDiC y la columna convencional.

## **CAPITULO I**

### **Introducción a la Integración Interna de Calor**

#### **1.1 Resumen**

La destilación es utilizada ampliamente en el campo de la separación de mezclas líquidas. Sin embargo, una de las principales desventajas es la energía requerida por los procesos de destilación. En este estudio se busca comparar el consumo energético de la columna convencional, con la columna HIDiC, la metodología usada para este trabajo se muestra en el anexo 1. En las columnas de destilación convencionales [1], el calor es utilizado como agente para la separación. La destilación fraccionada, usa altas temperaturas en el rehervidor y retira calor a bajas temperaturas en el condensador. Esta introducción externa y eliminación externa de calor, por la termodinámica general del proceso, muestra que la eficiencia se encuentra por debajo del 10%. [2].

##### **1.1.1 Método de Efectos Múltiples**

En las últimas décadas múltiples métodos para la mejora térmica y la economía en los procesos de destilación han sido propuestos y aplicados en la industria. En su mayoría, los estudios e investigaciones realizadas se han enfocado a una secuencia de integración de calor, por medio de columnas ubicadas en serie. La idea básica del Método de Efectos Múltiples, es usar el contenido de calor del destilado de una columna, para suplir el calor requerido por el rehervidor de la siguiente columna. Se debe trabajar a diferentes presiones para proporcionar la diferencia de temperatura suficiente para el proceso [3-5].

### **1.1.2 Acoplamiento Térmico**

Hace parte de las alternativas para mejorar la eficiencia energética de dos o más columnas de destilación acopladas térmicamente. El acoplamiento térmico es realizado eliminando el condensador y el rehervidor de la columna en algunos casos, e introduciendo una conexión de presión para la mezcla vapor – líquido con otras columnas. La destilación térmicamente acoplada fue patentada [6, 7] y mas tarde fue re-presentada por Petlyuk et al. [8]. Esto desarrollado para algunas separaciones ternarias, donde el acoplamiento térmico [9-11] y la columna Petlyuk [12, 13] presentaron un ahorro sustancial de energía.

### **1.1.3 Recompresión Directa de Vapor**

Contrastando con los diferentes métodos ya mencionados, la Recompresión directa de vapor ha mostrado mejoría térmica en una sola columna [14, 15]. Este método posee una bomba de calor asistida muy eficaz (Anexo I), ya que trata el problema de la introducción y extracción de calor en la columna. La presión y la temperatura del vapor a la salida son manejadas por un compresor para ser utilizadas como fuente de calor para el rehervidor. A pesar que la recompresión directa de vapor es una buena técnica para el ahorro de energía, su uso es restringido, siendo económico solo para mezclas con puntos de ebullición muy cercanos, donde la diferencia de temperaturas entre el fondo y el tope sea muy pequeña. La operación de este proceso se consigue por medio de relaciones de compresión bajas y en consecuencia baja cantidad de calor requerido. De esta manera mezclas con volatilidades relativas cercanas y bajas, poseen un potencial de ahorro de energía mayor debido a altos reflujos. De no ser así, el uso de grandes rehervidores

y por ende gran consumo de energía serían usados para separar la mezcla.

#### **1.1.4 Destilación Convencional Diabática**

Otro concepto de ahorro de energía aplicado a una columna de destilación es la llamada Destilación Convencional Diabática, la cual no es aplicable hasta la fecha [16, 17]. Este concepto sustituye el rehervidor y el condensador ubicados en el fondo y el tope respectivamente, por un rehervidor y un condensador integrados dentro de la columna en las secciones de agotamiento y rectificación correspondientemente. En la columna de destilación convencional, la relación molar entre los caudales de líquido y vapor que fluyen al mismo tiempo en la sección de rectificación y agotamiento se describe en líneas rectas. En la Columna Diabática las dos líneas rectas son sustituidas por una curva de operación continua, que es paralela a la curva de equilibrio. Si estas curvas se superponen en el límite, las pérdidas de exergía serían cero y el proceso de destilación sería perfectamente reversible. Obviamente, el potencial teórico de ahorro de energía y exergía no pueden ser explotados y de forma similar a la columna convencional los gastos de operación, el reflujo y número de etapas son necesarios para el desarrollo del proceso. Otra desventaja que presenta este concepto, es la necesidad de una temperatura especial en el rehervidor ubicado dentro de la sección de agotamiento.

#### **1.1.5 Columna de Destilación con Integración Interna de Calor**

Otra posibilidad es la integración interna de calor conocida en la literatura como HIDiC, que combina las ventajas del vapor de recompresión y la destilación diabática. La representación ideal de esta configuración se muestra con mayor profundidad en el Anexo II.

En HIDiC, el calor es transferido de la sección más caliente a la más fría, generando una evaporación gradual en la sección de agotamiento y una condensación gradual en la columna de rectificación. La sección de rectificación trabaja a mayor presión y temperatura con respecto a la sección de agotamiento. El principio de recompresión directa de vapor es aplicado para aumentar la presión entre las secciones. De hecho, la principal ventaja que presenta HIDiC comparado con la bomba de calor convencional es que HIDiC puede operar a menor relación de compresión. Teóricamente es capaz de operar sin rehervidor y condensador, a demás de que la altura de una columna HIDiC es significativamente menor, en el mejor de los casos puede ser de la mitad de la altura de las normales.

## **1.2 PERSPECTIVA EN COLUMNA HIDiC**

Los estudios de los procesos de separación se han desarrollado en paralelo a las necesidades que presenta la industria y sus requerimientos especiales. El potencial de ahorro energético que ofrece HIDiC en separaciones complejas y el gran uso industrial de columnas de destilación hacen de este estudio un proyecto de gran importancia para la posible transformación de la industria, solucionando en gran parte problemas energéticos y disminuyendo emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

Los métodos antes mencionados, reducen en general los insumos externos de energía por el uso eficaz de energía térmica en el sistema de destilación. Los estudios realizados para la columna HIDiC predominan a nivel experimental hasta ahora y han sido financiados por universidades del exterior y por importantes agencias de fomento, como la Universidad Tecnológica de Delf

(Holanda), financiados por el Ministerio de Economía (EETK001025), Akzo Nobel, BP, DSM, ECN, Shell Global Solutions y Sulzer Chemtech. También en japon, a travez de National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Kimura Chemical Plants Co. Ltd, Kansai Chemical Engineering Co. Ltd, y Tokyo Institute of technology.

El concepto de “HIDiC” parte de la idea propuesta por Mah et al. [18] como un método para el ahorro energético en columnas de destilación. A partir de los trabajos realizados por los autores nombrados, el concepto de integración interna de calor fue tomando fuerza, generando publicaciones y patentes con respecto a la nueva configuración. El concepto general de la integración interna de calor en la columna de destilación, parte del principio de la unidad fraccionadora convencional, ubicando concéntricamente la sección de rectificación y la sección de agotamiento, intercambiando calor de una sección a otra, para separar mezclas vapor-líquido.

### **1.3 COLUMNA DE DESTILACIÓN, CON INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR (Heat Integrated Distillation Column – “HIDiC”)**

#### **1.3.1 Estudios Desarrollados**

De los estudios presentados por Mah et. al, y la necesidad de disminuir costos en operación comenzó a tomar gran importancia en los investigadores el ahorro energético, posteriormente Seader [19] sugirió diferentes configuraciones para la columna propuesta por Mah. Por otra parte, una configuración de tubo y carcasa empaquetada fue presentada por Also et al. [20]. En la actualidad los estudios mas recientes han sido realizados por Investigadores Japoneses [21-24] que han estudiado la columna con integración

interna de calor, mostrando resultados de un 60% de ahorro energético con respecto a la convencional. La primera unidad fue construida a escala laboratorio en Kimura Chem. Plant CO. En 1997, para el estudio del diseño interno. En Latino América, particularmente en Colombia aun no se habla de esta tecnología, siendo de gran importancia este estudio para el ahorro energético en las industrias petroleras y alcohol-químicas.

Las investigaciones realizadas anteriormente, en aspectos de diseño no han sido informadas en su totalidad. Sin embargo, la mayoría de estudios de simulación se han desarrollado sin directrices. Este trabajo centra su atención en el estudio del diseño y evaluación de la nueva configuración con integración interna de calor.

### **1.3.2 Principio Columna HiDiC (Heat Integrated Distillation Column)**

La columna de destilación con integración de calor posee el mismo principio de la columna ideal donde el rehervidor y el condensador no son necesarios para la operación, la aplicación de este tipo de configuración en la industria es una de las perspectivas mas prometedoras debido al potencial energético y la reducción de costos energéticos en la industria operación de destilación, favoreciendo también al medio ambiente en la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El proceso es representado en la Figura 1, consta de dos columnas anulares, una trabaja como sección de rectificación y la otra como sección de agotamiento. Las columnas están ubicadas concéntricamente en el diseño a escala real, de esta manera el intercambio de calor va de la columna de rectificación a la de agotamiento, permitiendo un ahorro de energía demandada por el rehervidor, aumentando la eficiencia energética.

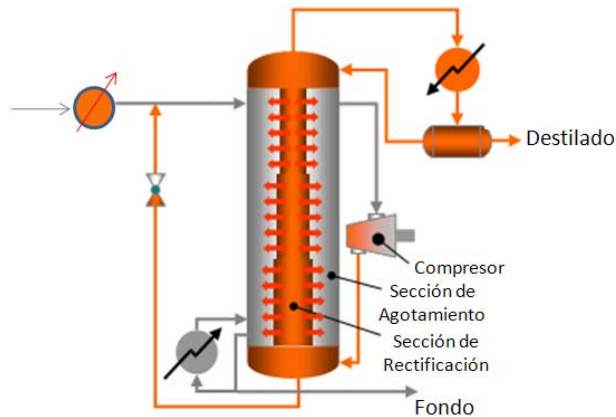


Figura 1. Representación Columna HIDiC

El calor de la sección de rectificación es reutilizado para ser transferido a la sección de agotamiento. La baja eficiencia energética de la columna convencional fue el principal interés de la investigación, generando nuevos conceptos para mejorar las tecnologías de destilación. El principio de la integración interna de calor, parte de las investigaciones realizadas para el aprovechamiento de calor [25-33].

Para el manejo de las presiones es usado un compresor y una válvula entre las dos secciones. El vapor comprimido es alimentado a la sección de rectificación mientras el fondo líquido de la misma sección se alimenta de nuevo a la sección de agotamiento. El destilado que se obtiene de la sección de rectificación es el producto, mientras que la corriente en la parte inferior de la sección de agotamiento es el fondo. Estos equipos en conjunto constituyen la columna HIDiC (Anexo II).

El calor de la columna de rectificación, es aprovechado para ser transferido a la sección de agotamiento. Para mejorar el intercambio se deben instalar paneles, que permite en zonas más lejanas a la pared de la sección.

### 1.3.3 Análisis Termodinámico

En las columnas de destilación convencionales el calor es requerido por el rehervidor y luego es retirado en el condensador. Debido a la diferencia de temperatura las operaciones están acompañadas por una pérdida de energía presente en los equipos con el entorno.

La idea de intercambio interno es básicamente una distribución y adición del calor removido en el proceso de destilación de manera uniforme a lo largo de la longitud de la columna. Las ventajas termodinámicas en igualdad de partición para la introducción de energía y la remoción de esta en la columna de destilación [34-37], visualiza un posible “diseño óptimo” (En el sentido de la segunda ley) la equipartición de entropía, esta fue presentada como concepto general [38], distribuyendo de manera uniforme la producción de entropía entre las variables del proceso. Estudios sobre desafíos futuros para la investigación básica en ingeniería química, aborda la equipartición de entropía como nuevo principio de diseño [39]. Este principio es aplicado a columnas diabáticas, destilación cuasi-reversibles y HIDiC.

En la columna HIDiC el principio de diseño de equipartición de entropía, combinado con una bomba de calor para el manejo del rango de temperatura, presenta ventajas, que lleva a un gran potencial de ahorro energético. La eficiencia termodinámica en la columna de destilación con integración interna de calor ha sido discutida en otros trabajos [40, 41], esta es presentada a continuación.

### 1.3.4 Eficiencia Termodinámica de HIDiC

Para un proceso de separación la mínima cantidad de trabajo necesaria requerida, para hacer una separación completa viene dado por:

$$W_{\min} = F(\Delta H - T\Delta S) \quad [1]$$

Donde, F (Kmol/s) es el flujo de alimento.  $\Delta H$  (KJ/mol) y  $\Delta S$  (KJ/mol-K) son los cambios de la entalpía y la entropía respectivamente. Para mezclas ideales de  $n$  componentes, el mínimo trabajo de separación puede expresarse por:

$$W_{\min} = FRT \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i \quad [2]$$

Donde R (KJ/mol-K) es la constante de los gases, T (K) es la temperatura de la mezcla en,  $X_i$  (-) es la fracción molar del componente  $i$  en la alimentación.  $W_{\min}$  es el mínimo termodinámico independiente de cualquier proceso en particular.

Los procesos actuales operan conducidos por fuerzas finitas que son irreversibles y por lo tanto usan más energía que la mínima termodinámica. Para la destilación convencional el mínimo de energía requerida ( $Q_{\min,convencional}$ ) en una separación completa de una mezcla binaria ideal [42], cuando el alimento esta en su punto de burbuja, puede reducirse a:

$$Q_{\min,convencional} = F\Delta H_{vap,H} \left[ \frac{1}{\alpha_{12} - 1} + x_{F1} \right] \quad [3]$$

Donde  $H_{vap,H}$  (KJ/Kg) es el vapor de vaporización en la parte inferior del producto,  $\alpha_{12}$  (-) es la volatilidad relativa de los componentes y  $x_{F1}$  (-) es la fracción molar del componente 1 en el alimento.

La eficiencia máxima termodinámica ( $E_{\max}$ ) se define como el mínimo trabajo termodinámico ( $W_{\min}$ ) para la separación dividida por

el mínimo de energía requerida pro el proceso para la separación ( $Q_{\min}$ ), siendo para la destilación convencional de un sistema ideal:

$$E_{\min,convencional} = \frac{W_{\min}}{Q_{\min,convencional}} = \frac{RT \sum_{i=1}^2 X_i \ln X_i}{\Delta H_{vap,B} \left[ \frac{1}{\alpha_{12} - 1} + X_{F1} \right]} \quad [4]$$

De acuerdo a la ecuación 4, la máxima eficiencia termodinámica para una columna de destilación convencional, parece ser muy bajo, típicamente los cálculos estimados son del 10% [43]. La volatilidad relativa ( $\alpha_{12}$ ) es el parámetro mas importante. Los sistemas con baja volatilidad relativa son los que presentan mayor ahorro de energía en la destilación, por regla general principalmente son sistemas binarios que tiene puntos de ebullición muy cercanos.

En el caso de las mezclas binarias que son separadas en el ideal HIDiC, su funcionamiento sin rehervidor ni condensador y la condición térmica en el alimento, hace que la separación pueda ser completada impulsada por el trabajo del compresor. El calor del compresor debe ser igual a:

$$Q_{HIDiC} = W_{compresor} = VRT_{in} \frac{K}{K-1} \left[ \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad [5]$$

Donde V (Kmol/s) es el flujo de vapor molar a la salida de la cima de la columna, K (-) es la relación entre el calor específico a presión constante y volumen constante,  $P_{in}$  (KPa) es la presión absoluta en la entrada, en este caso la presión en la sección de agotamiento y  $P_{out}$  (KPa) es la presión absoluta a la salida, que es la misma presión en la sección de rectificación.

La eficiencia termodinámica de una columna HIDiC, para un sistema de separación ideal esta expresada como:

$$E_{HIDiC} = \frac{F \cdot RT \sum_{i=1}^2 X_i \ln X_i}{V \cdot RT \frac{K}{K-1} \left[ \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]} \quad [6]$$

El calor del compresor se determina de la eficiencia de energética de la ecuación 5, donde el calor del compresor depende de dos variables: la relación de presiones ( $P_{out}/P_{in}$ ) y el flujo de vapor que entra al compresor ( $V$ ). Este flujo de vapor es influenciado por la vaporización parcial del líquido a alta presión y por la retroalimentación recibida de la sección de rectificación.

### 1.3.5 Potencial de Ahorro Energético Ideal HIDiC

Los estudios realizados para el Ideal HIDiC (Anexo III), y simulaciones desarrolladas por importantes grupos de investigación Japoneses [41,42], han expresado la necesidad de validar los estudios en una planta piloto HIDiC [44]. Los resultados y conclusiones con respecto a la viabilidad de la columna HIDiC, muestran un ahorro energético del 60%, pero el número de etapas aumenta en un factor de 2 a 3, comparado con la columna convencional encontrando atractivo para mezclas con puntos de ebullición cercanos, a demás de operar a una menor relación de compresión en la bomba de calor, como lo presenta la teoría. De esta manera HIDiC es viable para separaciones con volatilidad relativa baja y especificaciones ajustadas del producto. En el caso de un sub ambiente de temperatura del condensador, una bomba de calor puede eliminar el uso de refrigerantes.

## **CAPITULO II**

### **Opciones para el Diseño de Columnas con Integración Interna de Calor**

#### **2.1 Resumen**

HIDiC aparece como una solución atractiva para el aumento de la eficiencia energética, pero presenta dificultades en su construcción. El diseño de equipos es la llave para la implementación industrial de la columna HIDiC. La descripción de algunos diseños y propuestas son enunciados a continuación.

La razón del ahorro energético, se debe a la diferencia de temperatura entre la sección de rectificación y la sección de agotamiento, intercambiando calor a lo largo de la columna. Debido a las corrientes de vapor es importante que la integración de calor este de acuerdo al diseño, cambiando de área por el fuljo de vapor circulante en la sección. Esto se hace cambiando el diámetro de la sección de rectificación gradualmente a lo largo de la altura de la torre, variando también el diseño de bandeja de acuerdo al diámetro.

#### **2.2 Columnas Inter Acopladas**

El primer diseño práctico considerado para la integración interna de calor [34], fue basado en dos columnas interconectadas en paralelo separadas entre si, situando la destilación a través de bandejas y la tubería. El calor es transferido por medio del cuerpo tubular sumergido en la mezcla liquido/vapor, en las bandejas. Este método es flexible para ser aplicado en la columna, pero relativamente el intercambio en el área de plato es pequeño. Un inconveniente de este diseño es la cantidad de tuberías adyacentes dentro de la columna, dando lugar a costos adicionales y generando perdidas de calor con el entorno. La separación en la sección de agotamiento y

rectificación sin conexión en cada bandeja [45], usa un solo lazo de transferencia, lo cual soluciona el problema de congestión de tubos. Una bomba externa de calor es necesaria para el transporte del vapor. Una transferencia de calor especial por medio de placas organizadas en forma de serpentín dentro de las bandejas, implica una transferencia de calor total pero restringe el área.

### **2.3 Columna con Muro de Partición**

El trabajo de Seader [19] de una columna con dos secciones semicilíndricas en donde ocurre la transferencia de calor, que es realizada por tubos montados a través de la pared y las bandejas de las secciones. El alto coeficiente interno de transferencia de calor y la caída de presión a lo largo de la tubería de calor, permite un intercambio efectivo de calor a través de pequeñas diferencias de temperatura.

### **2.4 Columna Concéntrica**

Govind y Glenchur [4], presentaron la columna concéntrica HIDIc, con respecto a una configuración anular entre las secciones de rectificación y agotamiento. Esta configuración concéntrica tiene los principios ideales con respecto a la transferencia de calor, ya que el calor de la sección de rectificación no va directamente al medio, siendo intercambiado con la sección de agotamiento. Este concepto fue propuesto para columnas de bandejas, con área de transferencia de calor restringida por paredes. En consecuencia a la restricción del área de transferencia de calor, la cual es relativamente muy pequeña, hace que el diseño sea insuficiente para cambiar el área de transferencia de calor en la etapa.

### **2.5 Columna Tubo y Carcasa**

El problema de la transferencia de calor limitada presentado por el diseño de columna concéntrica [46], es aliviado por el concepto de tubo múltiple y carcasa [20], de esta manera, un fraccionamiento de intercambio de calor es construido en función al área de transferencia, este diseño muestra buenas propiedades para el intercambio de calor. Al igual que la columna concéntrica, el calor puede ser transferido solo a la sección de agotamiento, siendo configurado alrededor de los tubos, permitiendo flexibilidad en el área de transferencia de calor a lo largo de la columna. La desventaja del tubo y carcasa de la columna HiDiC, es que las bandejas de la sección de rectificación y agotamiento necesitarían diámetros de tubos muy pequeños lo cual complica el diseño.

### **2.6 Intercambio de Calor en Columna de platos**

Esta columna con integración interna de calor posee un intercambio tipo 'Plate-fin' (Plato-aleta). Este dispositivo con canales verticales alternos y adyacentes sirve en la rectificación y el agotamiento. En este diseño el área de transferencia de calor es larga y flexible, al cambiar el canal y dimensión, el área de transferencia de calor puede cambiar a lo largo de la longitud de la columna.

### **2.7 Columna Concéntrica con Paneles de Calor**

La columna concéntrica se equipa de paneles de calor (Figura 2), su configuración interna se da por bandejas estructuradas, donde la transferencia de calor se da entre las secciones de rectificación y agotamiento. En la parte inferior de la columna HiDiC en donde existe relativamente mayor espacio disponible, la transferencia de calor tiene preferencia en la sección de rectificación, estando relacionadas las dos secciones, con el fin que el vapor de la sección

de rectificación pueda entrar al panel condensarse y pueda volver como líquido a la sección de rectificación.

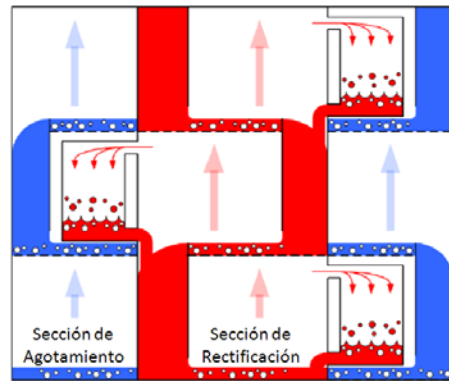


Figura 2. Sección Transversal Columna HIDiC con Paneles de Calor

### CAPITULO III

#### Características de unidades Transferencia de Calor y Masa en Columna con Integración Interna de Calor Concéntrica

##### 3.1 Resumen

La columna con integración interna de calor (HIDiC), aprovechando las secciones de agotamiento y rectificación, intercambia calor de una sección a otra.

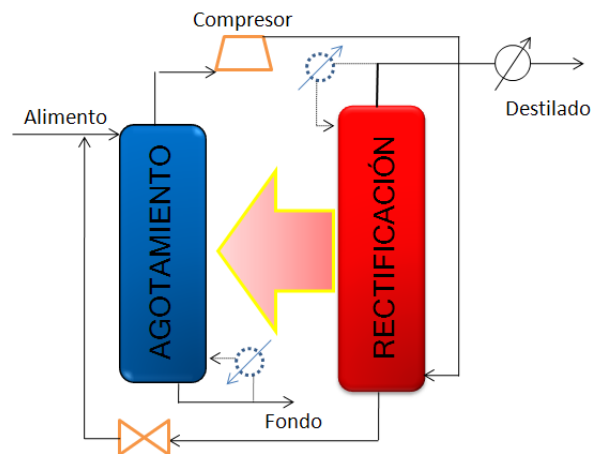


Figura 3. Representación Columna de Destilación con Integración Interna de Calor.

Para una mejor distribución del calor en la columna HIDiC, es necesario ubicar paneles para el aprovechamiento del intercambio en la sección de agotamiento (Figura 4). El vapor de la sección de rectificación entra al panel de transferencia para ser condensado y volver como flujo a la sección de rectificación, en la sección de agotamiento simultáneamente el líquido es evaporado.

Es importante resaltar que la fuerza de conducción del vapor a los paneles, se debe al propio proceso de condensación, ya que prácticamente no hay diferencia de presión en la entrada y la salida del panel.

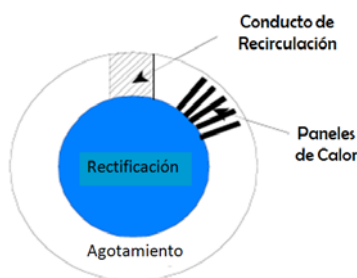


Figura 4. Ubicación de Paneles en Sección de Agotamiento.

### 3.2 Paneles de Transferencia Experimentales

El tipo de transferencia usada en la configuración interna de calor de la columna de destilación, es el factor más importante para la columna HIDiC. Los estudios presentados hasta la actualidad presentan una mejor eficiencia en la transferencia de calor y facilidades para la construcción de la columna (Figura 5). Estas placas son en acero inoxidable, soldadas a laser, que debido a su configuración forman canales de flujo de vapor y líquido adecuados, elevando la presión y la temperatura de la sección. La gran ventaja de este tipo de intercambiador es la flexibilidad en las dimensiones y el canal de distribución, a demás de ser relativamente baratos de fabricar.

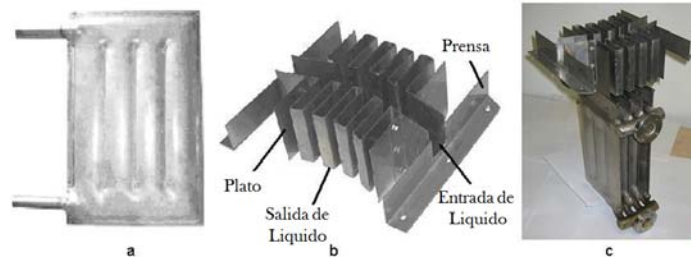
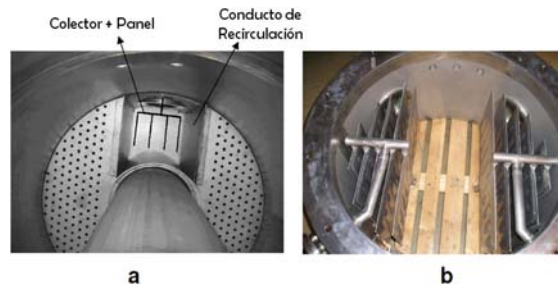


Figura 5. A) Panel de calor, b) Bafle Distribuidor de líquido. C) Set de paneles de calor usado en sección de intercambio.

Su diseño y ubicación están determinados por el espacio, las variables de diseño y el objetivo de separación. En la figura 6, se muestra la ubicación de un conducto de recirculación de un prototipo construido por la Universidad de Delf, para la transferencia de calor.



.Figura 6. A) Ubicación paneles transferencia de calor en 'Downcomer', b) Diseño de conjunto de paneles de calor en la sección activa.

### 3.3 Condensación de Componentes Puros y Mezclas Binarias

Los paneles de transferencia de calor usados son relativamente pequeños (350 mm), el flujo laminar para la transferencia de calor en la condensación fue desarrollado por Nusselt [47]. Este efecto fue identificado por Kapitza [48] demostrando la necesidad de una modificación por efectos del espesor de película, de esta manera se encuentra la Ecuación de Nusselt se expresa como:

$$Nu_{z,bw} = \frac{h_{z,bw}}{\lambda_l} \left( \frac{\mu_l^2}{\rho_l^2 \cdot g} \right)^{1/3} = 0.76 \left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{1/3} \cdot (Re_f)^{-0.22} \quad [1]$$

Donde  $h_{z,lw}$  es el coeficiente de transferencia local de condensación en régimen laminar,  $\lambda_l$  es la conductividad térmica (W/mK),  $\mu$  es la viscosidad del líquido (Pa.s),  $\rho$  es el término de densidad (Kg/m<sup>3</sup>),  $g$  es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $Re_f$  es el número de Reynolds para una película líquida, definido por:

$$Re_f = \frac{4 \cdot \Gamma_z}{\mu_l} \quad [2]$$

Donde  $\Gamma_z$  (Kg/s/m) es el flujo másico de líquido. El factor de corrección establecido por Kutateladze, donde  $h_{z,l}$  es coeficiente de transferencia local de condensación:

$$\frac{h_{z,lw}}{h_{z,l}} \approx 0.69 \cdot Re_f^{0.11} \quad [3]$$

Este régimen laminar en el calor de condensación presentado para una mezcla binaria, se asemeja al de un componente puro, controlado por los fenómenos de difusión.

### 3.4 Caída de Presión

La velocidad del vapor en las columnas de destilación son relativamente bajas, las pérdidas por fricción presentes en los muros son insignificantes, por lo tanto no habrá una caída de presión entre el vapor de entrada y de salida del panel de transferencia de calor (Figura 7).

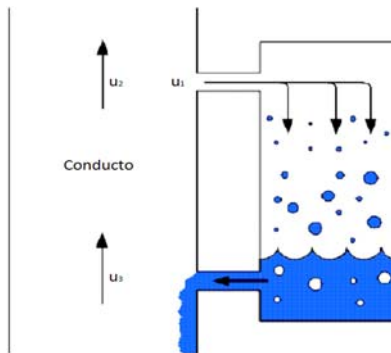


Figura 7. Representación Esquemática de los Paneles de Calor.

La caída de presión presente, se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta p_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \quad [4]$$

Donde  $L$  (m) es la longitud del tubo,  $D$  (m) es el diámetro del tubo,  $f$  es el factor de fricción y  $u$  (m/s) es la velocidad del vapor.

### 3.5 Modelos de Transferencia de Masa

Numerosos métodos se han desarrollado para la predicción de la eficiencia en la destilación, teniendo en cuenta que la columna HiDiC no posee correlaciones experimentales publicadas, no se llegó a calcular la eficiencia en la Columna HiDiC, para la transferencia de masa. Esta es una necesidad de la industria, por lo cual se patrocinó a un consorcio de investigadores de tres universidades conocidos como AIChE model [49], Chan y Fair [50], los cuales trabajaron en el ajuste de correlaciones empíricas volumétricas para coeficientes de transferencia de masa en base a datos experimentales obtenidos por el Instituto de Investigaciones de Fraccionamiento, usando la zona interfacial entre la fase líquida y vapor para la transferencia de masa. Garcia y Fair [51] continuaron los trabajos realizados y extendieron el modelo para mezclas de hidrocarburos. De esta manera en el

presente estudio solo se mencionara la eficiencia existente en la columna HIDiC.

### 3.6 Definición de Eficiencia en Bandejas

La eficiencia en la transferencia de masa al ponerse en contacto en la bandeja puede ser expresada de diferentes maneras, teniendo en cuenta que el modelo presentado en este estudio, analiza la transferencia de calor directa para el equilibrio, por lo cual solo se presentara los dos tipos de eficiencia presentes, el punto de eficiencia y la eficiencia general en la bandeja, para la columna HIDiC sin realizar sus cálculos.

### 3.7 Punto de Eficiencia

Hace referencia a la relación de equilibrio entre la concentración del vapor de salida de la bandeja y la composición de liquido en este punto, por lo tanto el punto puede variar a lo largo de la bandeja, este punto no debe ser mayor a uno por definición. El punto de eficiencia ( $E_{OG}$ ) para un plato o bandeja  $n$  es:

$$E_{OG} = \left( \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}} \right)_{point} \quad [5]$$

Donde  $y$  es la fracción molar del componente vapor ligero y  $y_n$  es la fracción molar del componente vapor ligero, en equilibrio con la concentración de liquido  $X$ . Este concepto es basado en resistencias teóricas.

### 3.8 Eficiencia Total de Bandeja

La ecuación de Murphree es el más usado para el cálculo de la eficiencia ( $E_{mv}$ ), siendo la eficiencia global de la bandeja. Este es

basado en la media de vapor y líquido dejado en la bandeja, por esto debido a su definición su eficiencia puede ser mayor a 100%. La diferencia entre el punto de eficiencia y la eficiencia de Murphree depende del comportamiento de la mezcla. Para el caso de líquido en mezcla completa, la eficiencia se describe como:

$$E_{mv} = E_{OG} \quad [6]$$

Para el caso, que el líquido en la bandeja no cumpla las condiciones este cálculo debe ser realizado por medio del cálculo del punto de eficiencia de Lewis [51].

## CAPITULO IV

### Diseño de Columna de Destilación con Integración Interna de Calor

#### 4.1 Resumen

La Columna con integración Interna de Calor (HIDiC), nace de la necesidad de ahorro energético en la industria, en la actualidad grandes columnas requieren de 100 MW de energía para su operación. Se ha demostrado que el nuevo concepto de columna HIDiC, aprovecha el calor para la disminución del consumo energético. Conceptualmente la columna HIDiC, esta compuesta por una sección de rectificación instalada concéntricamente dentro de la sección de agotamiento de forma anular, El área de transferencia de la pared no es suficiente para transferir el calor necesario, se debe instalar una unidad de calor para asegurar continuidad de aumento del caudal de vapor, de un mínimo a un máximo en la sección de agotamiento. En general para cierta constante de transferencia de calor por etapa, posee un coeficiente de transferencia de calor y una diferencia de temperatura por etapa. La zona de transferencia de

calor, depende del diseño usado, las diferentes configuraciones para una columna HiDiC se presenta en el anexo IV.

#### 4.2 Efectos de Configuración

Un problema potencial que posee la configuración HiDiC, es la distribución simétrica de platos o bandejas. Los estudios mostrados, especifican que un tercio de las etapas figuran en la sección de agotamiento y los otros dos tercios en la sección de rectificación. Una de las cuestiones con respecto a la configuración, es el número de platos en la sección de agotamiento y rectificación de la columna HiDiC, este dependen de la separación binaria que se desee, la configuración de alimento, presiones y temperaturas de las secciones, manteniendo el principio de transferencia de calor de una sección a la otra.

#### 4.3 Transferencia de Energía

Para el ajuste, se describe la ubicación del condensador en el plato 1 y el rehervidor en el plato n. De acuerdo al principio de conservación de materia y energía. La ecuación de balance de material se describe como:

$$R_i = V_{j+1}y_{i,j+1} - V_j y_{i,j} + L_{j-1}x_{i,j-1} - L_j x_{i,j} + F_j z_{i,j} = 0 \quad i=1, \dots, c \quad j=1, \dots, n \quad [1]$$

Donde  $R_i$ , es el bloque de la función residual y n el número total de platos incluyendo el condensador y el rehervidor.

$$N = nr + ns + 2ni + 2 \quad [2]$$

La relación de equilibrio Líquido – Vapor (VLE):

$$y_{i,j} = K_{i,j} x_{i,j} \quad i=1, \dots, c \quad j=1, \dots, n \quad [3]$$

La ecuación de sumatoria molar se describe como:

$$\sum_i^c x_{i,j} = \sum_i^c y_{i,j} = 1 \quad j=1, \dots, n \quad [4]$$

La ecuación de transferencia de calor entre la sección de rectificación y la de agotamiento, se describe como:

$$Q_j = UA(T_j - T_{j+ni-1}) \quad j=nr+2, \dots, nr+ni+1 \quad [5]$$

La ecuación de balance de energía se describe como:

$$V_{j+1}H_{j+1} - V_jH_j + L_{j-1}h_{j-1} - L_jh_j + Q_j = 0 \quad j=1, \dots, n \quad [6]$$

Para el intercambio con cambio de fase, se puede encontrar condiciones intermedias. Los valores de Q se encuentran a partir de las entalpías del fluido, en ausencia de trabajo mecánico [52], de esta manera el balance de energía del fluido circulante es:

$$Q = \Delta H \quad [7]$$

Debido a que las líneas de fluido caliente y frío nunca se van a cruzar. La relación de las dos fases depende de la diferencia de presión y temperaturas entre la sección de rectificación y la de agotamiento.

## CAPITULO V

### Simulación Columna HIDiC y Columna Convencional

#### 5.1 Resumen

En la actualidad son muy pocos los resultados que se tienen con respecto a la columna HIDiC, lo cual hace más difícil la construcción de la columna, el presente estudio, expone la comparación entre la Columna HIDiC y la Convencional para una mezcla Benceno-Tolueno, usando la herramienta de simulación ASPEN PLUS®, con el fin de obtener información valiosa de la columna HIDiC y mostrar

el ahorro energético que esta presenta frente a la columna convencional.

### 5.2 Determinación de parámetros y datos de la Simulación

Se estudio la mezcla binaria Benceno-Tolueno equimolar, para realizar la comparación entre la columna HIDiC y la Convencional. Las condiciones de alimentación y de la simulación son especificadas en la Tabla 1. La simulación es realizada para el equilibrio entre platos en estado estacionario y sin caída de presión en las columnas. El calor es transferido de la sección de rectificación a la de agotamiento por medio de corrientes de calor. Para este análisis se presentan tres casos de estudio, conociendo el calor presente en cada plato por medio de la diferencia de entalpias  $\Delta H$ , estimando un valor máximo de transferencia, por lo cual el coeficiente de transferencia de calor  $U$  y el área  $A$  no son usados para los cálculos. El primer caso presenta una transferencia de calor constante a lo largo de la columna, el segundo expone un perfil de transferencia y el tercero un intercambio escalonado por secciones. La compresión es asumida isoentrópica y la válvula opera adiabática para mantener la presión necesaria entre las secciones, siendo de 0,1013 MPa en la columna convencional y en la sección de agotamiento de la HIDiC. El método usado para el cálculo de los parámetros de la mezcla es NTRL, cabe destacar que la transferencia de calor es directa entre las torres, por lo cual se desprecia la resistencia del material.

ESPECIFICACIONES		
Item	Columna Convencional	HIDiC
Numero de platos	22	22
Presión Rectificación (MPa)	0,1013	0,25
Presión Agotamiento (MPa)	0,1013	0,1013
Razón Flujo en el Alimento (Kmol/h)	100	100
Composición Benceno en Alimento (Frac mol)	0,5	0,5

Tabla1. Parámetros de la Simulación.

Los parámetros para la simulación parten de publicaciones realizadas por grupos de investigación Japoneses y Holandeses [53-60]. La información publicada es muy restringida en la especificación de los parámetros establecidas en la operación, por lo tanto los resultados obtenidos en el estudio de la mezcla benceno-tolueno son de gran importancia para la construcción de una columna HIDiC. La figura 8 representa los modelos comparados.

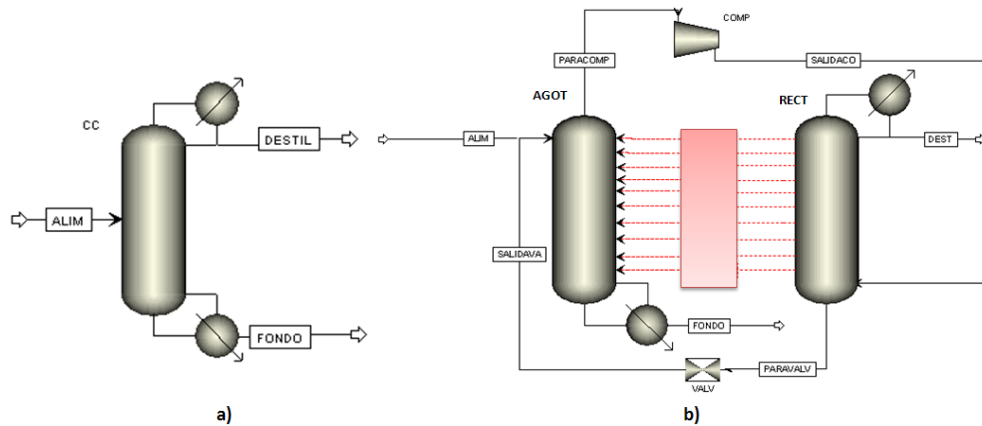


Figura 8. a) Columna Convencional, b) Columna HIDiC

El vapor comprimido proveniente de la sección de agotamiento, entra sobrecalentado a la sección de rectificación. En este estudio se adopta un precalentamiento de la corriente de alimentación. En la tabla 2. Se muestran los resultados de las simulaciones, teniendo como parámetro obtener la mayor concentración de benceno en el destilado.

### 5.3 Resultados obtenidos de los modelos presentados

El comportamiento descrito por la transferencia de calor se muestra en la Figura 9, Los resultados de la simulación se exponen seguidamente en la tabla en la tabla 2.

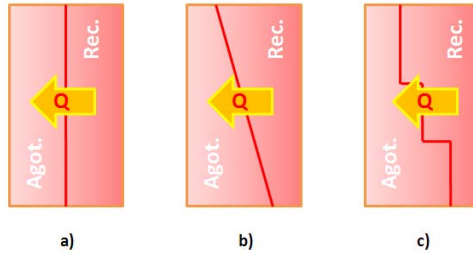


Figura 9. A) Transferencia de calor Caso I, b) Transferencia de calor Caso II, c) Transferencia de calor Caso III.

RESULTADOS				
Item	Convencional	HIDiC Caso I	HIDiC Caso II	HIDiC Caso III
QREHERVIDOR (KW)	18898,17	252,087078	288,26696	157,303269
QCONDENSADOR (KW)	-18897,03	-241,25686	-286,5064	-146,63846
Frac Benceno Destilado	0,99999997	0,89640918	0,8685254	0,94752663
Eficiencia Compresor	-	0,8	0,8	0,8

Tabla 2. Resultados Casos de estudio.

Los calores transferidos de la sección de rectificación a la sección de agotamiento para los casos de estudio se muestran en la tabla 3.

Plato	CASO I		CASO II		CASO III	
	Calor Transferido kW		Calor Transferido kW		Calor Transferido kW	
1	0	-241,25686	0	-2867,51	0	-146,638
2	125	-125	25	-25	80	-80
3	125	-125	50	-50	80	-80
4	125	-125	75	-75	80	-80
5	125	-125	100	-100	115	-115
6	125	-125	125	-125	115	-115
7	125	-125	150	-150	115	-115
8	125	-125	175	-175	115	-115
9	125	-125	200	-200	215	-215
10	125	-125	225	-225	215	-215
11	125	-125	250	-250	215	-215
12	252,087	0	2881,267	0	157,3033	0

Tabla 3. Calor Transferido

Los perfiles de temperatura obtenidos para los tres casos de estudio, son presentados por medio de gráficas de barras, mostrando la

temperatura de la sección de agotamiento y la sección de rectificación a medida que aumenta el número de platos. De esta manera se puede observar que para los tres gráficos el perfil de temperaturas pareciese ser le mismo, sin embargo existe variaciones en la diferencia de temperaturas entre uno los cosos. Se observa que al modificar el calor extraído de la sección de rectificación, la simulación no presenta fallas y los datos mostrados son coherentes.

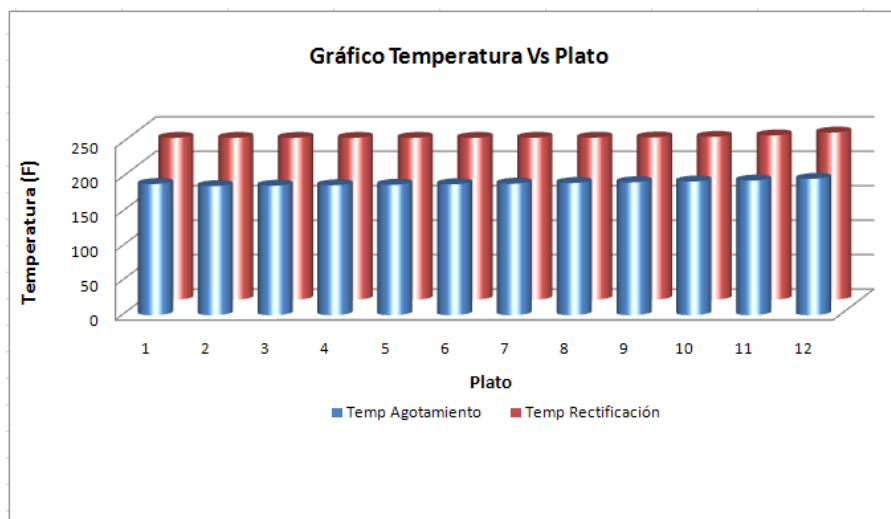


Figura 10. Grafica Temperatura vs Plato Caso I.

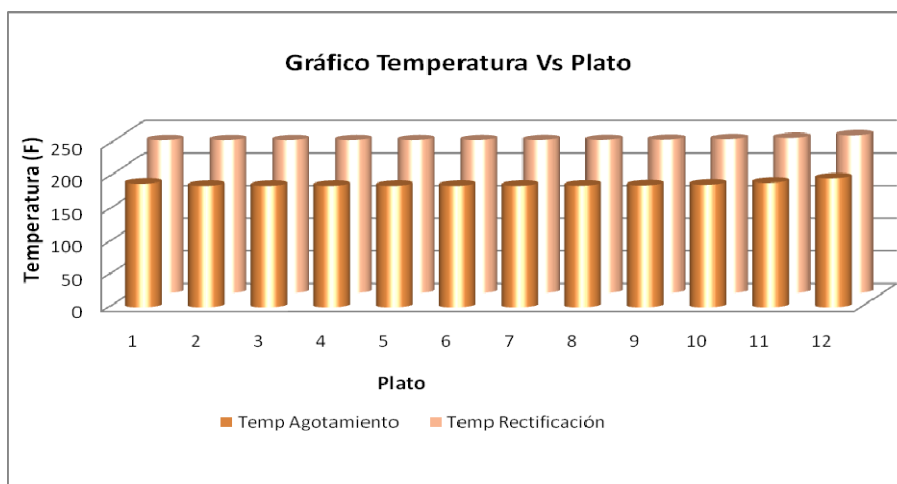


Figura 11. Grafica Temperatura vs Plato Caso II.

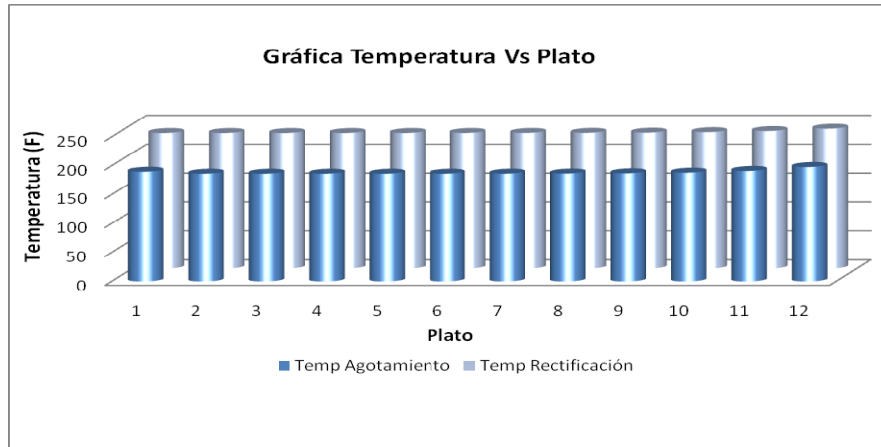


Figura 12. Grafica Temperatura vs Plato Caso III.

#### 5.4 Discusión de resultados

El estudio esta basado en la descripción de diferentes configuraciones internas de calor para columnas de destilación, enfocadas al intercambio interno de calor. Analizando los diseños, su complejidad y alcance es notorio que la integración de calor concéntrica es una viabilidad para el diseño de la configuración interna, sin embargo es necesario incluir intercambiadores de calor que den la temperatura necesaria en todo el volumen de la sección de agotamiento.

Los resultados obtenidos en la simulación son razonables para la separación de una mezcla benceno-tolueno. Como se muestra en la tabla 2, la concentración en el destilado es muy parecida a la obtenida por una columna convencional, de esta manera la separación para mezclas con puntos de ebullición muy cercanos pueden ser tratados en la columna HIDiC.

Las relaciones de reflujo de la columna HIDiC con respecto a la convencional varían significativamente debido a la configuración de presiones y temperatura, por lo tanto la pureza de los productos de

cima y fondo están rigurosamente ligados a la geometría de la columna y las condiciones de operación.

La configuración del compresor y la válvula son fundamentales para mantener la presión y temperaturas necesarias en la sección de agotamiento y de rectificación. Por lo tanto se observo que la eficiencia del compresor y por ende su carga de trabajo depende de las relaciones de reflujo que posean las columnas.

La configuración concéntrica presenta un ahorro energético considerable en el rehervidor y el condensador, comparada con la columna convencional. Cabe resaltar, que se debe incluir intercambiadores de calor en los platos para una mejor transferencia de calor, el arreglo del compresor y relaciones de flujo son fundamentales para la obtención de resultados acertados. A partir de los resultados del presente estudio, se pueden realizar cálculos en función del área y el coeficiente global de transferencia para el dimensionamiento de una columna HIDiC.

### **5.5 Conclusiones**

La literatura presenta estudios detallados sobre la columna HIDiC, pero no reporta datos experimentales para la validación de las simulaciones. Con base en los estudios presentados, en este trabajo se simula el funcionamiento de la columna HIDiC y se presentan los parámetros de diseño mas importantes.

El presente trabajo es la base para un estudio detallado de la configuración interna de calor en la columna, para la posterior estimación del área de transferencia y el coeficiente global de transferencia de calor de la columna HIDiC.

HIDiC es una columna construida especialmente para el ahorro de energía, ubicando en medio de las secciones de rectificación y agotamiento un compresor y una válvula para mantener la presión y temperatura adecuada, como se muestra en la tabla 2, disminuye el consumo de energía en el rehervidor y el condensador en comparación a la columna convencional. Para mejorar la eficiencia energética es necesario incluir intercambiadores de calor entre las secciones, este estudio será considerado en posteriores estudios.

Los parámetros establecidos para la simulación permiten observar la viabilidad de la columna HIDiC y el potencial de ahorro energético con respecto a la Convencional, demostrando la superioridad en el ahorro de energético debido a la configuración del proceso y el aprovechamiento del calor en la sección de rectificación.

Las ventajas de la columna HIDiC son obtenidas a partir de las relaciones de reflujo y la distribución del alimento líquido y vapor en las diferentes secciones, disminuyendo la carga energética en el rehervidor y el condensador, donde estos, al disminuir su consumo energético, disminuyen a su vez las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, estos estimativos serán considerados en estudios posteriores.

Se especificaron tres perfiles de transferencia de calor a lo largo de la columna: perfil constante plato a plato, ascendente plato a plato y escalonado. En cualquiera de los casos la columna HIDiC es superior a la convencional. El calor en el rehervidor disminuye un 40%, 35%, 37% y el calor retirado del condensador disminuye 45%, 37%, 40% respectivamente.

---

**BIBLOGRAFIA**

- 1 Emtir M., Rev E, Fonyo. Rigorous simulation of energy integrated and thermally coupled distillation schemes for ternary mixture. *Applied Thermal Engineering*, 21, 1299-1317. (2001).
- 2 Humphrey, J. L., Seibert, A. F. and Koort, R. A.. Separation technologies advances and priorities, Final Report for US Department of Energy, Office of Industrial Technologist, Washington DC, (1991).
- 3 Linnhoff, B., Pinch Analysis, A State of the Art Review, *Trans. I Chem E*, 71, 503-515 (1993).
- 4 Glenchur, T. and Govind, R., Study on a continuous Heat Integrated Distillation Column, *Separation Science and Technology*, 22(12), 2323-2338(1987).
- 5 Lang, L., Dynamic Behaviour and Operational Aspects of Heat-Integrated Distillation Processes, *Chem. Eng. Technol.*, 19, 498-506 (1996).
- 6 Brugma, A.J., Dutch Patent No. 41.850 (1937).
- 7 Brugma, A.J., US Patent 2,295,256 (1942)
- 8 Petlyuk, F.B., Platanov, V.M. and Slavinskii, D.M., Thermodynamically Optimal Method for Separating Multicomponent Mixtures, *Intl. Chem. Eng.*, 5(3), 555-561 (1965).
- 9 Wolff, E.A. and Skogestad, S., Operation of Integrated Three Product (Petlyuk) Columns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 2094-2103 (1995).
- 10 Halvorsen, I.J. and Skogestad, S., Optimal Operation of Peltyuk Distillation: Steady State Behaviour, *J. Process Control*, 9, 407-424 (1999).
- 11 Shah, P.B., Squeeze more out of Complex Columns, *Chem. Eng. Progress*, 98 (7), 46-55 (2002).
- 12 Wright R.O., U.S Patent 2,471,134, (1949).
- 13 Schultz, M.A., Stewart, D.G., Herris, J.M., Rosenblum, S.P., Shakur, M.S. and O'Brien, D.E., Reduce Costs with Dividing Wall Columns, *Chem. Eng. Progress*, 98 (5), 64-71 (2002).
- 14 Null, H.R., *Chem. Eng. Progress*, 78, pp. 58-64 (1976).
- 15 Sulzer Chemtech, Distillation and Heat Pump Technology, Brochure 22.47.06.40-V.91-100.
- 16 Le Goff, P., Cachot, T. and Rivero, R., Exergy Analysis of Distillation Processes, *Chem. Eng. Technol.*, 19, 478-485 (1996).
- 17 Rivero, R., Exergy simulateon and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation, *Energy*, 26, 561-593 (2001).
- 18 Mah, R.S., Nicholas, J.J. and Wodnik, R.B, Distillation with Secondary Reflux and Vaporization, a comparative evaluation, *AIChE J*, 23, 651-658 (1977).
- 19 J.D. Seader, US Patent NO. 4,234,391 (1978/1980).
- 20 Aso, K., Matsuo, H. Noda, T. Takada and N. Kobayashi, US Patent No. 5,783,047 (1996/1998).
- 21 M. Nakaiwa, K. Huang, M. Owa, T. Akiya, T. Nakane, M. Sato and T. Takamatsu, *Energy*, 22, 621-625 (1997).

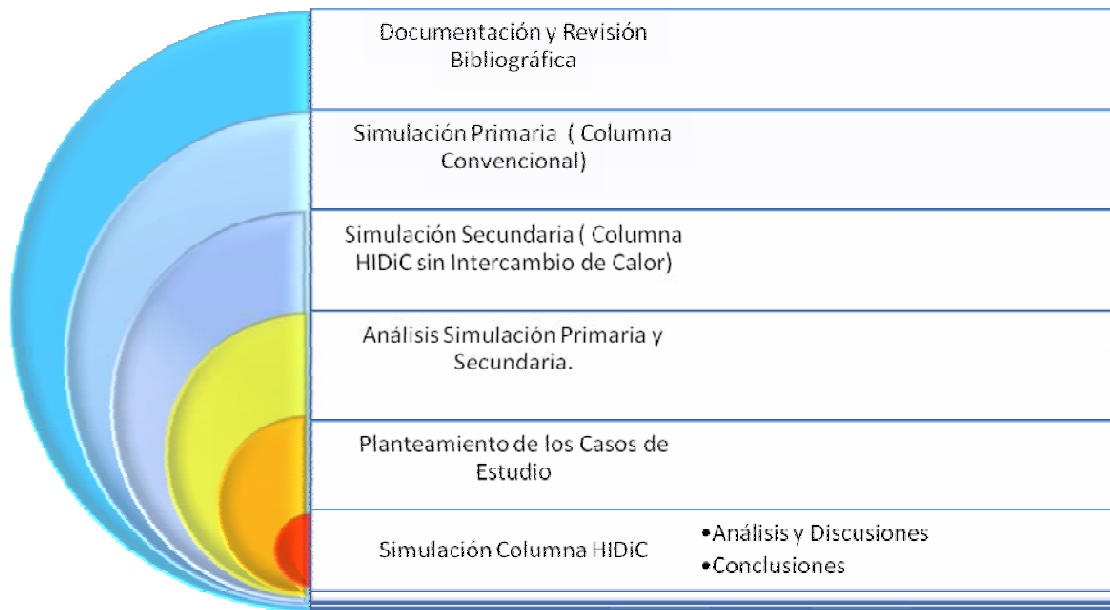
- 22 M. Nakaiwa, K. Huang, K. Naito, A. Endo, M. Owa, T. Akiya, T. Nakane, T. Takamatsu. A new configuration of ideal heat Integrated Distillation columns. *Computers and Chemical Engineering*. 24, 239-245. (2000).
- 23 M. Nakaiwa, K. Huang, K. Naito, A. Endo, T. Akya, T. Nakane and T. Takamatsu, *Comp. & Chem. Eng.*, 25, 737-744. (2001).
- 24 K. Naito, M. Nakaiwa, K. Huang, A. Endo, T. Aso, T. Nakanishi, T. Nakamura, H. Noda, T Takamatsu.. Operation of bench scale ideal heat integrated distillation column (HIDiC): an experimental study. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 495-499. (2000).
- 25 Freshwater, D.C., Thermal Economy in Distillation, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 29, 149-160 (1951).
- 26 M. Gadalla, Z. Oujic, L. Sun, A. De Rijke and P. J. Jansens. Pinch analysis based approach to conceptual desing of internally heat integrated distillation columns. *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Part A, August 2005 Chemical Engineering and Design*, 83(A8): 987-993 . (2005).
- 27 Smith, R., *Chemical Process Design* (McGraw-Hill New York), pp. 341-354 (1995).
- 28 H. Noda, T.Takamatsu, K. Aso, T. Nakanishi, K. Yoshida, M. Nakaiwa, T. Mukaida and N. Kuratani. Developmen on coaxial heat integrated distillation column (HIDiC). *Korean J. Chem. Eng.* 17(5), 593-596 (2000).
- 29 J. de Graauw, US Patent No. 0121303A1 (2005).
- 30 E. Rév, M. Emtir, Z. Szitkai, P. Mizsey, Z. Fonyó. Energy savings of integrated and coupled distillation systems. *Comp. and Chem. Eng.*, 25, 119-140 (2001).
- 31 K. Huang, L. Shan, Q. Zhu, J. Qian. Design and control of an ideal heat integrated distillation column (ideal HIDiC) system separating a close-boiling ternary mixture. *Energy*. 32, 2148-2156 (2007).
- 32 J. A. Hugill, US Patent No: 7,111,673 B2 (2006).
- 33 M. Gadalla, Z. Olujic, A. de Rijke, P. J. Jansens. Reducing Co2 emissions of internally heat Integrated Distillation columns for separation of close bouling mixtures. *Energy*, 32, 2409-2417 (2006).
- 34 Hanselden, G.G., An approach to minimum power consumption in low temperature gas separation, *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 122-132 (1958).
- 35 Flower, J.R., Jackson, R., *Trans Inst. Chem. Eng*, 42, 249-258, (1964).
- 36 Aguirre, P., Espinosa, J., Tarifa, E and Scenna, N., *Ind. Eng Chem Res*, 36: 4882-4893 (1997).
- 37 De Koijer, G.M., Kjelstrup, S., Van der Kooij, H., Gross, B., Knoche, K.F., and Andersen, T.R., Positioning heat exchangers in binary tray distillation using isoforce operation, *Energy Conversion and management*, 43, 1571-1581 (2002).
- 38 Tondeur, D., and Kvaalen, E., Equipartition of entropy-production. An optimalitility criterion for transfer and separation processes, *Ind. Engng. Chem Res*, 26, 50-56 (1987).

- 
- 39 Villermaux, J., Future Challenges for basic research in chemical engineering, *Chemical Engineering Science*, 48(14): 2525-2535 (1993).
  - 40 Nakaiwa, M., Internally Heat integrated distillation columns: a review, *Trans IChemE*, 81 Part A, (2003).
  - 41 Liu, X.G. and Qian J.X., *Chem Eng Technol*, 23: 235-241 (2000).
  - 42 Keller G.E. and Humphrey, J.L., *Separation Process Technology*, McGrawHill, New York (1995).
  - 43 Olujic, Z., Fnakhri, F., de Rijke, A., de Graauw, J., and Jansens, P. J., Internal Heat Integration – the key to an energy conserving distillation column, *J Chem Technol Biotechnol*, 78, 241-248 (2003).
  - 44 Jansens, P. J., Fahkri, F., de Graauw. J. And Olujic, Z., Energy saving potential heat integrated distillation column, *Proceedings of the topical distillation symposium, AIChE 2001 Spring Meeting Houston, 22-26 April, 19-25* (2001).
  - 45 Beggs, S. Meng project report, University of Edinburgh UK, (2002).
  - 46 Govind, R., Dual distillation columns, U.S: Patent 4,681,661 (1987).
  - 47 VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, 1994.
  - 48 Kapitza, P.L. *Wave Flow of Thin Films of Viscous Liquids*, Collected Papers of Kapitza, Pergamon Press Ltd. 662-689 (1949)
  - 49 American Institute of Chemical Engineers, Research Committee. *Tray Efficiencies in Distillation Columns*, AIChE: New York (1958).
  - 50 Chan, H. and Fair, J.R., Prediction of Point Efficiencies on Sieve Trays.1. Binary Systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 23, 814-820 (1984).
  - 51 Lewis, W.K., *Ind. Eng. Chem*, 28, 399 (1936).
  - 52 Levenspiel O. *Engineering flow and Heat Exchanger*. Ed. Reverté S.A., Ver. Español, 245-25 (1993).
  - 53 Huang, K., Shan, L., Zhu, Q., Qian, J. A totally heat Integrated distillation column (THIDiC) – the effect of feed pre – heating by distillate.. *Applied Thermal Engineering*. 28, 856-864 (2008).
  - 53 Nakaiwa M., Huang K., Naito K., Endo A., Akiya T., Nakane T., Takamatsu T. Parameter analysis and optimization of ideal heat Integrated distillation columns. *Computers and Chemical Engineering*. 25, 737-744. (2001).
  - 55 Wang L., Makita H., Kano M. and Hasebe S. Dynamic Start-up Model of Heat Integrated Distillation Column. *PSE ASIA*, Xi'an, China. August 15-18 (2007).
  - 56 Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T., Nakane T. and Sato M. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 97151, 1587-1591 (2001).
  - 57 Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T., Nakane T. Operating an Ideal Heat Integrated Distillation Column with Different Control Algorithms. *Computers and Chemical Engineering*. 22, S389-S393 (1998).
  - 58 Gadalla M., Olujic Z., Laureano Esteller L.J., Gonsábez G.G. A desing method for internal heat Integrated Distillation columns. 17<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17, 1041 (2007).

- 59 Tkamatsu, T., Nakaiwa, M., Huang, K., Akiya, T., Noda, H., Nakanishi, T. and Aso, K. Simulation oriented development of a new heat integrated distillation column and its characteristics for energy saving. *Computer Chem Engng*, Vol 21, Suppl, S243-247 (1997).
- 60 Gadalla, M., Jimenez, L., Olujić, Z., Jansens, P.J. A thermo-hydraulic approach to conceptual design of an internally heat-integrated Distillation column. *Computers and Chemical Engineering*, 31, 1346-1354 (2007).

## ANEXOS

### ANEXO I Metodología del Proyecto



### ANEXO II Vaporización con Reflujo Secundario o Recompresión Directa de vapor (SRV)

La recuperación de energía en la industria de procesos, ha sido un tema de gran importancia por los costos requeridos en la operación, siendo la destilación un proceso que consume gran cantidad de energía. La configuración de transferencia de calor de la sección de rectificación a la sección de agotamiento es un método eficaz para el ahorro de energía en columnas de destilación. Este método, propuesto por primera vez por Mah et al, se llama método de vaporización y reflujo secundario 'SRV' (Figura 13). Desde entonces, hubo amplios estudios de 'SRV'. HiDiC es una de las columnas de destilación, donde el ahorro de energía se realiza por el método de

SRV, en la cual no hay rehedidor ni condensador y tiene gran potencial de reducción de energía.

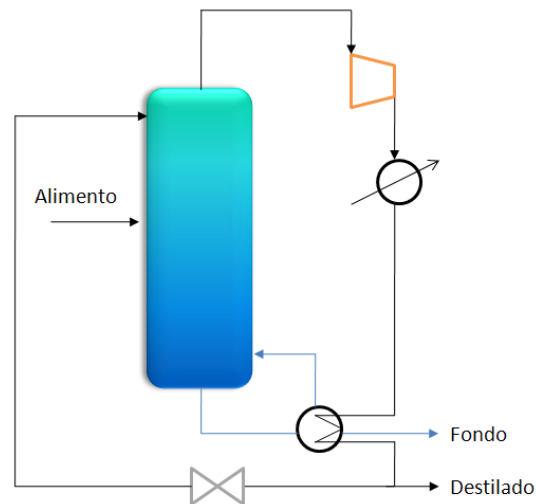


Figura 13. Modelo Vaporización y Reflujo Secundario

En la destilación "SRV" las tasas de vaporización y el reflujo son manipulados para aumentar la eficiencia térmica en general. Esta manipulación logra un intercambio de calor entre las secciones de rectificación y agotamiento, con el fin de proporcionar la temperatura necesaria para el intercambio de calor entre las dos columnas. La sección de rectificación opera a más alta presión, dando como resultado el calor necesario para el intercambio, la tasa de reflujo líquido aumenta a medida que desciende por la sección de rectificación, mientras que el caudal de vapor aumenta hasta pasar la sección. Estudios realizados por Batista y Meirelles, describen que el fluido interno es una recirculación, consecuencia del intercambio de calor, por lo tanto las columnas pueden ser operadas en relaciones mas bajas de reflujo sin poner en peligro la pureza del producto y reduciendo energía adicionalmente.

De esta manera el vapor del tope de la columna es comprimido y después condensado usando el rehervidor de la misma columna, dando el calor necesario para la generación de vapor.

### ANEXO III Equipos Usados en columna HIDiC

En la unidad de destilación fraccionada se encuentran asociados equipos que permiten el funcionamiento de la torre, los cuales en principio también son usados para la configuración de Columna de Destilación con Integración Interna de Calor HIDiC, cada uno de estos cumple una tarea específica ya sea para el intercambio de calor o el mejoramiento de la transferencia de masa, integrándose todos como un solo equipo encargado de la separación por destilación. A continuación en la Tabla 4 se especifican los equipos presentes en la destilación fraccionada.






EQUIPO	EQUIPO	DESCRIPCIÓN	OTROS
Columna		Equipo de separación de los componentes. Dos ubicados concéntricamente.	Sus especificaciones de altura y diámetro, número de platos y forma de plato, depende del componente a tratar.
Rehervidor (Reboiler)		Encargado de vaporizar el producto de fondo.	El tipo de intercambiador depende de los componentes a tratar, siendo el más usado Tubo y carcasa.
Condensador		Enfría y condensa el vapor que sale por la parte superior de la columna.	Intercambiador de calor encargado de bajar la temperatura de los vapores de cima, se construyen de acuerdo al componente a condensar.
Válvula		Encargada del paso de los componentes y ajuste de presión entre las secciones.	Son ajustadas de acuerdo al sistema de control y al diagrama del proceso descrito.
Compresor		Compresión del vapor a alimentar en la sección de rectificación.	Ajustado de acuerdo a las necesidades del proceso.

Tabla 4. Equipos Usados en columna HIDiC.

Las especificaciones y materiales con los que se debe construir la torre, obedece rigurosamente al modelo y los ajustes obtenidos en simulaciones previas de las condiciones en las cuales se va a desarrollar el proceso, a demás de los componentes con los cuales se van a trabajar.

#### **ANEXO IV Integración Interna de Calor en Columna de Destilación Ideal (Ideal Heat Integrated Distillation Column - "Ideal - HIDiC")**

Takamatsu et al. (1996) extendió el método de Mc Cabe – Thiele para la columna con integración interna de calor, identificando la posibilidad de operar sin la necesidad de rehervidor ni condensador (esta configuración se llama Ideal 'Heat Integrated Distillation Column' – Ideal HIDiC (Figura 14).

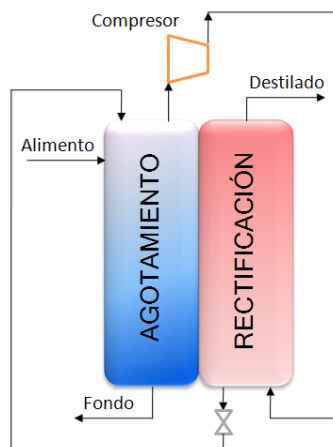


Figura 14. Ideal HIDiC

El presente modelo de columna, parte del principio básico de intercambio de calor entre la sección de rectificación y la sección de agotamiento, para mezclas binarias. Estas dos secciones están

separadas en dos columnas, conectadas por el intercambio interno de calor.

El acoplamiento interno de la Columna Ideal de Destilación con Integración Interna de Calor, intercambia calor entre las dos columnas instaladas concéntricamente, de la sección de rectificación que opera a presión y temperaturas más altas a las que opera la sección de agotamiento. Para el ajuste de la presión se ubica un compresor y una válvula entre las secciones. De esta manera la integración de calor genera reflujos en la sección de rectificación y flujos de vapor en la sección de agotamiento. El principio del 'Ideal - HiDiC' es el no uso de condensador y rehervidor en la unidad de operación, realizando de esta manera la disminución de la transferencia de calor del rehervidor hasta que tome un valor de cero, que es lo que se busca para el proceso, la disminución de la energía demandada por el rehervidor y de las emisiones que este posee.

La síntesis y análisis del 'Ideal - HiDiC' a sido discutida por Takamatsu, Nakaiwa, Huang, Akiya y Aso (1997). Nakaiwa, Huang, Owa, Akiya, Endo, Naito, Nakane y Takamatsu (1999) han estudiado la factibilidad de la operación del proceso más reciente. Los estudios realizados por estos investigadores indican que el ahorro energético con respecto a la columna convencional es significativo y de operación factible.

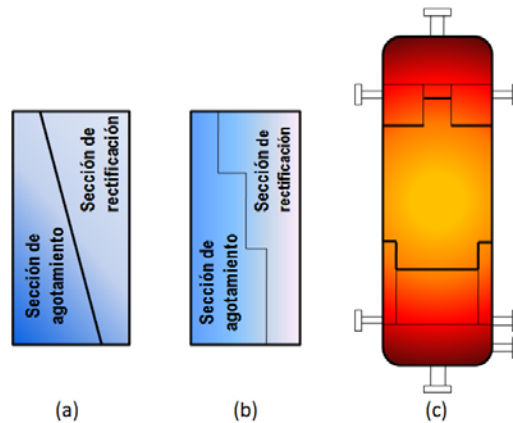


Figura 15. Estructura General de HIDiC

De los estudios realizados y la heurística adquirida a partir de la construcción del modelo a escala piloto, de 20 m de altura y 254 mm de diámetro, la estructura concéntrica de la torre y el intercambio de calor adoptado, posee un comportamiento general con respecto a la sección de la torre (Rectificación / Agotamiento), su presión y temperatura. En la Figura 15c se ilustra el arreglo para Ideal – HIDiC, donde el tubo que trabaja en la parte interna de la configuración de forma anular, es la sección de rectificación y axialmente se encuentra la sección de rectificación para el intercambio de calor. El embalaje de estas dos secciones ubicadas concéntricamente es tipo MC PACK, siendo este empaquetamiento el que permite la acción de intercambio de calor debido a la zona de transferencia entre las dos secciones.

En la sección de rectificación, debido a que el vapor se condensa gradualmente a lo largo del tubo en el intercambio de calor, el caudal de vapor disminuye a medida que asciende por la torre. Por el contrario en la sección de agotamiento como el líquido es evaporado gradualmente a lo largo de la carcasa por el intercambio de calor, el flujo de vapor se incrementa hacia la cima de esta sección. El comportamiento ideal para 'HIDiC' debe tener un comportamiento

como se muestra en la Figura 15a, debido a que la sección transversal del área de destilación debe ser proporcional al caudal de vapor. Sin embargo, debido a que su construcción es complicada, la columna en la práctica es modificada a una forma como se muestra en la Figura 15b. Como se observa en la figura el tubo de la sección interna en un tamaño a escala, cambia dos veces en su camino a la parte superior de la torre. Sus diámetros son de 140,165 y 190 mm y sus correspondientes longitudes son de alrededor de 3, 8 y 5 metros respectivamente.

La descripción del funcionamiento del ideal HIDiC se enuncia en la Tabla 5, en donde se especifica el procedimiento de inicio de la operación, de acuerdo a los trabajos realizados por K. Naito, M. Nakaiwa, K. Huang, A. Endo, K. Aso, T. Nakanishi, T. Nakamura, H. Noda, T. Takamatsu.

PASO	PROCEDIIMIENTO
(i)	Ideal HIDiC limpio y vacío.
(ii)	Introducción del alimento, en la etapa de alimentación
(iii)	El líquido llega a la parte inferior de la columna, con el rehedidor arreglado incrementando el 'holdup' (Tiempo de mantenimiento).
(iv)	El rehedidor arreglado y especificado para determinado volumen de líquido y el nivel de control de trabajo. El calor en el rehedidor se presenta en el momento en que el compresor comienza a trabajar.
(v)	La presión en la sección de rectificación llega a un nivel predeterminado y el condensado comienza a trabajar. La presión es mantenida por el 'duty' del condensador y el nivel de control al cual comienza a trabajar. El proceso está direccionado a un reflujo total, hasta de flujo de vapor de salida del plato posee un valor determinado.
(vi)	El producto de destilado y la composición a la salida del fondo es controlado por un interruptor de encendido. Mientras tanto el reflujo y la tasa del rehedidor se reducen gradualmente a cero.
(vii)	Continuación de la operación.

Tabla 5. Inicio de operación Ideal HIDiC

De este procedimiento se puede constatar, que el tiempo de arranque posee dificultades ya que puede demorarse hasta más de

10 horas para encontrar su equilibrio. La Figura 16 muestra una típica respuesta transitoria de Ideal HiDiC.

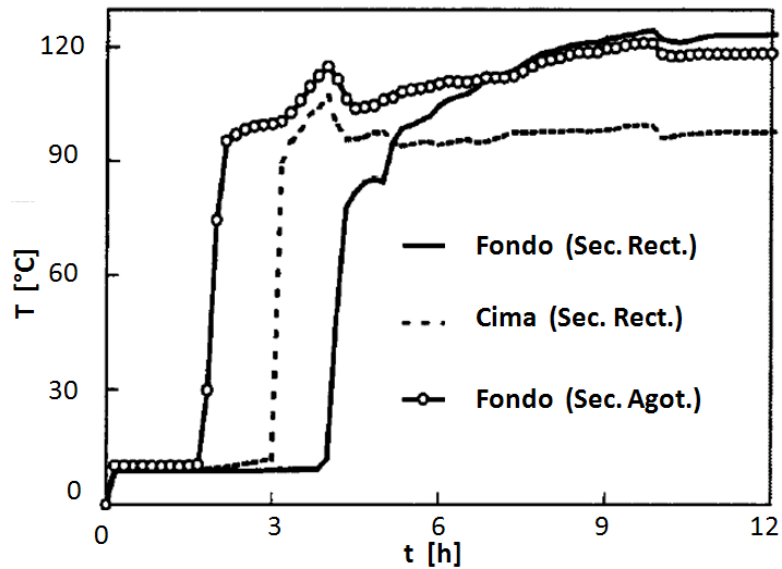


Figura 16. Respuesta transitoria con duración en el tiempo Ideal HiDiC

A pesar de las complicaciones que presenta su construcción, los estudios realizados para el ideal HiDiC muestran la superioridad en eficiencia energética con respecto a la columna convencional.

ANEXO V Posibles Configuraciones de Columnas de destilación con Integración Interna de Calor (HIDiC)

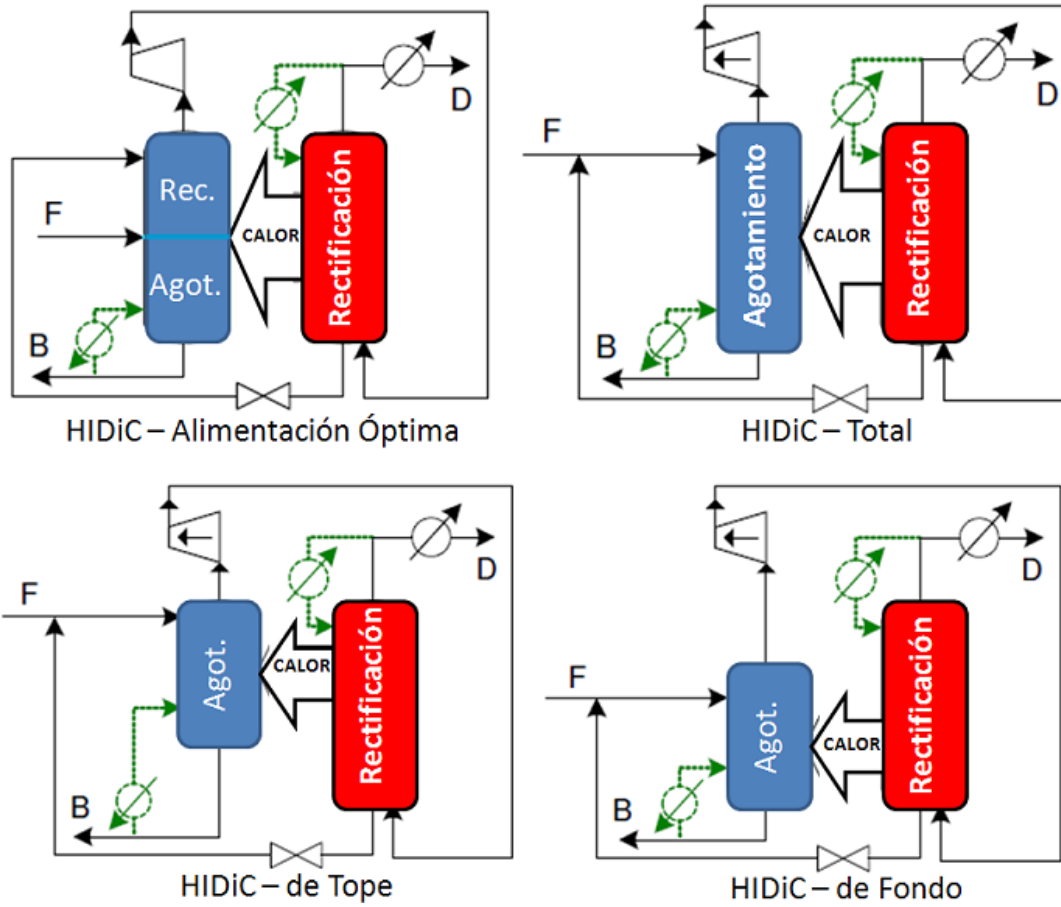


Figura 17. Configuraciones HIDiC