

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO II**

# **EVALUACIÓN TERMOHIDRÁULICA DEL SISTEMA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE VAPORES DE UNA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO (FCC)**

Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. RODRÍGUEZ A., Daniel.  
para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO II**

# **EVALUACIÓN TERMOHIDRÁULICA DEL SISTEMA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE VAPORES DE UNA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO (FCC)**

### **Tutores:**

Ing. Fernando Urdaneta  
Prof. Lucy Monsalve

Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. RODRÍGUEZ A., Daniel.  
para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

Caracas, Noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel David Rodríguez, titulado:

**“EVALUACIÓN TERMOHIDRÁULICA DEL SISTEMA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA SECCIÓN DE RECUPERACIÓN DE VAPORES DE UNA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO (FCC)”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.

---

Prof. Andrés Rosales  
Jurado

---

Prof. Jaime Hernández  
Jurado

---

Prof. Lucy Monsalve  
Tutor Académico

---

Ing. Fernando Urdaneta  
Tutor Industrial

**Rodríguez A., Daniel D.**

**EVALUACIÓN TERMOHIDRÁULICA DEL SISTEMA DE  
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA SECCIÓN DE  
RECUPERACIÓN DE VAPORES DE UNA UNIDAD DE  
CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO (FCC)**

**Tutor académico: Profa. Lucy Monsalve. Tutor industrial: Ing. Fernando Urdaneta. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2008, 200 pp**

Palabras claves: intercambiadores de calor, tubos y carcasa, software DETC, visual basic

El presente proyecto surge de la necesidad presentada por la empresa Venezolana de Proyectos Integrados (VEPICA), para evaluar los intercambiadores de calor de la sección de recuperación de vapores (SRV) de una unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) ante el aumento de flujo de la corriente de alimentación a la unidad. Adicionalmente se requiere implementar una herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa para procesos que manejen fluidos líquidos, y de este modo estudiar la influencia de distintas variables de operación en los parámetros de caída de presión y coeficiente global de transferencia de calor, principalmente.

En tal sentido, este Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo fundamental evaluar termohidráulicamente el sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC estudiada y el desarrollo de una herramienta para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, haciendo uso de hojas de cálculo en Microsoft Excel y de la programación de algoritmos en el lenguaje de programación Visual Basic for Applications.

Para la evaluación del sistema de intercambiadores de calor, se empleó el software HTRI y se comparó el funcionamiento de los equipos a condiciones actuales de flujo y a las nuevas condiciones. Los resultados obtenidos a partir de estas evaluaciones indican que, el sistema de intercambiadores de calor evaluado no puede soportar la nueva carga de alimentación, por lo cual, es necesario realizar modificaciones estructurales a los equipos, ya sea variar el espaciado de deflectores, el número de pasos por los tubos o colocar otro intercambiador para operar en serie o en paralelo.

Con respecto a la validación de la herramienta de programación realizada, se emplearon los datos de dos de los intercambiadores de la unidad de FCC en estudio, y se compararon los resultados obtenidos con los arrojados por el software HTRI para el estudio de los mismos equipos. Al comparar ambos resultados se concluye que la herramienta de programación arroja resultados aceptables. Los valores obtenidos sirvieron de soporte para realizar la validación del programa, en base al objetivo fundamental del mismo, el cual busca estudiar, de una forma aproximada pero realista, la influencia de distintas variables de operación en la transferencia de calor en intercambiadores de tubos y carcasa.

## **Agradecimientos**

A mi Universidad Central de Venezuela, donde conocí a las personas que hoy en día son mis hermanos y donde viví las más maravillosas experiencias. Probablemente se hayan acabado los días de estudio al final de la escuela, los lunes, martes o miércoles de parroquia, las noches de ping pong, los almuerzos en el piso, pero todo eso y otras muchas vivencias me han convertido en un auténtico ucevista, y hoy más que nunca me siento orgulloso de pertenecer a tan selecto grupo. Sueño con el día de verte remozada y convertida en la verdadera obra de arte que hoy se encuentra medio escondida, pero me despido de ti tranquilo, sabiendo que tu verdadera esencia, permanece intacta. Gracias!

A la Profe Lucy. Cuando la conocí me impresionó su juventud y cuando me dijo que yo era su primer tesista, debo confesar que me asusté. Sin embargo, lo logramos juntos y le doy las gracias por sus sermones a veces y por sus palabras de aliento siempre. Éxito y espero seguir en contacto.

Si hay alguien al que le debo dar las más grandes de las gracias por haber podido culminar mi carrera, es al Sr Fernando. A veces me pregunto cual es la razón por la cual hace mas de 7 meses me dio la oportunidad de poder terminar este camino, y la respuesta es la más obvia: es un gran profesional y mejor persona. Espero seguir aprendiendo de Ud, ya sea dentro de la empresa o fuera de ella, pero ahora como colegas. Mil Gracias Sr. Fernando.

A mi mamá. ¿Qué te puedo decir que ya no sepas? A través de este laaaargo camino siempre has estado allí, como una mamá gallina, protegiéndome, diciéndome que descanse, consintiéndome (como cuando nos llevabas a ana y a mí sendas arepas después de una noche de tesis con el infaltable jugo natural para no enfermarnos), llevándonos a todas partes. Dios, tantas cosas!!! Eres la persona más importante de mi vida, eres lo máximo y mi éxito es tuyo. Te amo!

A mi papá. Eres mi modelo a seguir, mi guía. Cada vez que dicen que me parezco a ti no quepo del orgullo que siento. Esto te lo dedico a ti y a mi mamá. Todo lo que has

trabajado por Dani y por mí, espero poder retribuírtelo de alguna forma, aunque sé que no me alcanzaría la vida para hacerlo. Te amo!

A Dani. Cada vez que pienso que te vas pronto se me parte el alma. Eres mi hermana con todas sus letras, me has protegido y cuidado durante 24 años y hoy quiero agradecerte por vivir conmigo cada uno de mis éxitos. Éste también es para ti. Te amo! El día que te vayas de la casa voy a quedar un poquito destruido, pero mientras seas feliz yo también lo seré, y estoy seguro que no vas a encontrar mayor felicidad que con el cuñadito obesín de Dal. Eres lo máximo cuñaito, mis más sinceras Gracias!

Me seco las lágrimas y continúo...

A Ana María. Si de algo estoy seguro, es que no voy a conocer alguien más luchador que tú. Sé que no es común que te diga cosas cariñosas, pero no sé, me parece, tengo la impresión, de que éste es el momento. Nos conocemos hace más de seis años y todavía no dejas de sorprenderme con tu particular personalidad, pero he vivido contigo momentos inolvidables que no hubiese querido compartir con nadie más. Está de más decir que eres mi segunda hermana y que como tal y a pesar de las peleas diarias, te amo! No sólo sé que tu camino hasta hoy no ha sido nada fácil, sino que he vivido como propios, los millones de obstáculos que la vida te puso en frente. Espero que estés allí cada vez que te necesite, aunque te aseguro que yo estaré aquí para ti siempre. Lo logramos!!!! Finalmente podemos decirlo; Lo logramos juntos!!!!

A Neglin. Siempre serás la más especial. Vivimos momentos mágicos. La vida te puso frente a mí para formar este vínculo a prueba de todo. Gracias Dory Te amo! A Alfon. Mi negrita macumbambé. Tu eterna sonrisa y tu actitud siempre positiva hace que los momentos que compartimos sean lo máximo. A Napo. Mi único hermano. Le doy gracias a dios que pude encontrar a cuatro personas espléndidas, mis hermanos, con historias dignas de un bestseller y que han hecho de mí un mejor persona. Todavía me faltan millones de experiencias por vivir, pero espero contar con Uds. para seguir escribiéndolas juntos. Los amo!

A Alicia mi amiga incondicional. Desde el primer días somos compinches y de verdad no se cómo me aguantaste. Contigo al lado fue mucho más fácil lograrlo. Sabes que te amo y extraño verte todos los días. Infinitas gracias! A Bianquita. Eres

la máxima expresión de que todo lo bueno viene en frasco miniatura. Me haces sentir orgulloso “Novia de navidad”, eres especial para mí. Gracias por ser como eres. A Raque. Gracias por estar siempre pendiente de mí negrita, jamás lograré formar un mejor caraoto team que el que formamos juntos. Gracias. A Janny, mi ingeniera viejita Gracias!. A Luis Mi y a Raymond. Los pocos machos que tengo como panas. Gracias!. A David, Alito, Kathy, César, por favor no olvidemos el póker. A Josne, Mon, Chico, Iralis, Laurent, Annabelle, Johann, Jorge. A Gabriella y a Maru. Gracias por sus alentadoras palabras y por los super breaks.

A mi familia. Abuelita Te amo!. A mis tías Nancy, Morelba, Omaira, Yolanda y Erica. A mi tío Luis. A Mary. A mis super primos Gaby “la mosca” y Luis E “la larva”. Al Chino, a Lenny.

Cada uno de ustedes, contribuyó de una u otra manera a que pudiera alcanzar la meta que hace meses veía tan lejana, pero que hoy finalmente estoy cruzando con éxito. Espero que sigan allí, conmigo, cuando escriba mi próxima Tesis.... Sí claro!!!! Mil Gracias!!!

**ÍNDICE GENERAL**

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>1</b>
I.1. Planteamiento del problema.....	1
I.2. Objetivos.....	3
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
II.1. Proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado .....	4
II.1.1. Descripción general de una refinería .....	4
II.1.2. Descripción del proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado .....	6
II.1.2.1. Sección de Recuperación de Vapores (SRV) .....	9
II.2. Transferencia de calor .....	13
II.2.1. Mecanismos de transferencia de calor.....	13
II.2.1.1. Transferencia de calor por conducción.....	13
II.2.1.2. Transferencia de calor por radiación .....	15
II.2.1.3. Transferencia de calor por convección .....	16
II.2.2. Equipos de transferencia de calor .....	17
II.2.3. Intercambiador de calor de tubos y carcasa.....	20
II.2.4. Componentes de intercambiadores de calor de tubos y carcasa.....	25
II.2.4.1. Tubos .....	25
II.2.4.2. Carcasa .....	28
II.2.4.3. Deflectores.....	29
II.2.5. Variables de operación en intercambiadores de calor de tubos y carcasa ..	31
II.2.5.1. Área de Flujo .....	32
II.2.5.2. Régimen de Flujo .....	32
II.2.5.3. Coeficientes individuales de transferencia de calor .....	35
II.2.5.4. Coeficiente global de transferencia de calor .....	39
II.2.5.5. Diferencia media de temperaturas .....	42
II.2.5.6. Factor de ensuciamiento .....	46

II.2.5.7. Caídas de presión a través de los tubos y la carcasa.....	47
II.2.5.8. Disposición de los fluidos .....	50
II.2.6. Problemas operacionales comunes .....	51
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>55</b>
III.1. Evaluación del sistema de intercambiadores de la unidad de FCC.....	55
III.2. Desarrollo de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa .....	58
III.2.1. Criterios para el diseño de intercambiadores de tubos y carcasa .....	59
III.2.2. Procedimiento de cálculo para intercambiadores de tubos y carcasa .....	60
III.2.3 Desarrollo de la interfaz del programa.....	69
III.2.4 Validación del programa .....	72
<b>CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
IV.1. Evaluación termohidráulica de los intercambiadores de la SRV de la unidad de FCC estudiada a condiciones actuales.....	73
IV.2. Evaluación termohidráulica de los intercambiadores de la SRV de la unidad de FCC estudiada a nuevas condiciones .....	77
IV.3. Desarrollo de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa .....	104
IV.4. Validación de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa .....	112
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>121</b>
<b>CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>123</b>
<b>CAPÍTULO VI. APÉNDICES.....</b>	<b>125</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Conductividad térmica de diversos materiales.....	14
<b>Tabla 2.</b> Tipo de intercambiadores de calor .....	19
<b>Tabla 3.</b> Nomenclatura de los componentes de intercambiadores de calor de tubos y carcasa .....	22
<b>Tabla 4.</b> Velocidades máximas recomendadas para fluidos en tubos y carcasa.....	34
<b>Tabla 5.</b> Coeficientes globales de transferencia de calor (aproximados).....	41
<b>Tabla 6.</b> Datos de diseño del sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC .....	74
<b>Tabla 7.</b> Comparación entre los datos de diseño y los resultados de la primera evaluación del sistema de intercambiadores de la SRV de la unidad de FCC.....	76
<b>Tabla 8.</b> Evaluación del intercambiador E-101 a condiciones actuales y modificadas.....	78
<b>Tabla 9.</b> Evaluación del intercambiador E-101 en paralelo.....	80
<b>Tabla 10.</b> Evaluación del intercambiador E-102 a condiciones actuales y modificadas.....	81
<b>Tabla 11.</b> Evaluación del intercambiador E-102 en serie.....	83
<b>Tabla 12.</b> Evaluación del intercambiador E-102 en paralelo.....	85
<b>Tabla 13.</b> Evaluación del intercambiador E-103 a condiciones actuales y modificadas.....	87
<b>Tabla 14.</b> Evaluación del intercambiador E-103 en paralelo.....	88
<b>Tabla 15.</b> Evaluación del intercambiador E-104 a condiciones actuales y modificadas.....	89
<b>Tabla 16.</b> Evaluación del intercambiador E-104 en serie.....	91
<b>Tabla 17.</b> Evaluación del intercambiador E-104 en paralelo.....	92
<b>Tabla 18.</b> Evaluación del intercambiador E-105 a condiciones actuales modificadas.....	94
<b>Tabla 19.</b> Evaluación del intercambiador E-105 en serie.....	95

<b>Tabla 20.</b> Evaluación del intercambiador E-105 en paralelo.....	97
<b>Tabla 21.</b> Evaluación del intercambiador E-106 a condiciones actuales y modificadas.....	98
<b>Tabla 22.</b> Evaluación del intercambiador E-106 ante las propuestas planteadas.....	99
<b>Tabla 23.</b> Evaluación del intercambiador E-107 a condiciones actuales y modificadas.....	101
<b>Tabla 24.</b> Evaluación del intercambiador E-107 en paralelo.....	102
<b>Tabla 25.</b> Resultados del programa DETC en el caso de Diseño.....	108
<b>Tabla 26.</b> Resultados del programa DETC en el caso de Evaluación.....	111
<b>Tabla 27.</b> Caso1: Comparación entre hoja de datos de E-106 y resultados del diseño con DETC y HTRI.....	114
<b>Tabla 28.</b> Caso2: Comparación entre hoja de datos de E-107 y resultados del diseño con DETC y HTRI .....	115
<b>Tabla 29.</b> Comparación de resultados de la evaluación del caso 3 con HTRI y DETC .....	118
<b>Tabla 30.</b> Comparación de resultados de la evaluación del caso 4 con HTRI y DETC.....	119

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema General de una Refinería .....	5
<b>Figura 2.</b> Esquema General de la unidad de FCC.....	8
<b>Figura 3.</b> Esquema de la Sección de Recuperación de Vapores .....	10
<b>Figura 4.</b> Esquema básico de un intercambiador de tubos y carcasa .....	21
<b>Figura 5.</b> Intercambiador de cabezal fijo. ....	23
<b>Figura 6.</b> Intercambiador de tubos en U .....	24
<b>Figura 7.</b> Intercambiador de cabezal flotante.....	24
<b>Figura 8.</b> Arreglo de tubos .....	27
<b>Figura 9.</b> Tipo de deflectores segmentados.....	30
<b>Figura 10.</b> Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada en tubos... 35	
<b>Figura 11.</b> Esquema de resistencias térmicas.....	38
<b>Figura 12</b> Perfiles de temperatura para fluidos en contracorriente y en paralelo .....	42
<b>Figura 13</b> Ventana de inicio del programa DETC. ....	104
<b>Figura 14</b> Ventana de Introducción de datos para el caso de Diseño. ....	105
<b>Figura 15</b> Ventana de Resultados para el caso de Diseño.....	107
<b>Figura 16.</b> Ventanas de recomendación para caídas de presión mayores a la permisible.....	109
<b>Figura 17.</b> Ventana de recomendación para porcentaje de área en exceso negativo	109

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

### Símbolos Latinos

	Símbolo	Unidades	
		SI	Inglesas
$A$	Área total de transferencia de calor	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$A_D$	Área de transferencia de calor disponible	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$A_{fc}$	Área de flujo de la carcasa	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$a_{ft}$	Área de flujo de cada tubo	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$A_{Ft}$	Área de flujo total de los tubos	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$a_t$	Área de transferencia de calor de cada tubo	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$A_{req}$	Área de transferencia de calor requerida	m <sup>2</sup>	pie <sup>2</sup>
$\%A_{exc}$	Porcentaje de área en exceso		%
$B$	Espaciado entre deflectores	mm	pulg
$c$	Capacidad calorífica del fluido frío	kJ/kg.K	BTU/lb.h
$C$	Capacidad calorífica del fluido caliente	kJ/kg.K	BTU/lb.h
$c_i$	Capacidad calorífica del fluido de los tubos a la temperatura media	kJ/kg.K	BTU/lb.h
$c_o$	Capacidad calorífica del fluido de la carcasa a la temperatura media	kJ/kg.K	BTU/lb.h
$C'$	Distancia entre tubos contiguos	mm	pulg
$D$	Diámetro interno del tubo o diámetro equivalente en la carcasa	m	pie
$D_c$	Diámetro interno de la carcasa	m	pie
$D_e$	Diámetro equivalente	m	pie
$D_i$	Diámetro interno de los tubos	mm	pulg
$D_o$	Diámetro externo de los tubos	mm	pulg
$f_D$	Factor de fricción de Darcy		adimensional
$f_{Dc}$	Factor de fricción de Darcy en la carcasa		adimensional
$f_{Dt}$	Factor de fricción de Darcy en los tubos		adimensional

$F$	Factor de corrección de temperaturas	adimensional	
$Fr$	Fracción calórica	adimensional	
$G$	Velocidad másica del fluido	kg/m <sup>2</sup> .s	lb/pie <sup>2</sup> .h
$G_c$	Velocidad másica en la carcasa	kg/m <sup>2</sup> .s	lb/pie <sup>2</sup> .h
$G_t$	Velocidad másica en los tubos	kg/m <sup>2</sup> .s	lb/pie <sup>2</sup> .h
$h_i$	Coficiente individual de transferencia de calor por convección interna	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$h_{io}$	Coficiente individual de convección interna referido al área externa de los tubos	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$h_{ioc}$	Coficiente individual de convección interna corregido	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$h_o$	coeficiente individual de convección externa	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$h_{oc}$	Coficiente individual de convección externa corregido	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$k_i$	conductividad térmica del fluido de los tubos a la temperatura media	W/m.K	BTU/h.pie.°F
$k_o$	conductividad térmica del fluido de la carcasa a la temperatura media	W/m.K	BTU/h.pie.°F
$L$	Longitud del tubo	m	pie
$m$	Flujo másico del fluido frío	kg/s	lb/h
$M$	Flujo másico del fluido caliente	kg/s	lb/h
$m_c$	Flujo másico del fluido en la carcasa	kg/s	lb/h
$m_t$	Flujo másico del fluido en los tubos	kg/s	lb/h
$N_b$	Número de deflectores	adimensional	
$N_p$	Número de pasos	adimensional	
$N_t$	Número de tubos	adimensional	
$Nu_c$	Número de Nusselt en la carcasa	adimensional	
$Nu_t$	Número de Nusselt en los tubos	adimensional	
$P$	Razón entre ganancia de temperatura del	adimensional	

	fluido frío y máxima diferencia de temperatura		
$Pr_c$	Número de Prandtl en la carcasa		adimensional
$Pr_t$	Número de Prandtl en los tubos		adimensional
$pt$	Espaciado entre tubos	mm	pulg
$R$	Razón entre ganancia de temperatura del fluido caliente y ganancia de temperatura del fluido frío		adimensional
$Re$	Número de Reynolds		adimensional
$Re_c$	Número de Reynolds en la carcasa		adimensional
$Re_t$	Número de Reynolds en los tubos		adimensional
$Rf$	Factor de ensuciamiento	$m^2.K/W$	$h.pie^2.°F/ BTU$
$r_i$	Resistencia por ensuciamiento interno	$m^2.K/W$	$h.pie^2.°F/ BTU$
$r_o$	Resistencia por ensuciamiento externo	$m^2.K/W$	$h.pie^2.°F/ BTU$
$r_w$	Resistencia por la pared del tubo	$m^2.K/W$	$h.pie^2.°F/ BTU$
$\%S$	Porcentaje de sobrediseño		%
$t_1$	Temperatura de entrada del fluido frío	K	°F
$t_2$	Temperatura de salida del fluido frío	K	°F
$T_1$	Temperatura de entrada del fluido caliente	K	°F
$T_2$	Temperatura de salida del fluido caliente	K	°F
$T_{pi}$	Temperatura de la pared interna de los tubos	K	°F
$T_{po}$	Temperatura de la pared externa de los tubos	K	°F
$t_{prom}$	Temperatura promedio del fluido frío	K	°F
$T_{prom}$	Temperatura promedio del fluido caliente	K	°F
$U_D$	Coefficiente global de transferencia de calor de diseño	$W/m^2.K$	$BTU/h.pie^2.°F$
$U_{Disp}$	Coefficiente global de transferencia de calor disponible	$W/m^2.K$	$BTU/h.pie^2.°F$

$U_o$	Coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa de los tubos	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$U_{LIMPIO}$	Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$U_{SUCIO}$	Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones de ensuciamiento	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F
$U_s$	Coeficiente global de transferencia de calor supuesto	W/m <sup>2</sup> .K	BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F

### **Símbolos Griegos**

	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades SI</b>	<b>Unidades Inglesas</b>
$\Delta P_C$	Caída de presión en la carcasa	kg/m.s <sup>2</sup>	lb/pie.h <sup>2</sup>
$\Delta P_t$	Caída de presión en los tubos	kg/m.s <sup>2</sup>	lb/pie.h <sup>2</sup>
$\Delta T_{m_{Ln}}$	Diferencia de temperaturas media logarítmica	K	°F
$\rho_c$	Densidad del fluido de la carcasa	kg/m <sup>3</sup>	lb/pie <sup>3</sup>
$\rho_t$	Densidad del fluido de los tubos	kg/m <sup>3</sup>	lb/pie <sup>3</sup>
$\mu_i$	Viscosidad dinámica del fluido de los tubos a la temperatura media	Pa.s	cP
$\mu_o$	Viscosidad dinámica del fluido de la carcasa a la temperatura media	Pa.s	cP
$\mu_{pi}$	Viscosidad dinámica del fluido de los tubos a la temperatura de la pared interna del tubo	Pa.s	cP
$\mu_{po}$	Viscosidad dinámica del fluido de la carcasa a la temperatura de la pared externa del tubo	Pa.s	cP

**Abreviaturas**

ACL	Aceite Cíclico Liviano
BPD	Barriles por día
BWG	British Wiring Gauge
FCC	Craqueo Catalítico Fluidizado
LPG	Gas Licuado de Petróleo
SRV	Sección de Recuperación de Vapores
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturers Association (Asociación de fabricantes de intercambiadores tubulares)
VBA	Visual Basic for Applications

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo se describe el planteamiento del problema, así como los objetivos que se pretenden alcanzar para la resolución del mismo.

### **I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de una refinería está diseñada para procesar 42.000 BPD de gasóleos atmosféricos y de vacío provenientes de una estación de producción de crudo. La unidad está compuesta del sistema de reacción de estos gasóleos y los sistemas de separación de los productos de reacción en productos intermedios y productos para almacenamiento. Entre los productos se encuentran gas combustible, mezcla de olefinas C<sub>4</sub>, gasolina, diesel para mezclas (aceite cíclico liviano), aceite pesado, propileno grado químico y propano.

Debido a la necesidad de incrementar la producción de crudo, se requiere aumentar la capacidad de la planta en 20%, con el fin de procesar 50.000 BPD de gasóleos atmosféricos y de vacío, por lo cual es necesaria la evaluación de los equipos existentes a fin de determinar si dichos equipos son capaces de manejar la nueva carga de alimentación.

La sección de recuperación de vapores (SRV) de la unidad de FCC está constituida por la sección de separación de propano y propileno (grado químico) en la cual, se encuentran siete intercambiadores de tubos y carcasa que requieren ser evaluados termohidráulicamente ante las nuevas condiciones del proceso. Esta evaluación se basa en la obtención y análisis de parámetros como caída de presión en los tubos, caída de presión en la carcasa y coeficiente global de transferencia de calor, principalmente.

En general, los intercambiadores de calor son empleados en la transferencia de energía entre dos corrientes de procesos, como rehervidores y condensadores en las columnas de destilación, en enfriadores de aire, entre otras aplicaciones. Debido a la

importancia que tiene este proceso, es necesario tener precaución en el diseño y evaluación de estos equipos, para así alcanzar la demanda de calor requerida al menor costo posible, tomando en cuenta diversos factores que influyen en la transferencia de energía.

Para el estudio de intercambiadores de calor, se requiere del empleo de herramientas de simulación que permitan el diseño y evaluación de dichos equipos. En este sentido, en el presente Trabajo Especial de Grado se desarrolla una herramienta basada en la programación con Visual Basic for Applications (VBA) de Microsoft Excel®, que permitirá el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa en procesos que manejen fluidos líquidos, con el fin de facilitar, tanto a ingenieros como a estudiantes, el estudio térmico e hidráulico de estos equipos en la etapa de ingeniería conceptual. Esta herramienta será un software libre, cuyo código estará disponible y servirá de aporte a la Universidad Central de Venezuela para que pueda ser empleado en funciones académicas.

Así, el presente Trabajo Especial de Grado tiene como finalidad fundamental la evaluación del sistema de intercambiadores de calor de la sección de separación de propano y propileno de la unidad de FCC de una refinería y el desarrollo de una herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa en procesos donde se manejen fluidos líquidos.

## **I.2. OBJETIVOS.**

Una vez descrito el planteamiento del problema, se establecen los objetivos que deben cumplirse en el presente Trabajo Especial de Grado.

**General:** Evaluar térmica e hidráulicamente el sistema de intercambiadores de calor de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC de una refinería

### **Objetivos Específicos:**

- Establecer los criterios de diseño para intercambiadores de calor de tubos y carcasa en procesos sin cambio de fase.
- Desarrollar el método de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa.
- Desarrollar una herramienta de programación en el lenguaje Visual Basic for Applications, para el diseño y evaluación de intercambiadores de tubos y carcasa en procesos que manejen fluidos líquidos.
- Determinar los parámetros termohidráulicos del sistema de intercambiadores de calor de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC (caída de presión en tubos y carcasa, coeficiente global de transferencia de calor, factor de ensuciamiento, etc)
- Evaluar el comportamiento termohidráulico de cada intercambiador de calor de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC.
- Validar los resultados obtenidos de la evaluación del sistema de intercambiadores de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC con la herramienta de programación a realizar, comparándolos con los obtenidos por el paquete de simulación HTRI®.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

La información presentada a continuación, permite conocer los fundamentos teóricos relacionados con la transferencia de calor e intercambiadores de calor de tubos y carcasa, así como la descripción general del proceso de craqueo catalítico fluidizado, lo cual facilitará la comprensión del estudio llevado a cabo y el análisis de los resultados obtenidos.

### **II.1. PROCESO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO**

#### **II.1.1. Descripción general de una refinería**

Una refinería de petróleo tiene como función principal transformar los crudos de petróleo en productos comercializables, como gasolinas, gasóleos, etc., de una forma económica. Por tanto, la refinación constituye un eslabón en la cadena del negocio integrado que se inicia con la exploración y sigue con la producción, venta-compra de crudo, transporte, refinación, distribución y venta de productos terminados.

Una refinería de petróleo está conformada por una serie de procesos en los que, mediante separaciones físicas o transformaciones químicas, se modifican las características de las materias primas hasta obtener los productos deseados. (Hernández, 2004)

La Figura 1 muestra la secuencia de procesos en una refinería moderna de alta complejidad, indicando los flujos de procesos más importantes entre operaciones. En primer lugar el crudo es calentado en un horno y cargado a una torre de destilación atmosférica, donde es separado en gas húmedo liviano, nafta ligera no estabilizada, nafta pesada, kerosene, gasóleo atmosférico y crudo reducido (residuo atmosférico). Este último es enviado a la torre de destilación al vacío y separado en dos corrientes de destilados y una de fondo de crudo reducidos de vacío (residuo de vacío).

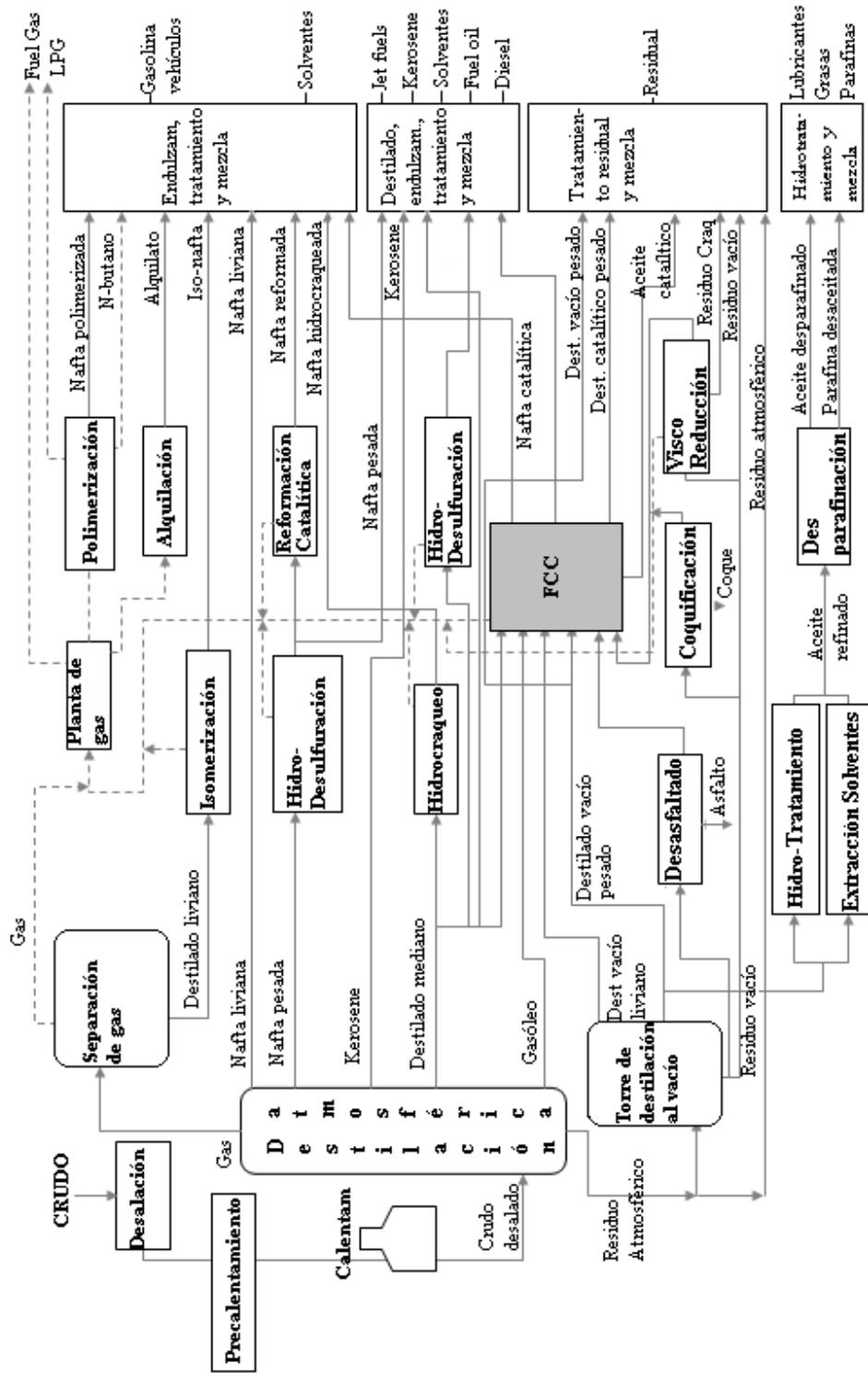


Fig 1. Esquema general de una refinera

Los gasóleos provenientes de las unidades de destilación atmosférica y de vacío sirven de alimentación a las unidades de craqueo catalítico y craqueo térmico. Estas unidades tienen como objetivos craquear o romper las moléculas pesadas en compuestos de peso molecular más bajo que se encuentran en el rango de ebullición de la gasolina y combustible destilado. (Gary, 2001)

### **II.1.2. Descripción del proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)**

El proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) es una tecnología con más de 60 años de experiencia en operaciones comerciales. El proceso es usado para convertir hidrocarburos de altos pesos moleculares a productos de hidrocarburos menos pesados y de mayor valor comercial, a través del contacto con un catalizador en polvo a condiciones apropiadas. El principal propósito del proceso de FCC ha sido la producción de gasolina, destilado y olefinas C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>, a partir de corrientes de gas de refinería o corrientes mas pesadas. Generalmente la unidad de FCC es el corazón de las refinерías modernas, debido a su versatilidad ante cambios en la alimentación y en la demanda de producto. Así como la refinación de crudo ha evolucionado en el tiempo, de igual forma lo ha hecho el proceso FCC, logrando el craqueo de alimentaciones más pesadas y contaminadas, incrementando la flexibilidad operacional, ajustándose a las nuevas legislaciones ambientales y maximizando la confiabilidad del proceso. (Meyers, 2004)

La unidad de Craqueo Catalítico (FCC) de la refinería referida en este Trabajo Especial de Grado, está diseñada para procesar gasóleos atmosféricos y de vacío provenientes de una estación de producción de crudo. La unidad está compuesta del sistema de reacción de estos gasóleos y los sistemas de separación de los productos de reacción en productos intermedios valiosos y productos para almacenamiento.

Los productos de la unidad son los siguientes:

- Gas combustible
- Propileno de alta pureza
- Propano
- Mezcla de butanos y butilenos
- Gasolina
- Aceite cíclico ligero (diesel para mezclas)
- Aceite decantando del fondo de la fraccionadora (combustóleo)

La planta de FCC consiste, principalmente, de las siguientes secciones:

- Sección de craqueo catalítico (convertidor).
- Sección de fraccionamiento.
- Sección de compresión de gas y estabilización de gasolinas.
- Sección de tratamiento de producto.
- Sección de fraccionamiento de gas licuado.
- Sección de recuperación de vapores.

La sección de Craqueo Catalítico está conformada por el reactor, el desgasificador y el regenerador los cuales están integrados en un solo equipo denominado convertidor, tal como se observa en la Figura 2. Este equipo recibe la alimentación compuesta por los gasóleos provenientes de las torres de destilación atmosférica y de vacío, donde entra en contacto por pocos segundos con el catalizador.

Los productos calientes que salen del convertidor entran a la fraccionadora principal, en la cual la mayoría del calor es removido para generar vapor, o proveer el calor requerido para calentamiento de corrientes y equipos aguas abajo. En la fraccionadora principal se obtienen dos corrientes finales para mezcla: Aceite Cíclico Liviano (ACL) y aceite decantado del fondo de la fraccionadora. Los productos más livianos son retirados por el domo de la fraccionadora principal como una mezcla de vapor y líquido los cuales son separados en la sección de recuperación de vapores.

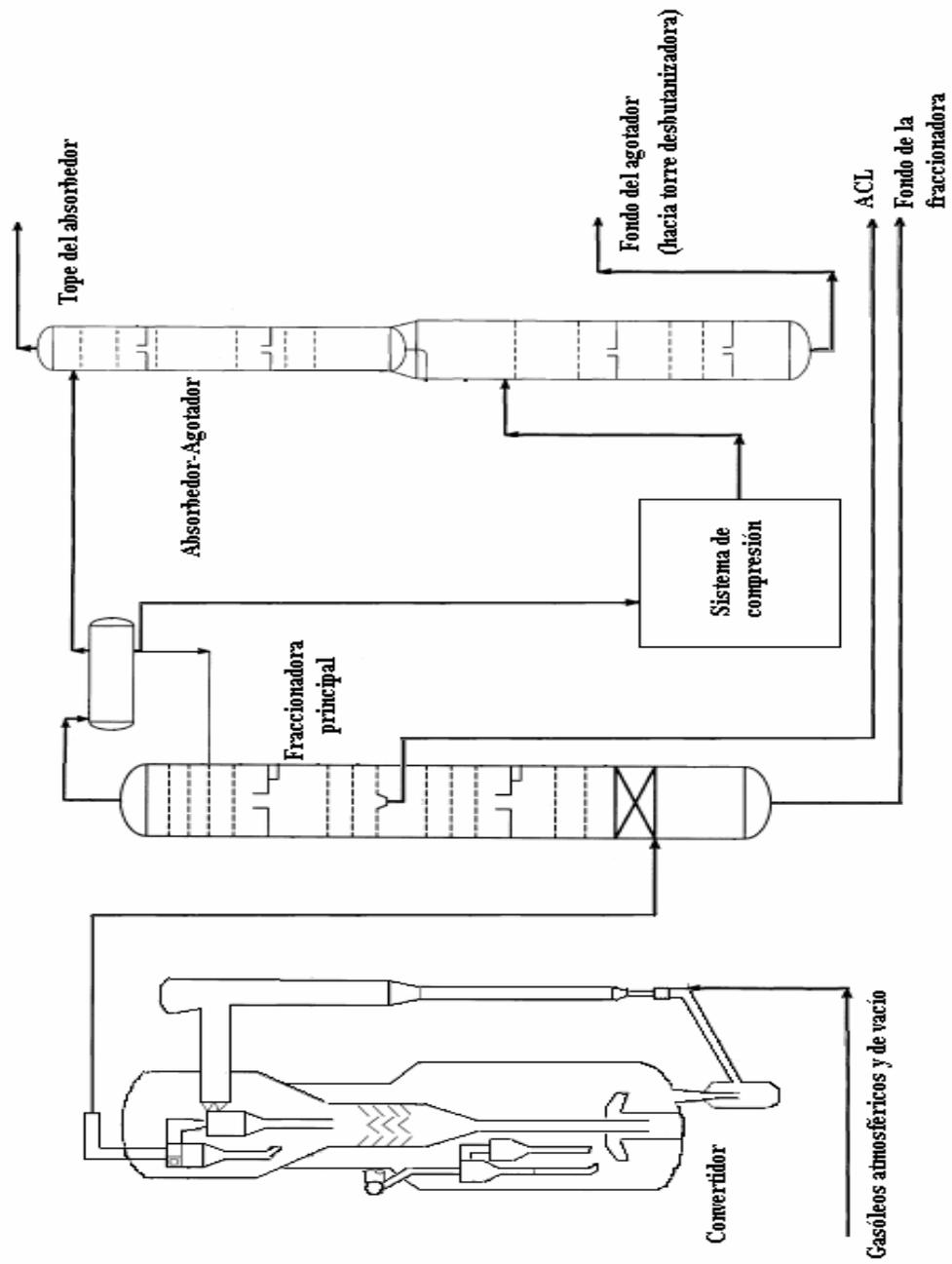


Figura 2. Esquema general de la unidad de FCC

La Sección de Recuperación de Vapores (SRV) comprende: el sistema de compresión, el absorbedor-agotador y torres de fraccionamiento simple, donde los productos son separados como: gasolina, butilenos, propileno, propano y gas combustible o gas seco.

#### **II.1.2.1. Sección de Recuperación de Vapores (SRV):**

La SRV está compuesta por el Absorbedor-agotador, la torre desbutanizadora V-101, la torre despropanizadora V-102 y el splitter de propileno V-103. Estos tres últimos equipos se muestran en la Figura 3. Es en esta sección donde se realiza la evaluación de los intercambiadores de calor (resaltados en la figura), objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado.

La sección recibe gas húmedo y gasolinas desde el tambor de reflujo del domo de la fraccionadora y debe cumplir los siguientes objetivos:

- Enviar  $C_2$  y componentes más ligeros al sistema de gas combustible.
- Recuperar LPG  $C_4$ , propano y propileno en grado químico como productos líquidos separados.
- Producir gasolina en el rango de ebullición y volatilidad especificado.

El gas húmedo proveniente del tambor de reflujo del domo de la fraccionadora fluye al sistema de compresión, de donde se extrae el vapor de alimentación al absorbedor y el líquido de alimentación al agotador.

El agotador remueve  $C_2$  y componentes más livianos del líquido alimentado, por lo que es aquí donde se controla el contenido final de  $C_2$  en el propileno producto. El  $C_2$  y componentes más livianos despojados salen finalmente con la corriente de domo del absorbedor, mientras que el  $C_3$  y componentes más pesados absorbidos son recuperados al final en la corriente de fondo del agotador.

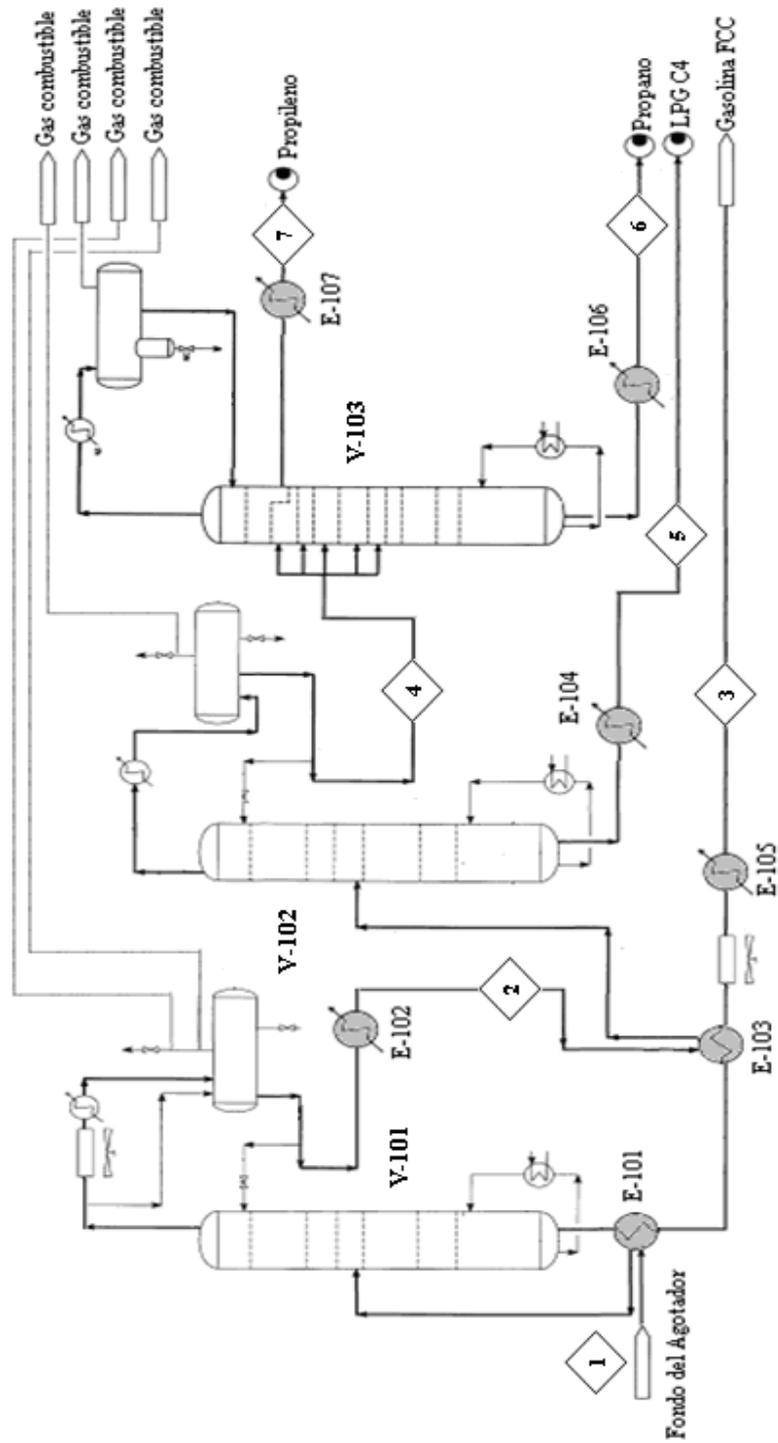


Figura 3. Esquema de la Sección de Recuperación de Vapores

**a) Sistema de la Torre Desbutanizadora V-101:**

El líquido de fondo del agotador se precalienta con el fondo de la torre desbutanizadora en el Intercambiador Alimentación / Fondo de la desbutanizadora E-101, para ser alimentada a la columna en el plato número 20. La desbutanizadora se requiere para producir una corriente de gasolina con un determinado requerimiento de presión de vapor y una corriente de  $C_3$ - $C_4$  conteniendo una mínima cantidad de  $C_5$  y materiales de mayor rango de ebullición.

La corriente del domo de la torre desbutanizadora pasa a través de un aroenfriador y de un enfriador para condensar totalmente la corriente del domo. El producto líquido de domo de la desbutanizadora es bombeado y se divide en dos corrientes. Una regresa al plato superior de la torre, como reflujo, y la otra corriente se dirige al Enfriador de Producto de Domo de la Desbutanizadora E-102.

El producto de fondo de la desbutanizadora fluye al intercambiador E-101, y luego al intercambiador Alimentación Despropanizadora / Fondo Desbutanizadora E-103 para precalentar la alimentación a la torre despropanizadora V-102. Este producto de fondo luego intercambia calor con agua de enfriamiento en el Enfriador de Fondo de la Desbutanizadora E-105. Posteriormente esta corriente es enviada a la unidad de endulzamiento de gasolina y fluye al límite de batería para su almacenaje.

**b) Sistema de la Despropanizadora V-102:**

El LPG  $C_3$ - $C_4$  es precalentado, intercambiando calor con la corriente de fondo de la torre desbutanizadora en el intercambiador E-103, para luego ser alimentado a la columna despropanizadora en el plato 18. Esta es requerida para producir corrientes separadas de  $C_3$  y  $C_4$  de la pureza mínima especificada.

El condensador del domo de la despropanizadora V-102, es un condensador total que utiliza agua de enfriamiento. El producto de LPG  $C_4$  se enfría con agua en el Enfriador del Fondo de la Despropanizadora E-104 y fluye al límite de batería para su

almacenaje. El producto de LPG C<sub>3</sub> se divide en dos corrientes: una retorna a la zona superior de la despropanizadora y la otra se envía al splitter de propileno V-103.

**c) Sistema del Splitter de Propileno V-103:**

El LPG C<sub>3</sub> se alimenta a la columna en el plato número 74. El splitter de propileno es requerido para producir propileno y propano por separado con la especificación mínima de pureza requerida.

El condensador de domo del splitter de C<sub>3</sub> es un condensador total con agua de enfriamiento. En rehervidor de la columna se utiliza vapor de baja presión como medio de calentamiento. El hidrocarburo líquido del tambor de reflujo del splitter de C<sub>3</sub>, se envía de regreso a la torre como reflujo total al plato número 1.

El propileno grado químico producto es extraído del plato número 6 de la columna y es enfriado con agua en el Enfriador de Producto de Propileno E-107. Luego es analizado para determinar el contenido de etano y finalmente se envía al límite de batería para su almacenaje.

El propano producto es extraído del fondo de la columna y enviado hasta el Enfriador de Producto de Propano E-106 en donde alcanza su temperatura final y es enviado al límite de batería para su almacenaje.

Una vez descrito el esquema de la unidad de FCC, se procede a explicar los principios básicos de la transferencia de calor, donde se incluye la descripción detallada de los intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa, así como las variables de operación que involucra el empleo de este tipo de equipos

## II.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es el traspaso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico.

En tal sentido, la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía térmica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones. (Holman, 1986)

### II.2.1 Mecanismos de Transferencia de Calor

En general, el calor se transfiere por tres mecanismos distintos: conducción, radiación y convección, aún cuando en muchas de las aplicaciones en ingeniería ocurren combinaciones de estos mecanismos.

#### II.2.1.1. Transferencia de calor por conducción

La conducción se refiere a la transmisión de calor desde un cuerpo más caliente hacia un cuerpo más frío por contacto molecular directo, no por movimientos de masas de material caliente a la región fría. En estado estacionario el caudal de transmisión de calor depende de la naturaleza del material y de las diferencias de temperatura, y se expresa por la ley de Fourier como:

$$dq = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $dq$  es la cantidad de calor transferida en la dirección  $x$  (W/m),  $A$  es el área normal a la dirección del flujo de calor ( $m^2$ );  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura en la dirección  $x$  (K/m) y  $k$  es la conductividad térmica (W/m.K), definida como el calor

que atraviesa un cubo del material en cuestión de 1 m de lado, por consecuencia de una diferencia de temperatura de 1 K entre las caras opuestas. (Levenspiel, 1993)

El signo negativo en esta ecuación significa que el calor circula desde las regiones de mayor temperatura a las de menor temperatura, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

La conductividad se evalúa experimentalmente y está básicamente definida por la Ec. 1. La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de si el sólido es relativamente buen conductor de calor, tal como un metal, o un mal conductor como el asbesto. Estos últimos sirven como aislantes. Aún cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones. (Kern, 1965). En la siguiente tabla se muestran valores de conductividad térmica de los materiales más comúnmente usados en el diseño de intercambiadores de calor:

**Tabla 1.** Conductividad térmica de diversos materiales

<b>Material</b>	<b><i>k</i> (W/m.K)</b>	<b><i>k</i> (BTU/h.pie.°F)</b>
Plata (pura)	420	273
Cobre (puro)	385	223
Aluminio (puro)	202	117
Admiralty ®	108	63
Níquel (puro)	93	54
Hierro (puro)	73	42
Acero al carbón, 1% C	43	25
Plomo (puro)	35	20.3
Acero Inoxidable (304 y 302)	17	10
Acero cromo-níquel, 18%Cr 8% Ni	16	9

Fuente: Holman

### II.2.1.2. Transferencia de calor por radiación

En contraste con el mecanismo de conducción, en donde está involucrada la transferencia de energía a través de un medio material, el calor también se puede transferir a regiones donde existe el vacío perfecto. En este caso, el mecanismo es la radiación térmica.

Consideraciones termodinámicas muestran que un radiador ideal, o cuerpo negro, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias de la cuarta potencia de temperaturas. Así:

$$q = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $q$  es la cantidad de calor transferido (W),  $\sigma$  es la constante de proporcionalidad o constante de Stefan- Boltzmann con el valor de  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ . A la Ec. 2 se le llama la ley de radiación térmica de Stefan-Boltzmann, y se aplica sólo a los cuerpos negros.

Las superficies no negras emiten radiación de acuerdo a la ecuación:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $\varepsilon$ , la emisividad (adimensional), es una propiedad de la superficie y varía desde cero para un reflector ideal, hasta uno para un cuerpo negro. (Holman, 1986)

### II.2.1.3 Transferencia de calor por convección

Cuando un fluido caliente se mueve en contacto con una superficie fría, el calor se transfiere hacia la pared a una velocidad que depende de las propiedades del fluido y de si se mueve por flujo laminar o por flujo turbulento. Así, la transferencia de calor por convección es la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global del fluido. Cuando este movimiento se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de la diferencia de temperatura, el mecanismo de transferencia de calor asociado se denomina convección natural. Por el contrario, si se produce por medios mecánicos, se denomina convección forzada.

La transferencia de calor por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que la rodea se realiza en varias etapas. Primero, el calor fluye por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes del fluido. Esta energía incrementa la energía interna y por ende la temperatura del fluido. De esta manera el fluido se mueve hacia una región del fluido de menor temperatura, donde se mezcla y transfiere parte de su energía a otras partículas del fluido. (Fernández, s.f.)

Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación similar a la forma de la ecuación de conducción y es dada por:

$$dq = h \cdot A \cdot dT \quad \text{Ec. 4}$$

La constante de proporcionalidad  $h$ , o coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ), es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación. Cuando la Ec. 4 se escribe en su forma integrada, se conoce como la ley de enfriamiento de Newton: (Kern, 1965)

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 5}$$

El coeficiente por convección es un parámetro empírico, obtenido experimentalmente, pero no medido directamente, por lo que el cálculo de la transferencia de calor por convección es más empírico que para los otros dos mecanismos, existiendo una gran dependencia de datos experimentales y sus correlaciones. Adicionalmente, este coeficiente incorpora elementos de dinámica de fluidos. (MDP-05-E-02, 1995)

Sin embargo Sieder y Tate han estudiado este parámetro, planteando correlaciones para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada. En la sección II.2.5.3 se desarrolla este punto con mayor detalle.

## II.2.2. EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Una vez expuesto los mecanismos por los cuales el calor se transfiere, a continuación se explica el funcionamiento de los equipos de transferencia de calor, haciendo énfasis en los intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa.

Un intercambiador de calor es un equipo empleado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido o entre partículas sólidas y un fluido, que se encuentran a diferentes temperaturas. Los fluidos pueden ser compuestos simples o mezclas. Las aplicaciones más comunes implican la calefacción o la refrigeración de una corriente de interés, la evaporación o condensación de una corriente simple o multicomponente y la recuperación de calor o el despojo de calor de un sistema. En otras aplicaciones, el objetivo puede ser esterilizar, pasteurizar, fraccionar, destilar, concentrar, cristalizar, o controlar el fluido de proceso.

En la mayoría de los intercambiadores de calor, los fluidos se encuentran separados por una superficie de transferencia de calor e idealmente no se mezclan. Tales equipos se conocen como *equipos transferencia directa*, o simplemente *recuperadores*.

Estos equipos están compuestos por: un entorno principal o núcleo que contiene la superficie de transferencia de calor y elementos de distribución tales como cabezales, colectores, boquillas de entrada y salida, o sellos.

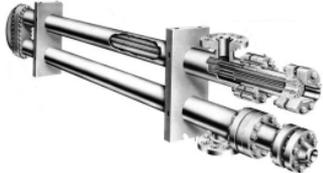
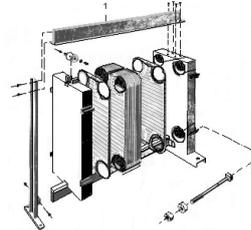
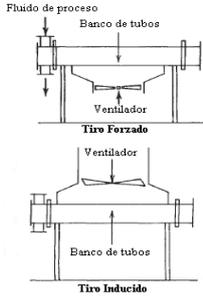
La superficie de transferencia de calor está en contacto directo con los fluidos y a través de ella el calor es transferido por conducción. Para aumentar el área de transferencia de calor, se pueden emplear accesorios conocidos como aletas que pueden ser unidas a la superficie. Así, la adición de aletas reduce la resistencia térmica y por ende incrementa la transferencia de calor neta desde o hacia la superficie, para la misma diferencia de temperaturas.

En la Tabla 2, se muestra la clasificación de los intercambiadores más empleados en la industria según su construcción

Los equipos usados en un proceso que involucre la transferencia de calor son diseñados específicamente en base al calor requerido por el proceso. Es decir, el intercambiador no es comprado como un equipo ya fabricado, sino que debe ser diseñado para el proceso en cuestión. Existe una gran variedad de equipos que pueden cumplir con los requerimientos de un proceso en particular, por lo que el papel del ingeniero es fundamental para la adecuada elección del intercambiador a emplear.

Entre la gran variedad de equipos de transferencia de calor, los intercambiadores de tubos y carcasa son de los que se emplean con mayor frecuencia en la industria, debido a su versatilidad y su alta eficiencia (Holman, 1986). A continuación se describe de manera detallada este tipo de intercambiador debido a que el presente Trabajo Especial de Grado se basa en el funcionamiento, diseño y evaluación de dichos equipos.

Tabla 2. Tipos de Intercambiadores de calor

Tipo	Características	Aplicaciones	Esquema	
Doble tubo	Está formado por uno o más tubos pequeños contenidos en un tubo de diámetro más grande.	Se emplea principalmente en procesos que requieren poca área de transferencia de calor. Recomendado especialmente para altas presiones (>500 psig). Al colocar varios equipos en serie requieren de altos costos y mucho espacio.		
Placas	Planas	Compuesto por finas placas metálicas separadas por juntas, ensambladas en un armazón para su apoyo.	Presentan una alta eficiencia en la transferencia de calor, debido a su elevada área de transferencia por unidad de volumen. Sus principales aplicaciones incluyen el empleo de fluidos viscosos y corrosivos. Están limitados a procesos líquido-líquido y a temperaturas de 300 a 350 °F	
	Espiral	Construido a partir de varias placas, dispuestas en forma concéntrica de modo tal, que exista un espacio anular por donde se colocan los fluidos.	Proporcionan una transferencia de calor y unas condiciones de flujo óptimas para una gran variedad de fluidos, y permiten además reducir al mínimo el tamaño de la unidad. Presentan flujo completamente en contracorriente. Son ideales en servicios líquido-líquido, así como en condensaciones y en determinados servicios de evaporación.	
Enfriados por aire	Por lo general consisten en un banco horizontal de tubos aleteados con un ventilador colocado debajo (tiro forzado) o por encima (tiro inducido) del banco de tubos.	Empleado en procesos donde el factor económico es limitante, ya que es más económico condensar o enfriar corrientes calientes dentro de tubos haciendo fluir aire a través de los tubos en lugar de usar agua u otro líquido de refrigeración. Son fáciles de limpiar y mantener		

Fuente: Ludwing, 1999

### **II.2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CARCASA.**

Los intercambiadores del tipo tubos y carcasa, son los equipos de transferencia de calor sin combustión más empleados en las plantas de procesos químicos, aún cuando se está haciendo cada vez mayor hincapié en la implementación de otros diseños. (Walas, 1990)

Al emplear este tipo de intercambiador, se puede obtener un amplio rango de diseños y condiciones de operación, entre los cuales pueden mencionarse los siguientes:

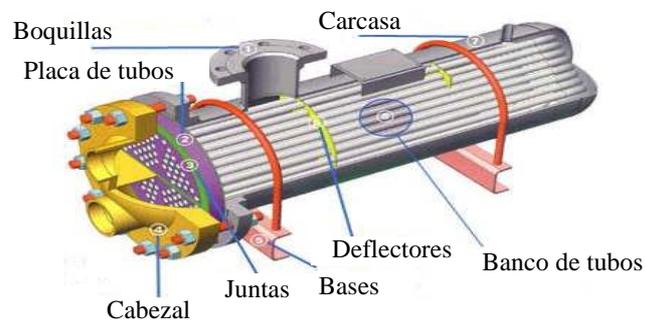
- Se pueden emplear fases simples, o corrientes en condensación o ebullición, las cuales pueden ser dispuestas tanto por los tubos como por la carcasa, ya sea en posición vertical u horizontal.
- El rango de presión y de caída de presión son ajustadas sin afectar las condiciones de proceso de los fluidos.
- Puede emplearse una gran variedad de materiales para su construcción.
- Para mejorar la transferencia de calor, se utilizan superficies extendidas en ambos lados.
- Se pueden obtener amplios rangos de capacidades térmicas.
- Es fácilmente desmontable para su limpieza o reparación

Adicionalmente, la disponibilidad de buenos procedimientos de diseño, de experticia y de facilidades de fabricación, asegura el diseño y construcción exitosos de este tipo de intercambiador, convirtiéndolo en la primera opción a seleccionarse para un proceso de transferencia de calor.

En general, un intercambiador típico de tubos y carcasa, consiste en una serie de tubos lineales colocados dentro de un tubo o ánulo de mayor diámetro llamado coraza o carcasa y representan la alternativa de aquellos procesos donde se requiere un área de transferencia de calor alta. Los tubos se colocan de forma ordenada dentro de la carcasa, formando el banco de tubos, de manera tal que uno de los fluidos fluye por el interior de éstos, mientras el otro, circula por el espacio entre el exterior de los tubos y

la carcasa, transfiriéndose el calor a través de la pared de los tubos. El calor es transferido ya sea, teniendo el medio de calentamiento por la carcasa y el fluido a ser calentado por los tubos o viceversa. (Cheremisinoff, 2001). En la sección II.2.4 se explica detalladamente las partes que constituyen la fabricación de este equipo

En la siguiente figura se muestran las partes más importantes que conforman la estructura de un intercambiador típico de tubos y carcasa.



**Figura 4.** Esquema básico de un intercambiador de tubos y carcasa

Los intercambiadores de carcasa y tubos se diseñan y fabrican de acuerdo a los estándares de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares (Tubular Exchanger Manufacturers Association, TEMA). En la Tabla 3 se muestra la nomenclatura de los diferentes tipos de unidades.

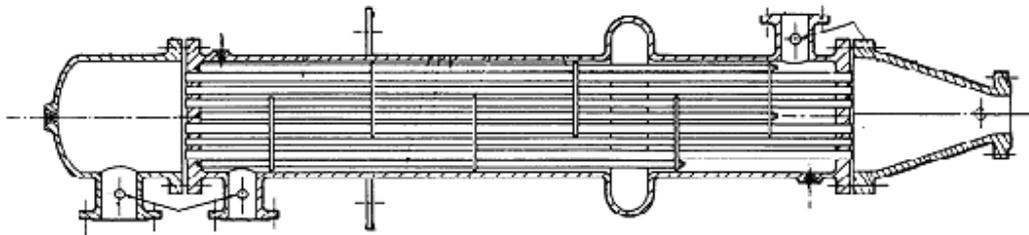
Tabla 3. Nomenclatura de los componentes de intercambiadores de tubos y carcasa

	TIPOS DE CABEZALES FIJO EXTREMIDAD ANTERIOR		TIPOS DE CARCAZAS		TIPOS DE CABEZALES EXTREMIDAD POSTERIOR
A		E		L	
B		F		M	
C		G		N	
		H		P	
D		J		S	
		K		T	
				U	
				W	

Fuente: Rohsenow, 1998

De la clasificación anterior, los tres tipos más comunes de intercambiadores de tubos y carcasa son de diseño de placa de tubos fija o cabezal fijo, de tipo tubos en U y de cabezal flotante. A continuación se describen sus características más importantes:

**a) Intercambiadores de placa de tubos fija o de cabezal fijo.** En este caso, el equipo tiene tubos rectos, asegurados en ambos extremos en placas de tubos soldados a la carcasa. En este tipo de construcción, mostrada en la Figura 5, algunas veces es necesario incorporar en la carcasa una junta de expansión o una junta de empaques, debido a la expansión diferencial de la carcasa y los tubos. Esta expansión se debe a la operación del equipo a diferentes temperaturas y a la utilización de diferentes materiales en la construcción. El haz de tubos no puede ser removido para inspección y limpieza, pero el cabezal en el lado de los tubos, las empaaduras y la cubierta del canal son accesibles para mantenimiento y reemplazo de las partes. La carcasa puede ser limpiada por retrolavado o químicamente. Los intercambiadores de cabezal fijo son usados en servicios donde el fluido de la carcasa es un fluido limpio, como vapor de agua, refrigerante, gases, cierto tipo de agua de enfriamiento, etc. (MDP-05-E-01, 1995)

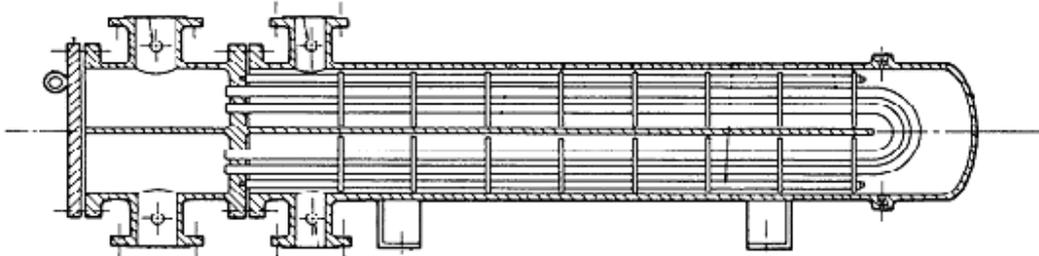


Fuente: Ludwing, 1999

**Figura 5.** Intercambiador de cabezal fijo

**b) Intercambiadores con tubos en U.** El segundo tipo de intercambiadores de tubo y carcasa utiliza tubos en forma de U, con ambos extremos de los tubos sujetos a una placa de tubos simple, eliminándose así los problemas de expansión diferencial porque los tubos pueden expandirse y contraerse libremente, la forma de U absorbe estos cambios, tal como se observa en la Figura 6. El haz de tubos puede ser removido de la carcasa para inspección y limpieza; pero la limpieza mecánica interna de los tubos y su reemplazo es difícil, por lo que este tipo de intercambiadores es usualmente aplicable en servicios limpios o cuando la limpieza química es efectiva. El costo de estas

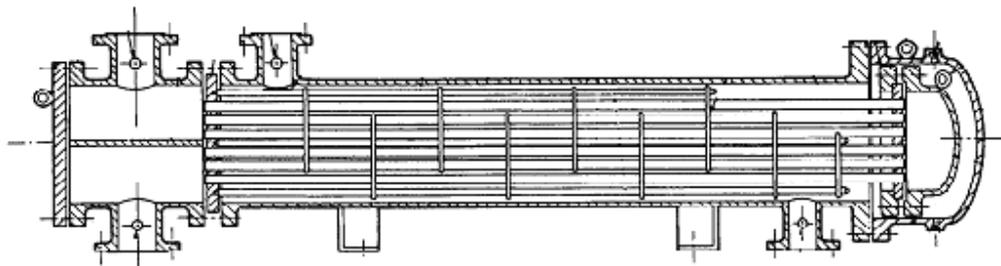
unidades a presión baja es aproximadamente igual al de las unidades de cabezal fijo, pero a presión alta es significativamente mas barato, por lo que es muy usado en este tipo de aplicación.



Fuente: Ludwing, 1999

**Figura 6.** Intercambiador de tubos en U

**c) Intercambiadores de cabezal flotante.** Al igual que las unidades de cabezal fijo, este equipo presenta dos placas de tubos, pero con sólo una de ellas soldada a la carcasa y la otra moviéndose libremente, evitando así los problemas de expansión diferencial. El haz de tubos de este tipo de intercambiador puede removerse para mantenimiento y para la limpieza mecánica de la carcasa. Los tubos también pueden ser limpiados mecánicamente tanto en su exterior como en su interior. El diseño de cabezal flotante es mas caro (aprox. en un 25%) que el diseño de cabezal fijo y es apropiado para servicios asociados a altas temperatura y presiones, pero limitado a aquellos servicios donde la fuga del fluido contenido en la carcasa es tolerable. En la siguiente figura, se ilustra un esquema de este tipo de intercambiador.



Fuente: Ludwing, 1999

**Figura 7.** Intercambiador de cabezal flotante

Para tener en cuenta un buen diseño o evaluación de un equipo de transferencia de calor de tubos y carcasa es necesario conocer los aspectos más importantes de la geometría de estos equipos.

#### **II.2.4. COMPONENTES DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CARCASA**

Los componentes que conforman un intercambiador de tubos y carcasa son: el banco de tubos, la carcasa o coraza, los baffles o deflectores, los cabezales, las juntas, bases, entre otros. A continuación se explica detalladamente la configuración de las partes más importantes de un intercambiador de tubos y carcasa.

##### **II.2.4.1. Tubos**

Los tubos constituyen la frontera que separa a los dos fluidos y por los cuales se transfiere el calor por conducción a través de las paredes de los mismos. Los tubos para intercambiadores de calor también se conocen como tubos para condensador y no son iguales a tubos de acero u otro tipo de tubería comercialmente usada. Estos tubos se encuentran disponibles en varios metales, los que incluyen acero, cobre, admiralty, metal Muntz, latón, aleaciones cobre-níquel 70-30, aluminio-bronce, aluminio y aceros inoxidable. Se pueden conseguir con diferentes espesores de pared, definidos por la British Wiring Gauge (BWG), que en la práctica se refiere sólo como BWG del tubo. En el Apéndice A se presentan las características de los tubos que generalmente están disponibles, de los cuales los de 3/4 y 1 plg de diámetro exterior son los más comunes en el diseño de intercambiadores de calor. (Kern, 1965)

Existen dos tipos de tubos: lisos o desnudos y aleteados. Los lisos son los que se usan frecuentemente debido a que son más fáciles de construir y por ende más económicos. Sin embargo, cuando se emplean tubos aleteados el funcionamiento del intercambiador es más eficiente debido a que aumenta el área de transferencia de calor y la turbulencia del fluido, incrementando así la transferencia de calor asociada al proceso. (Kutz, 2006)

En cuanto a la longitud de los tubos, la selección depende de la disponibilidad y el costo de los mismos. En general, las longitudes de tubo no mayor de 7.3 m (24 pies) son fáciles de obtener. Sin embargo, 6.1 m (20 pies) de longitud es la medida comúnmente preferida en las refinerías de la IPPCN (Industria Petrolera, Petroquímica y Carbonífera Nacional).

El costo del área superficial del intercambiador depende sobre todo de la longitud del tubo, en especial aquellos casos donde la longitud es mayor a 7.3 m (24 pies).

Como se mencionó anteriormente, los tubos constituyen la frontera por la cual el calor se transfiere. Así, el área de transferencia de calor total dentro de un intercambiador de calor de tubos y carcasa se determina a partir de la siguiente relación:

$$A = N_t \cdot \pi \cdot D \cdot L = N_t \cdot a_t \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$A$  = área total de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ ).

$N_t$  = número de tubos (adimensional).

$D$  = diámetro de los tubos (m).

$L$  = longitud de los tubos (m).

$a_t$  = área de transferencia de calor de cada tubo ( $\text{m}^2$ ).

El área de transferencia de calor para el fluido que circula por el interior de los tubos está referida al área interna de los mismos, por lo que el valor a emplear en la ecuación anterior debe ser el diámetro interno; mientras que para el fluido de la carcasa, el área de transferencia de calor es el área externa, por lo que debe emplearse el diámetro externo de los tubos.

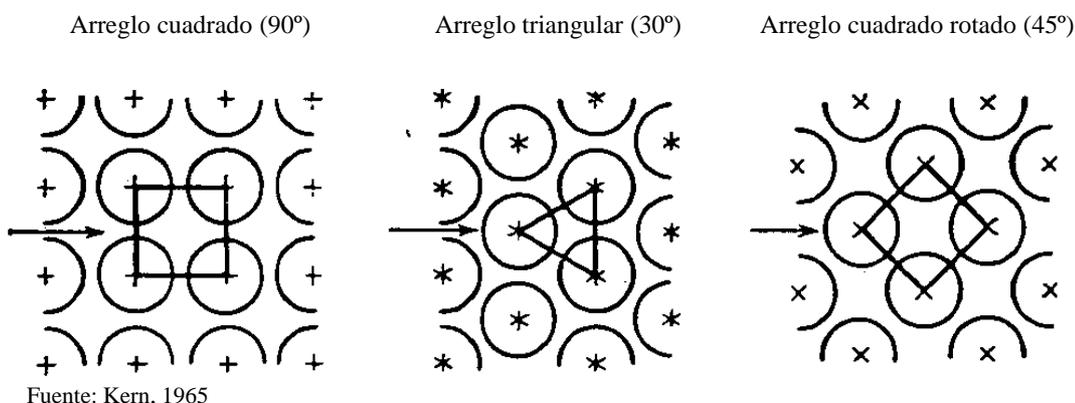
#### - Arreglo de los tubos

Existen cuatro tipos de arreglos de tubos: cuadrado ( $90^\circ$ ), cuadrado rotado ( $45^\circ$ ), triangular ( $30^\circ$ ) y triangular rotado ( $60^\circ$ ).

El *arreglo triangular de 60°* es poco usado, debido a que sus características de transferencia de calor son bajas comparado con la alta caída de presión. Sin embargo, ocasionalmente algunos proveedores siguen utilizando este arreglo. Para todos los intercambiadores con un factor de ensuciamiento de  $0.00035 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$  ( $0.002 \text{ hpie}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$ ) o menor, se prefiere el uso de *arreglos triangulares de 30°*, suponiendo que el ensuciamiento acumulado se pueda eliminar químicamente.

Un intercambiador con arreglo triangular cuesta menos por metro cuadrado y transfiere más calor por metro cuadrado que uno con *arreglo de tubo cuadrado a 90° ó 45°*. Por esta razón, cuando se puede aplicar, el arreglo triangular es el preferido. Los arreglos de tubos cuadrados y en cuadrado rotado deberían ser especificados para todos los intercambiadores que tengan un factor de ensuciamiento en el lado de la carcasa mayor de  $0.00035 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  ( $0.002 \text{ h.pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$ ) y cuando se requiere limpieza mecánica del lado externo de los tubos. Para flujo laminar se prefieren arreglos de tubos en cuadrado rotado debido a que el coeficiente de transferencia de calor es incrementado por la turbulencia inducida presente en el arreglo. Para flujo turbulento, especialmente para casos limitados por la caída de presión, el arreglo de tubos en cuadrado es preferible, debido a que el coeficiente de transferencia de calor es equivalente al del arreglo en cuadrado rotado, pero con menos caída de presión. (MDP-05-E-02, 1995).

En la siguiente figura se muestran las configuraciones de arreglos de tubos más usadas en la industria.



**Figura 8.** Arreglos de tubos

**- Espaciado de los tubos.**

El espaciado de los tubos (pt) es la distancia menor de centro a centro en tubos adyacentes. El mínimo espaciado entre tubos es de 1.25 veces el diámetro externo de los tubos. Los espaciados más comunes para arreglos cuadrados y triangulares de tubos de  $\frac{3}{4}$  pulg de diámetro externo son de 1 pulg, mientras que para tubos de 1 pulg de diámetro externo para ambas configuraciones es de  $1\frac{1}{4}$  pulg. (Kern, 1965)

**- Pasos por los tubos**

El número de pasos por los tubos en un intercambiador pueden ir desde 1 hasta 16. Si se usa más de un paso, se produce alguna pérdida en la eficiencia térmica del equipo debido al efecto que tiene el patrón de flujo sobre el valor de diferencia de temperatura media logarítmica, término que será explicado en la sección II.2.5.5. Un diseño de múltiple número de pasos surge de la necesidad de compensar las bajas velocidades de flujo o de la necesidad de mantener altas velocidades para así reducir los efectos de ensuciamiento o incrustación, obteniendo así una buena transferencia de calor. (Rohsenow, 1998)

En la práctica, se especifica el suficiente número de pasos de tubo para maximizar la utilización de la caída de presión disponible, siempre y cuando el material de construcción del tubo lo permita. Además, para servicios con hidrocarburos, el número de pasos se especifica con el fin de obtener una alta velocidad en los tubos, previendo así el flujo laminar o de transición.

**II.2.4.2. Carcasa**

Las carcasas son fabricadas generalmente de tubos estándar para diámetros de carcasa menores a 610 mm (2 pies) y por enrollamiento y soldadura de placas para los diámetros más grandes. El rango de diámetros de carcasa va desde menos de 50 mm (2 pulg) a 6.10 m (20 pies) para aplicaciones especiales.

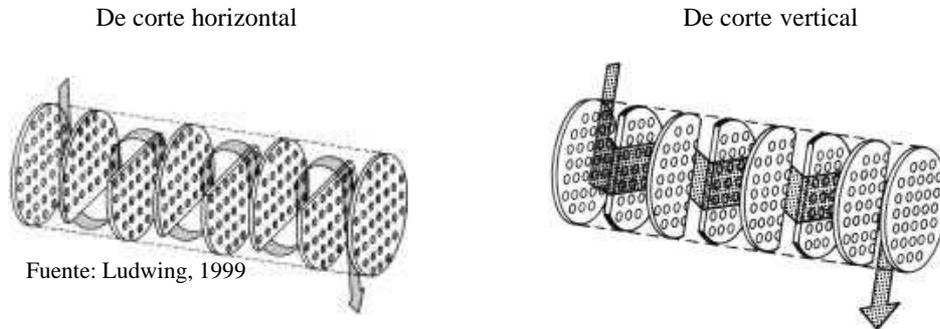
La carcasa Tipo E, ilustrada en la Tabla 3, es la más empleada en las industrias de procesos, debido a que su construcción es económica y posee una amplia gama de capacidades. Además el factor de corrección de temperaturas  $F$  obtenido con este equipo es mayor que el obtenido con cualquier otro. Sin embargo, cuando se requieren valores de caída de presión mayores a la permisible, se emplean otras carcasas de diseño más complicado y por ende más costosas. (Kutz, 2006).

La carcasa tipo F se emplea cuando pudiese existir un cruce de temperaturas dentro de una carcasa tipo E para evitar colocar dos carcasas de este tipo en serie. Sin embargo esta unidad presenta problemas al quitar o substituir el banco de tubos. La carcasa F es usada para fluidos de una sola fase. Si la caída de presión para una carcasa E es muy alta, se pueden emplear las carcasas de flujo dividido tipo G, H o J, a expensas de una disminución en el factor  $F$ . La carcasa tipo J produce una caída de presión de alrededor de un quinto de la producida por una carcasa tipo E de las mismas dimensiones y son empleadas en aplicaciones de condensación a condiciones de vacío. La carcasa G es usada en muchas aplicaciones, siendo las más comunes los termosifones horizontales y equipos de vaporización. La carcasa tipo H es el equivalente de emplear dos carcasas tipo G en paralelo, por lo cual se emplea sólo cuando la caída de presión es muy alta al usar una carcasa tipo G. Finalmente la carcasa tipo K es utilizadas exclusivamente como rehervidores tipo Kettle o vaporizadores y se caracteriza por estar sobredimensionada. Esto con el fin de lograr la separación de las fases líquida y vapor presentes en las aplicaciones de evaporación. (MDP-05-E-02, 1995)

#### **II.2.4.3. Deflectores**

Los baffles o deflectores son láminas que tienen como funciones principales aumentar la velocidad del fluido que fluye fuera de los tubos (fluido del lado de la carcasa) y como soporte de los tubos. Al incrementarse la velocidad del fluido se obtiene un aumento de transferencia de calor y una disminución del ensuciamiento (depósito material sobre los tubos), pero se produce un incremento en la caída de presión en el lado de la carcasa. El valor de caída de presión en el lado de la carcasa es una función de espaciado, el corte y tipo de deflector. (Perry, 1999)

El tipo de deflector más popular es el segmentado, cuyos cortes pueden ser horizontales o verticales, tal como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Tipos de deflectores segmentados

El *corte del deflector* es la porción “cortada” para permitir el flujo a través del deflector. El tamaño de este corte afecta el coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión. Para los deflectores segmentados, esta porción es expresada en porcentaje y viene dada como el cociente entre la altura del corte y el diámetro de la carcasa. Usualmente, los cortes de los deflectores segmentados son de aproximadamente 25% de su área. (MDP-05-E-02, 1995)

El *espaciado del deflector*, es el espacio longitudinal entre dos deflectores adyacentes. A menor espaciado, mayor coeficiente de transferencia y mayor caída de presión por la carcasa; por lo que esta distancia debe definirse de manera tal que permita una alta velocidad y un alto coeficiente transferencia dentro de los límites permisibles de caída de presión. El espaciado máximo del deflector no debe exceder al diámetro de la carcasa y debe ser adecuado para proporcionar soporte a los tubos y prevenir la posible vibración de los mismos. Esta dimensión es una función del tamaño del tubo y, para flujos sin cambio de fase, del diámetro de la carcasa. Si no existe cambio de fase en el fluido del lado de la carcasa, el espaciado de deflector no debe exceder el diámetro interno de la carcasa; de otra manera el fluido tendría que fluir paralelo a los tubos, en lugar de perpendicularmente, produciendo así un coeficiente de transferencia de calor mucho más bajo. El mínimo espaciado de deflectores requerido para mantener una

buena distribución de flujo, es el 20% del diámetro interno de la carcasa pero no menor de 50 mm (2 pulg). Un espaciado de deflector muy pequeño obliga al fluido en la carcasa a desviarse, produciendo así una disminución en el coeficiente de transferencia de calor. (MDP-05-E-02, 1995)

El número de deflectores se determina a partir del espaciado entre ellos, mediante la siguiente ecuación: (Fernández, s.f.)

$$N_b = \frac{L}{B} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$N_b$  = número de deflectores (adimensional).

$B$  = espaciado entre deflectores (m).

### **II.2.5. VARIABLES DE OPERACIÓN EN INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CARCASA**

Para el diseño y evaluación de un equipo de transferencia de calor, deben considerarse las diferencias entre las condiciones ideales bajo las cuales se realiza el diseño y las condiciones reales a las cuales se someterá el equipo a diseñar, por lo cual se debe tomar en cuenta algunos factores que afectan la transferencia de calor (Perry, 1999). Éstos comprenden el área de flujo, el régimen de flujo de los fluidos, el coeficiente individual de transferencia de calor ( $h$ ), el coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ); la diferencia de temperaturas media logarítmica ( $\Delta Tm_{LN}$ ), que constituye la fuerza impulsora mediante la cual se transfiere el calor; el factor de ensuciamiento ( $Rf$ ); la caída de presión que sufre tanto el fluido del lado de la carcasa como el de los tubos ( $\Delta P$ ) y la disposición de los fluidos dentro del equipo.

### II.2.5.1. Área de flujo

Para el fluido que circula por el interior de los tubos en un intercambiador de calor ejecutando más de un paso por el equipo, el área de flujo es determinada por medio de la siguiente relación:

$$A_{Fi} = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t}{4 \cdot N_p} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$A_{Fi}$  = área total de flujo total en el lado de los tubos (m<sup>2</sup>).

$D_i$  = diámetro interno de los tubos (m)

$N_p$  = número de pasos por los tubos (adimensional).

Para el fluido que circula por la carcasa, el área de flujo varía dentro del intercambiador, dependiendo principalmente del espaciado entre los tubos y el espaciado entre los deflectores de la carcasa, pudiéndose determinar de una forma aproximada, mediante la siguiente relación: (Fernández, s.f.)

$$A_{Fc} = D_c \cdot \left( \frac{pt - D_o}{pt} \right) \cdot B \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$A_{Fc}$  = Área de flujo de la carcasa (m<sup>2</sup>).

$D_o$  = diámetro externo de los tubos (m)

$pt$  = espaciado entre centros de tubos adyacentes (m).

### II.2.5.2. Régimen de flujo

La velocidad a la que el calor es transferido hacia / o de un líquido a un tubo, es considerablemente menor en el flujo laminar que en el turbulento, y en la práctica industrial es casi siempre deseable evitar condiciones tales como la baja velocidad de un líquido que origina el flujo laminar.

La velocidad másica de un fluido se define como:

$$G = \frac{m_t}{A_F} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$G$  = velocidad másica ( $\text{kg/s.m}^2$ ).

$m$  = flujo másico ( $\text{kg/s}$ ).

$A_F$  = área de flujo ( $\text{m}^2$ )

Así, el régimen de flujo en un intercambiador es determinado a partir del número de Reynolds, el cual es función de la velocidad másica del fluido, mediante la ecuación (Kern, 1965):

$$\text{Re} = \frac{D \cdot G}{\mu} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$\text{Re}$  = número de Reynolds (adimensional)

$D$  = diámetro interno del tubo o diámetro equivalente en la carcasa (m).

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)

$G$  = velocidad másica del fluido ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ )

Un fluido se encuentra en régimen laminar cuando el número de Reynolds, asociado a su patrón de flujo, es menor a 2000. Cuando es mayor a 10000 se dice que está en régimen turbulento, y si el número de  $\text{Re}$  obtenido está en el intervalo desde 2000 a 10000 se encuentra en régimen de transición.

Como se observa en la relación anterior, el régimen de flujo para el fluido que circula por la carcasa, es determinado a partir del diámetro equivalente. Este parámetro es utilizado cuando el área de flujo es diferente a la circular, a fin de expresar los coeficientes de transferencia de calor y caídas de presión mediante los mismos tipos de ecuaciones y representaciones gráficas usadas para los tubos. De este modo, el

diámetro equivalente es calculado a partir de las siguientes relaciones, según el tipo de arreglo de los tubos: (Kern, 1965)

$$D_e = \frac{4 \cdot \left( \frac{1}{2} pt \cdot 0.87 \cdot pt - \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi \cdot D_o} \quad (\text{para arreglos triangulares}) \quad \text{Ec. 12}$$

$$D_e = \frac{4 \cdot \left( pt^2 - \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \right)}{\pi \cdot D_o} \quad (\text{para arreglos cuadrados}) \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$D_e$  = diámetro equivalente (m).

Igualmente se debe tomar en cuenta el valor de la velocidad lineal del fluido dentro del equipo a fin de evitar problemas operacionales como erosión de los materiales o falla por desgaste. La siguiente tabla presenta valores de velocidad máxima recomendados para los fluidos líquidos en el lado de los tubos y la carcasa a partir de sus viscosidades dinámicas:

**Tabla 4.** Velocidades máximas recomendadas para fluidos en tubos y carcasa

$\mu$ , viscosidad (cP)	$V_{\max}$ , velocidad máxima recomendada (pie/s)	$V_{\max}$ , velocidad máxima recomendada (m/s)
Mayor a 1500	2	0,6
1000-500	2.5	0,8
500-100	3	0,9
100-35	5	1,5
35-1	6	1,8
Menor a 1	8	2,4

Fuente: Ludwig, 1999

### II.2.5.3. Coeficientes individuales de transferencia de calor

Como se mencionó en la sección II.2.1.3, los coeficientes de transferencia de calor por convección son obtenidos empíricamente. Sin embargo Sieder y Tate han estudiado este parámetro, planteando correlaciones para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada dentro de los tubos, mediante la gráfica que se muestra a continuación:

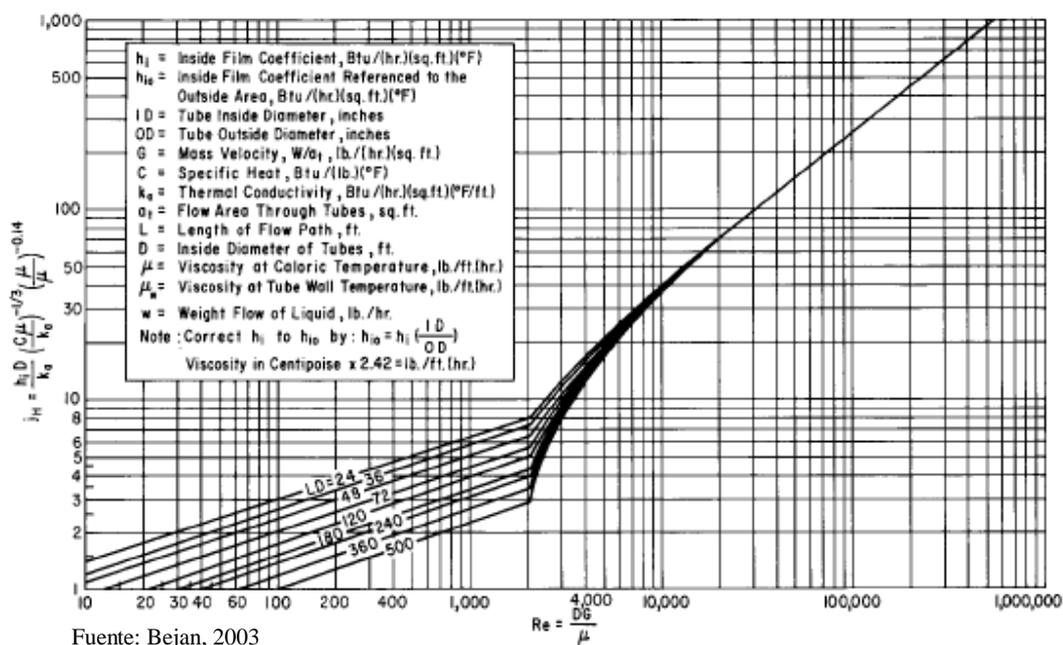


Figura 10. Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada en tubos

Las correlaciones que representan a la gráfica mostrada anteriormente son las siguientes:

- Para régimen de flujo laminar:

$$Nu_t = \frac{h_i \cdot D_i}{k_i} = 1.86 \cdot \left[ Re_t \cdot Pr_t \cdot \left( \frac{D_i}{L} \right) \right]^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 14}$$

- Para régimen de flujo turbulento:

$$Nu_t = \frac{h_i \cdot D_i}{k_i} = 0.027 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr_t^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 15}$$

- Para régimen en transición:

$$Nu_t = \frac{h_i \cdot D_i}{k_i} = 1.86 \cdot \left( \frac{Re_t \cdot Pr_t \cdot D_i}{L} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_{pi}} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$Nu_t$  = número de Nusselt en los tubos (adimensional).

$h_i$  = coeficiente individual de transferencia de calor por convección interna ( $W/m^2.K$ ).

$D_i$  = diámetro interno del tubo (m).

$Re_t$  = Número de Reynolds en los tubos (adimensional).

$Pr_t$  = Número de Prandtl en los tubos (adimensional).

$L$  = Longitud del tubo (m).

$k_i$  = conductividad térmica del fluido de los tubos a la temperatura media ( $W/m.K$ )

$\mu_i$  = viscosidad dinámica del fluido de los tubos a la temperatura media (Pa.s)

$\mu_{pi}$  = viscosidad dinámica del fluido de los tubos a la temperatura de la pared interna del tubo (Pa.s)

A menudo los coeficientes individuales se refieren a un área de los tubos determinado. Comúnmente se refieren al área externa de los tubos por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{D_i}{D_o} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$h_{io}$  = coeficiente individual de convección interna referido al área externa de los tubos ( $W/m^2.K$ ).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada para el lado de la carcasa, Mc Adams propuso la siguiente relación, la cual esta limitada a intercambiadores que emplean deflectores de corte de 25% : (Fernández, s.f.)

$$Nu_c = \frac{h_o \cdot D_e}{k_o} = 0.36 \cdot Re_c^{0.8} \cdot Pr_c^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_o}{\mu_{po}} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

$Nu_c$  = número de Nusselt en la carcasa (adimensional).

$h_o$  = coeficiente individual de transferencia de calor por convección externa (W/m<sup>2</sup>.K).

$D_e$  = diámetro equivalente (m).

$k_o$  = conductividad térmica del fluido de la carcasa a la temperatura media (W/m.K)

$Re_c$  = Número de Reynolds en la carcasa (adimensional).

$Pr_c$  = Número de Prandtl en la carcasa (adimensional).

$\mu_o$  = viscosidad dinámica del fluido de la carcasa a la temperatura media (Pa.s)

$\mu_{po}$  = viscosidad dinámica del fluido de la carcasa a la temperatura de la pared externa del tubo (Pa.s)

La mayoría de las ecuaciones de coeficiente de transferencia de calor para el lado de la carcasa, están estimadas para un corte de deflectores de 25%, siendo este tipo de deflector el que origina los valores de coeficientes de transferencia de calor más altos. (Kern, 1965).

Como se puede observar, existe una gran influencia de las propiedades de los fluidos en las relaciones presentadas previamente, por lo que debe contarse con un conjunto de datos de propiedades apropiado para dichos cálculos.

Es necesario conocer los valores de temperatura de pared interna y externa, para obtener así las viscosidades de los fluidos a dichas condiciones. Este cálculo es un proceso iterativo que se basa en un balance de energía del flujo de calor a través de los tubos.

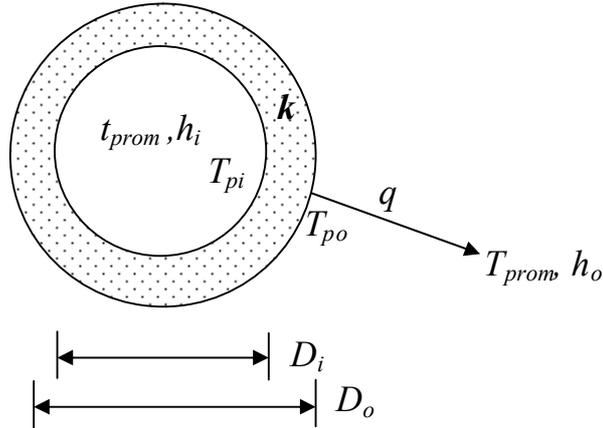


Figura 11. Esquema de resistencias térmicas.

Considérese la Figura 11, donde se ilustra el flujo de calor desde el interior de un tubo, hacia el exterior del mismo. El flujo de calor debe vencer las resistencias de convección interna, la resistencia por conducción de la pared del tubo y la resistencia de convección externa. Sabiendo que el flujo de calor desde el interior del tubo hasta la pared interna del tubo es igual al flujo de calor desde la pared interna hasta el fluido que se encuentra en el exterior del tubo, se realiza un balance de energía obteniéndose las siguientes relaciones:

$$q = \frac{|t_{prom} - T_{pi}|}{\frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i \cdot L}} = \frac{|T_{pi} - T_{po}|}{\frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot \pi \cdot D_o \cdot L}} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\frac{|t_{prom} - T_{pi}|}{\frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i \cdot L}} = \frac{|T_{pi} - T_{po}|}{\frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

$q$  = cantidad de calor transferido (W).

$T_{prom}$  = temperatura promedio del fluido en la carcasa (K).

$t_{prom}$  = temperatura promedio del fluido en los tubos (K).

$T_{pi}$  = temperatura de pared interna del tubo (K).

$T_{po}$  = temperatura de pared externa del tubo (K).

Una vez obtenido el valor de temperatura interna por medio de la ecuación 19, se puede calcular el valor de temperatura de pared externa del tubo por medio de la ecuación 20, para así poder evaluar las viscosidades dinámicas de los fluidos a dichos valores de temperatura.

#### II.2.5.4. Coeficiente global de transferencia de calor

Como se mencionó anteriormente, existen tres mecanismos por los cuales la transferencia de calor se lleva a cabo: conducción, convección y radiación, siendo esta última despreciable con respecto a las dos primeras en este tipo de equipos de transferencia de calor. Por tanto, la transferencia de calor total por estos mecanismos, se expresa en términos de un coeficiente de transferencia de calor total  $U$ , definido por la relación: (Holman, 1986)

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta Tm_{LN} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$A$  = área de transferencia de calor ( $\text{m}^2$ ).

$\Delta Tm_{LN}$  = diferencia de temperatura media logarítmica (K).

$F$  = factor de corrección de temperaturas (K).

El coeficiente global de transferencia de calor es la suma de las resistencias individuales a la transferencia de calor: coeficiente de convección interna, resistencia por ensuciamiento interna, conductividad de los tubos, resistencia por ensuciamiento externa y el coeficiente de convección externa. Por medio de la Ec. 22 se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa de los tubos: (referencia)

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{io}} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{k} + \frac{1}{h_o} + r_o + r_i} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$U_o$  = coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa de los tubos (W/m<sup>2</sup>.K).

$r_o$  = resistencia por ensuciamiento externo (m<sup>2</sup>.K /W).

$r_i$  = resistencia por ensuciamiento interno (m<sup>2</sup>.K /W).

Debido a que el área de transferencia de calor para la convección no es la misma para los fluidos involucrados, el coeficiente global de transferencia de calor puede expresarse ya sea como función del área interna como del área externa del cilindro.

Aunque los diseños de intercambiadores de calor se harán en base a cuidadosos cálculos de  $U$ , es de gran ayuda tener la tabla de valores del coeficiente de transferencia de calor total para diversas situaciones que pueden encontrarse en la práctica. En la Tabla 5 se presenta una lista resumida de valores de  $U$  para procesos sin cambio de fase.

**Tabla 5.** Coeficientes globales de transferencia de calor (aproximados)

Fluido Caliente	Fluido Frío	$U$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$U$ (BTU/h.pie <sup>2</sup> .°F)
Agua	Agua	850-1700	150-300
Solventes orgánicos	Agua	285-850	50-150
Gases	Agua	15-285	3-50
Crudos livianos	Agua	350-910	60-160
Crudos pesados	Agua	55-285	10-50
Solventes orgánicos	Crudos livianos	110-400	20-70
Agua	Salmuera	565-1200	100-200
Solventes orgánicos	Salmuera	150-515	30-90
Gases	Salmuera	15-285	3-50
Solventes orgánicos	Solventes orgánicos	110-350	20-60
Crudos pesados	Crudos pesados	45-285	8-50
Orgánicos ligeros	Agua	425-850	75-150
Vapor	Orgánicos ligeros	565-1200	100-200
Orgánicos ligeros	Orgánicos ligeros	225-425	40-75
Orgánicos pesados	Orgánicos ligeros	150-350	30-60
Orgánicos ligeros	Orgánicos pesados	55-225	10-40

Fuente: Kern, 1965; Ludwing, 1999; Walas, 1990.

Se debe destacar que el valor de  $U$  en muchos casos está determinado sólo por uno de los coeficientes de transferencia de calor. En la mayor parte de los problemas, la resistencia de conducción es pequeña comparada con las resistencias de convección. (Levenspiel, 1993)

Cuando el valor de  $U$  no se conoce, el flujo de calor puede ser calculado a partir de las condiciones del proceso y las propiedades de los fluidos involucrados. Realizando un balance de energía del calor intercambiado, y suponiendo que el calor transferido por el fluido caliente es igual al calor recibido por el fluido frío, se obtiene la siguiente relación: (Bejan, 2003)

$$q = M \cdot C \cdot (T_1 - T_2) = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$C$  = capacidad calorífica del fluido caliente (kJ/kg.K).

$c$  = capacidad calorífica del fluido frío (kJ/kg.K).

$M$  = flujo másico del fluido caliente (kg/s).

$m$  = flujo másico del fluido frío (kg/s).

$T_1$  = temperatura de entrada del fluido caliente (K).

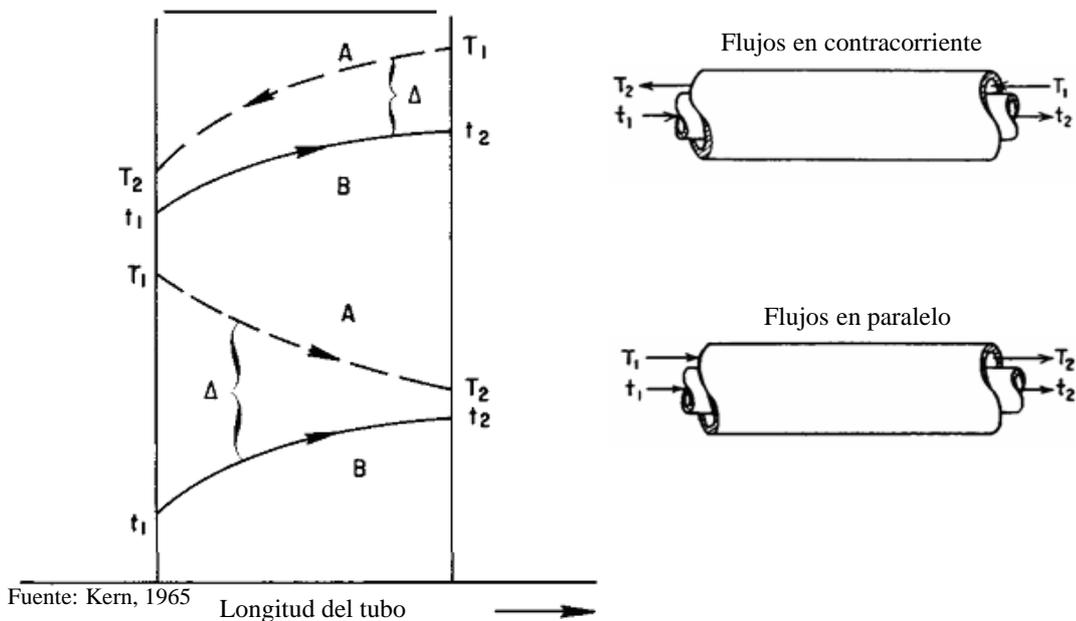
$T_2$  = temperatura de salida del fluido caliente (K).

$t_1$  = temperatura de entrada del fluido frío (K).

$t_2$  = temperatura de salida del fluido frío (K).

### II.2.5.5. Diferencia media de temperaturas

La diferencia de temperaturas constituye la fuerza impulsora mediante la cual se transfiere el calor de una corriente a otra. La gráfica de Temperatura vs. Longitud de tubo para un sistema de dos tubos concéntricos en el cual el fluido del ánulo se enfría y el fluido en el tubo se calienta, se muestra en la Figura 12. Cuando los dos fluidos viajan en direcciones opuestas a lo largo del tubo, se dice que los fluidos están a *contracorriente*. Si los fluidos viajan en la misma dirección, están en flujo en *paralelo*.



**Figura 12.** Perfiles de temperatura para fluidos en contracorriente y en paralelo

Realizando un balance diferencial de energía y luego una integración para la longitud total de intercambiador, se concluye que la verdadera fuerza motriz a la transferencia de calor dentro del equipo es el promedio logarítmico de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador, a través de las siguientes expresiones, tanto para flujos en contracorriente como en paralelo: (Perry, 1999)

$$\Delta Tm_{Ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{Ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (\text{flujo en contracorriente}) \quad \text{Ec. 24}$$

$$\Delta Tm_{Ln} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{Ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \quad (\text{flujo en paralelo}) \quad \text{Ec. 25}$$

La derivación anterior incluye dos suposiciones importantes:

1. Los calores específicos de los fluidos no varían con la temperatura.
2. Los coeficientes de transferencia de calor por convección son constantes a través del intercambiador de calor.

La segunda suposición es casi siempre la más seria debido a los efectos de entrada, viscosidad del fluido y cambios de conductividad térmica, etc. (Holman, 1986)

En la operación en contracorriente, observado en la Figura 12, la curva del perfil de temperatura del fluido A, el cual se enfría, se encuentra casi paralela a la curva del fluido B (el cual se calienta), en cualquier punto del intercambiador. Se puede observar que la temperatura de entrada del fluido A es mayor que la temperatura de entrada del fluido B. En este caso el fluido B puede salir del intercambiador a una temperatura  $t_2$  mayor a la temperatura de salida  $T_2$  del fluido A. La distancia vertical entre las dos curvas en cualquier punto a lo largo de la longitud del equipo es la diferencia de temperaturas  $\Delta(T-t')$  en dicho punto.

En la operación de flujos en paralelo, los fluidos A y B fluyen en la misma dirección a lo largo del equipo. Ellos entran en el mismo extremo del intercambiador, y sus temperaturas se incrementan y disminuyen respectivamente a medida que se acercan a la salida de la unidad y a medida que sus temperaturas de salida se acercan. En este caso la temperatura de salida,  $t_2$ , del fluido B, no puede exceder la temperatura de salida,  $T_2$ , de fluido A, como en el caso de flujo en contracorriente, por lo cual la transferencia de calor en este caso está limitada por la temperatura de salida del fluido B. En general, el empleo de un patrón de flujo en contracorriente siempre es más eficiente que el flujo en paralelo. (Ludwing, 1999)

Dentro de un intercambiador de tipo tubos y carcasa con múltiple pasos por los tubos, es necesario emplear un factor de corrección  $F$ , para así obtener la diferencia de temperaturas correspondiente a la disposición considerada de las corrientes en circulación. Este factor toma en cuenta, que en este tipo de equipos pueden existir algunas porciones de flujo en contracorriente y otras en paralelo o flujos cruzados, lo cual produce una disminución la eficiencia de la transferencia de calor con respecto a patrones de flujos en contracorriente o en paralelos verdaderos. Por tanto, el factor  $F$  siempre es menor a 1 para intercambiadores con múltiples pasos, excepto para corrientes en ebullición o condensación donde siempre es igual a 1. Usualmente, este factor es mayor a 0.8 para un intercambiador diseñado adecuadamente. (Kutz, 2006).

Para obtener el valor del factor de corrección de temperaturas  $F$ , se requiere determinar dos parámetros. El primero de ellos, el parámetro  $P$ , representa la ganancia o disminución de temperatura del fluido que circula por los tubos con respecto a la máxima diferencia de temperaturas alcanzada dentro del intercambiador. Se calcula mediante la siguiente relación:

$$P = \frac{t_{t2} - t_{t1}}{T_{cd} - t_{cd}} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

$P$  = razón de ganancia de temperatura del fluido de los tubos y máxima diferencia de temperatura (adimensional).

$t_{t2}$  = temperatura de salida del fluido de los tubos (K).

$t_{t1}$  = temperatura de entrada del fluido de los tubos (K).

$T_{c1}$  = temperatura de entrada del fluido de la carcasa (K).

El otro parámetro  $R$ , es la razón entre la ganancia o disminución de temperatura del fluido que circula por la carcasa y la ganancia o disminución de temperatura del fluido que circula por el interior de los tubos, y se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{t_{t2} - t_{t1}} \quad \text{Ec. 27}$$

$R$  = razón de ganancia de temperaturas del fluido de la carcasa y ganancia de temperatura del fluido de los tubos (adimensional)

$T_{c2}$  = temperatura de salida del fluido de la carcasa (K). (Fernández, s.f.)

Para el cálculo del factor  $F$ , existen correlaciones para intercambiadores de un paso por la carcasa - dos pasos por los tubos (1-2) y dos pasos por la carcasa - cuatro pasos por los tubos (2-4).

- Factor de corrección de la temperatura para intercambiadores 1-2:

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \cdot \ln\left(\frac{1 - P}{1 - R \cdot P}\right)}{(R - 1) \cdot \ln\left(\frac{2 - P \cdot (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P \cdot (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}\right)} \quad \text{Ec. 28}$$

- Factor de corrección de la temperatura para intercambiadores 2-4:

$$F = \frac{\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{2 \cdot (R - 1)} \cdot \ln\left(\frac{1 - P}{1 - R \cdot P}\right)}{\ln\left(\frac{\frac{2}{P} - 1 - R + \frac{2}{P} \cdot \sqrt{(1 - P) \cdot (1 - R \cdot P)} + \sqrt{R^2 + 1}}{\frac{2}{P} - 1 - R + \frac{2}{P} \cdot \sqrt{(1 - P) \cdot (1 - R \cdot P)} - \sqrt{R^2 + 1}}\right)}$$

Ec. 29

La ecuación 28 también es válida para intercambiadores 1-4, 1-6 y 1-8, ya que deducciones y estudios realizados afirman que la diferencia entre los valores del factor de corrección  $F$ , para estos arreglos, es menor del 2% cuando se usa esta relación. (Kern, 1965). El factor  $F$  también puede ser obtenido a partir de las gráficas mostradas en el Apéndice B.

#### II.2.5.6. Factor de Ensuciamiento

Pasado cierto tiempo en operación las superficies de transferencia de calor de un intercambiador de calor pueden cubrirse con diversos depósitos presentes en los sistemas de flujo o las superficies pueden oxidarse como resultado de la interacción entre los fluidos y el material usado para la construcción del equipo. En ambos casos, esta capa representa una resistencia adicional al flujo de calor y tiene como resultado una reducción en el rendimiento. El efecto total se representa, por medio de un factor de incrustación o resistencia por incrustación o ensuciamiento,  $R_f$ , que debe incluirse junto con las demás resistencias térmicas que forman el coeficiente de transferencia de calor total. Los factores de incrustación deben obtenerse experimentalmente determinando los valores de  $U$  tanto para condiciones limpias como de ensuciamiento en el intercambiador de calor. El factor de incrustación o ensuciamiento se define por consiguiente como: (Holman, 1986)

$$R_f = \frac{1}{U_{SUCIO}} - \frac{1}{U_{LIMPIO}}$$

Ec. 30

Donde:

$R_f$  = Factor de ensuciamiento ( $m^2.K/W$ ).

$U_{SUCIO}$  = Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones de ensuciamiento ( $W/m^2.K$ ).

$U_{LIMPIO}$  = Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias ( $W/m^2.K$ ).

En el Apéndice C se muestran algunos valores de factores de ensuciamiento para una variedad de corrientes de procesos. Los factores de ensuciamiento tabulados pretenden evitar que el intercambiador transfiera menos calor que el requerido por el proceso, durante un período aproximado de un año a un año y medio. Sin embargo, esta tabla es solamente una guía, ya que cuando exista información que pueda ser utilizada para determinar con precisión el factor de ensuciamiento para un servicio en particular, este factor debería utilizarse en lugar de los valores que se presentan en dicha tabla. (MDP-05-E-01, 1995)

#### **II.2.5.7. Caídas de presión a través de los tubos y la carcasa**

La caída de presión está fuertemente condicionada por la geometría del intercambiador, por lo cual es más difícil estimar dicho valor, especialmente en el lado de la carcasa, ya que el área de flujo en esta sección del equipo no es constante, dependiendo de las pérdidas por fricción asociadas al tipo de material con el cual se construyen los deflectores, los tubos y la carcasa en sí, además del variable patrón de flujo que sufre el fluido. (Ludwing, 1999)

Sin embargo, se han realizado numerosos estudios para lograr definir este valor, con la mayor precisión posible. Así, a partir de la siguiente expresión se puede calcular la caída de presión en la carcasa incluyendo las pérdidas de entrada y salida: (Bejan, 2003)

$$\Delta P_c = 2,679 \cdot 10^{-10} \frac{f_{Dc} \cdot G_c^2 \cdot D_c \cdot \frac{L}{B}}{g \cdot D_e \cdot \rho_c \cdot \phi} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde:

$\Delta P_c$  = Caída de presión en la carcasa (psi).

$G_c$  = Velocidad másica en la carcasa (lb/h.pie<sup>2</sup>).

$D_c$  = Diámetro interno de la carcasa (pie)

$B$  = espaciado entre deflectores (pie)

$D_e$  = Diámetro equivalente (pie)

$\rho_c$  = densidad del fluido de la carcasa (lb/pie<sup>3</sup>).

$g$  = aceleración de gravedad (pie/s<sup>2</sup>).

$\phi$  = factor de corrección de viscosidades (adimensional).

$f_{Dc}$  = factor de fricción de Darcy en la carcasa (adimensional).

El factor de Darcy para el lado de la carcasa, se determina a partir de la gráfica D.1 mostrada en el Apéndice D. Para números de Reynold mayores a 300 se estima a partir de la siguiente ecuación: (Ludwing, 1999)

$$f_{Dc} = 1.756 \cdot \text{Re}^{-0.192} \quad \text{Ec. 32}$$

Para el lado de los tubos, la caída de presión se calcula a partir de la siguiente expresión, la cual incluye las pérdidas por retorno debido al cambio de dirección que sufre el fluido dentro de los tubos: (Bejan, 2003)

$$\Delta P_t = 1,667 \cdot 10^{-11} \cdot \left[ 4 \cdot N_p + f_{Dt} \cdot \left( \frac{L \cdot N_p}{D_i} \right) \right] \cdot \frac{G_t^2}{2 \cdot \rho_t \cdot \phi} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

$\Delta P_t$  = Caída de presión en los tubos (psi).

$N_p$  = número de pasos (adimensional).

$G_c$  = Velocidad másica en los tubos (lb/h.pie<sup>2</sup>).

$D_i$  = Diámetro interno de los tubos (pie)

$\rho_t$  = densidad del fluido de los tubos (lb/pie<sup>3</sup>).

$\phi$  = factor de corrección de viscosidades (adimensional).

$f_D$  = factor de fricción de Darcy (adimensional)

El factor de Darcy en el lado de los tubos, se determina a partir de la figura D.2 del Apéndice D. Para un número de Reynold mayor a 1000 se estima mediante el siguiente ajuste: (Ludwing, 1999)

$$f_{Dt} = 0.411 \cdot \text{Re}_t^{-0.252} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

$f_{Dt}$  = factor de fricción de Darcy para el lado de los tubos (adimensional).

Para prevenir un excedente en la caída de presión, se pueden realizar dos tipos de correcciones en el diseño del intercambiador:

1. Ajustar la caída de presión permisible. Posiblemente la caída de presión para la cual la unidad está diseñada fue seleccionada arbitrariamente y puede ser incrementada.
2. Ajustar la geometría de tal forma que produzca la menor pérdida en la transferencia de calor haciendo uno a más de los cambios siguientes:
  - a. Incrementar el espaciado del deflector.
  - b. Disminuir la longitud del tubo.
  - c. Incrementar el espaciado del tubo.
  - d. Usar carcasas de flujo dividido, como Tipo J.

Si ninguno de estos puntos dan el resultado deseado, se debe considerar el uso de unidades en paralelo. (MDP-05-E-02, 1995)

#### **II.2.5.8. Disposición de los fluidos**

La opción de ubicar un fluido en el lado de los tubos influirá en la selección del tipo de cambiador y requerirá la evaluación de los siguientes factores siguientes para llegar a un funcionamiento satisfactorio:

- *Limpieza*: La carcasa es difícil de limpiar, por tanto debería ubicarse el fluido más limpio.
- *Corrosión*. La corrosión en uno de los fluidos del proceso puede dictar el empleo de aleaciones costosas, por lo tanto, los fluidos más corrosivos son colocados dentro de los tubos para ahorrar el costo de una carcasa fabricada de aleaciones.
- *Presión*. Las carcasas de alta presión, debido a sus diámetros, son gruesas y con mayor costo; por lo tanto, los fluidos de alta presión son colocados en los tubos.
- *Temperaturas*. El fluido de alta temperatura debería ser ubicado dentro de los tubos. Altas temperaturas reducen los esfuerzos aceptables en los materiales, y el efecto es similar a la alta presión en la determinación del grosor de la carcasa. Además, la seguridad de personal puede requerir el costo adicional de aislamiento si el fluido de alta temperatura está en la carcasa.
- *Cantidad*. Se puede obtener un mejor diseño cuando el fluido de menos cantidad (el fluido con menor flujo másico) es colocado en la carcasa. Esta opción puede evitar la construcción de múltiples pasos con la consiguiente pérdida de eficiencia en el intercambiador u obtener un régimen de flujo turbulento en la carcasa.

- *Viscosidad*. El número de Reynolds crítico para el flujo turbulento sobre el lado de carcasa es aproximadamente 2000; de ahí, cuando el régimen de flujo del fluido en los tubos es laminar, puede llegar a ser turbulento si el mismo fluido es colocado en la carcasa. Sin embargo, si el flujo es todavía laminar cuando se ubica en la carcasa, entonces es mejor colocar el fluido dentro de los tubos, para así predecir tanto la transferencia de calor como la distribución de flujo con mayor facilidad.
- *Caída de presión*. Si la caída de presión de un fluido es crítica y debe ser calculada con exactitud, debe colocarse el fluido dentro de los tubos. La caída de presión dentro de tubos puede ser calculada con menos error, mientras que en la carcasa se desviará ampliamente de los valores teóricos. (Rohsenow, 1998)

### **II.2.6. Problemas operacionales comunes.**

Cuando los intercambiadores de calor fallan, el proceso involucrado puede verse afectado, y a veces debe ser detenido. Por lo general, las pérdidas incurridas por una parada imprevista son mucho más costosas que cuando un intercambiador falla. Un mal funcionamiento del intercambiador de calor es, por lo general, debido a factores que no tienen que ver con el coeficiente de transferencia de calor. Aunque sólo la experiencia puede prever de todos los problemas posibles que se pueden presentar en los procesos que involucran el uso de intercambiadores de calor, a continuación se describen los problemas más comunes encontrados cuando se emplea este tipo de equipos: (Cheremisinoff, 2000)

#### **a) Ensuciamiento**

Como se mencionó anteriormente, en la sección II.2.5.6, el depósito de material sólido de corrientes de proceso sobre la superficie de transferencia de calor es conocido como ensuciamiento, y es el problema más importante en los equipos de transferencia de calor. El ensuciamiento puede ser causado por:

1. Precipitación de sustancias disueltas
2. Depósito de materia
3. Solidificación de material por reacciones químicas,
4. Corrosión de la superficie,
5. Crecimiento e incrustación de organismos biológicos,
6. Solidificación por congelamiento.

Las variables más importantes que afectan el ensuciamiento (además de la concentración del material sucio) son la velocidad, que afecta tipos 1, 2, y 5, y la temperatura superficial, que afecta los tipos 3-6. Generalmente es imposible conocer antes de tiempo, el mecanismo de ensuciamiento que será más importante en un caso particular.

Sin embargo, la mayoría de los tipos de ensuciamiento son retardados si la velocidad de flujo es tan alta como sea posible, la temperatura superficial tan baja como sea posible, y la distribución de flujo lo más uniforme.

Generalmente, la presencia esperada de ensuciamiento es considerada en la práctica por la asignación de factores de ensuciamiento, como resistencias adicionales a la transferencia de calor, como se vio en la Ec. 30. Los factores de ensuciamiento son asignados con el objetivo de sobrediseñar suficientemente el tamaño del intercambiador de calor para permitir un tiempo adecuado de operación antes de que sea necesaria la limpieza. En el pasado el factor de ensuciamiento también ha servido como un "factor de seguridad" esperado para así compensar otras incertidumbres en el diseño. Sin embargo, la asignación de factores de ensuciamiento demasiado grandes puede producir una operación deficiente causada por el excesivo sobrediseño.

En general, el valor mínimo comúnmente usado para el diseño es  $0.0005 \text{ } ^\circ\text{F}\cdot\text{h}\cdot\text{pie}^2/\text{BTU}$  para gases o hidrocarburos ligeros. Valores típicos para corrientes de proceso o agua de enfriamiento están alrededor de  $0.001\text{-}0.002 \text{ } ^\circ\text{F}\cdot\text{h}\cdot\text{pie}^2/\text{BTU}$ , y

para corrientes de procesos muy sucias en el rango de  $0.003-0.01 \text{ } ^\circ\text{F}\cdot\text{h}\cdot\text{pie}^2/\text{BTU}$ . (MDP-05-E-02, 1995)

**b) Vibración**

Un problema con los intercambiadores de tubos y carcasa que se está presentando más frecuentemente a medida que los equipos son más grandes y la velocidad de flujo más alta, es la falla o ruptura de los tubos debido a la vibración de los mismos inducida por el flujo. En general, los problemas de vibración de los tubos tienden a ocurrir cuando la distancia entre los deflectores o placas de apoyo es demasiado grande. Los espaciados máximos entre deflectores, recomendados por TEMA, están basados en el máximo de la longitud sin apoyo del tubo para que no se deforme considerablemente. Para procesos sin cambios de fase, el espaciado máximo del deflector no debe exceder al diámetro de la carcasa. La experiencia ha demostrado que la vibración inducida por flujo puede ocurrir aún cuando se emplee al espaciado máximo recomendado, pero para menos de aproximadamente 0.7 veces este espaciado, la mayor parte de vibración puede ser eliminada a velocidades de flujo normales. (MDP-05-E-02, 1995)

**d) Corrosión y erosión**

Una de las causas más frecuentes de falla en los intercambiadores son los daños a los tubos por la corrosión y la erosión.

Las fallas por corrosión no siempre son posibles eliminarlas completamente, a pesar de las precauciones que se tomen en la etapa de diseño; debido a que las condiciones de operación no son estáticas; razón por la cual es necesario una revisión periódica del equipo y mejoramiento de los sistemas de control de la corrosión. Sin embargo, en servicios corrosivos, para minimizar los efectos de la corrosión se recomienda:

- Pretratamiento de las superficies metálicas.
- Uso de inhibidores de corrosión.
- Tratamiento del agua, cuando este fluido este involucrado en la operación.
- Uso de material anticorrosivo o revestimiento.
- Selección de unidades fáciles de reparar, por ejemplo unidades de tubo y carcasa con haz de tubos removibles. (Ludwing, 1999)

**c) Pinch de Temperaturas**

Cuando las corrientes calientes y frías alcanzan aproximadamente la misma temperatura en un intercambiador de calor, la transferencia de calor se detiene. Esta condición se conoce como *pinch* de temperaturas. Para fluidos de una sola fase en el lado de la carcasa, se producen *pinches* inesperados de temperaturas que pueden ser resultado de una mala distribución de flujo dentro de la carcasa en combinación con un valor bajo de  $\Delta T_{mLn}$  y posiblemente un cruce de temperaturas. Es necesario un factor adicional,  $F_{dt}$ , factor de distorsión del perfil de temperaturas, como corrección al factor  $F$  normal para representar este efecto. Sin embargo, si se siguen buenas prácticas de diseño en lo concerniente a la geometría de la carcasa, este efecto puede ser ignorado. (MDP-05-E-02, 1995)

## CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se describe detalladamente la metodología establecida para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados en el capítulo I.

La metodología seguida se divide en las siguientes secciones:

### III.1. Evaluación del sistema de intercambiadores de la unidad de FCC.

- Revisión de la información de referencia.
- Evaluación del sistema de intercambiadores a condiciones actuales.
- Evaluación del sistema de intercambiadores a nuevas condiciones.

Para llevar a cabo la evaluación de los intercambiadores de calor de la unidad de FCC, se realizó una revisión de documentos de referencia que incluyeron los balances de materia y energía de los flujos de proceso y de servicio, así como las hojas de datos de los equipos. A partir del balance de materia y energía se obtuvo las composiciones molares de las corrientes, para así determinar las propiedades fisicoquímicas de los fluidos que circulan por las mismas. De las hojas de datos de los equipos fueron extraídos datos de procesos de las corrientes manejadas por cada uno de los siete intercambiadores, a las condiciones de diseño, tales como, flujo másico, temperaturas de entrada y salida, caídas de presión permisibles; y datos de la geometría de los equipos. Estos documentos fueron suministrados por la empresa cliente (Apéndice E)

Conocidos los datos anteriormente mencionados se procedió a realizar una primera evaluación de los intercambiadores, a condiciones de diseño, es decir, en base a los 42.000 BPD de gasóleos atmosféricos y de vacío provenientes de la estación de producción de crudo que actualmente procesa la unidad de FCC, bajo la modalidad de *rating* (evaluación) que ofrece el software HTRI®. Las propiedades de las corrientes involucradas fueron determinadas a partir del balance de masa y energía mostrado en el Apéndice F, empleando el paquete de simulación PROII®.

El objetivo fundamental de esta primera evaluación fue comparar el comportamiento de los intercambiadores según el diseño establecido en la hoja de datos de los equipos, mediante la obtención del porcentaje de desviación entre los resultados obtenidos por HTRI® y los valores reportados en las hojas de datos. Se estableció un porcentaje de desviación de 5 % (valor establecido por VEPICA) para la validación termohidráulica del diseño de los intercambiadores.

Las principales variables sometidas a observación fueron: el calor intercambiado, el coeficiente total de transferencia de calor y la  $\Delta T_{mLn}$ . Adicionalmente se observó la caída de presión calculada por el software a través de la carcasa y del lado tubo.

A partir de la simulación de la unidad de FCC realizada por Ingenieros del Departamento de Procesos de VEPICA, se obtuvieron los nuevos flujos de las corrientes de los intercambiadores a evaluar, en base al flujo de alimentación de 50.000 BPD de gasóleos atmosférico y de vacío.

Seguidamente, se procedió a la realización de la evaluación de cada uno de los intercambiadores bajo la modalidad de *rating* de HTRI®, manteniendo la misma configuración de los equipos reportada en las hojas de datos: tipo y dimensiones de la carcasa, dimensiones y arreglo de los tubos, número de unidades y arreglo (serie-paralelo), tipo y espaciamiento entre deflectores. De igual manera, se procedió obtener las propiedades de los fluidos a las nuevas condiciones de operación.

Los intercambiadores evaluados se describen a continuación (ver Figura 3):

- E-101: Intercambiador Fondo / Alimentación de la desbutanizadora
- E-102: Enfriador de producto del domo de la desbutanizadora.
- E-103: Intercambiador Fondo desbutanizadora / Alimentación despropanizadora.
- E-104: Enfriador del fondo de la despropanizadora.
- E-105: Enfriador del fondo de la desbutanizadora.
- E-106: Enfriador de producto de propano.
- E-107: Enfriador de producto de propileno.

Los datos introducidos en el software fueron los siguientes:

Datos geométricos:

- Tipo de carcasa, incluido tipos de los cabezales
- Diámetro interno de la carcasa.
- Espaciado entre deflectores.
- Tipo, longitud, diámetro externo, BWG, número y espaciado de los tubos.

Datos de Proceso:

- Flujos máxicos de los fluidos caliente y frío.
- Composición molar de las corrientes caliente y fría.
- Propiedades de los fluidos.
- Temperatura de entrada y salida de los fluidos caliente y frío.
- Caída de presión permisible para los tubos y para la carcasa.
- Factores de ensuciamiento para los fluidos caliente y frío.

Las principales variables sometidas a observación luego de la evaluación fueron: el calor intercambiado, el coeficiente total de transferencia de calor, el porcentaje de sobrediseño, la caída de presión calculada por el software a través de la carcasa y a través de los tubos, velocidad a través de los tubos y la carcasa, entre otros.

Finalmente, se procedió a realizar modificaciones en la geometría de los equipos que, ante las nuevas condiciones de flujo, no cumplieron con los objetivos operacionales del proceso. Esta tarea se realizó bajo la modalidad *rating* del software HTRI®, considerando las modificaciones realizadas como nuevos datos geométricos.

### **III.2. Desarrollo de la herramienta de programación en VBA para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa.**

La herramienta de programación en Visual Basic for Applications®, se desarrolló y validó según los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica sobre procedimientos de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa, así como los criterios de diseño para dimensionar este tipo de equipos en procesos que manejen fluidos líquidos sin cambio de fase.
- Desarrollo de hojas de cálculo en Microsoft Excel®, donde se incluye el procedimiento de diseño establecido para equipos que manejen fluidos líquidos y con un solo paso por la carcasa.
- Desarrollo de la interfaz del usuario de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa, en el lenguaje de programación Visual Basic for Applications® (VBA), a partir de las hojas de cálculos realizadas.
- Validación del programa realizado, empleando los datos de los intercambiadores de calor evaluados, estableciendo los porcentajes de desviación asociados en cada caso.

A partir de información de la bibliografía consultada, se desarrolló un procedimiento de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, el cual fue el fundamento de las hojas de cálculo realizadas. De igual manera se consultó diversas normas y códigos, según las cuales fue posible establecer criterios de diseño para este mismo tipo de equipos, algunos de los cuales fueron incluidos en el programa realizado.

### **III.2.1. Criterios para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa**

Los criterios de diseño mostrados a continuación, extraídos del Manual de Diseño de procesos de PDVSA, se incluyeron en el programa con el objeto de servir de guía al usuario al momento de diseñar un intercambiador:

1. Las longitudes de tubos más comunes en la industria son de 8, 12, 14, 16 y 20 pies, siendo las más utilizadas las de 16 y 20 pies.
2. El ensuciamiento no es usualmente severo por debajo de los 120°C (250°F), siendo más significativo cuando los hidrocarburos se calientan que cuando se enfrían.
3. El diámetro externo de tubo más pequeño y normalmente usado es de 19 mm (3/4 pulg.), reservándose los tubos de 25 mm (1 pulg) para servicios muy sucios, con gran tendencia a la formación de depósitos, ya que tubos más pequeños resultarían poco prácticos para limpiarlos mecánicamente.
4. Diseños con diámetros pequeños (16 a 25 mm (5/8 a 1 pulg.)) son más compactos y mas económicos que aquellos con diámetros mayores, aunque estos últimos podrían ser apropiados en casos donde se requieren bajas caídas de presión.
5. Un intercambiador con arreglo triangular cuesta menos por metro cuadrado y transfiere más calor por metro cuadrado que uno con arreglo de tubo cuadrado. Por esta razón, cuando se puede aplicar, el arreglo triangular es el preferido.
6. Para todos los intercambiadores con un factor de ensuciamiento de 0,00035 m<sup>2</sup>C/W (0,002 hpie<sup>2</sup>F/BTU) o menor, se prefiere el uso de arreglos triangulares de 30°, suponiendo que el sucio acumulado se pueda limpiar químicamente.
7. Los arreglos de tubos cuadrados deberían ser especificados para todos los intercambiadores que tengan un factor de ensuciamiento en el lado de la

carcasa mayor de  $0.00035 \text{ m}^2\text{C/W}$  ( $0.002 \text{ h.pie}^2 \cdot \text{°F/BTU}$ ), cuando la limpieza mecánica del lado externo de los tubos es requerida o exigida por el proceso.

8. Cuando existe flujo turbulento, especialmente para casos limitados por la caída de presión, el arreglo de tubos en cuadrado es preferible, debido a que el coeficiente de transferencia de calor es equivalente al del arreglo en cuadrado rotado, pero con menos caída de presión.
9. Los espaciamientos de tubos comúnmente usados son aproximadamente 1.25 veces el diámetro externo del tubo.
10. El rango de corte óptimo para deflectores segmentados es de 15 a 30%, con 25% como el óptimo.
11. En procesos donde no existe cambio de fase del lado de la carcasa, el espaciado de deflector no debe exceder el diámetro interno de la carcasa; de otra manera el fluido tendría que fluir paralelo a los tubos, en vez de perpendicular, produciendo así un coeficiente de transferencia de calor mucho más bajo. El mínimo espaciado de deflectores, requerido para mantener una buena distribución de flujo, es el 20% del diámetro interno de la carcasa.
12. La carcasa tipo E, según TEMA, es la construcción con mayor uso en intercambiadores de tubo y carcasa.
13. Normalmente, se pueden emplear no menos de dos o más de ocho pasos por los tubos. Con más de ocho y menos de dos, los costos de fabricación tienden a ser excesivos.

### **III.2.2. Procedimiento de cálculo para intercambiadores de calor de tubos y carcasa.**

Para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, los resultados obtenidos permiten determinar principalmente el área de transferencia de calor requerida para un proceso determinado; mientras que para la evaluación, se busca determinar las variables de procesos tales como temperaturas de salidas de las

corrientes de interés o flujos máxicos de los fluidos involucrados, teniendo el área de transferencia de calor como dato.

**a) Procedimiento de cálculo para el diseño**

Las hojas de cálculos realizadas para el desarrollo de la herramienta de programación, se basaron en el procedimiento de cálculo para el diseño de un intercambiador de tubos y carcasa que maneje fluidos líquidos sin cambio de fase. Dicho procedimiento, se rige por los siguientes pasos, una vez que se han especificado los datos requeridos: (Kern, 1965)

1. Realizar un ajuste de las propiedades de los fluidos con respecto a la variación de temperatura, tanto para el fluido que circula por los tubos como para el fluido que fluye por la carcasa, a partir de datos suministrados por el usuario del programa.
2. Comprobar el balance de energía, a partir de las condiciones del proceso y las propiedades del fluido, mediante ecuación 23.
3. Calcular la diferencia de temperatura media logarítmica,  $\Delta T_{mLn}$ , por medio de las ecuaciones 24 o 25 según sea el caso.
4. Determinar los parámetros  $P$  y  $R$  por medio de las ecuaciones 26 y 27 respectivamente.
5. Obtener el factor de corrección de temperaturas  $F$  por medio de la ecuación 28 o a partir de la gráfica mostrada en el Apéndice B.
6. Determinar el promedio de las temperaturas de entrada y salida del fluido caliente,  $T_{prom}$  y del fluido frío,  $t_{prom}$ , a las cuales serán evaluadas las propiedades de los fluidos.
7. Suponer un valor de coeficiente global de transferencia de calor ( $U_s$ ). En la tabla 5 se resumen valores típicos para fluidos que se emplean comúnmente en procesos sin cambio de fase.

8. Calcular el área de transferencia de calor ( $A_s$ ):

$$A_s = \frac{q}{U_s \cdot F \cdot \Delta Tm_{Ln}} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$A_s$ = área de transferencia de calor a partir del coeficiente global supuesto ( $m^2$ ).

$U_s$ = coeficiente global de transferencia de calor supuesto ( $W/m^2.K$ ).

9. Calcular el área de transferencia de calor de cada tubo, previa selección del diámetro y longitud del mismo:

$$a_t = \pi \cdot D_o \cdot L \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

$a_t$ = área de transferencia de calor de cada tubo ( $m^2$ ).

$D_o$ =diámetro externo de los tubos (m).

$L$ = Longitud de los tubos (m).

10. Determinar el número de tubos en el intercambiador.

$$N_t = \frac{A_s}{a_t} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde:

$N_t$ = número de tubos del intercambiador (adimensional).

11. Seleccionar el diámetro mínimo de la carcasa ( $D_c$ ), a partir de las tablas del Apéndice G, en base al número de tubos calculado y el arreglo de los mismos. En este paso se establece como nuevo número de tubos, el valor inmediatamente superior al número de tubos calculado en el paso 10.

12. Corregir el área de transferencia de calor en base al nuevo número de tubos, obteniendo el área de transferencia de calor disponible:

$$A_D = N_t \cdot a_t \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$A_D$  = área de transferencia de calor disponible ( $m^2$ ).

13. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor disponible, en base al área de transferencia de calor disponible:

$$U_{Disp} = \frac{q}{A_D \cdot F \cdot \Delta Tm_{Ln}} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$U_{Disp}$  = coeficiente global de transferencia de calor disponible ( $W/m^2 \cdot K$ ).

14. Estimar el espaciado de los deflectores  $B$  (ver sección II.2.4.3).
15. Determinar el número de deflectores ( $N_b$ ) mediante la ecuación 7, y aproximar al número entero superior.

**Cálculos para el lado de la carcasa:**

16. Calcular el área de flujo de la carcasa, a partir de la ecuación 9.
17. Calcular la velocidad másica en la carcasa

$$G_c = \frac{m_c}{A_{fc}} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde:

$G_c$  = velocidad másica en la carcasa ( $kg/s \cdot m^2$ ).

$m_c$  = flujo másico del fluido de la carcasa ( $kg/s$ ).

18. Determinar el diámetro equivalente ( $D_e$ ) a partir de las ecuaciones 12 o 13, según sea el caso.
19. Evaluar la viscosidad del fluido en la carcasa,  $\mu_o$ , a  $T_{prom}$  o  $t_{prom}$ , mediante el ajuste realizado en el paso 1.
20. Determinar el número de Reynolds ( $Re_c$ ):

$$Re_c = \frac{De \cdot G_c}{\mu_o} \quad \text{Ec. 42}$$

Donde:

$Re_c$  = número de Reynolds en el lado de la carcasa (adimensional)

21. Determina el número de Prandtl ( $Pr_c$ ) para el lado de la carcasa:

$$Pr_c = \frac{\mu_o \cdot c_o}{k_o} \quad \text{Ec. 43}$$

Donde:

$Pr_c$  = Número de Prandtl en el lado de la carcasa (adimensional).

$c_o$  = capacidad calorífica del fluido de la carcasa a la temperatura media (kJ/kg.K)

22. Calcular el número de Nusselt en la carcasa ( $Nu_c$ ), según la ecuación 18. Para este cálculo se asume que el factor de corrección de viscosidad  $(\mu_o / \mu_{po})^{0,14}$  es igual a la unidad ya que aún no se conoce la temperatura de pared externa.

23. A partir del número de Nusselt para el fluido de la carcasa, obtener el coeficiente individual de convección externa ( $h_o$ ), mediante la ecuación 18.

**Cálculos para el lado de los tubos:**

24. Empleando la ecuación 8, obtener el área de flujo por los tubos  $A_{Ft}$ .

25. Calcular la velocidad másica del fluido ( $G_t$ ):

$$G_t = \frac{m_t}{A_{Ft}} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

$G_t$  = velocidad másica en el lado de los tubos (kg/s.m<sup>2</sup>).

$m_t$  = flujo másico del fluido en los tubos (kg/s).

26. Evaluar la viscosidad del fluido en los tubos,  $\mu_i$ , a  $T_{prom}$  o  $t_{prom}$  mediante el ajuste realizado en el paso 1.

27. Determinar el número de Reynolds para el lado de los tubos ( $Re_t$ ):

$$Re_t = \frac{D_i \cdot G_t}{\mu_i} \quad \text{Ec. 45}$$

Donde:

$Re_t$  = número de Reynolds en el lado de los tubos (adimensional)

28. Determinar el número de Prandtl ( $Pr_t$ ) para el lado de los tubos:

$$Pr_t = \frac{\mu_i \cdot c_i}{k_i} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde:

$Pr_t$  = número de Prandtl en el lado de los tubos (adimensional)

$c_i$  = capacidad calorífica del fluido de los tubos a la temperatura media (kJ/kg.K)

29. Calcular el número de Nusselt del fluido en el lado de los tubos ( $Nu_t$ ), dependiendo del régimen de flujo, según las ecuaciones 14, 15 o 16. Para este cálculo se asume que el factor de corrección de viscosidad es igual a la unidad ya que aún no se conoce la temperatura de pared interna.

30. A partir del número de Nusselt para el fluido en el lado de los tubos, calcular el coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ ).

31. Corregir el coeficiente individual de convección interna, para referirlo al área externa de los tubos según la ecuación 17. De esta manera el coeficiente de global de transferencia de calor será calculado en base al área externa de los tubos.

**Corrección por temperatura de pared:**

- 32. Calcular la temperatura de pared interna ( $T_{pi}$ ) por medio de la ecuación 19.
- 33. Calcular la temperatura de pared externa ( $T_{po}$ ) por medio de la ecuación 20.
- 34. Evaluar las viscosidades de los fluidos a las temperaturas de pared interna y externa, ( $\mu_{pi}$ ) y ( $\mu_{po}$ ) respectivamente.
- 35. Corregir el coeficiente individual de convección interna ( $h_{ioc}$ ):

$$h_{ioc} = h_{io} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_{pi}} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

$h_{ioc}$ = coeficiente individual de convección interna corregido (W/m<sup>2</sup>.K).

- 36. Corregir el coeficiente individual de convección externa ( $h_{oc}$ ):

$$h_{oc} = h_o \cdot \left( \frac{\mu_o}{\mu_{po}} \right)^{0.14} \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

$h_{oc}$ = coeficiente individual de convección externa corregido (W/m<sup>2</sup>.K).

- 37. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor de diseño ( $U_D$ ), por medio de la ecuación 22.

- 38. Determinar el área de transferencia de calor requerida ( $A_{req}$ ):

$$A_{req} = \frac{q}{U_D \cdot F \cdot \Delta T m_{Ln}} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

$A_{req}$ = Área de transferencia de calor requerida (m<sup>2</sup>).

- 39. Comparar el área de transferencia de calor disponible ( $A_{Dsp}$ ) con el área de transferencia de calor requerida ( $A_{req}$ ), mediante la obtención de porcentaje de área en exceso a partir de la siguiente ecuación:

$$\%A_{exc} = \frac{A_D - A_{req}}{A_{req}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

$\%A_{exc}$  = porcentaje de área en exceso (%).

Se pueden presentar los siguientes casos a partir del valor de  $\%A_{exc}$ :

- a) Si el área requerida es superior a la disponible, es decir, el porcentaje de área en exceso es negativo, se ha supuesto un valor de  $U_s$  muy alto. Para aumentar el valor de  $\%A_{exc}$ , elegir el diámetro de la carcasa inmediatamente superior al seleccionado en el paso 11 (ver Apéndice G), o de una forma más rápida disminuir el valor de  $U_s$  en un 5% aproximadamente y repetir el cálculo.
- b) Si el valor de área en exceso está entre 10 y 15%, pueden espaciarse los deflectores para aumentar el área requerida hasta que el porcentaje de área en exceso sea inferior al 10%, o seleccionar el tamaño de la carcasa de diámetro inmediatamente inferior del elegido en el paso 11 (ver Apéndice G), calculando un nuevo intercambiador.
- c) Si el porcentaje de área en exceso es inferior al 10%, se procede a calcular las caídas de presión en el intercambiador.

#### **Cálculos de caída de presión:**

**40.** Calcula el factor de fricción de Darcy para el lado de la carcasa ( $f_{Dc}$ ), a partir de la ecuación 32.

**41.** Determinar la caída de presión en la carcasa ( $\Delta P_C$ ), a partir de la ecuación 31.

Si la caída de presión es mayor que la permisible, se puede ampliar el espaciado de los deflectores o cambiar el corte de los mismos.

42. Calcular el factor de fricción de Darcy para el lado de los tubos ( $f_{Dt}$ ), a partir de la ecuación 34.
43. Determinar la caída de presión para el lado de los tubos ( $\Delta P_t$ ), a partir de la ecuación 33.

Si el valor de caída de presión en el lado de los tubos es mayor que el valor permisible, se puede reducir el número de pasos por los tubos o aumentar el diámetro de los tubos en caso de que la caída de presión sea muy elevada.

#### **b) Procedimiento de cálculo para evaluación**

Para el caso de evaluación se sigue básicamente el mismo procedimiento de cálculo que para el diseño, sólo que en este caso, no se debe suponer un coeficiente de global de transferencia de calor como en el paso 7. Por el contrario, una vez conocida la geometría del intercambiador, sólo se deben determinar las variables de salida del proceso.

1. Realizar un ajuste de las propiedades de los fluidos con respecto a la variación de temperatura, tanto para el fluido que circula por los tubos como para el fluido que fluye por la carcasa
2. Calcular la variable de salida desconocida
  - Si la variable desconocida es el flujo másico de una de las corrientes, determinar el calor transferido por la otra corriente, mediante la ecuación 23, y conociendo las temperaturas de entrada y salida, calcular el flujo másico desconocido.
  - Si la variable desconocida es la temperatura de salida de una de las corrientes, determinar el calor transferido por la otra corriente a partir de la ecuación 23, y seguir un proceso iterativo, suponiendo un valor de temperatura de salida hasta alcanzar el calor calculado.
3. Seguir los pasos del 3 al 6 del procedimiento de cálculo para el diseño.

7. Calcular el área total de transferencia de calor por medio de la ecuación 6, usando como datos el diámetro, la longitud y el número de los tubos del intercambiador a evaluar.
8. Calcular el coeficiente global de calor requerido por el proceso ( $U_{req}$ ), mediante la ecuación 21, en base al área de transferencia de calor real calculada en el paso anterior.
9. Seguir los pasos del 16 al 36 del procedimiento de cálculo para el diseño, usando los datos geométricos del intercambiador a evaluar.
30. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor actual  $U_{actual}$ , mediante la Ec 22.
33. Determinar el porcentaje de sobrediseño (%S):

$$\%S = \frac{U_{actual} - U_{req}}{U_{req}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 51}$$

Donde:

$\%S$  = porcentaje de sobrediseño (%).

34. Seguir los pasos del 40 al 43 del procedimiento de cálculo para el diseño, para determinar las caídas de presión por la carcasa y por los tubos.

### **III.2.3. Desarrollo de la interfaz del programa**

Una vez realizadas las hojas de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, se procedió a realizar la interfaz del programa, empleando el software Visual Basic for Applications®, incluido dentro del programa Microsoft® Excel, en la cual el usuario introducirá los datos geométricos y de procesos, requeridos para dimensionar y / o evaluar el funcionamiento de este tipo de intercambiadores, así como visualizar los resultados obtenidos. En esta parte se utilizaron diversos elementos gráficos que contiene el software VBA, tales como botones de comando, listas desplegables, cuadros de texto, entre otros.

Para ello, se crearon dos ventanas principales, según la aplicación del programa:

- **Ventana de Diseño.**

Los datos a introducir por el usuario en la etapa de diseño son:

*Datos geométricos:*

- Longitud de los tubos.
- Diámetro externo de los tubos.
- Espesor BWG de los tubos.
- Número de pasos por los tubos.
- Material de los tubos.
- Espaciado entre deflectores de la carcasa.
- Arreglo de los tubos (cuadrado o triangular)

*Datos de proceso:*

- Temperaturas de entrada y salida del fluido en los tubos.
- Temperaturas de entrada y salida del fluido en la carcasa.
- Flujo másico de los fluidos en los tubos y en la carcasa.
- Factor de ensuciamiento en los tubos y en la carcasa.
- Caída de presión permitida en los tubos y en la carcasa.
- Coeficiente global de transferencia de calor supuesto.
- Tipo de flujo, en contracorriente o en paralelo.
- Propiedades de los fluidos.

- **Ventana de Evaluación.**

Los datos a introducir por el usuario en la ventana de evaluación son:

*Datos geométricos:*

- Diámetro de la carcasa
- Longitud de los tubos.
- Diámetro externo de los tubos.
- Espesor BWG de los tubos.
- Número de pasos por los tubos.

- Material de los tubos.
- Espaciado entre deflectores de la carcasa.
- Arreglo de los tubos (cuadrado o triangular)

*Datos de proceso:*

- Si se desconoce la temperatura de salida del fluido en los tubos, se requieren como datos las temperaturas de entrada de los fluidos en los tubos y en la carcasa, la temperatura de salida del fluido en la carcasa y los flujos máxicos de ambos fluidos.
- Si se desconoce la temperatura de salida del fluido en la carcasa, se requieren como datos las temperaturas de entrada de los fluidos en los tubos y en la carcasa, la temperatura de salida del fluido en los tubos y los flujos máxicos de ambos fluidos.
- Si se desconoce el flujo máxico del fluido en los tubos, se requieren como datos, las temperaturas de entrada y salida ambos fluidos y flujo máxico del fluido en la carcasa.
- Si se desconoce el flujo máxico del fluido en la carcasa, se requieren como datos, las temperaturas de entrada y salida ambos fluidos y el flujo máxico del fluido en los tubos.
- Factor de ensuciamiento en los tubos y en la carcasa.
- Caída de presión permitida en los tubos y en la carcasa.
- Tipo de flujo, en contracorriente o en paralelo.
- Propiedades de los fluidos. Éstas serán evaluadas al promedio de las temperaturas de entrada y salida del fluido. El ajuste utilizado para cada propiedad fue un ajuste lineal con respecto a la temperatura.

De igual forma, empleando VBA, se realizó un lenguaje de programación, en base a las hojas de cálculos realizadas. Una vez efectuadas las ventanas de la interfaz del usuario se procedió a asociar el código de programación de dichas hojas con las ventanas creadas, de modo tal que el programa pueda ser ejecutado por el usuario, para así mostrar los resultados obtenidos de la evaluación.

Así, la herramienta realizada será un aporte a la Universidad Central de Venezuela, para ser usada como parte del programa de transferencia de calor de la Escuela de Ingeniería Química. De este modo, el lenguaje de programación creado será un código abierto de modo tal que pueda ser modificado y optimizado para aplicaciones futuras.

#### **III.2.4. Validación del programa.**

Finalmente se procedió a realizar la validación del programa, a partir de los datos de los intercambiadores de calor E-106 y E-107 de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC en estudio. Estos equipos fueron seleccionados debido a que son los únicos intercambiadores de la unidad que manejan sólo fluidos líquidos y están conformados por una sola carcasa, características para las cuales fue diseñado el programa. Dicha evaluación se basó en la obtención de diversas variables de operación y la posterior comparación de los mismos, con los arrojados por el software HTRI®, estableciendo de este modo los alcances y limitaciones de la herramienta de programación realizada.

## **CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez desarrollados cada uno de los objetivos planteados, mediante la metodología anteriormente descrita, se presentan en este capítulo los resultados obtenidos, mostrando además los análisis pertinentes.

A partir de esta sección se llamarán *condiciones actuales*, aquellas basadas en los 42.000 BPD que actualmente procesa la unidad de FCC. Se llamarán *condiciones modificadas*, aquellas basadas en los 50.000 BPD de gasóleos atmosféricos y de vacío que se espera pueda procesar la unidad.

### **IV.1. Evaluación termohidráulica del sistema de intercambiadores de calor de la Sección de Recuperación de Vapores (SRV) de la unidad de FCC a condiciones actuales.**

En la Tabla 6 se encuentran resumidos los datos de las hojas de diseño de cada uno de los siete intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC evaluados.

**Tabla 6. Datos de diseño del sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC**

<b>DATOS DE PROCESO</b>	<b>E-101</b>	<b>E-102</b>	<b>E-103</b>	<b>E-104</b>	<b>E-105</b>	<b>E-106</b>	<b>E-107</b>
Coefficiente global, U (W/m <sup>2</sup> .°C)	488,32	633,65	674,34	479,06	457,75	453,57	574,97
ΔT <sub>m,ln</sub> (°C)	43,5	7,1	59,3	22,7	14,0	8,6	6,0
Calor intercambiado (kW)	6727,12	908,03	4863,39	2466,11	4701,62	116,40	261,93
<b>Tubos</b>							
Fluido	Fondo torre desbutanizadora	Agua de enfriamiento	Fondo torre desbutanizadora	Agua de enfriamiento	Agua de enfriamiento	Agua de enfriamiento	Agua de enfriamiento
Temp. de entrada / salida (°C)	191,4 / 141,6	33,0 / 41,5	141,6 / 111,5	33,0 / 43,2	33,0 / 43,0	33,0 / 37,8	33,0 / 37,8
Flujo másico (kg/h)	192907	91476	192906	199044	399542	20057	41813
ΔP permisible / calculada (kPa)	68,63 / 58,82	78,43 / 58,82	68,63 / 68,63	98,10 / 90,60	98,07 / 95,76	98,07 / 93,87	98,07 / 92,56
Factor de ensuciamiento (h.m <sup>2</sup> .°C/W)	0,0005	0,0006	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
<b>Carcasa</b>							
Fluido	Alimentación torre desbutanizadora	GLP C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	Alimentación torre despropanizadora	Fondo torre despropanizadora	Fondo torre desbutanizadora	Producto de propano	Producto de propileno
Temp. de entrada / salida (°C)	109,4 / 126,2	53,0 / 37,8	38,3 / 76,8	102,1 / 38,0	78,0 / 37,8	60,0 / 37,8	49,6 / 38,0
Flujo másico (kg/h)	275647	82739	81946	48960	192906	6164	25967
ΔP permisible / calculada (kPa)	68,63 / 58,82	68,63 / 68,63	68,63 / 49,02	39,24 / 39,24	39,23 / 37,64	19,61 / 18,97	34,32 / 33,76
Factor de ensuciamiento (h.m <sup>2</sup> .°C/W)	0,0005	0,0002	0,0003	0,0002	0,0005	0,0002	0,0002

**Tabla 6. Datos de diseño del sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC (Cont.)**

<b>DATOS GEOMÉTRICOS</b>	<b>E-101</b>	<b>E-102</b>	<b>E-103</b>	<b>E-104</b>	<b>E-105</b>	<b>E-106</b>	<b>E-107</b>
Área de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )	316	215	98	219	708	30	72
Diámetro de la carcasa (mm)	1030	610	690	740	980	356	432
Diámetro externo de los tubos (mm)	25,4	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05
Longitud de los tubos (mm)	7315	6096	4880	4880	7315	6096	7315
Número de tubos	550	300	342	384	820	84	166
Número de pasos por los tubos	4	2	2	1	2	4	4
Espaciado entre tubos (mm)	31,75	25,4	25,4	23,8	25,4	25,4	25,4
Espaciado entre deflectores (mm)	649	256	196	295	545	140	119
Tipo TEMA	AET	AES	AET	AET	AET	AES	BES
Unidades en serie	1	2	1	2	2	1	1

A partir de estos datos se realizó la primera evaluación, obteniéndose los siguientes resultados y comparándolos con los valores de diseño:

**Tabla 7. Comparación entre los datos de diseño y los resultados de la primera evaluación del sistema de intercambiadores de la SRV de la unidad de FCC**

Intercambiador	U <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> .K)			ΔT <sub>mln</sub> (K)			q <sub>t</sub> (kW)			ΔPt calculada, (kPa)			% D		
	DD	RE	%D	DD	RE	%D	DD	RE	%D	DD	RE	%D			
E-101	488,32	508,01	4	43,5	43,2	-1	6727,12	6650,16	-1	58,82	45,10	-23	58,82	2951	-50
E-102	633,65	615,63	-3	7,1	6,8	-4	908,03	901,30	-1	58,82	44,99	-24	68,63	5945	-13
E-103	674,34	701,37	4	59,3	57,0	-4	4863,39	4901,29	1	68,63	52,55	-23	49,02	4882	0
E-104	479,06	494,85	3	22,7	22,7	0	2466,11	2428,80	-2	90,60	24,18	-73	39,24	1563	-60
E-105	457,75	460,75	1	14	14	0	4701,62	4571,60	-3	95,76	84,44	-12	37,64	2887	-23
E-106	453,57	442,78	-2	8,6	8,5	-1	1116,40	114,20	-2	93,87	67,04	-29	18,97	4,02	-79
E-107	574,97	576,24	0	6	5,8	-3	261,93	273,30	4	92,56	89,57	-3	33,76	1601	-53

DD: Dato de Diseño; RE: Resultado de la Evaluación; %D: Porcentaje de Desviación; ΔPt: Caída de presión en los tubos; ΔPc: Caída de presión en la carcasa

De los resultados obtenidos con HTRI®, y dada la premisa que, hasta un 5% de desviación en los resultados referente a los datos de diseño validan la configuración desde el punto de vista térmico de los equipos, se puede concluir que todos los parámetros tomados en cuenta para la evaluación térmica de los intercambiadores se encuentran dentro del 5% aceptado.

En cuanto a la caída de presión por el lado carcasa y los tubos de todos los equipos se puede concluir que, a pesar que los porcentajes de desviación son mayores al establecido, se observa que el valor calculado es inferior al permisible, lo cual garantiza el buen funcionamiento de los intercambiadores desde el punto de vista hidráulico.

En el Apéndice H, se muestran las hojas de reporte de la evaluación de cada intercambiador empleando el software HTRI®.

#### **IV.2. Evaluación termohidráulica del sistema de intercambiadores de calor de la Sección de Recuperación de Vapores (SRV) de la unidad de FCC a las nuevas condiciones.**

En esta sección se exponen y analizan los resultados obtenidos de la evaluación de cada intercambiador de la SRV, en base al aumento en el flujo de alimentación de la unidad de FCC, es decir, a las nuevas condiciones de flujo, y se compara con los resultados obtenidos de la evaluación a condiciones actuales, expuestos en la sección IV.1.

##### **a) Intercambiador Fondo / Alimentación de la torre desbutanizadora E-101**

El intercambiador E-101 tiene como función precalentar la corriente de alimentación a la torre desbutanizadora, que fluye por la carcasa, usando como medio de calentamiento la corriente de fondo de la torre que fluye por los tubos.

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los resultados de las evaluaciones respectivas del equipo a condiciones actuales y modificadas.

**Tabla 8. Evaluación del intercambiador E-101 a condiciones actuales y modificadas**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	316	316
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	275647	325264
Temp. Ent / Sal ( °C)	109,4 / 126,2	109,4 / 126,2
ΔP calc/perm (kPa)	29,5 / 68,7	34,8 / 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	192907	224031
Temp. Ent / Sal ( °C)	191,4 / 141,6	191,4 / 141,6
ΔP calc/perm (kPa)	45,1 / 68,7	58,1 / 68,7
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	43,2	43,2
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	2575	2939
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	3077	3282
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	508	529,12
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	488	578
q (kW)	6652	7878
% Sobrediseño (%)	4,14	-8,49

Fuente: Propia

Como se observa en la tabla anterior, algunos parámetros del equipo varían al incrementarse el flujo másico de los fluidos en la carcasa y en los tubos. Como se espera, al incrementarse los flujos másicos aumentan los respectivos coeficientes individuales y las caídas de presión a través de los tubos y la carcasa. A partir de los valores de coeficientes individuales se obtiene un valor de coeficiente global (U) mayor a las nuevas condiciones. De igual forma el coeficiente global requerido por el proceso (U<sub>req</sub>), calculado a partir del área de transferencia de calor actual y del calor (q), determinado a partir de las condiciones del proceso y las propiedades de los fluidos (ver Ec. 23), aumenta ante las nuevas condiciones de flujo. A pesar de que los valores de caída de presión, tanto en la carcasa como en los tubos, son mayores ante estas condiciones, éstas se encuentran por debajo de las permisibles. Sin embargo, se observa que el porcentaje de sobrediseño es negativo, es decir, el U<sub>req</sub> es mayor que el

U, por lo que el área de transferencia de calor actual del equipo no es suficiente para llevar a los fluidos a las condiciones térmicas deseadas.

Ante esta situación se podría considerar diseñar un nuevo equipo de mayor área capaz de cumplir con los requerimientos del proceso. Sin embargo, y por disposición de la empresa cliente, se evitará el reemplazo de los equipos existentes en la unidad de FCC y así incurrir en el costo de oportunidad asociado al sustituir los intercambiadores actualmente operativos por nuevos equipos. En la evaluación de los seis intercambiadores restantes se parte de la misma premisa para las posibles modificaciones de los mismos.

A partir de esta disposición se consideró incluir otro equipo de las mismas dimensiones para disponerlo en una operación en paralelo con el intercambiador en funcionamiento actualmente, para así disminuir los valores de caída de presión asociados.

En la Tabla 9 se observan los resultados obtenidos a partir de evaluación del equipo a las condiciones nuevas o modificadas, ubicando otro intercambiador en paralelo con el existente. Además se observan los resultados obtenidos de la evaluación a nuevas condiciones a fin de lograr una mejor comparación

**Tabla 9. Evaluación del intercambiador E-101 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	325264	325264
Temp. Ent / Sal ( °C)	109,4 / 126,2	109,4 / 126,2
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	34,8/ 68,7	27,2/ 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	224031	224031
Temp. Ent / Sal ( °C)	191,4 / 141,6	191,4 / 141,6
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	58,1 / 68,7	16,6 / 68,7
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	43,2	43,2
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	2939	1692
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	3282	2854
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	529	447
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	578	289
q (kW)	7878	7838
% Sobrediseño (%)	-8,49	54,61
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	316	632
Unidades en serie	1	1
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	4	4
Espaciado de deflectores (mm)	649	515
Corte de deflectores (%)	27,5	27,5

Fuente: Propia

Al colocar otro intercambiador para operar en paralelo con el ya existente, se reducen considerablemente los valores de caída de presión tanto por los tubos como por la carcasa. Los valores de  $U$  y  $U_{req}$  disminuyen, pero en este caso se alcanza un valor de  $U_{req}$  menor que el  $U$  calculado. Así, el porcentaje de sobrediseño del equipo es positivo con un valor de 55%, lo cual garantiza que, al aumentar el área de transferencia de calor al doble, las corrientes involucradas saldrán del intercambiador a la temperatura establecida. Además de colocar otra unidad en paralelo, se redujo el espaciado entre

los deflectores ya que, los tubos del equipo podrían presentar posibles fallas por vibración inducida por el flujo ante las nuevas condiciones, según una advertencia producida por el software HTRI®. De este modo el nuevo espaciado se estableció en 515 mm, lo cual se encuentra dentro del rango recomendado por TEMA.

**b) Enfriador de producto del domo de la desbutanizadora E-102.**

El enfriador de producto del domo de la torre desbutanizadora E-102, consta de dos equipos formando un sistema de intercambiadores en serie, y tiene como función principal llevar la corriente del domo de la torre a una temperatura de 37,8°C empleando para ello agua de enfriamiento, la cual fluye por el interior de los tubos. En la Tabla 10 se resumen los resultados obtenidos de las evaluaciones del equipo a las condiciones actuales y modificadas.

**Tabla 10. Evaluación del intercambiador E-102 a condiciones actuales y modificadas**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	215	215
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	82739	99287
Temp. Ent / Sal ( °C)	53,0 / 37,8	53,0 / 37,8
ΔP calc/perm (kPa)	59,5 / 68,7	79,3 / 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	91476	91476
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 41,5	33,0 / 43,2
ΔP calc/perm (kPa)	44,9 / 78,5	44,9 / 78,5
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	6,8	5,9
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	5214	5262
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	2544	2841
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	616	633
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	614	855
q (kW)	901	1080
% Sobrediseño (%)	0,21	-26,05

Fuente: Propia

A las condiciones de flujo actuales, el funcionamiento de este equipo es adecuado, produciendo caídas de presión menores a la permisible, tanto para el lado tubos como para el lado carcasa, como se observa en la primera columna de la tabla. El coeficiente global de transferencia de calor es mayor que el requerido por lo cual el equipo es capaz de llevar la corriente del domo de la desbutanizadora a la temperatura requerida con un porcentaje de sobrediseño del 0,2%.

Ante las nuevas condiciones, se observan los siguientes cambios operacionales en el equipo. En primer lugar la caída de presión en el lado de la carcasa (corriente del domo de la columna) supera la caída de presión permisible, debido al aumento en el flujo. Por otra parte el porcentaje de sobrediseño es negativo, lo que significa que el área disponible no es suficiente para cumplir con las condiciones de salida del proceso, lo cual se refleja en los valores de  $U$  y  $U_{req}$ .

Ante esta situación se proponen dos alternativas. En primer lugar se realizó la evaluación con un tercer intercambiador colocado en serie y permitir de este modo disminuir el valor de  $U_{req}$  y aumentar así el porcentaje de sobrediseño. Los resultados de esta evaluación y su comparación con la evaluación realizada a condiciones modificadas se visualizan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Evaluación del intercambiador E-102 en serie**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en serie</b>	<b>Resultados de operación en serie modificada</b>
<b>Carcasa</b>			
Flujo másico (kg/h)	99287	99287	99287
Temp. Ent / Sal ( °C)	53,0 / 37,8	53,0 / 37,8	53,0 / 37,8
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	79,3 / 68,7	119,2 / 68,7	46,7 / 68,7
<b>Tubos</b>			
Flujo másico tubos (kg/h)	91476	91476	91476
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 43,2	33,0 / 43,2	33,0 / 43,2
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	44,9 / 78,5	67,4 / 78,5	67,4 / 78,5
<b>Proceso</b>			
$\Delta T_{mLn}$	5,9	6,5	6,6
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	5262	5248	5252
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	2841	2840	2133
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	633	632	589
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	855	512	509
$q$ (kW)	1080	1080	1080
% Sobrediseño (%)	-26,05	23,57	15,62
<b>Geometría</b>			
Área (m <sup>2</sup> )	215	323	323
Unidades en serie	2	3	3
Unidades en paralelo	1	1	1
Número de pasos por los tubos	2	2	2
Espaciado de deflectores (mm)	256	256	610
Corte de deflectores (%)	20,6	20,6	20,6

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 11, al colocar otro equipo para formar un sistema de tres intercambiadores en serie, se logra aumentar el porcentaje de sobrediseño hasta un 24%. De este modo y desde el punto de vista térmico, este sistema es válido, ya que el

U calculado es mayor que el  $U_{req}$ , es decir, el área de transferencia de calor es suficiente para llevar la corriente del domo de la torre desbutanizadora a la temperatura requerida. Sin embargo, si se analiza el equipo desde el punto de vista hidráulico, se observa que el hecho de colocar un tercer equipo en serie, produce que el valor de la caída de presión en el lado de la carcasa sobrepase el valor permitido, aunque el valor de caída de presión en los tubos sí permanece por debajo del valor máximo permitido. Para solventar este problema, se realizó la evaluación del sistema nuevamente (columna *Resultados de operación en serie modificada*), pero en esta ocasión se procedió a aumentar el espaciado de los deflectores hasta 610 mm, el máximo recomendado por TEMA (diámetro de la carcasa). De este modo se alcanzó un valor de  $\Delta P$  en la carcasa menor al permisible, logrando un porcentaje de sobrediseño del 16%. Así la propuesta de colocar un intercambiador de las mismas dimensiones para formar un sistema de tres intercambiadores en serie debe ser sometida a una posterior evaluación económica.

La otra alternativa consiste en colocar otro tren de dos intercambiadores para operar en paralelo con el ya existente. Los resultados de esta evaluación y su comparación con la evaluación realizada a condiciones de flujo modificadas se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12. Evaluación del intercambiador E-102 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	99287	99287
Temp. Ent / Sal ( °C)	53,0 / 37,8	53,0 / 37,8
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	79,3 / 68,7	22,2/ 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	91476	91476
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 43,2	33,0 / 43,2
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	44,9 / 78,5	12,3 / 78.5
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	5,9	5,9
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	5262	3043
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	2841	1863
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	633	514
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	855	428
$q$ (kW)	1080	1080
% Sobrediseño (%)	-26,05	20,21
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	215	430
Unidades en serie	2	2
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	2	4
Espaciado de deflectores (mm)	256	256
Corte de deflectores (%)	20,6	20,6

Fuente: Propia

Al evaluar esta propuesta se obtiene una operación adecuada del sistema de intercambiadores, ya que la caída de presión tanto por los tubos como por la carcasa, es menor que la permisible y el porcentaje de sobrediseño es positivo con un valor del 20%, lo cual asegura que el equipo puede lograr las condiciones de salida requeridas de la corriente del domo de la torre desbutanizadora. Además el hecho de que exista un tren en paralelo, flexibiliza el proceso, en el sentido que, en caso de mantenimiento de los equipos, no será necesario hacer una parada en el proceso; sólo bastará con

disminuir el flujo de entrada para así poder realizar el mantenimiento o reparación del tren de intercambiadores que se requiera.

Luego de analizar los dos arreglos se concluye que ambos son posibles desde el punto de vista termohidráulico, por lo que se deberá realizar una evaluación económica de cada propuesta para determinar cuál es la más idónea.

### **Intercambiador Fondo desbutanizadora / Alimentación despropanizadora E-103**

El intercambiador E-103, tiene como función precalentar la alimentación a la columna despropanizadora, la cual fluye por la carcasa, usando como medio de calentamiento la corriente de fondo de la columna desbutanizadora, la cual fluye por el interior de los tubos. Se requiere alcanzar una temperatura de 77°C en la corriente de alimentación y así garantizar que se encuentre en estado de mezcla L-V antes de ingresar a la torre.

En la Tabla 13 se visualizan los resultados de la evaluación del intercambiador E-103, ante las condiciones actuales y a las condiciones de incremento de flujo de alimentación a la unidad de FCC.

**Tabla 13. Evaluación del intercambiador E-103 a condiciones actuales y modificadas**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	98	98
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	81944	98335
Temp. Ent / Sal ( °C)	38,3 / 76,8	38,3 / 76,8
ΔP calc/perm (kPa)	48,9 / 68,7	64,5 / 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	192906	224031
Temp. Ent / Sal ( °C)	141,6 / 111,5	141,6 / 111,5
ΔP calc/perm (kPa)	52,6 / 68,7	68,6 / 68,7
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	57,0	57,1
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	3879	4429
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	3765	4229
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	702	738
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	679	1046
q (kW)	4903	5836
% Sobrediseño (%)	3,33	-29,42

Fuente: Propia

Al evaluar los parámetros operativos de este equipo, a las condiciones actuales, se observa que presenta un porcentaje de sobrediseño del 3% y caídas de presión cercanas pero por debajo de la permisible, tanto en el lado de los tubos como en el lado de la carcasa. Ante las nuevas condiciones de flujo se produce un aumento en las pérdidas por fricción tanto en el lado de los tubos como en el lado de la carcasa, ubicándose cercanas al valor máximo permisible. Con respecto al porcentaje de sobrediseño, se observa que es del -29%, lo que indica que el equipo no será capaz de entregar la carga calórica suficiente para alcanzar las condiciones de salida requeridas en el proceso. Se propone diseñar y construir un nuevo intercambiador para ser colocado en un arreglo de dos equipos en paralelo. Al evaluar esta propuesta se obtienen los siguientes resultados preliminares, mostrados en la Tabla 14.

**Tabla 14. Evaluación del intercambiador E-103 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	98335	98335
Temp. Ent / Sal ( °C)	38,3 / 76,8	38,3 / 76,8
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	64,5 / 68,7	29,4 / 68,7
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	224031	224031
Temp. Ent / Sal ( °C)	141,6 / 111,5	141,6 / 111,5
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	68,6 / 68,7	22,4 / 68,7
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	57,1	56,8
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	4430	2545
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	4229	3044
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	738	602
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1046	524
q (kW)	5836	5825
% Sobrediseño (%)	-29,42	14,90
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	98	196
Unidades en serie	1	1
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	2	2
Espaciado de deflectores (mm)	138	138
Corte de deflectores (%)	15,0	15,0

Al evaluar la operación en paralelo, los valores de caída de presión tanto para el lado de los tubos como para el lado de la carcasa son menores a los valores permisibles, como es de esperarse, ya que cada equipo maneja la mitad del flujo que manejaba anteriormente uno de ellos. De igual manera los valores del coeficiente global de transferencia de calor disminuyeron, aunque el valor de  $U_{req}$  es menor que el  $U$  calculado, lo cual indica que, el área de transferencia de calor de 196 m<sup>2</sup> que se logra al emplear dos equipos, es suficiente para llevar a las corrientes involucradas a las

condiciones térmicas deseadas, alcanzándose de este modo un porcentaje de sobrediseño positivo del 15%. Se concluye entonces, que el equipo E-103 funciona correctamente desde el punto de vista termohidráulico al agregarse un intercambiador adicional para formar un sistema de dos intercambiadores en paralelo.

**c) Enfriador del fondo de la despropanizadora E-104.**

En el intercambiador E-104, se enfría la corriente del fondo de la torre despropanizadora, la cual fluye por la carcasa, hasta una temperatura de 38°C, empleando para ello agua. Este intercambiador consta de dos carcavas colocadas en serie. Los resultados de la evaluación de este equipo se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15. Evaluación del intercambiador E-104 a condiciones actuales y a condiciones modificadas**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	219	219
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	48960	58752
Temp. Ent / Sal ( °C)	102,1 / 38,0	102,1 / 38,0
ΔP calc/perm (kPa)	15,6 / 39,2	18,9 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	199044	199044
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 43,42	33,0 / 45,5
ΔP calc/perm (kPa)	24,2 / 98,1	24,2 / 98,1
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	22,7	22,2
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	4607	4636
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	1326	1484
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	495	516
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	488	599
q (kW)	2429	2914
% Sobrediseño (%)	1,49	-13,84

Fuente: Propia

El desempeño termohidráulico del equipo es adecuado a las condiciones actuales, ya que los valores de caída de presión se encuentran por debajo de la permisible y además se obtiene un coeficiente global de transferencia de calor mayor al requerido por lo cual el equipo presenta un porcentaje de sobrediseño positivo del 1,5%. Ante el aumento del flujo de alimentación, los valores de caída de presión, tanto para el lado de la carcasa como para el lado de los tubos aumentan pero se mantienen en valores por debajo de la caída de presión permisible para los fluidos que se manejan. Sin embargo el área requerida es mayor que la disponible, por lo cual el equipo no es capaz de llevar la corriente de fondo de la despropanizadora a la temperatura requerida, presentando un porcentaje de sobrediseño negativo del -14%.

Ante esta situación se plantean dos propuestas. En primer lugar, colocar otro intercambiador de las mismas dimensiones en serie para formar un sistema de 3 intercambiadores en serie. Los resultados de esta evaluación se observan en la Tabla 16 mostrada a continuación.

**Tabla 16. Evaluación del intercambiador E-104 en serie**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en serie</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	58752	58752
Temp. Ent / Sal ( °C)	102,1 / 38,0	102,1 / 38,0
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	18,9 / 39,2	28,2 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	199044	199044
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 45,5	33,0 / 45,5
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	24,2 / 98,1	36,3 / 98,1
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	22,2	22,4
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	4636	4634
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1484	1487
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	516	516
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	599	395
$q$ (kW)	2914	2914
% Sobrediseño (%)	-13,84	30,73
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	219	329
Unidades en serie	2	3
Unidades en paralelo	1	1
Número de pasos por los tubos	1	1
Espaciado de deflectores (mm)	295	295
Corte de deflectores (%)	20,0	20,0

En este caso se obtiene que el porcentaje de sobrediseño es de 31%. Como se observa en la fila correspondiente al coeficiente global de transferencia de calor requerido, éste disminuye a consecuencia del aumento en el área de transferencia de calor producto de colocar otro equipo en serie, siendo menor que el  $U$  calculado a partir de las condiciones del proceso, validando de este modo el comportamiento térmico del sistema de intercambiadores. De los valores de caída de presión se observa que se

encuentran por debajo de los valores permisibles por lo que esta opción debe ser tomada en cuenta como válida desde el punto de vista hidráulico.

Por otra parte se propone diseñar otro tren de 2 intercambiadores en serie y formar un sistema en paralelo. En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos al evaluar este arreglo.

**Tabla 17. Evaluación del intercambiador E-104 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	58352	58752
Temp. Ent / Sal ( °C)	102,1 / 38,0	102,1 / 38,0
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	18,9 / 39,2	7,6 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	199044	199044
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 45,5	33,0 / 45,5
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	24,2 / 98,1	10,7 / 98,1
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	22,2	22,2
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	4636	2593
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1484	968
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	516	398
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	599	299
$q$ (kW)	2914	2914
% Sobrediseño (%)	-13,84	32,69
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	219	439
Unidades en serie	2	2
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	1	1
Espaciado de deflectores (mm)	295	295
Corte de deflectores (%)	20,0	20,0

Fuente: Propia

Al realizar la evaluación de esta propuesta se obtiene que el porcentaje de sobrediseño es de 33% y los valores de caída de presión tanto para la carcasa como para los tubos son menores a la permisible. De esta forma se alcanza flexibilidad en el proceso ya que cuando exista un problema en alguno de los trenes el otro puede cumplir con los requerimientos del proceso sin tener que realizar una parada de planta no programada.

Al analizar las dos propuestas se concluye que ambas son válidas termohidráulicamente. De este modo se debe realizar un análisis económico de las dos alternativas con el fin de seleccionar la más óptima

**d) Enfriador del fondo de la desbutanizadora E-105.**

El sistema de dos intercambiadores en serie E-105, se encarga de enfriar la corriente de fondo de la torre desbutanizadora hasta una temperatura de 38°C empleando agua de enfriamiento, que fluye por el interior de los tubos. Bajo condiciones actuales el equipo presenta una operación adecuada, en base a los valores de caída de presión y del coeficiente global de transferencia de calor calculados. Tanto para el lado de los tubos como para el lado de la carcasa se presentan caídas de presión por debajo de las permisibles. Con respecto al coeficiente global de transferencia de calor, el valor actual es mayor al requerido por lo que se obtiene un porcentaje de sobrediseño positivo, como se observa en los resultados obtenidos de la evaluación a las condiciones de flujo actuales mostrados en la Tabla 18, presentada a continuación.

**Tabla 18. Evaluación del intercambiador E-105 a condiciones actuales y modificadas.**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	708	708
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	192906	227630
Temp. Ent / Sal ( °C)	78,0 / 38,0	78,0 / 38,0
ΔP calc/perm (kPa)	28,9 / 39,2	40,0 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	399542	399542
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 43,0	33,0 / 44,5
ΔP calc/perm (kPa)	84,4 / 98,1	84,3 / 98,1
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	14,0	13,4
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	7558	7606
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	1326	1656
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	461	476
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	460	561
q (kW)	4572	5317
% Sobrediseño (%)	0,13	-15,25

Fuente: Propia

Ante las nuevas condiciones de proceso, se realizó la evaluación de este sistema de intercambiadores y se obtuvieron los valores mostrados en la tabla anterior. La caída de presión en la carcasa aumentó y sobrepasó por un pequeño margen a la caída de presión permisible. En cuanto al coeficiente de transferencia de calor, se obtuvo un valor menor al requerido, lo cual indica que el equipo no aporta calor suficiente para alcanzar las condiciones de procesos requeridas; el porcentaje de sobrediseño fue de -15%. Las alternativas para adecuar el equipo ante las nuevas condiciones se pueden resumir como sigue.

Al igual que en casos anteriores, una de las propuestas se basa en diseñar y construir un intercambiador de las mismas dimensiones de cada intercambiador existente, y

colocarlo en serie para obtener un tren de tres intercambiadores en serie. Al realizar la evaluación de este sistema se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Evaluación del intercambiador E-105 en serie**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en serie</b>	<b>Resultados de operación en serie modificada</b>
<b>Carcasa</b>			
Flujo másico (kg/h)	227630	227630	227630
Temp. Ent / Sal ( °C)	78,0 / 38,0	78,0 / 38,0	78,0 / 38,0
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	40,0 / 39,2	60,0 / 39,2	36,1 / 39,2
<b>Tubos</b>			
Flujo másico tubos (kg/h)	399542	399542	399542
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 44,5	33,0 / 44,5	33,0 / 44,5
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	84,3 / 98,1	126,6 / 98,1	28,8 / 98,1
<b>Proceso</b>			
$\Delta T_{mLn}$	13,4	14,3	14,9
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	7606	7577	4376
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1656	1660	1443
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	476	476	432
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	561	350	336
q (kW)	5317	5317	5317
% Sobrediseño (%)	-15,25	35,86	28,62
<b>Geometría</b>			
Área (m <sup>2</sup> )	708	1062	1062
Unidades en serie	2	3	3
Unidades en paralelo	1	1	1
Número de pasos por los tubos	2	2	1
Espaciado de deflectores (mm)	545	545	980
Corte de deflectores (%)	22,4	22,4	20,6

Fuente: Propia

Para 3 intercambiadores en serie se obtiene un porcentaje de sobrediseño positivo del 36%, pero con la limitante que las caídas de presión tanto para el lado tubo como para el lado de la carcasa sobrepasan los valores permisibles, tal como se observa en la segunda columna de la tabla anteriormente expuesta (*Resultados de operación en serie*).

Ante esta situación se procedió a disminuir el número de pasos por los tubos de 2 a 1, disminuyendo la caída de presión por los tubos. Además se aumentó el espaciado de los deflectores a fin de reducir las pérdidas por fricción en la carcasa hasta el máximo permisible por TEMA, 980 mm (diámetro interno de la carcasa). De esta manera se obtuvieron caídas de presión por debajo de las permisibles, tanto para el lado de los tubos como para el lado de la carcasa. Al evaluar el coeficiente global de transferencia de calor, se observa que se alcanza un valor mayor al requerido, obteniéndose un porcentaje de sobrediseño del 29% (*Resultados de operación en serie modificada*).

Por otra parte se analizó la alternativa de colocar un tren de dos intercambiadores en serie, operando en paralelo con el ya existente. Los resultados obtenidos de esta propuesta, mostrados en la Tabla 20, indican que el coeficiente global de transferencia de calor ante estas condiciones es mayor que el requerido y además los valores de caída de presión para ambos lados del equipo son menores que las permisibles, determinando así que el intercambiador funciona de forma adecuada tanto térmica como hidráulicamente. Debido a que la velocidad en el lado de la carcasa es muy baja (ver reporte en el apéndice H), y para tratar de evitar que se produzcan incrustaciones o depósitos en el equipo, se decidió disminuir el espaciado de los deflectores, hasta lo que permita la caída de presión, para así solventar este posible problema operacional. El porcentaje de sobrediseño para este caso fue de 47%.

**Tabla 20. Evaluación del intercambiador E-105 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	227630	227630
Temp. Ent / Sal ( °C)	78,0 / 38,0	78,0 / 38,0
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	40,0 / 39,2	28,4 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	399542	399542
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 44,5	33,0 / 44,5
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	84,3 / 98,1	23,8 / 98,1
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	13,4	13,2
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	7606	4398
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1656	1293
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	476	418
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	561	284
q (kW)	5317	5317
% Sobrediseño (%)	-15,25	46,90
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	708	1416
Unidades en serie	2	2
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	2	2
Espaciado de deflectores (mm)	545	245
Corte de deflectores (%)	22,4	22,4

Fuente: Propia

**e) Enfriador de producto de propano E-106.**

Usando agua de enfriamiento, el intercambiador E-106, tiene como función principal llevar la corriente producto de propano desde una temperatura de 60 °C hasta 38 °C. El agua de enfriamiento fluye por el interior de los tubos mientras la corriente de producto de propano fluye por la carcasa. Los resultados obtenidos de las evaluaciones a condiciones actuales y modificadas de flujo se presentan en la Tabla 21.

**Tabla 21. Evaluación del intercambiador E-106 a condiciones actuales y modificadas**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	30	30
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	6194	7397
Temp. Ent / Sal ( °C)	60,0 / 37,8	60,0 / 37,8
ΔP calc/perm (kPa)	4,0 / 19,6	5,8 / 19,6
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	20057	20057
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 37,8	33,0 / 38,91
ΔP calc/perm (kPa)	64,9 / 98,1	64,8 / 98,1
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	8,5	7,2
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	7347	7390
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	908	1014
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	442	466
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	440	635
q (kW)	113	138
% Sobrediseño (%)	0,4	-26,57

Fuente: Propia

A condiciones actuales el intercambiador presenta un comportamiento adecuado, produciendo valores de caída de presión menores a las permisibles, tanto para el fluido que va por los tubos, como el que fluye por la carcasa. Además el área de transferencia de calor disponible, es suficiente para llevar la corriente de producto de propano a las condiciones de salida requeridas, por lo que el porcentaje de sobrediseño es positivo. Por el contrario, cuando se evalúa el equipo ante las nuevas condiciones de flujo, el coeficiente global de transferencia de calor calculado es menor que el requerido por el proceso y por ende el área del intercambiador se hace insuficiente para llevar a 38 °C la nueva cantidad de producto. Al evaluar los valores de caída de presión a través del equipo, se observa que, a pesar de haber aumentado su magnitud (en el caso de la carcasa), se encuentran por debajo de los valores máximos recomendados. Con el fin

de incrementar el valor de sobrediseño se evaluaron dos propuestas, cuyos resultados se resumen en la Tabla 22.

**Tabla 22. Evaluación del intercambiador E-106 ante las propuestas planteadas**

	<b>Resultados a nuevas condiciones</b>	<b>Resultados con modificaciones menores</b>	<b>Resultados de operación paralelo</b>
<b>Carcasa</b>			
Flujo másico (kg/h)	7397	7397	7397
Temp. Ent / Sal ( °C)	60,0 / 37,8	60,0 / 37,8	60,0 / 37,8
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	5,8 / 19,6	14,5 / 19,6	1,5 / 19,6
<b>Tubos</b>			
Flujo másico tubos (kg/h)	20057	20057	20057
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 38,9	33,0 / 38,9	33,0 / 38,9
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	64,8 / 98,1	64,8 / 98,1	18,4 / 98,1
<b>Proceso</b>			
$\Delta T_{mLn}$	7,2	6,7	7,1
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	7391	7473	4275
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1014	1253	665
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	466	511	358
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	635	673	319
$q$ (kW)	138	138	138
% Sobrediseño (%)	-26,57	-24,12	12,44
<b>Geometría</b>			
Área (m <sup>2</sup> )	30	30	61
Unidades en serie	1	1	1
Unidades en paralelo	1	1	2
Número de pasos por los tubos	4	4	4
Espaciado de deflectores (mm)	140	71	140
Corte de deflectores (%)	17,5	17,5	17,5

Fuente: Propia

Con el fin de aumentar el coeficiente individual de transferencia de calor en la carcasa y por ende el U calculado, para incrementar así el porcentaje de sobrediseño, se procedió a reducir el espaciado de los deflectores, hasta 1/5 del diámetro interno de la carcasa, el cual es el mínimo recomendado por TEMA y se obtuvo como resultado porcentaje de sobrediseño mayor pero aún negativo de -24,12%. Como se observa, al tomar esta medida el U calculado aumenta como es de esperarse. Sin embargo el U req también aumenta como consecuencia de la disminución de la  $\Delta T_{mLn}$ , por lo que el porcentaje de sobrediseño sigue siendo negativo. Se puede concluir que este equipo, con menor espaciado de deflectores, no es capaz de manejar este nuevo flujo por lo que hay que tomar otras medidas.

La solución más económica a largo plazo sería construir un equipo de las mismas dimensiones que el que está en operación y hacerlos funcionar como un sistema en paralelo. Los resultados de esta propuesta se muestran en la tercera columna de la tabla anterior. En este caso, se obtiene un porcentaje de sobrediseño del 12% y caídas de presión en los equipos muy por debajo de las permisibles. Con esta propuesta el diseño se valida termohidráulicamente.

**f) Enfriador de producto de propileno E-107.**

El producto de propileno es enfriado hasta una temperatura de 38°C en el intercambiador E-107, empleando para ello agua de enfriamiento que fluye por el interior de los tubos. Los resultados obtenidos de las evaluaciones a condiciones actuales y modificadas de flujo se presentan en la Tabla 23.

**Tabla 23. Evaluación del intercambiador E-107 a condiciones actuales y modificadas.**

	<b>Resultados a condiciones actuales</b>	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>
Área (m <sup>2</sup> )	72	72
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	25967	31162
Temp. Ent / Sal ( °C)	49,6 / 37,8	49,6 / 37,8
ΔP calc/perm (kPa)	16,1 / 34,3	22,9 / 34,3
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	41813	41813
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 37,8	33,0 / 38,91
ΔP calc/perm (kPa)	83,8 / 98,1	83,8 / 98,1
<b>Proceso</b>		
ΔT <sub>mLn</sub>	5,8	4,4
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	7670	7726
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	1702	1902
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	575	596
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	569	912
q (kW)	273	290
% Sobrediseño (%)	0,90	-34,64

Fuente: Propia

Ante las nuevas condiciones de flujo el intercambiador no es capaz de llevar a la temperatura de salida a la corriente propileno, ya que, como se observa en la tabla anterior, el valor de porcentaje de sobrediseño es negativo. De este modo el equipo no operará adecuadamente desde el punto de vista térmico. Con respecto a la caída de presión, se observa que ante el aumento del flujo de propileno, se produce un incremento en este valor, aunque se encuentra por debajo del máximo permitido.

Con el fin de solventar el déficit de área que presenta el intercambiador ante las nuevas condiciones, se propone diseñar y construir otro equipo para formar un sistema de dos intercambiadores en operación en paralelo. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de esta propuesta.

**Tabla 24. Evaluación del intercambiador E-107 en paralelo**

	<b>Resultados a condiciones modificadas</b>	<b>Resultados de operación en paralelo</b>
<b>Carcasa</b>		
Flujo másico (kg/h)	31162	31162
Temp. Ent / Sal ( °C)	49,6 / 37,8	49,6 / 37,8
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	22,9 / 34,3	5,9 / 39,2
<b>Tubos</b>		
Flujo másico tubos (kg/h)	41813	41813
Temp. Ent / Sal ( °C)	33,0 / 38,9	33,0 / 38,9
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	83,8 / 98,1	23,8 / 98,1
<b>Proceso</b>		
$\Delta T_{mLn}$	4,4	4,4
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	7726	4469
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	1902	1244
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	597	482
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	912	457
q (kW)	290	290
% Sobrediseño (%)	-34,64	5,36
<b>Geometría</b>		
Área (m <sup>2</sup> )	72	144
Unidades en serie	1	1
Unidades en paralelo	1	2
Número de pasos por los tubos	4	4
Espaciado de deflectores (mm)	173	173
Corte de deflectores (%)	17,9	17,9

Fuente: Propia

Al añadir una carcasa de las mismas dimensiones que la existente, se logró aumentar el porcentaje de sobrediseño hasta un 5%, produciendo caídas de presión, tanto en los tubos como en la carcasa, menores a los valores permisibles. Así, al colocar dos intercambiadores operando en paralelo, se valida el diseño térmico e hidráulico del equipo.

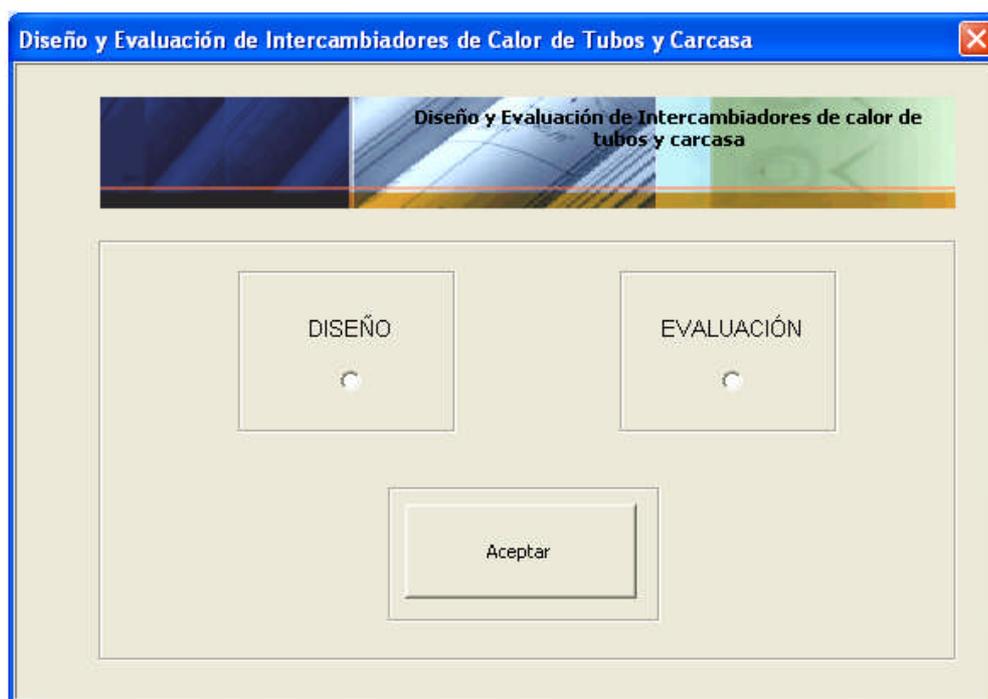
De todas las evaluaciones realizadas al sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC se puede concluir que, los equipos actualmente en planta no pueden soportar la carga de flujo de alimentación adicional. Por lo tanto se propone diseñar nuevos equipos de iguales dimensiones a los existentes y emplearlos como un complemento, a fin de seguir utilizando los que se encuentran en operación y no reemplazarlos. Esto podría traer como consecuencia mayores costos de inversión que construir un equipo nuevo más pequeño pero economiza el proceso por las siguientes razones:

1. Se logra flexibilidad operacional en el proceso ya que, mientras un equipo está en funcionamiento, el otro puede ser sometido a mantenimiento.
2. Mientras el flujo de proceso sea menor que el 20 % adicional puede operarse un solo intercambiador o tren de intercambiadores, disminuyendo los costos de operación.
3. En el caso que no hubiese espacio en la planta se podría disponer del segundo equipo o tren de intercambiadores en paralelo, uno arriba del otro, previo estudio económico sobre las fundaciones que se requieren para soportar el peso de los mismos.
4. Si se diseñara un equipo mas pequeño solo para cubrir la carga del 20% adicional, no se alcanzaría la flexibilidad esperada, ya que al hacerle mantenimiento al equipo existente, el de menor área no soportaría la carga, por lo que el mantenimiento habría que realizarlo en una parada de planta.

### **IV.3. Desarrollo de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa en Visual Basic for Applications®**

El programa realizado para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa, denominado DETC, fue desarrollado empleando dos herramientas. Mediante el programa Microsoft® Excel, se desarrollaron los procedimientos, a través de la realización de hojas de cálculo; y la segunda fue Microsoft® Visual Basic for Applications®, que se encuentra dentro del programa Excel, donde se desarrolló el código de programación respectivo, basado en el procedimiento de cálculo descrito en el marco metodológico, y se creó una interfaz de fácil manejo para el usuario.

La primera ventana que visualiza el usuario corresponde a la de selección del tipo de actividad que se requiere, ya sea diseño o evaluación, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 13.** Ventana de inicio del programa DETC

En esta primera ventana el usuario puede elegir entre, realizar un diseño de un intercambiador nuevo conociendo las condiciones del proceso o bien evaluar un equipo ya diseñado conociendo la geometría del mismo. Al oprimir el botón *Aceptar* se abre una ventana donde se introducen los datos requeridos, según la operación que se requiera realizar.

La ventana de introducción de datos consta de tres pestañas correspondientes a Datos de Proceso, Datos Geométricos y Propiedades de los fluidos, tal como se ve en la Figura 14.

DISEÑO - Introduzca los datos que se piden a continuación

Datos Geométricos | Datos de Proceso | Propiedades de los fluidos

Longitud de los tubos Seleccione m

Diámetro externo de los tubos Seleccione mm

BWG Seleccione

Número de pasos por los tubos Seleccione pasos

Material de los tubos Seleccione

Espaciado entre deflectores Seleccione mm

Arreglo de los tubos Seleccione

Atrás

Sistema de Unidades

Aceptar

Figura 14. Ventana de Introducción de datos para el caso de Diseño

En esta ventana, en la página de introducción de Datos Geométricos, se encuentran siete listas desplegables correspondientes a las diferentes variables que puede seleccionar el usuario. Cada una de ella contiene una base de datos de valores que comúnmente se usan en el diseño de un intercambiador de calor de tubos y carcasa. Se

debe destacar que, a pesar de que el programa ya contiene en la base de datos los valores presentados, este hecho no limita a que se incorporen o retiren más valores, para así optimizar el alcance de esta herramienta.

En la lista correspondiente a la longitud de los tubos, el usuario puede seleccionar entre las siguientes opciones: 6 pies (1,829 m), 8 pies (2,438 m), 10 pies (3,048 m), 12 pies (3,6576 m), 14 pies (4,2672 m), 16 pies (4,8768 m), 18 pies (5,4867 m), 20 pies (6,096 m), 22 pies (6,7056 m) y 24 pies (7,3154 m).

En cuanto al diámetro externo de los tubos el usuario puede seleccionar entre: 0,75 pulg (19,05 mm), 1 pulg (25,4 mm), 1,25 pulg (31,75 mm) y 1,5 pulg (38,1 mm).

Con respecto al espesor BWG de los tubos se tienen las siguientes opciones: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18.

La lista correspondiente al número de pasos por los tubos contiene los siguientes valores: 1, 2, 4, 6 y 8 pasos.

Los materiales de los tubos seleccionados para incluirlos en el programa, en base a la frecuencia de uso en la industria son: acero al carbono, acero inoxidable (304 y 302), cobre, Admiralty y aluminio.

Los valores de espaciado de los deflectores se basa en su relación con el diámetro de la carcasa ( $D_c$ ):  $1/5 D_c$ ,  $1/4 D_c$ ,  $1/3 D_c$ ,  $1/2 D_c$  y  $D_c$

La última lista, corresponde al arreglo de los tubos, para el cual, el usuario puede elegir entre arreglo cuadrado o arreglo triangular.

Como se ve en la Figura 12, existen tres botones en el lado derecho de la pantalla. Al pulsar el botón *Atrás*, el usuario puede regresar a la ventana anterior. Al pulsar el botón *Sistema de Unidades*, el usuario puede seleccionar entre dos sistemas de unidades empleados comúnmente, a saber, el Sistema Internacional de Unidades y el Sistema Inglés. Al pulsar el botón *Aceptar*, y una vez introducidos todos los datos

requeridos, el programa procede a realizar los cálculos correspondientes al diseño del intercambiador, mostrando luego, la ventana de resultados presentada en la Figura 13.

The screenshot shows a software window titled "DISEÑO - Resultados" with a blue header and a close button. The main content area is titled "RESULTADOS" and has two tabs: "Página 1" (selected) and "Página 2". The results are displayed in a grid of input/output fields:

Calor, Q	0,11465 MW	Número de pasos, Np	4 Pasos
Dif de Temp media Logarítmica, DTMLN	11,35 K	Número de tubos, Nt	47
Coefficiente Global, U	551,6 W/(m <sup>2</sup> .K)	Diámetro carcasa, Dc	254 mm
Coefficiente Global supuesto, Usup	550 Label32	* ΔP tubos	264,8 kPa
Área requerida, Areq	18,31 m <sup>2</sup>	ΔP permisible (tubos)	98,07 kPa
Área disponible, Adisp	20,58 m <sup>2</sup>	* ΔP carcasa	19,61 kPa
% Área en exceso, %Aexc	11,03 %	ΔP permisible (carcasa)	16,51 kPa

At the bottom of the window, there are several control buttons: "Ajustar D carcasa", "Reporte (Versión impresión)", "Ir al Menú principal", "S.U.", "Atrás", and "Salir".

**Figura 15.** Ventana de Resultados para el caso de diseño.

Los resultados arrojados por el programa, en el caso de Diseño se presentan en la siguiente tabla, de acuerdo al número de página de la ventana de resultados donde se encuentran.

**Tabla 25.** Resultados del programa DETC en el caso de Diseño.

Página 1	Página 2
Calor intercambiado, q.	Coefficiente de convección interna, $h_i$
Diferencia de temperaturas media logarítmica corregida, DTMLN.	Coefficiente de convección interna, $h_o$
Coefficiente global de transferencia de calor, U.	Velocidad en los tubos, $V_t$
Coefficiente global de transferencia de calor supuesto, $U_{sup}$ .	Velocidad en la carcasa, $V_c$
Área requerida, $A_{req}$ .	Número de Reynolds en los tubos, $Re_t$
Área disponible, $A_{disp}$ .	Número de Reynolds en la carcasa, $Re_c$
Porcentaje de área en exceso, % $A_{exc}$ .	Número de deflectores, $N_d$
Número de pasos por los tubos, $N_p$ .	Espaciado entre deflectores, B
Número de tubos, $N_t$ .	Temperatura de pared interna, $T_{pi}$
Diámetro de la carcasa, $D_c$ .	Temperatura de pared externa, $T_{po}$
Caída de presión en los tubos calculada, $\Delta P_{tubos}$	
Caída de presión permisible en los tubos, $\Delta P_{permisible}$ (tubos)	
Caída de presión en la carcasa calculada, $\Delta P_{carcasa}$	
Caída de presión permisible en la carcasa, $\Delta P_{permisible}$ (carcasa)	

Como se observa en la Figura 15, al obtenerse valores de caída de presión mayores a las permisibles (tanto para tubos como para la carcasa) o un porcentaje de área en exceso negativo (no se visualiza en la figura), el programa muestra advertencias en forma de asteriscos de color rojo. Al hacer doble click sobre estas advertencias se abren ventanas donde se proporciona al usuario recomendaciones para solventar estas situaciones. En las siguientes figuras se presentan las tres ventanas de recomendación para cada una de las situaciones descritas.

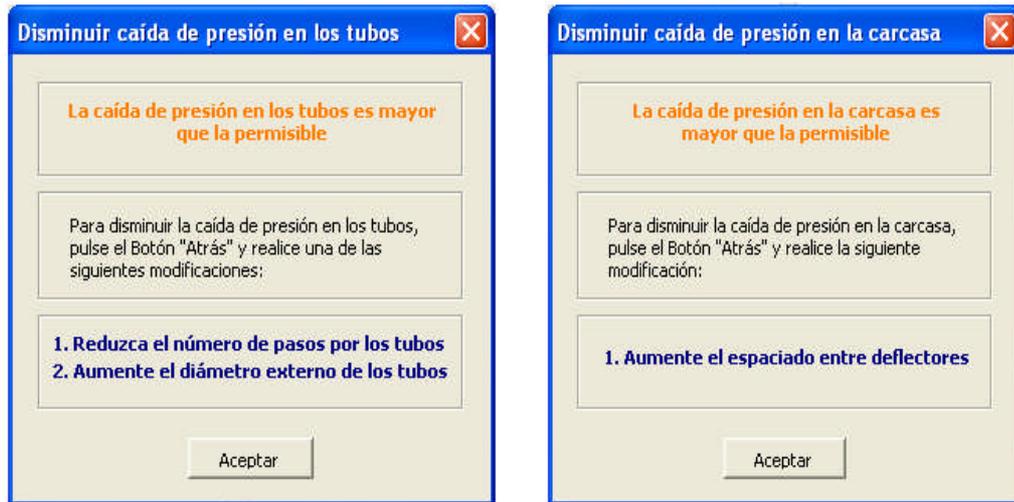


Figura 16. Ventanas de recomendación para caídas de presión mayores a la permisible.



Figura 17. Ventana de recomendación para porcentaje de área en exceso negativo.

Al presionar el botón *Ajustar D carcasa*, ubicado en la parte inferior de la ventana de resultados, el programa selecciona la carcasa de diámetro inmediatamente superior, según el paso 39 del procedimiento de cálculo mostrado en el marco metodológico, e inicia nuevamente el proceso para diseñar un equipo con las nuevas características.

De igual forma, en la Figura 15, se observan botones adicionales. El botón *Reporte (Versión impresión)*, al ser oprimido, muestra una hoja de reporte (ver Apéndice I), donde el usuario puede visualizar la totalidad de los resultados arrojados por el programa y guardar el caso o imprimir el reporte. Al oprimir el botón *Ir al Menú Principal*, el programa vuelve al inicio, desplegando la ventana mostrada en la Figura 13. Al presionar el botón *S.U.*, el usuario puede seleccionar el sistema de unidades bajo el cual serán mostrados los resultados. Finalmente, al presionar el botón *Atrás*, el programa cierra la ventana de resultados y abre la ventana de introducción de datos mostrada en la Figura 14.

Para el caso de que el usuario requiera realizar la evaluación de un intercambiador existente, se despliega una ventana similar a la mostrada en la figura 14. Las diferencias entre esta ventana y la realizada para el caso de Evaluación, radican en los datos requeridos para la ejecución del programa (ver sección III.2.3). Una vez introducidos los datos necesarios y ejecutado el programa, se despliega la ventana de resultados de dos páginas, la cual es similar a la mostrada en la Figura 15, incluyendo los botones que en ella se encuentran y sus funciones asociadas.

Los resultados arrojados por el programa, en el caso de Evaluación se presentan en la siguiente tabla, de acuerdo al número de página de la ventana de resultados donde se encuentran.

**Tabla 26.** Resultados del programa DETC en el caso de Evaluación.

Página 1	Página 2
Calor intercambiado, q.	Temperatura de salida en los tubos, Tst
Diferencia de temperaturas media logarítmica corregida, DTMLN.	Temperatura de salida en la carcasa, Tsc
Coficiente global de transferencia de calor actual, Uactual.	Flujo másico en los tubos, mt
Coficiente global de transferencia de calor requerido, Ureq.	Flujo másico en la carcasa, mc
Área de transferencia de calor, A.	Velocidad en los tubos, Vt
Porcentaje de sobrediseño, %S.	Velocidad en la carcasa, Vc
Diámetro de la carcasa, Dc.	Número de pasos por los tubos, Np
Número de tubos, Nt.	Coficiente de convección interna, hi
Número de deflectores, Nd	Coficiente de convección interna, ho
Espaciado entre deflectores, B	Número de Reynolds en los tubos, Re t
Caída de presión en los tubos calculada, ΔP tubos	Número de Reynolds en la carcasa, Re c
Caída de presión permisible en los tubos, ΔP permisible (tubos)	
Caída de presión en la carcasa calculada, ΔP carcasa	
Caída de presión permisible en la carcasa, ΔP permisible (carcasa)	

De esta manera, la interfaz del programa realizada es amigable para el usuario, pudiendo seleccionar entre las diferentes alternativas presentadas, haciendo flexible su utilización y optimización.

### **Limitaciones del programa**

El programa realizado, sólo es capaz de diseñar o evaluar un intercambiador, es decir, no esta capacitado para resolver el diseño o evaluación de sistemas de operación en serie o paralelo. De igual forma, está diseñado para estudiar procesos en los cuales no exista cambio de fase en las corrientes involucradas y para aquellos que manejen fluidos líquidos, debido a que las correlaciones usadas sólo son válidas para este tipo

de procesos. Además, se limita su uso a equipos con un corte de deflectores de 25%, ya que la ecuación empleada para el cálculo de la caída de presión en la carcasa se base en este valor.

En cuanto a las propiedades de los fluidos, el programa ajusta los valores introducidos por el usuario a un polinomio de grado uno, es decir linealmente, lo cual influirá notablemente en los resultados a obtener, en especial a aquellos procesos que manejen fluidos cuyas propiedades varían en gran medida con la temperatura.

De esta forma, el programa realizado no pretende sustituir el uso de los *softwares* comercialmente empleados para el diseño o evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, sino que, está dirigido a estudiantes e ingenieros que requieran diseñar o evaluar un equipo en la etapa de ingeniería conceptual, obteniendo resultados aproximados que sirvan de guía para estudiar de forma general el comportamiento de un equipo ante diferentes variables de operación.

#### **IV.4. Validación de la herramienta de programación para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa.**

A continuación se presenta la sección de validación del programa, empleando para ello los datos obtenidos de las evaluaciones de los equipos E-106 y E-107 de la unidad de FCC en estudio, ante las condiciones de flujo actuales. Se realizó la comparación de las evaluaciones con estos intercambiadores ya que son los únicos de los siete evaluados, que bien poseen una sola carcasa o manejan sólo fluidos líquidos, características para las cuales fue desarrollado el programa. Los resultados obtenidos se encuentran en las hojas de reporte del programa DETC, mostradas en el Apéndice I.

##### **a) Validación de la modalidad de Diseño.**

El objetivo principal de la modalidad de diseño de DETC, es determinar el tamaño de la carcasa óptimo, desde el punto de vista térmico y desde el punto de vista hidráulico, para llevar a las corrientes involucradas en el proceso a las condiciones de salida requeridas. Para validar la modalidad de diseño del programa DETC, se tomó como

datos de entrada, los valores de las hojas de datos de los intercambiadores E-106 (caso 1) y E-107 (caso 2), de la unidad de FCC estudiada. Además, se realizó el diseño de los equipos empleando el software HTRI®, bajo la modalidad *Design*. De esta manera, se pudo comparar entre los resultados arrojados por ambos programas y los valores reales de diseño de cada intercambiador, estableciendo los porcentajes de desviación asociados.

Los datos de entrada para el **caso 1**, correspondientes al intercambiador E-106 fueron:

- Longitud de los tubos: 6,096 m.
- Diámetro externo de los tubos: 19,05 m.
- Espesor BWG: 14.
- Material de los tubos: acero al carbono.
- Arreglo de los tubos: triangular
- Número de pasos por los tubos: 4.
- Espaciado entre deflectores:  $\frac{1}{2}$  del diámetro de la carcasa.
- Flujo másico en la carcasa: 6163,92 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en la carcasa: 60,0 / 37,7 °C
- $\Delta P$  permisible en la carcasa: 19,61 kPa.
- Flujo másico en los tubos: 20056,64 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en los tubos: 33 / 37,8 °C
- $\Delta P$  permisible en los tubos: 98,07 kPa.
- Propiedades de los fluidos: extraídos de PRO II®.
- Factor de ensuciamiento Carcasa / Tubos: 0,000172 / 0,000601 m<sup>2</sup>.K/W.
- Coeficiente global de transferencia de calor supuesto: 450 W/m<sup>2</sup>.K

El valor de coeficiente global supuesto se encuentra dentro del rango mostrado en la Tabla 5, para intercambiadores que procesan fluidos orgánicos ligeros por la carcasa y agua por los tubos, como es el caso.

Los resultados obtenidos por ambos programas se muestran en la siguiente tabla, comparándolos con los valores de la hoja de datos del equipo.

**Tabla 27.** Caso1: Comparación entre hoja de datos de E-106 y resultados del diseño con DETC y HTRI

	<b>Hoja de datos</b>	<b>Diseño con DETC</b>	<b>% Desviación</b>	<b>Diseño con HTRI</b>	<b>% Desviación</b>
U (W/m <sup>2</sup> .K)	453,57	483,94	6,4	430,65	-5,1
q (MW)	0,1164	0,1118	3,9	0,1134	-2,6
$\Delta T_{mLn}$ ( °C)	8,6	10,9	26,8	8,6	0
Diámetro de la carcasa (mm)	356	304,8	-14,4	336,6	-5,4
Área (m <sup>2</sup> )	30	31,4	4,7	33,6	12,0
$\Delta P$ tubos calc / perm (kPa)	93,87 / 98,07	74,86 / 98,07	-20,3	77,93 / 98,07	-16,9
$\Delta P$ carcasa calc / perm (kPa)	18,97 / 19,61	7,12 / 19,61	-59,0	3,49 / 19,61	-65,3

Los datos de entrada para el **caso 2**, correspondientes al intercambiador E-107 fueron:

- Longitud de los tubos: 7,315 m.
- Diámetro externo de los tubos: 19,05 m.
- Espesor BWG: 14.
- Material de los tubos: acero al carbono.
- Arreglo de los tubos: triangular
- Número de pasos por los tubos: 4.
- Espaciado entre deflectores: 1/3 del diámetro de la carcasa
- Flujo másico en la carcasa: 25967,16 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en la carcasa: 49,6 / 37,8 °C
- $\Delta P$  permisible en la carcasa: 34,32 kPa.
- Flujo másico en los tubos: 43357,32 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en los tubos: 33 / 37,8 °C
- $\Delta P$  permisible en los tubos: 98,07 kPa.

- Propiedades de los fluidos: extraídos de PRO II®.
- Factor de ensuciamiento Carcasa / Tubos: 0,000172 / 0,000601 m<sup>2</sup>.K/W.
- Coeficiente global de transferencia de calor supuesto: 550 W/m<sup>2</sup>.K

Los resultados obtenidos por ambos programas se muestran en la siguiente tabla, comparándolos con los valores de la hoja de datos del equipo.

**Tabla 28.** Caso2: Comparación entre hoja de datos de E-107 y resultados del diseño con DETC y HTRI

	<b>Hoja de datos</b>	<b>Diseño con DETC</b>	<b>% Desviación</b>	<b>Diseño con HTRI</b>	<b>% Desviación</b>
U (W/m <sup>2</sup> .K)	566,45	594,02	4,9	613,51	8,3
q (MW)	0,2424	0,2416	-0,3	0,2416	-0,3
ΔTmLn ( °C)	5,7	7,4	29,8	5,7	0,0
Diámetro de la carcasa (mm)	432	438,15	1,4	435,05	-0,7
Área (m <sup>2</sup> )	72	84,93	17,9	70,94	-1,5
ΔP tubos calc / perm (kPa)	89,96 / 98,07	79,81 / 98,07	-11,3	91,52 / 98,07	1,7
ΔPcarcasa calc / perm (kPa)	14,81 / 34,32	29,58 / 34,32	99,7	32,75 / 34,32	121,13

A partir de los valores mostrados en las tablas anteriores, se observa que los porcentajes de desviación de los resultados correspondientes a la geometría del intercambiador (área y diámetro de la carcasa), están por debajo del 20% con respecto a los valores de las hojas de datos de los equipos. Estos valores se consideran aceptables de acuerdo al objetivo fundamental del programa, que es estudiar, de forma general, el procedimiento de diseño de un intercambiador de tubos y carcasa en la etapa de ingeniería conceptual, y cómo las variables de operación influyen en el área de transferencia de calor.

En cuanto al coeficiente global de transferencia de calor, se observa que se acerca en gran medida a los valores de diseño y a resultados los arrojados por el software

HTRI®, presentando porcentajes de desviación menores al 10%. Con respecto a la  $\Delta T_{mLn}$ , se obtuvieron resultados con porcentajes de desviación de alrededor del 30%. Esto puede ser consecuencia de la forma por la cual se calcula el factor de corrección de temperaturas  $F$ , y a que el software HTRI® determina el valor de  $\Delta T_{mLn}$  en diversos puntos a lo largo del intercambiador, por lo cual evalúa el comportamiento de la temperatura con mayor exactitud.

Los valores más críticos son los concernientes a las caídas de presión tanto para los tubos, como para la carcasa. Esto puede deberse a que las propiedades de los fluidos se ajustaron linealmente con respecto a la temperatura, lo cual no necesariamente ocurre en la realidad, influyendo directamente en el cálculo de estos parámetros, según las ecuaciones 31 y 33. Sin embargo, se observa que los resultados obtenidos con DETC, no se alejan en gran medida de los arrojados por el software HTRI®. Además, dichos valores se encuentran siempre por debajo de los valores máximos permitidos, lo cual indica que el programa proporciona resultados aceptables desde el punto de vista hidráulico.

Cuando se requiere diseñar un intercambiador de calor de tubos y carcasa, existe un infinito número de posibilidades geométricas para alcanzar las condiciones de salida de los equipos, por lo que es difícil comparar el resultado de los diseños logrados, ya que como se ve en las tablas, los diseños realizados con DETC como los hechos por HTRI son válidos. En general, la modalidad de diseño del programa DETC arroja resultados aceptables para el estudio de la influencia de las variables de operación en el cálculo del área de transferencia de calor, objetivo principal de la realización de esta herramienta. Los cálculos tipo correspondientes a la modalidad de diseño se encuentran en el Apéndice J.

**b) Validación de la modalidad de Evaluación.**

El programa DETC, cuando se emplea bajo la modalidad de Evaluación, arroja como resultados las variables de salida de las corrientes involucradas, ya sea la temperatura conociendo el flujo másico; o el flujo másico, conociendo la temperatura de salida, para un equipo cuyas dimensiones son conocidas.

Para validar la modalidad de Evaluación del programa, se usó como valores a comparar los resultados obtenidos del software HTRI® de las evaluaciones de los intercambiadores E-106 (caso 3) y E-107 (caso 4), ante las condiciones actuales de flujo.

Para el **caso 3**, se propuso comparar los resultados obtenidos de HTRI®, para la evaluación del intercambiador E-106 ante las condiciones actuales, estableciendo como parámetro principal de validación, la temperatura de salida del agua de enfriamiento que fluye por el interior de los tubos.

Los datos introducidos al programa DETC fueron los siguientes:

- Diámetro de la carcasa: 304,8 mm.
- Longitud de los tubos: 6,096 m.
- Diámetro externo de los tubos: 19,05 mm.
- Espesor BWG de los tubos: 14
- Número de pasos por los tubos: 4
- Material de los tubos: acero al carbono
- Espaciado entre deflectores:  $\frac{1}{2}$  del diámetro de la carcasa.
- Arreglo de los tubos: triangular.
- Flujo másico en la carcasa: 6163,92 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en la carcasa: 60,0 / 37,7 °C
- $\Delta P$  permisible en la carcasa: 19,61 kPa.
- Flujo másico en los tubos: 20056,64 kg/h.

- Temperatura de Entrada en los tubos: 33°C
- $\Delta P$  permisible en los tubos: 98,07 kPa.
- Propiedades de los fluidos: extraídos de PRO II®.
- Factor de ensuciamiento Carcasa / Tubos: 0,000172 / 0,000601 m<sup>2</sup>.K/W.

En la siguiente tabla se comparan los resultados obtenidos por los dos programas:

**Tabla 29.** Comparación de resultados de la evaluación del caso 3 con HTRI y DETC

	Resultados de HTRI	Resultados de DETC	% Desviación
<b>Carcasa</b>			
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	4,02 / 19,61	7,12 / 19,61	77,1
<b>Tubos</b>			
Temperatura de salida ( °C)	37,8	38,3	1,3
$\Delta P$ calc/perm (kPa)	64,89 / 98,07	74,87 / 98,07	15,4
<b>Proceso</b>			
$\Delta T_{mLn}$	8,5	10,8	27,1
$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	7347,08	7484,38	1,9
$h_o$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	908,49	929,18	2,3
$U$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	442,34	481,79	9,4
$U_{req}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	440,42	360,55	-18,3
$q$ (kW)	113,19	115,17	1,7
Área (m <sup>2</sup> )	30,28	31,37	3,6

Para el **caso 4**, se compararon los resultados obtenidos de HTRI®, para la evaluación, a condiciones actuales, del intercambiador E-107, estableciendo como parámetro principal de validación, el flujo másico de la corriente de propano que fluye por los tubos.

Los datos introducidos al programa DETC fueron los siguientes:

- Diámetro de la carcasa: 438,15 mm.
- Longitud de los tubos: 7,315 m.

- Diámetro externo de los tubos: 19,05 mm.
- Espesor BWG de los tubos: 14
- Número de pasos por los tubos: 4
- Material de los tubos: acero al carbono
- Espaciado entre deflectores: ½ del diámetro de la carcasa.
- Arreglo de los tubos: triangular.
- Temperaturas de Entrada / Salida en la carcasa: 49,6 / 37,7 °C
- ΔP permisible en la carcasa: 34,32 kPa.
- Flujo másico en los tubos: 41813,28 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en los tubos: 33,0 / 37,8 °C
- ΔP permisible en los tubos: 98,07 kPa.
- Propiedades de los fluidos: extraídos de PRO II®.
- Factor de ensuciamiento Carcasa / Tubos: 0,000172 / 0,000601 m<sup>2</sup>.K/W.

En la Tabla 30 se observan los resultados obtenidos:

**Tabla 30.** Comparación de resultados de la evaluación del caso 4 con HTRI y DETC

	<b>Resultados de HTRI</b>	<b>Resultados de DETC</b>	<b>% Desviación</b>
<b>Carcasa</b>			
Flujo másico	25967,16	24800,22	-4,5
ΔP calc/perm (kPa)	16,01 / 34,32	27,22 / 34,32	70,0
<b>Tubos</b>			
ΔP calc/perm (kPa)	83,82 / 98,07	74,76 / 98,07	-10,8
<b>Proceso</b>			
ΔT <sub>mLn</sub>	5,8	7,4	27,6
h <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	7670,13	7017,13	-8,5
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	1701,88	1437,53	-15,5
U (W/m <sup>2</sup> .°C)	574,73	586,02	1,9
U <sub>req</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	569,10	368,44	-35,3
q (kW)	273,31	233,04	-14,7
Área (m <sup>2</sup> )	71,76	84,93	18,4

Al observar las principales variables sometidas a la validación, temperatura de salida en los tubos (caso 3) y flujo másico en la carcasa (caso 4), y los valores de coeficientes individuales, se concluye que, los resultados obtenidos usando DETC, bajo la modalidad de evaluación, se acercan considerablemente a los valores arrojados por HTRI® presentando, en general, porcentajes de desviación menores al 5 %.

Al igual que en la modalidad de diseño, el valor de  $\Delta T_{mLn}$  se ve afectado por la forma en que es calculado el factor de corrección de temperaturas  $F$ , presentando porcentajes de desviación cercanos al 30%. Esto influye directamente en el valor del coeficiente global de transferencia de calor requerido, ya que éste es calculado a partir de la  $\Delta T_{mLn}$ .

Los valores críticos son, nuevamente, los resultados de caída de presión. Las posibles razones de los altos porcentajes de desviación fueron explicadas anteriormente. Sin embargo se observa que, los valores para la caída de presión en los tubos y en la carcasa, para los casos 3 y 4, se encuentran por debajo de los valores permisibles, indicando que el programa, bajo la modalidad de evaluación, arroja resultados aceptables desde el punto de hidráulico. Los cálculos tipo correspondientes a la modalidad de evaluación se encuentran en el Apéndice K.

Se puede decir entonces que, las modalidades de diseño y evaluación, en forma general, arrojaron resultados aceptables. Los valores obtenidos han servido de soporte para realizar una buena validación del programa DETC, en base al objetivo fundamental del mismo, el cual busca estudiar, de una forma aproximada pero realista, la influencia de distintas variables de operación en la transferencia de calor en intercambiadores de tubos y carcasa.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En el presente capítulo se presentan las conclusiones sobre la evaluación realizada al sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC estudiada y el desarrollo del programa para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa, así como las recomendaciones postuladas:

### *Conclusiones:*

- La configuración del sistema de intercambiadores de calor de la SRV, a condiciones actuales es válida termohidráulicamente, ya que los parámetros térmicos se encuentran dentro del 5 % aceptado y los valores de caída de presión se encuentran por debajo de los permisibles.
- El sistema de intercambiadores de calor de la sección de recuperación de vapores de la unidad de FCC estudiada, no puede soportar termohidráulicamente las nuevas condiciones de flujo.
- El sistema de intercambiadores evaluado sólo puede manejar las nuevas condiciones de flujo si se realizan modificaciones estructurales a los equipos.
- Al colocar un sistema de intercambiadores en paralelo, se disminuye la caída de presión en la carcasa y aumenta el área de transferencia de calor disponible.
- Al colocar un intercambiador en serie, se incrementan los valores de caída de presión en los tubos y en la carcasa, pero aumenta el área de transferencia de calor disponible.
- Las modificaciones realizadas al sistema de intercambiadores estudiado, permiten flexibilizar la operación de la SRV.
- El programa DETC permite diseñar y evaluar intercambiadores de calor de tipo tubos y carcasa para procesos que manejen fluidos líquidos sin cambio de fase, en un ambiente amigable para el usuario.

- Los resultados arrojados por el programa DETC, bajo la modalidad de diseño, correspondientes a la geometría del intercambiador, presentan porcentajes de desviación menores al 20% con respecto a los valores de las hojas de datos de los equipos.
- Los resultados arrojados por el programa DETC, bajo la modalidad de evaluación, correspondientes a la temperatura de salida y flujo másico, presentan porcentajes de desviación menores al 5%
- Los resultados obtenidos por el programa DETC, se consideran aceptables de acuerdo al objetivo de estudiar la influencia de diversas variables de operación en la transferencia de calor.

*Recomendaciones:*

- Realizar un estudio económico sobre las propuestas planteadas en la evaluación del sistema de intercambiadores de calor de la SRV de la unidad de FCC estudiada.
- Ampliar el rango de aplicación del programa, añadiendo los códigos de programación respectivos para el diseño y evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa en procesos con cambio de fase, así como incluyendo una mayor gama de materiales a utilizar en los tubos.
- Realizar un código de programación para el ajuste de propiedades en función de la temperatura, a fin de optimizar los resultados obtenidos con el programa DETC.
- Realizar un manual de guía para el usuario del programa DETC.

**CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BEJAN, A. y Krauss, A. (2003). **Heat Transfer Handbook**. New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons. 523 pp.
- BUTHOD, P. (1980). **Process Component Design**. Oklahoma, U.S.A.: Universidad de Tulsa. Cap. 8: Heat Exchangers Design.
- CEVALLOS, Francisco. (1997). **Enciclopedia de Visual Basic**. México D.F., México: Grupo Editor Alfaomega.
- CHEREMISINOFF, Nicholas. (2000). **Handbook of Chemical Processing Equipment**. ELSEVIER. 559 pp.
- FERNÁNDEZ, José. (s.f.). **Transferencia de Calor**. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- HOLMAN, J.P. (1986). **Transferencia de Calor**. México D.F., México: Compañía Editorial Continental, S.A. 621 pp.
- JAMES, Gary y Handwerk, G. (2001). **Petroleum Refining. Technology and Economics**, 4ta Edición. New Cork City, U.S.A.: Edit. Marcel Dekker. 455 pp.
- JONES, David y Pujadó, P. (2006). **Handbook of Petroleum Processing**. Holanda: Edit. Springer. 1353 pp.
- KERN, Donald. (1965). **Procesos de Transferencia de Calor**. México D.F., México: Compañía Editorial Continental, S.A. 979 pp.
- KUTZ, Myer. (2006). **Mechanical Engineer's Handbook**. New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons. 824 pp.
- LEVENSPIEL, Octave. (1993). **Flujo de fluidos. Intercambio de Calor**. Barcelona, España: Edit. Reverté S.A. 377 pp.

- LUDWING, Ernest. (1999). **Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants**, 3ra edición. Houston, U.S.A.: Gulf Professional Publishing. 702 pp.
- MEYERS, Robert. (2004). **Handbook of petroleum Refining Processes**. New York City, U.S.A.: McGraw- Hill
- MDP (Manual de Diseño de Procesos). (1995). MDP-05-E-01. **Transferencia de Calor. Intercambiadores de calor. Principios Básicos**. PDVSA.
- MDP (Manual de Diseño de Procesos). (1995). MDP-05-E-02. **Transferencia de Calor. Intercambiadores de calor. Intercambiadores de Tubos y Carcasa**. PDVSA.
- PERRY, R. y Green, D. (1999). **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7ma ed. New York, U.S.A.: McGraw-Hill.
- ROHSENOW, W., Hartnett, J y Cho, Y. (1998). **Handbook of Heat Transfer**. Cap 17. New York, U.S.A.: McGraw-Hill.
- WALAS, Stanley. (1990). **Chemical Process Equipment. Selection and Design**. Washington D.C., U.S.A.: Butterworth-Heinemann. 774 pp.

**CAPÍTULO VII. APÉNDICES**

APÉNDICE A. Características geométricas de los tubos .....	125
APÉNDICE B. Gráficas de factor de corrección de $\Delta Tm_{Ln}$ .....	126
APÉNDICE C. Valores de Factores de Ensuciamiento.....	127
APÉNDICE D. Factores de fricción de Darcy para tubos y carcasa. ....	129
APÉNDICE E. Hojas de datos de los intercambiadores evaluados.....	131
APÉNDICE F. Balance de masa de las corrientes de proceso de la SRV.....	138
APÉNDICE G. Diámetros de carcasa estándar .....	140
APÉNDICE H. Hojas de Reporte de las evaluaciones realizadas con HTRI .....	148
APÉNDICE I. Hojas de Reporte del programa DETC .....	178
APÉNDICE J. Cálculos tipo para el diseño de intercambiadores .....	182
APÉNDICE K. Cálculos tipo para la evaluación de intercambiadores .....	182

APÉNDICE A. Características geométricas de los tubos

Tube O.D. Inches	B.W.C. Gage	Thickness In.	Internal Area In. <sup>2</sup>	F <sup>2</sup> External Surface Per Ft Length	F <sup>2</sup> Internal Surface Per Ft Length	Weight Per Ft Length Steel Lb.*	Tube I.D. In.	Moment of Inertia In. <sup>4</sup>	Section Modulus In. <sup>3</sup>	Radius of Gyration In.	Constant C**	O.D. I.D.	Transverse Metal Area In. <sup>2</sup>
1/4	22	0.028	0.0296	0.0654	0.0508	0.066	0.104	0.00012	0.00068	0.0791	46	1.289	0.0195
	24	0.022	0.0333	0.0654	0.0539	0.054	0.206	0.00010	0.00083	0.0810	52	1.214	0.0158
	26	0.018	0.0390	0.0654	0.0569	0.045	0.214	0.00009	0.00071	0.0823	56	1.168	0.0131
	27	0.016	0.0573	0.0654	0.0571	0.040	0.218	0.00008	0.00065	0.0820	58	1.147	0.0118
3/4	18	0.049	0.0603	0.0082	0.0725	0.171	0.277	0.00068	0.0096	0.1166	94	1.354	0.0392
	20	0.035	0.0731	0.0082	0.0798	0.127	0.305	0.00055	0.0099	0.1208	114	1.230	0.0374
	22	0.028	0.0790	0.0082	0.0825	0.104	0.319	0.00046	0.0095	0.1231	125	1.176	0.0305
	24	0.022	0.0890	0.0082	0.0867	0.083	0.351	0.00038	0.0090	0.1250	134	1.133	0.0244
1 1/2	16	0.065	0.1075	0.1309	0.0069	0.302	0.370	0.0021	0.0086	0.1555	168	1.351	0.0688
	18	0.049	0.1290	0.1309	0.0352	0.236	0.402	0.0018	0.0071	0.1604	198	1.244	0.0694
	20	0.035	0.1432	0.1309	0.1126	0.174	0.430	0.0014	0.0056	0.1640	227	1.163	0.0511
	22	0.028	0.1543	0.1309	0.1162	0.141	0.444	0.0012	0.0046	0.1672	241	1.126	0.0415
1 3/4	12	0.109	0.1901	0.1636	0.1066	0.601	0.407	0.0061	0.0197	0.1865	293	1.326	0.177
	13	0.095	0.1486	0.1636	0.1139	0.538	0.435	0.0057	0.0183	0.1904	292	1.437	0.158
	14	0.083	0.1655	0.1636	0.1202	0.481	0.459	0.0053	0.0170	0.1939	298	1.362	0.141
	15	0.072	0.1817	0.1636	0.1259	0.426	0.481	0.0049	0.0156	0.1972	283	1.290	0.125
	16	0.065	0.1924	0.1636	0.1296	0.389	0.405	0.0045	0.0145	0.1993	300	1.263	0.114
	17	0.058	0.2035	0.1636	0.1333	0.332	0.500	0.0042	0.0134	0.2015	317	1.228	0.103
	18	0.049	0.2181	0.1636	0.1380	0.302	0.527	0.0037	0.0119	0.2044	340	1.186	0.089
	19	0.042	0.2290	0.1636	0.1416	0.262	0.541	0.0033	0.0105	0.2067	350	1.135	0.077
2	20	0.035	0.2419	0.1636	0.1453	0.221	0.555	0.0028	0.0091	0.2090	377	1.126	0.065
	10	0.134	0.1825	0.1963	0.1262	0.833	0.482	0.0129	0.0344	0.2220	285	1.556	0.259
	11	0.120	0.2043	0.1963	0.1325	0.808	0.510	0.0122	0.0326	0.2267	210	1.471	0.238
	12	0.109	0.2223	0.1963	0.1393	0.747	0.532	0.0116	0.0309	0.2290	347	1.410	0.219
	13	0.095	0.2463	0.1963	0.1466	0.665	0.560	0.0107	0.0285	0.2340	384	1.339	0.195
	14	0.083	0.2670	0.1963	0.1529	0.592	0.584	0.0098	0.0262	0.2376	418	1.284	0.174
	15	0.072	0.2884	0.1963	0.1587	0.522	0.606	0.0090	0.0238	0.2411	450	1.238	0.154
	16	0.065	0.3019	0.1963	0.1623	0.476	0.620	0.0083	0.0221	0.2433	471	1.210	0.140
17	0.058	0.3157	0.1963	0.1669	0.429	0.634	0.0076	0.0206	0.2455	492	1.183	0.126	
18	0.049	0.3330	0.1963	0.1707	0.367	0.652	0.0067	0.0178	0.2484	521	1.130	0.108	
19	0.035	0.3632	0.1963	0.1789	0.288	0.680	0.0060	0.0134	0.2531	567	1.103	0.070	
2 1/2	10	0.134	0.2994	0.2291	0.1589	1.052	0.607	0.0221	0.0505	0.2662	451	1.442	0.312
	11	0.120	0.3167	0.2291	0.1662	0.969	0.635	0.0208	0.0475	0.2703	494	1.378	0.285
	12	0.109	0.3390	0.2291	0.1729	0.893	0.657	0.0196	0.0449	0.2736	529	1.332	0.262
	13	0.095	0.3685	0.2291	0.1793	0.792	0.685	0.0180	0.0411	0.2778	575	1.277	0.233
	14	0.083	0.3948	0.2291	0.1856	0.708	0.709	0.0164	0.0374	0.2813	616	1.234	0.207
	15	0.072	0.4197	0.2291	0.1914	0.618	0.731	0.0148	0.0337	0.2850	655	1.197	0.182
	16	0.065	0.4390	0.2291	0.1959	0.563	0.745	0.0137	0.0312	0.2873	680	1.174	0.165
	17	0.058	0.4525	0.2291	0.1987	0.507	0.759	0.0125	0.0285	0.2896	706	1.138	0.149
18	0.049	0.4742	0.2291	0.2034	0.438	0.777	0.0109	0.0249	0.2925	740	1.126	0.137	
19	0.035	0.5000	0.2291	0.2107	0.314	0.805	0.0082	0.0187	0.2972	794	1.087	0.092	
3	8	0.165	0.3526	0.2618	0.1754	1.473	0.670	0.0392	0.0734	0.3000	350	1.493	0.433
	10	0.134	0.4208	0.2618	0.1916	1.241	0.732	0.0350	0.0700	0.3068	656	1.366	0.365
	11	0.120	0.4536	0.2618	0.1999	1.129	0.760	0.0327	0.0654	0.3140	760	1.316	0.332
	12	0.109	0.4893	0.2618	0.2047	1.038	0.782	0.0307	0.0615	0.3174	749	1.279	0.305
	13	0.095	0.5153	0.2618	0.2121	0.919	0.810	0.0289	0.0569	0.3217	804	1.235	0.270
	14	0.083	0.5463	0.2618	0.2183	0.814	0.834	0.0253	0.0507	0.3255	852	1.199	0.239
	15	0.072	0.5755	0.2618	0.2241	0.714	0.856	0.0227	0.0455	0.3291	898	1.168	0.210
	16	0.065	0.5945	0.2618	0.2278	0.630	0.870	0.0210	0.0419	0.3314	927	1.149	0.191
18	0.049	0.6300	0.2618	0.2361	0.498	0.902	0.0166	0.0332	0.3367	997	1.109	0.146	
19	0.035	0.6793	0.2618	0.2435	0.361	0.930	0.0134	0.0247	0.3414	1060	1.075	0.106	
4	7	0.180	0.6221	0.3272	0.2339	2.099	0.890	0.0690	0.1425	0.3836	970	1.494	0.605
	8	0.165	0.6648	0.3272	0.2409	1.914	0.920	0.0647	0.1355	0.3880	1037	1.390	0.582
	10	0.134	0.7574	0.3272	0.2571	1.599	0.982	0.0742	0.1187	0.3974	1182	1.273	0.470
	11	0.120	0.8012	0.3272	0.2644	1.490	1.010	0.0688	0.1100	0.4018	1250	1.238	0.426
	12	0.109	0.8365	0.3272	0.2702	1.330	1.032	0.0642	0.1027	0.4062	1305	1.211	0.391
	13	0.095	0.8825	0.3272	0.2775	1.173	1.060	0.0579	0.0926	0.4097	1377	1.179	0.345
	14	0.083	0.9220	0.3272	0.2838	1.036	1.084	0.0521	0.0833	0.4136	1440	1.153	0.304
	16	0.065	0.9852	0.3272	0.2932	0.824	1.120	0.0435	0.0682	0.4196	1537	1.116	0.242
18	0.049	1.0423	0.3272	0.3016	0.629	1.152	0.0334	0.0534	0.4250	1626	1.085	0.185	
19	0.035	1.0936	0.3272	0.3089	0.455	1.180	0.0247	0.0395	0.4297	1706	1.059	0.134	
5	10	0.134	1.1021	0.3927	0.3225	1.957	1.352	0.1354	0.1806	0.4333	1860	1.313	0.575
	12	0.109	1.2008	0.3927	0.3356	1.821	1.382	0.1150	0.1545	0.4383	2014	1.170	0.476
	14	0.083	1.3077	0.3927	0.3492	1.257	1.354	0.0951	0.1241	0.45018	2180	1.124	0.369
	16	0.065	1.4741	0.3927	0.3587	0.997	1.370	0.0756	0.1008	0.5070	2300	1.095	0.293
6	11	0.120	2.4328	0.5236	0.4603	2.412	1.760	0.3144	0.3144	0.6660	3795	1.136	0.709
	12	0.109	2.4941	0.5236	0.4665	2.204	1.782	0.2904	0.2904	0.6697	3891	1.122	0.648
	13	0.095	2.5730	0.5236	0.4739	1.935	1.810	0.2586	0.2586	0.6744	4014	1.105	0.589
	14	0.083	2.6417	0.5236	0.4801	1.701	1.834	0.2300	0.2300	0.6784	4121	1.091	0.500

\*Weights are based on low carbon steel with a density of 0.2836 lb./in.<sup>3</sup> For other metals multiply by the following factors:  
 Aluminum 0.35 A.I.S.I. 300 Series S/Steels 1.02 Nickel-Chrome-Iron 1.07 Nickel-Copper 1.12  
 Titanium 0.38 Aluminum Bronze 1.04 Admiralty 1.09 Copper and Cupro-Nickels 1.14  
 A.I.S.I. 400 Series S/Steels 0.90 Aluminum Brass 1.06 Nickel 1.13

\*\*Liquit Velocity =  $\frac{\text{lb per cube hour}}{C \times \text{sp. gr. of liquid}}$  in. ft per sec (sp. gr. of water at 60°F = 1.0)

Figura A.1. Características geométricas de los tubos

APÉNDICE B. Gráficas de factor de corrección de  $\Delta Tm_{Ln}$ . Intercambiadores de un paso en la carcasa y número par de pasos en los tubos

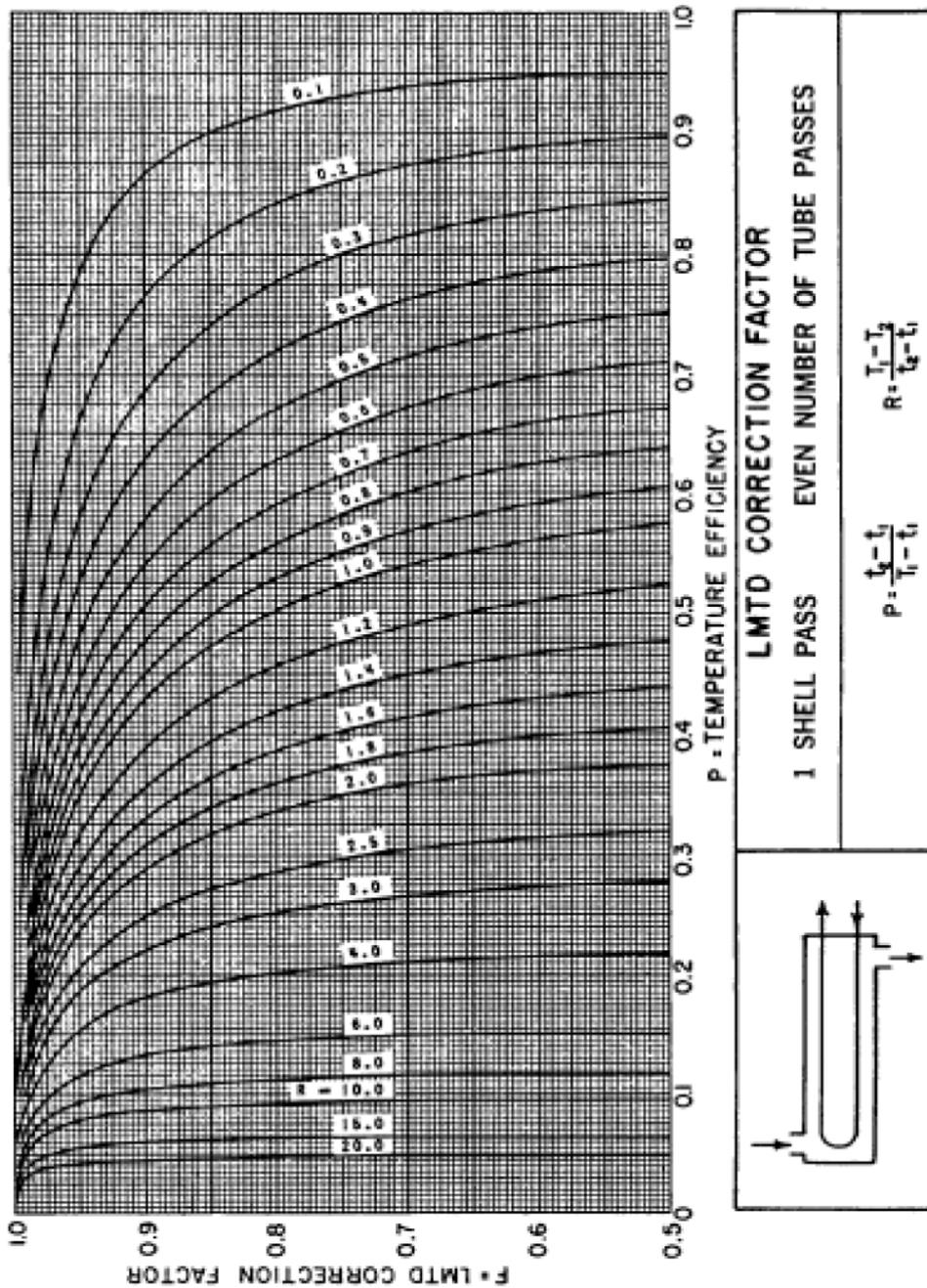


Figura B.1. Gráfica de Factor de corrección de temperaturas

APÉNDICE C. Valores de Factores de Ensuciamiento

Fouling Resistances For Industrial Fluids		Fouling Resistances for Natural Gas-Gasoline Processing Streams							
<b>Oils:</b>		<b>Gases and Vapors:</b>							
Fuel oil #2	0.002	Natural gas						0.001–0.002	
Fuel oil #6	0.005	Overhead products						0.001–0.002	
Transformer oil	0.001	<b>Liquids:</b>							
Engine lube oil	0.001	Lean oil						0.002	
Quench oil	0.004	Rich oil						0.001–0.002	
<b>Gases and Vapors:</b>		Natural gasoline and liquefied petroleum gases						0.001–0.002	
Manufactured gas	0.010	<b>Fouling Resistances for Oil Refinery Streams</b>							
Engine exhaust gas	0.010	<b>Crude and Vacuum Unit Gases and Vapors:</b>							
Steam (nonoil-bearing)	0.0005	Atmospheric tower overhead vapors						0.001	
Exhaust steam (oil-bearing)	0.0015–0.002	Light Naphtha						0.001	
Refrigerant vapors (oil-bearing)	0.002	Vacuum overhead vapors						0.002	
Compressed air	0.001	<b>Crude and Vacuum Liquids:</b>							
Ammonia vapor	0.001	Crude oil							
CO <sub>2</sub> vapor	0.001	0 to 250°F velocity ft/sec			250 to 350°F velocity ft/sec				
Chlorine vapor	0.002	<2	2–4	>4	<2	2–4	>4		
Coal flue gas	0.010	DRY						0.003 0.002 0.002 0.003 0.002 0.002	
Natural gas flue gas	0.005	SALT*						0.003 0.002 0.002 0.005 0.004 0.004	
<b>Liquids:</b>		350 to 450°F velocity ft/sec			450°F and more velocity ft/sec				
Molten heat transfer salts	0.0005	<2	2–4	>4	<2	2–4	>4		
Refrigerant liquids	0.001	DRY						0.004 0.003 0.003 0.005 0.004 0.004	
Hydraulic fluid	0.001	SALT*						0.006 0.005 0.005 0.007 0.006 0.006	
Industrial organic heat transfer media	0.002	*Assumes desalting @ approx. 250°F							
Ammonia liquid	0.001	Gasoline							0.002
Ammonia liquid (oil-bearing)	0.003	Naphtha and light distillates							0.002–0.003
Calcium chloride solutions	0.003	Kerosene							0.002–0.003
Sodium chloride solutions	0.003	Light gas oil							0.002–0.003
CO <sub>2</sub> liquid	0.001	Heavy gas oil							0.003–0.005
Chlorine liquid	0.002	Heavy fuel oils							0.005–0.007
Methanol solutions	0.002	<b>Asphalt and Residuum:</b>							
Ethanol solutions	0.002	Vacuum tower bottoms						0.010	
Ethylene glycol solutions	0.002	Atmosphere tower bottoms						0.007	
<b>Fouling Resistances for Chemical Processing Streams</b>		<b>Cracking and Coking Unit Streams:</b>							
<b>Gases and Vapors:</b>		Overhead vapors						0.002	
Acid gases	0.002–0.003	Light cycle oil						0.002–0.003	
Solvent vapors	0.001	Heavy cycle oil						0.003–0.004	
Stable overhead products	0.001								
<b>Liquids:</b>									
MEA and DEA solutions	0.002								
DEG and TEG solutions	0.002								
Stable side draw and bottom product	0.001–0.002								
Caustic solutions	0.002								
Vegetable oils	0.003								

Fuente: Ludwing, 1999

Figura C.1. Factores de ensuciamiento típicos para diversos fluidos.

APÉNDICE C. Valores de Factores de Ensuciamiento (Cont.)

Fouling Resistances for Oil Refinery Streams (Continued)		Catalytic Hydro Desulfurizer:				
<b>Cracking and Coking Unit Streams (Continued)</b>		Charge	0.004–0.005			
Light coker gas oil	0.003–0.004	Effluent	0.002			
Heavy coker gas oil	0.004–0.005	H.T. sep. overhead	0.002			
Bottoms slurry oil (4.5 ft/sec min.)	0.003	Stripper charge	0.003			
Light liquid products	0.002	Liquid products	0.002			
<b>Catalytic Reforming, Hydrocracking, and Hydrodesulfurization Streams:</b>		<b>HF Alky Unit:</b>				
Reformer charge	0.0015	Alkylate, deprop. bottoms, main fract.	0.003			
Reformer effluent	0.0015	overhead, main fract. feed				
Hydrocracker charge and effluent*	0.002	All other process streams	0.002			
Recycle gas	0.001	<b>Fouling Resistances for Water</b>				
Hydrodesulfurization charge and effluent*	0.002	<b>Temperature of Heating Medium</b>	<b>Up to 240°F</b>	<b>240 to 400°F</b>		
Overhead vapors	0.001	<b>Temperature of Water</b>	<b>125°</b>	<b>More Than 125°</b>		
Liquid product greater than 50° A.P.I.	0.001		<b>Water Velocity</b>	<b>Water Velocity</b>		
Liquid product 30–50° A.P.I.	0.002		<b>Ft/Sec</b>	<b>Ft/Sec</b>		
*Depending on charge, characteristics and storage history, charge resistance may be many times this value.			<b>3 and Less</b>	<b>More Than 3</b>	<b>3 and Less</b>	<b>More Than 3</b>
<b>Light Ends Processing Streams:</b>		Sea water	0.0005	0.0005	0.001	0.001
Overhead vapors and gases	0.001	Brackish water	0.002	0.001	0.003	0.002
Liquid products	0.001	Cooling tower and artificial spray pond:				
Absorption oils	0.002–0.003	Treated makeup	0.001	0.001	0.002	0.002
Alkylation trace acid streams	0.002	Untreated	0.003	0.003	0.005	0.004
Reboiler streams	0.002–0.003	City or well water	0.001	0.001	0.002	0.002
<b>Lube Oil Processing Streams:</b>		River water:				
Feed stock	0.002	Minimum	0.002	0.001	0.003	0.002
Solvent feed mix	0.002	Average	0.003	0.002	0.004	0.003
Solvent	0.001	Muddy or silty	0.003	0.002	0.004	0.003
Extract*	0.003	Hard (more than 15 grains/gal)	0.003	0.003	0.005	0.005
Raffinate	0.001	Engine jacket	0.001	0.001	0.001	0.001
Asphalt	0.005	Distilled or closed cycle				
Wax slurries*	0.003	Condensate	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Refined lube oil	0.001	Treated boiler feedwater	0.001	0.0005	0.001	0.001
*Precautions must be taken to prevent wax deposition on cold tube walls.		Boiler blowdown	0.002	0.002	0.002	0.002
<b>Visbreaker:</b>		If the heating medium temperature is more than 400°F and the cooling medium is known to scale, these ratings should be modified accordingly.				
Overhead vapor	0.003					
Visbreaker bottoms	0.010					
<b>Naphtha Hydrotreater:</b>						
Feed	0.003					
Effluent	0.002					
Naphtha	0.002					
Overhead vapors	0.0015					

Fuente: Ludwing, 1999

Figura C.2. Factores de ensuciamiento típicos para diversos fluidos (continuación).

APÉNDICE D. Factores de fricción de Darcy para tubos y carcasa

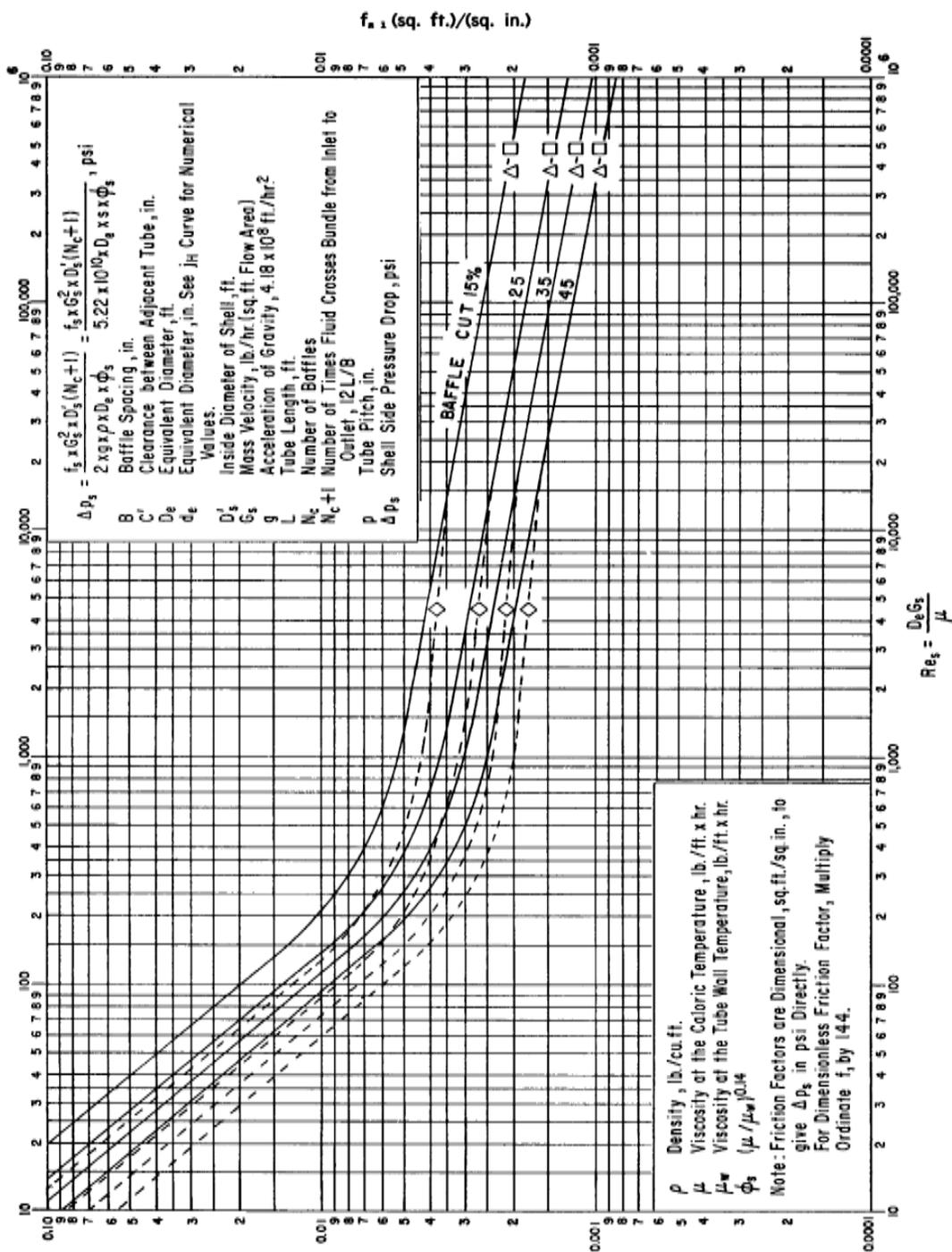


Figura D.1. Factor de fricción de Darcy para el fluido de la carcasa

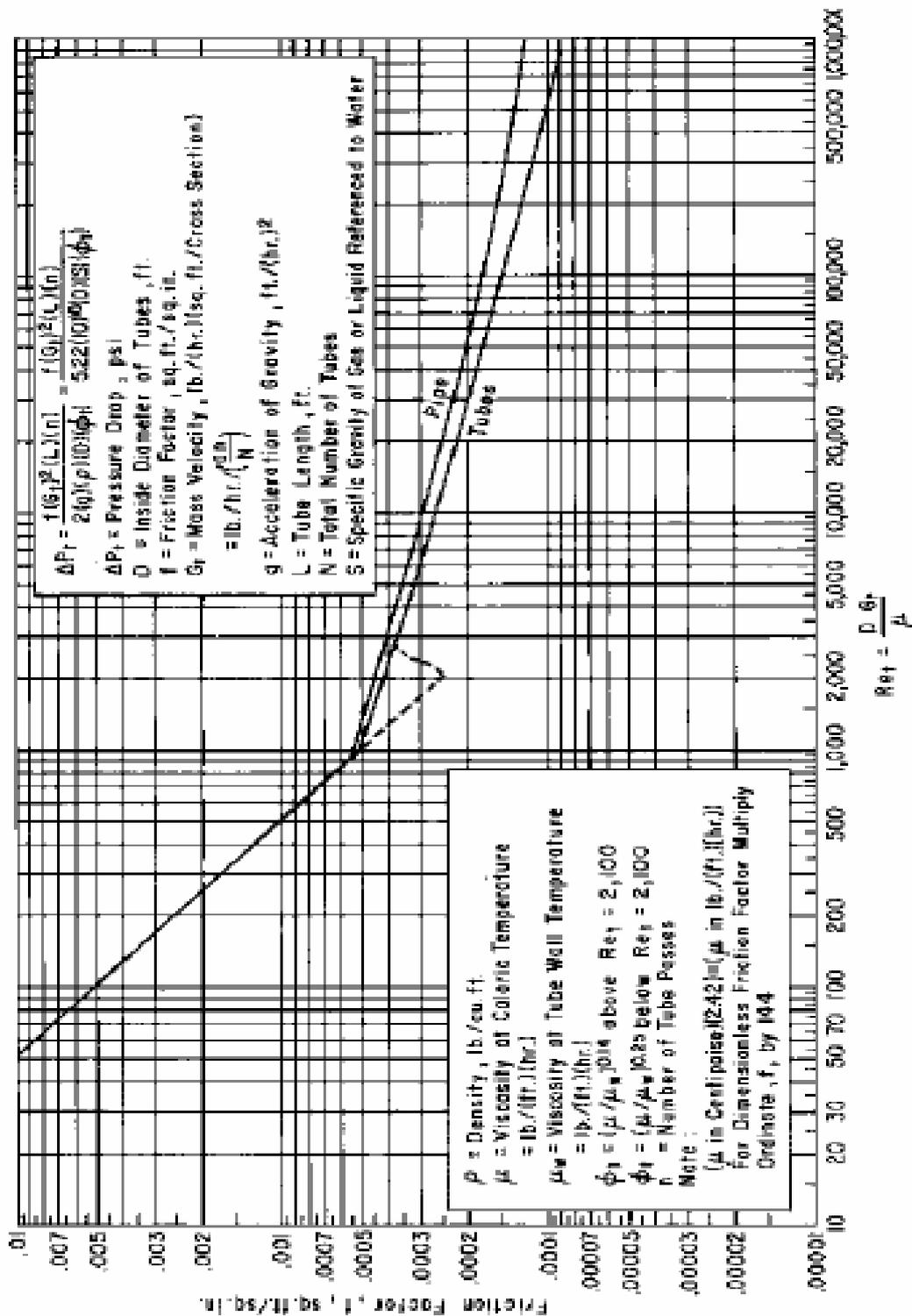


Figura D.2. Factor de fricción de Darcy para el fluido de los tubos

APÉNDICE E. Hojas de datos de los intercambiadores evaluados

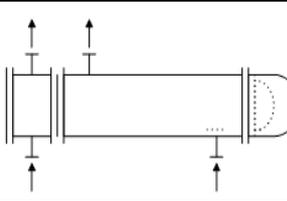
SPECIFICATION SHEET SHELL AND TUBE EXCHANGER																																																																																																																																																																																																																																															
REVISION	Form EXCHST01 MKH Units				Job No. _____ Page 1 of 2																																																																																																																																																																																																																																										
					Client _____																																																																																																																																																																																																																																										
				Location _____																																																																																																																																																																																																																																											
				Item No. _____																																																																																																																																																																																																																																											
				Process Unit FCCU																																																																																																																																																																																																																																											
				Fabricator _____																																																																																																																																																																																																																																											
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1 Service of Unit</td> <td colspan="7">Debutanizer Feed / Bottoms Exchanger</td> <td>No. of Units</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Size</td> <td>1030-7310</td> <td>Type</td> <td>AET (Horizontal)</td> <td>Connected in</td> <td>1</td> <td>Parallel</td> <td>1</td> <td>Series</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3 Surface/Unit (EFF.)</td> <td>317</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Shells/Unit</td> <td>1</td> <td>Surface/Shell (EFF.)</td> <td>317</td> <td></td> <td></td> <td>m<sup>2</sup></td> </tr> </table>										1 Service of Unit	Debutanizer Feed / Bottoms Exchanger							No. of Units	1	2 Size	1030-7310	Type	AET (Horizontal)	Connected in	1	Parallel	1	Series		3 Surface/Unit (EFF.)	317	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (EFF.)	317			m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																								
1 Service of Unit	Debutanizer Feed / Bottoms Exchanger							No. of Units	1																																																																																																																																																																																																																																						
2 Size	1030-7310	Type	AET (Horizontal)	Connected in	1	Parallel	1	Series																																																																																																																																																																																																																																							
3 Surface/Unit (EFF.)	317	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (EFF.)	317			m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																																																						
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>																																																																																																																																																																																																																																															
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> <tr> <th colspan="4">Debutanizer Feed</th> <th colspan="4">Debutanizer Bottoms</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 Fluid Allocation</td> <td colspan="4"></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>6 Fluid Name</td> <td colspan="4"></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>7 Fluid Quantity, Total</td> <td colspan="4">275646</td> <td colspan="4">192906</td> </tr> <tr> <td>8 Vapor (In/Out)</td> <td colspan="4">3201</td> <td colspan="4">52956</td> </tr> <tr> <td>9 Liquid</td> <td colspan="4">272445</td> <td colspan="4">222690</td> </tr> <tr> <td>10 Steam</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>11 Water</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>12 Noncondensable (MW)</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>13 Temperature (In/Out)</td> <td colspan="4">109,4</td> <td colspan="4">126,2</td> </tr> <tr> <td>14 Density (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">32,69</td> <td colspan="2">581,27</td> <td colspan="2">31,87</td> <td colspan="2">593,53</td> </tr> <tr> <td>15 Viscosity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,011</td> <td colspan="2">0,14</td> <td colspan="2">0,011</td> <td colspan="2">0,14</td> </tr> <tr> <td>16 Molecular Weight, Vapor</td> <td colspan="2">51,6</td> <td colspan="2">55,3</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="2">-</td> </tr> <tr> <td>17 Specific Heat (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,523</td> <td colspan="2">0,582</td> <td colspan="2">0,53</td> <td colspan="2">0,584</td> </tr> <tr> <td>18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,025</td> <td colspan="2">0,084</td> <td colspan="2">0,026</td> <td colspan="2">0,081</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td colspan="4"></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>20</td> <td colspan="4"></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>21 Latent Heat</td> <td colspan="4">62,5</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>22 Inlet Pressure</td> <td colspan="4">15,87</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>23 Velocity</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">1,87</td> </tr> <tr> <td>24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)</td> <td colspan="2">0,7</td> <td colspan="2">0,6</td> <td colspan="2">0,7</td> <td colspan="2">0,6</td> </tr> <tr> <td>25 Fouling Resistance (Min.)</td> <td colspan="4">0,0006</td> <td colspan="4">0,0006</td> </tr> <tr> <td>26 Heat Exchanged</td> <td>5786000</td> <td>kcal/hr</td> <td colspan="2">MTD (Connected) (Weighted)</td> <td>43,5</td> <td colspan="2">°C</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>27 Transfer Rate (Service/Clean)</td> <td>420</td> <td colspan="2">kcal/hr m<sup>2</sup> °C/kcal</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>											SHELL SIDE				TUBE SIDE				Debutanizer Feed				Debutanizer Bottoms				5 Fluid Allocation									6 Fluid Name									7 Fluid Quantity, Total	275646				192906				8 Vapor (In/Out)	3201				52956				9 Liquid	272445				222690				10 Steam	-				-				11 Water	-				-				12 Noncondensable (MW)	-				-				13 Temperature (In/Out)	109,4				126,2				14 Density (Vapor/Liquid)	32,69		581,27		31,87		593,53		15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,011		0,14		0,011		0,14		16 Molecular Weight, Vapor	51,6		55,3		-		-		17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	0,523		0,582		0,53		0,584		18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,025		0,084		0,026		0,081		19									20									21 Latent Heat	62,5				-				22 Inlet Pressure	15,87				-				23 Velocity	-				1,87				24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	0,7		0,6		0,7		0,6		25 Fouling Resistance (Min.)	0,0006				0,0006				26 Heat Exchanged	5786000	kcal/hr	MTD (Connected) (Weighted)		43,5	°C				27 Transfer Rate (Service/Clean)	420	kcal/hr m <sup>2</sup> °C/kcal											
	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																										
	Debutanizer Feed				Debutanizer Bottoms																																																																																																																																																																																																																																										
5 Fluid Allocation																																																																																																																																																																																																																																															
6 Fluid Name																																																																																																																																																																																																																																															
7 Fluid Quantity, Total	275646				192906																																																																																																																																																																																																																																										
8 Vapor (In/Out)	3201				52956																																																																																																																																																																																																																																										
9 Liquid	272445				222690																																																																																																																																																																																																																																										
10 Steam	-				-																																																																																																																																																																																																																																										
11 Water	-				-																																																																																																																																																																																																																																										
12 Noncondensable (MW)	-				-																																																																																																																																																																																																																																										
13 Temperature (In/Out)	109,4				126,2																																																																																																																																																																																																																																										
14 Density (Vapor/Liquid)	32,69		581,27		31,87		593,53																																																																																																																																																																																																																																								
15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,011		0,14		0,011		0,14																																																																																																																																																																																																																																								
16 Molecular Weight, Vapor	51,6		55,3		-		-																																																																																																																																																																																																																																								
17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	0,523		0,582		0,53		0,584																																																																																																																																																																																																																																								
18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,025		0,084		0,026		0,081																																																																																																																																																																																																																																								
19																																																																																																																																																																																																																																															
20																																																																																																																																																																																																																																															
21 Latent Heat	62,5				-																																																																																																																																																																																																																																										
22 Inlet Pressure	15,87				-																																																																																																																																																																																																																																										
23 Velocity	-				1,87																																																																																																																																																																																																																																										
24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	0,7		0,6		0,7		0,6																																																																																																																																																																																																																																								
25 Fouling Resistance (Min.)	0,0006				0,0006																																																																																																																																																																																																																																										
26 Heat Exchanged	5786000	kcal/hr	MTD (Connected) (Weighted)		43,5	°C																																																																																																																																																																																																																																									
27 Transfer Rate (Service/Clean)	420	kcal/hr m <sup>2</sup> °C/kcal																																																																																																																																																																																																																																													
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>																																																																																																																																																																																																																																															
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 Design Pressure</td> <td colspan="4">17,0</td> <td colspan="4">15,8</td> </tr> <tr> <td>31 Design Temperature (Max/Min)</td> <td colspan="4">343 / -12</td> <td colspan="4">343 / -12</td> </tr> <tr> <td>32 Corrosion Allowance</td> <td colspan="4">3</td> <td colspan="4">3</td> </tr> <tr> <td>33 No. of Passes per Shell</td> <td colspan="4">1</td> <td colspan="4">4</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">34 Connections</td> <td>In</td> <td colspan="4">12"-300# RF</td> <td colspan="4">10"-300# RF</td> </tr> <tr> <td>Out</td> <td colspan="4">16"-300# RF</td> <td colspan="4">10"-300# RF</td> </tr> </tbody> </table>											SHELL SIDE				TUBE SIDE				30 Design Pressure	17,0				15,8				31 Design Temperature (Max/Min)	343 / -12				343 / -12				32 Corrosion Allowance	3				3				33 No. of Passes per Shell	1				4				34 Connections	In	12"-300# RF				10"-300# RF				Out	16"-300# RF				10"-300# RF																																																																																																																																																																									
	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																										
	30 Design Pressure	17,0				15,8																																																																																																																																																																																																																																									
31 Design Temperature (Max/Min)	343 / -12				343 / -12																																																																																																																																																																																																																																										
32 Corrosion Allowance	3				3																																																																																																																																																																																																																																										
33 No. of Passes per Shell	1				4																																																																																																																																																																																																																																										
34 Connections	In	12"-300# RF				10"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																									
	Out	16"-300# RF				10"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																									
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>37 Tube No.</td> <td>550</td> <td>OD</td> <td>25,4</td> <td>mm</td> <td>Thk</td> <td>2,11</td> <td>mm (Min.)</td> <td>Length</td> <td>7310</td> <td>mm</td> <td>Pitch</td> <td>31,75</td> <td>mm</td> <td>Flow Angle</td> <td>90</td> <td>Deg.</td> </tr> <tr> <td>38 Tube Type</td> <td colspan="16">STRAIGHT</td> </tr> <tr> <td>39 Shell</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td>ID</td> <td>1030</td> <td>OD</td> <td>-</td> <td>mm</td> <td>Material</td> <td colspan="8">C.S. (Welded)</td> </tr> <tr> <td>40 Channel or Bonnet</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td colspan="4"></td> <td>Shell Cover</td> <td colspan="8">K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>41 Tubesheet - Stationary</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td colspan="4"></td> <td>Channel Cover</td> <td colspan="8">K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>42 Floating Head Cover</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td colspan="4"></td> <td>Tubesheet - Floating</td> <td colspan="8">K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>43 Baffles - Cross</td> <td colspan="2">C.S.</td> <td>Type</td> <td colspan="4">HOR. SEC.</td> <td>Impingement Protection</td> <td colspan="8">YES</td> </tr> <tr> <td>44 Baffles - Long</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="4"></td> <td>% Cut</td> <td>27,5 (Dia.)</td> <td>Spacing (c/c)</td> <td>649</td> <td>mm</td> <td>Inlet</td> <td>710</td> <td>mm</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>45 Supports - Tube</td> <td colspan="2">C.S.</td> <td colspan="4"></td> <td>Seal Type</td> <td colspan="8">-</td> </tr> <tr> <td>46 Bypass Seal Arrangement</td> <td colspan="2">2 PAIRS OF SEAL STRIPS</td> <td colspan="4"></td> <td>Type</td> <td colspan="8">FLOATING HEAD</td> </tr> <tr> <td>47 Expansion Joint</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="4"></td> <td>Tube - Tubesheet Joint</td> <td colspan="8">TWO GROOVES &amp; EXPANDED</td> </tr> <tr> <td>48 Gaskets - Shell Side</td> <td colspan="2">STL JKTD.</td> <td>Tube Side</td> <td colspan="4">STL JKTD.</td> <td>Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube)</td> <td colspan="8">-</td> </tr> <tr> <td>49 Code Requirements</td> <td colspan="2">ASME SECT. VIII DIV. 1</td> <td colspan="4"></td> <td>Floating Head</td> <td colspan="8">SOLID METAL</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="4"></td> <td>Stamp</td> <td colspan="4">YES</td> <td>TEMA Class</td> <td colspan="3">"R"</td> </tr> </table>										37 Tube No.	550	OD	25,4	mm	Thk	2,11	mm (Min.)	Length	7310	mm	Pitch	31,75	mm	Flow Angle	90	Deg.	38 Tube Type	STRAIGHT																39 Shell	K.C.S.		ID	1030	OD	-	mm	Material	C.S. (Welded)								40 Channel or Bonnet	K.C.S.						Shell Cover	K.C.S.								41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.						Channel Cover	K.C.S.								42 Floating Head Cover	K.C.S.						Tubesheet - Floating	K.C.S.								43 Baffles - Cross	C.S.		Type	HOR. SEC.				Impingement Protection	YES								44 Baffles - Long	-						% Cut	27,5 (Dia.)	Spacing (c/c)	649	mm	Inlet	710	mm			45 Supports - Tube	C.S.						Seal Type	-								46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS						Type	FLOATING HEAD								47 Expansion Joint	-						Tube - Tubesheet Joint	TWO GROOVES & EXPANDED								48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.		Tube Side	STL JKTD.				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube)	-								49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1						Floating Head	SOLID METAL															Stamp	YES				TEMA Class	"R"		
37 Tube No.	550	OD	25,4	mm	Thk	2,11	mm (Min.)	Length	7310	mm	Pitch	31,75	mm	Flow Angle	90	Deg.																																																																																																																																																																																																																															
38 Tube Type	STRAIGHT																																																																																																																																																																																																																																														
39 Shell	K.C.S.		ID	1030	OD	-	mm	Material	C.S. (Welded)																																																																																																																																																																																																																																						
40 Channel or Bonnet	K.C.S.						Shell Cover	K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																							
41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.						Channel Cover	K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																							
42 Floating Head Cover	K.C.S.						Tubesheet - Floating	K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																							
43 Baffles - Cross	C.S.		Type	HOR. SEC.				Impingement Protection	YES																																																																																																																																																																																																																																						
44 Baffles - Long	-						% Cut	27,5 (Dia.)	Spacing (c/c)	649	mm	Inlet	710	mm																																																																																																																																																																																																																																	
45 Supports - Tube	C.S.						Seal Type	-																																																																																																																																																																																																																																							
46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS						Type	FLOATING HEAD																																																																																																																																																																																																																																							
47 Expansion Joint	-						Tube - Tubesheet Joint	TWO GROOVES & EXPANDED																																																																																																																																																																																																																																							
48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.		Tube Side	STL JKTD.				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube)	-																																																																																																																																																																																																																																						
49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1						Floating Head	SOLID METAL																																																																																																																																																																																																																																							
							Stamp	YES				TEMA Class	"R"																																																																																																																																																																																																																																		
																																																																																																																																																																																																																																															
REMARKS:																																																																																																																																																																																																																																															
(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.																																																																																																																																																																																																																																															
(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.																																																																																																																																																																																																																																															
54																																																																																																																																																																																																																																															
55																																																																																																																																																																																																																																															
56																																																																																																																																																																																																																																															
57																																																																																																																																																																																																																																															
58																																																																																																																																																																																																																																															
59																																																																																																																																																																																																																																															
60																																																																																																																																																																																																																																															
61																																																																																																																																																																																																																																															

Figura E.1. Hoja de datos del Intercambiador E-101

SPECIFICATION SHEET										
SHELL AND TUBE EXCHANGER										
REVISION	Form EXCHST01					Job No. _____ Page 1 of 1				
						Client _____				
						Location _____				
						Item No. _____				
					Process Unit _____					
					Fabricator _____					
1 Service of Unit <b>DEBUTANIZER OVERHEAD PRODUCT COOLER</b> No. of Units <b>1</b>										
2 Size <b>584-6100</b> Type <b>AES (Horizontal)</b> Connected in <b>1</b> Parallel <b>2</b> Series _____										
3 Surface/Unit (Eff.) <b>214</b> m <sup>2</sup> Shells/Unit <b>2</b> Surface/Shell (Eff.) <b>107</b> m <sup>2</sup>										
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>										
5 Fluid Allocation					<b>SHELL SIDE</b>			<b>TUBE SIDE</b>		
6 Fluid Name					<b>C3C4 LPG</b>			<b>COOLING WATER</b>		
7 Fluid Quantity, Total					<b>82739</b>			<b>91480</b>		
8 Vapor (In/Out)					-			-		
9 Liquid					<b>82739</b>			<b>82739</b>		
10 Steam					-			-		
11 Water					-			<b>91480</b>		
12 Noncondensable (MW)					-			-		
13 Temperature (In/Out)					<b>53,0</b>			<b>37,8</b>		
14 Density (Vapor/Liquid)					-			<b>504,48</b>		
15 Viscosity (Vapor/Liquid)					-			<b>0,1</b>		
16 Molecular Weight, Vapor					-			<b>0,11</b>		
17 Specific Heat (Vapor/Liquid)					-			<b>0,631</b>		
18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)					-			<b>0,093</b>		
19										
20										
21 Latent Heat					-			-		
22 Inlet Pressure					-			-		
23 Velocity					-			<b>0,99</b>		
24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)					<b>0,7</b>			<b>0,7</b>		
25 Fouling Resistance (Min.)					<b>0,0002</b>			<b>0,0007</b>		
26 Heat Exchanged					<b>781000</b> kcal/hr			MTD (Connected) (Weighted) <b>6,7</b> °C		
27 Transfer Rate (Service/Clean)					<b>545</b>			kcal/hr m <sup>2</sup> °C		
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>										
29					<b>SHELL SIDE</b>			<b>TUBE SIDE</b>		
30 Design Pressure					<b>22,0</b>			<b>14,7</b>		
31 Design Temperature (Max/Min)					<b>149 / -12</b>			<b>149 / -12</b>		
32 Corrosion Allowance					<b>3</b>			<b>3</b>		
33 No. of Passes per Shell					<b>1</b>			<b>2</b>		
34 Connections					In <b>6"-300# RF</b>			Out <b>4"-150# RF</b>		
35 Size & Rating					Out <b>6"-300# RF</b>			In <b>4"-150# RF</b>		
36					Intermediate <b>6"-300# RF</b>			In <b>4"-150# RF</b>		
37 Tube No. <b>300</b> OD <b>19,05</b> mm Thk <b>2,11</b> mm (Avg.)					Length <b>6100</b> mm Pitch <b>25,4</b> mm Flow Angle <b>90</b> Deg.					
38 Tube Type <b>STRAIGHT</b>					Material <b>SB-111 (UNS C44300)</b>					
39 Shell <b>K.C.S.</b> ID <b>584</b> OD <b>610</b> mm					Shell Cover <b>K.C.S.</b> (Remov.)					
40 Channel or Bonnet <b>C.S. (3)</b>					Channel Cover <b>C.S.</b>					
41 Tubesheet - Stationary <b>K.C.S.</b>					Tubesheet - Floating <b>K.C.S.</b>					
42 Floating Head Cover <b>K.C.S.</b>					Impingement Protection <b>YES</b>					
43 Baffles - Cross <b>MUNTZ</b> Type <b>HOR. SEG.</b>					% Cut <b>20,6 (Dia.)</b> Spacing (c/c) <b>256</b> mm Inlet <b>560</b> mm					
44 Baffles - Long					Seal Type <b>-</b>					
45 Supports - Tube <b>MUNTZ</b>					Type <b>FLOATING HEAD</b>					
46 Bypass Seal Arrangement <b>2 PAIRS OF SEAL STRIPS</b>					Tube - Tubesheet Joint <b>TWO GROOVES &amp; EXPANDED</b>					
47 Expansion Joint					Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) <b>-</b> °C					
48 Gaskets - Shell Side <b>STL JKTD.</b> Tube Side <b>STL JKTD.</b>					Floating Head <b>SOLID METAL</b>					
49 Code Requirements <b>ASME SECT. VIII DIV. 1</b>					Stamp <b>YES</b> TEMA Class <b>"R"</b>					
50 REMARKS:										
51 (1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.										
52 (2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR										
53 QUOTATION.										
54 (3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.										
55										
56										
57										
58										
59										
60										
61										

Figura E.2. Hoja de datos del Intercambiador E-102

SPECIFICATION SHEET										
SHELL AND TUBE EXCHANGER										
REVISION	Form EXCHST0				Job No.		Page 1 of 2			
					Client					
				Location						
				Item No.						
				Process Unit		FCCU				
				Fabricator						
1	Service of Unit <b>DEPROPANIZER FEED/DEBUTANIZER BOTTOMS EXCHANGER</b>								No. of Units <b>1</b>	
2	Size <b>690-4880</b>		Type <b>AET (Horizontal)</b>		Connected in <b>1</b>		Parallel		Series <b>1</b>	
3	Surface/Unit (EFT) <b>98</b>		Shells/Unit <b>1</b>		Surface/Shell (EFT) <b>98</b>				m <sup>2</sup>	
4	<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>									
5	Fluid Allocation				SHELL SIDE			TUBE SIDE		
6	Fluid Name				DEPROPANIZER FEED			DEBUTANIZER BOTTOMS		
7	Fluid Quantity, Total				81946			192900		
8	Vapor (In/Out)				-			-		
9	Liquid				81946			192900		
10	Steam				-			-		
11	Water				-			-		
12	Noncondensable (MW)				-			-		
13	Temperature (In/Out)				38,3			141,6		
14	Density (Vapor/Liquid)				529,95			465,65		
15	Viscosity (Vapor/Liquid)				0,11			0,17		
16	Molecular Weight, Vapor				-			47,8		
17	Specific Heat (Vapor/Liquid)				0,6			0,576		
18	Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)				0,101			0,082		
19										
20										
21	Latent Heat				62,1			-		
22	Inlet Pressure				19,67			-		
23	Velocity				-			2,91		
24	Pressure Drop (Allowable/Calculated)				0,7			0,7		
25	Fouling Resistance (Min)				0,0004			0,0004		
26	Heat Exchanged <b>3256000</b>				kcal/hr		MTD (Corrected) (Weighted) <b>59,3</b>		°C	
27	Transfer Rate (Service/Clean) <b>580</b>				kcal/hr m <sup>2</sup> °C					
28	<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>									
29					SHELL SIDE			TUBE SIDE		
30	Design Pressure				22,0			15,8		
31	Design Temperature (Max/Min)				343 / -12			343 / -12		
32	Corrosion Allowance				3			3		
33	No. of Passes per Shell				1			2		
34	Connections		In		6"-300# RF			8"-300# RF		
35	Size & Rating		Out		8"-300# RF			8"-300# RF		
36										
37	Tube No. <b>342</b>				OD <b>19,05</b>		mm Thk <b>2,11</b>		mm (Min.)	
38	Tube Type <b>STRAIGHT</b>				Length <b>4880</b>		mm Pitch <b>25,4</b>		mm Flow Angle <b>90</b>	
39	Shell <b>K.C.S.</b>				ID <b>690</b>		OD <b>-</b>		mm	
40	Chammel or Bonnet <b>K.C.S.</b>				Shell Cover <b>K.C.S.</b>				<b>(Remov.)</b>	
41	Tubesheet - Stationary <b>K.C.S.</b>				Tubesheet - Floating <b>K.C.S.</b>					
42	Floating Head Cover <b>K.C.S.</b>				Impingement Protection <b>YES</b>					
43	Baffles - Cross <b>C.S.</b>				Type <b>HOR. SEC.</b>		% Cut <b>25,6 (Dia.)</b>		Spacing (c/c) <b>196</b> mm Inlet <b>560</b> mm	
44	Baffles - Long <b>-</b>				Seal Type <b>-</b>					
45	Supports - Tube <b>C.S.</b>				Type <b>FLOATING HEAD</b>					
46	Bypass Seal Arrangement <b>2 PAIRS OF SEAL STRIPS</b>				Tube - Tubesheet Joint <b>TWO GROOVES &amp; EXPANDED</b>					
47	Expansion Joint <b>-</b>				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) <b>-</b>				°C	
48	Gaskets - Shell Side <b>STL JKTD.</b>				Tube Side <b>STL JKTD.</b>		Floating Head <b>SOLID METAL</b>			
49	Code Requirements <b>ASME SECT. VIII DIV. 1</b>				Stamp <b>YES</b>		TEMA Class <b>"R"</b>			
50	REMARKS:									
51	(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.									
52	(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.									
53										
54										
55										
56										
57										
58										
59										
60										
61										

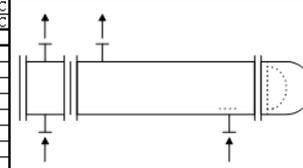


Figura E.3 Hoja de datos del Intercambiador E-103

SPECIFICATION SHEET																																								
SHELL AND TUBE EXCHANGER																																								
REVISION	Form EXCHSTD1																																							
						Job No. _____ Page 1 of 1																																		
						Client _____																																		
						Location _____																																		
					Item No. _____																																			
					Process Unit _____																																			
					Fabricator _____																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1 Service of Unit</td> <td colspan="8">DEPROPANIZER BOTTOMS COOLER</td> <td>No. of Units</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Size</td> <td>740-4880</td> <td>Type</td> <td>AET (Horizontal)</td> <td>Connected in</td> <td>1</td> <td>Parallel</td> <td>2</td> <td>Series</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3 Surface/Unit (Eff.)</td> <td>218</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Shells/Unit</td> <td>2</td> <td>Surface/Shell (Eff.)</td> <td colspan="2">109</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td></td> </tr> </table>										1 Service of Unit	DEPROPANIZER BOTTOMS COOLER								No. of Units	1	2 Size	740-4880	Type	AET (Horizontal)	Connected in	1	Parallel	2	Series		3 Surface/Unit (Eff.)	218	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	2	Surface/Shell (Eff.)	109		m <sup>2</sup>	
1 Service of Unit	DEPROPANIZER BOTTOMS COOLER								No. of Units	1																														
2 Size	740-4880	Type	AET (Horizontal)	Connected in	1	Parallel	2	Series																																
3 Surface/Unit (Eff.)	218	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	2	Surface/Shell (Eff.)	109		m <sup>2</sup>																																
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>																																								
Fluid Allocation			SHELL SIDE				TUBE SIDE																																	
Fluid Name			DEPROPANIZER BOTTOMS				COOLING WATER																																	
Fluid Quantity, Total			48962				199038																																	
Vapor (In/Out)			-				-																																	
Liquid			48962				48962																																	
Steam			-				-																																	
Water			-				199038																																	
Noncondensable (MW)			-				-																																	
Temperature (In/Out)			102,1				38,0																																	
Density (Vapor/Liquid)			463,38				567,09																																	
Viscosity (Vapor/Liquid)			0,07				0,14																																	
Molecular Weight, Vapor			-				-																																	
Specific Heat (Vapor/Liquid)			0,722				0,58																																	
Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)			0,077				0,105																																	
Latent Heat			-				-																																	
Inlet Pressure			-				-																																	
Velocity			-				1,68																																	
Pressure Drop (Allowable/Calculated)			0,4				0,2																																	
Fouling Resistance (Min.)			0,0002				0,0007																																	
Heat Exchanged			1991000				18,6																																	
Transfer Rate (Service/Clean)			491				18,6																																	
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>																																								
Design Pressure			20,7				13,8																																	
Design Temperature (Max/Min)			149 / -12				149 / -12																																	
Corrosion Allowance			3				3																																	
No. of Passes per Shell			1				2																																	
Connections			6"-300# RF				6"-150# RF																																	
Size & Rating			6"-300# RF				6"-150# RF																																	
Tube No.			384				4880																																	
Tube Type			STRAIGHT				SB-111 (UNS C44300)																																	
Shell			K.C.S.				K.C.S.																																	
Channel or Bonnet			C.S. (3)				C.S.																																	
Tubesheet - Stationary			K.C.S.				K.C.S.																																	
Floating Head Cover			K.C.S.				YES																																	
Baffles - Cross			MUNTZ				Type HOR. SEG.																																	
Baffles - Long			-				Seal Type -																																	
Supports - Tube			MUNTZ				Type FLOATING HEAD																																	
Bypass Seal Arrangement			3 PAIRS OF SEAL STRIPS				Tube - Tubesheet Joint TWO GROOVES & EXPANDED																																	
Expansion Joint			-				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) -																																	
Gaskets - Shell Side			STL JKTD.				Tube Side STL JKTD.																																	
Code Requirements			ASME SECT. VIII DIV. 1				Stamp YES																																	
REMARKS:																																								
(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.																																								
(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.																																								
(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.																																								

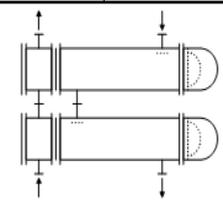


Figura E.4 Hoja de datos del Intercambiador E-104

SPECIFICATION SHEET																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
SHELL AND TUBE EXCHANGER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
REVISION	(MKH Units)					Job No. _____ Page 1 of 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
						Client _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
						Location _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
						Item No. _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
						Process Unit FCCU																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
					Fabricator _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1</td> <td>Service of Unit</td> <td colspan="6">DEBUTANIZER BOTTOMS TRIM COOLER</td> <td>No. of Units</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Size</td> <td>980-7310</td> <td>Type</td> <td colspan="2">AET (Horizontal)</td> <td>Connected in</td> <td>1</td> <td>Parallel</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Surface/Unit (Eff.)</td> <td>702</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Shells/Unit</td> <td>2</td> <td>Surface/Shell (Eff.)</td> <td colspan="2"></td> <td>351</td> </tr> <tr> <td colspan="10" style="text-align: center;"><b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Fluid Allocation</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">SHELL SIDE</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">TUBE SIDE</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Fluid Name</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">DEBUTANIZER BOTTOMS</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">COOLING WATER</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Fluid Quantity, Total</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">192900</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">192900</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">399538</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">399538</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Vapor (In/Out)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Liquid</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">192900</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">192900</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>Steam</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>Water</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">399538</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">399538</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>Noncondensable (MW)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>Temperature (In/Out)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">78,0</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">37,8</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">33,0</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">43,0</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>Density (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">706,73</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">744,82</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>Viscosity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,275</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,41</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>Molecular Weight, Vapor</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>Specific Heat (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,518</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,482</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,098</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,108</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>Latent Heat</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>Inlet Pressure</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>Velocity</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1,58</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>Pressure Drop (Allowable/Calculated)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,4</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,4</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1,1</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1,1</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>Fouling Resistance (Min.)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,0006</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">0,0007</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>Heat Exchanged</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">3990000</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">13,5</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>Transfer Rate (Service/Clean)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">421</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td colspan="10" style="text-align: center;"><b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="4" style="text-align: center;">SHELL SIDE</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">TUBE SIDE</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>Design Pressure</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">15,8</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">10,4</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>Design Temperature (Max/Min)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">160 / -12</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">149 / -12</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>32</td> <td>Corrosion Allowance</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">3</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">3</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>33</td> <td>No. of Passes per Shell</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">2</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>34</td> <td>Connections</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">8" - 300# RF</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">10" - 150# RF</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>Size &amp; Rating</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">8" - 300# RF</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">10" - 150# RF</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td>37</td> <td>Tube No.</td> <td>820</td> <td>OD 19.05</td> <td>mm Thk 2.11</td> <td>mm (Avg.)</td> <td>Length 7310</td> <td>mm Pitch 25.4</td> <td>mm Flow Angle 90</td> <td>Deg.</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>Tube Type</td> <td colspan="8">STRAIGHT</td> </tr> <tr> <td>39</td> <td>Shell</td> <td colspan="4">K.C.S.</td> <td colspan="4">Material SB-111 (UNS C44300)</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>Channel or Bonnet</td> <td colspan="4">C.S. (3)</td> <td colspan="4">Shell Cover K.C.S. (Remov.)</td> </tr> <tr> <td>41</td> <td>Tubesheet - Stationary</td> <td colspan="4">K.C.S.</td> <td colspan="4">Channel Cover C.S.</td> </tr> <tr> <td>42</td> <td>Floating Head Cover</td> <td colspan="4">K.C.S.</td> <td colspan="4">Tubesheet - Floating K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>43</td> <td>Baffles - Cross</td> <td colspan="2">MUNTZ</td> <td>Type HOR. SEC.</td> <td></td> <td colspan="2">Impingement Protection YES</td> <td colspan="2">% Cut 22,4 (Dia.) Spacing (c/c) 545 mm Inlet 610 mm</td> </tr> <tr> <td>44</td> <td>Baffles - Long</td> <td colspan="2">-</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2">Seal Type -</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>Supports - Tube</td> <td colspan="2">MUNTZ</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2">Type FLOATING HEAD</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>46</td> <td>Bypass Seal Arrangement</td> <td colspan="4">3 PAIRS OF SEAL STRIPS</td> <td colspan="4">Tube - Tubesheet Joint TWO GROOVES &amp; EXPANDED</td> </tr> <tr> <td>47</td> <td>Expansion Joint</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) - °C</td> </tr> <tr> <td>48</td> <td>Gaskets - Shell Side</td> <td colspan="2">STL JKTD.</td> <td>Tube Side</td> <td>STL JKTD.</td> <td colspan="2">Floating Head</td> <td colspan="2">SOLID METAL</td> </tr> <tr> <td>49</td> <td>Code Requirements</td> <td colspan="4">ASME SECT. VIII DIV. 1</td> <td colspan="2">Stamp YES</td> <td colspan="2">TEMA Class "R"</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td colspan="10">REMARKS:</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td colspan="10">(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.</td> </tr> <tr> <td>52</td> <td colspan="10">(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.</td> </tr> <tr> <td>53</td> <td colspan="10">(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.</td> </tr> <tr> <td>54</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>55</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>56</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>57</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>58</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>59</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>60</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>61</td> <td colspan="10"></td> </tr> </table>										1	Service of Unit	DEBUTANIZER BOTTOMS TRIM COOLER						No. of Units	1	2	Size	980-7310	Type	AET (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	2	3	Surface/Unit (Eff.)	702	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	2	Surface/Shell (Eff.)			351	<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>										Fluid Allocation		SHELL SIDE				TUBE SIDE				Fluid Name		DEBUTANIZER BOTTOMS				COOLING WATER				7	Fluid Quantity, Total	192900		192900		399538		399538		8	Vapor (In/Out)	-		-		-		-		9	Liquid	192900		192900		-		-		10	Steam	-		-		-		-		11	Water	-		-		399538		399538		12	Noncondensable (MW)	-		-		-		-		13	Temperature (In/Out)	78,0		37,8		33,0		43,0		14	Density (Vapor/Liquid)	706,73		-		744,82		-		15	Viscosity (Vapor/Liquid)	0,275		-		0,41		-		16	Molecular Weight, Vapor	-		-		-		-		17	Specific Heat (Vapor/Liquid)	0,518		-		0,482		-		18	Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,098		-		0,108		-		19		-		-		-		-		20	Latent Heat	-		-		-		-		21	Inlet Pressure	-		-		-		-		22	Velocity	-		-		1,58		-		23	Pressure Drop (Allowable/Calculated)	0,4		0,4		1,1		1,1		24	Fouling Resistance (Min.)	-		0,0006		-		0,0007		25	Heat Exchanged	3990000		-		13,5		-		26	Transfer Rate (Service/Clean)	421		-		-		-		27		-		-		-		-		<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>												SHELL SIDE				TUBE SIDE				30	Design Pressure	15,8		-		10,4		-		31	Design Temperature (Max/Min)	160 / -12		-		149 / -12		-		32	Corrosion Allowance	3		-		3		-		33	No. of Passes per Shell	1		-		2		-		34	Connections	8" - 300# RF		-		10" - 150# RF		-		35	Size & Rating	8" - 300# RF		-		10" - 150# RF		-		36		-		-		-		-		37	Tube No.	820	OD 19.05	mm Thk 2.11	mm (Avg.)	Length 7310	mm Pitch 25.4	mm Flow Angle 90	Deg.	38	Tube Type	STRAIGHT								39	Shell	K.C.S.				Material SB-111 (UNS C44300)				40	Channel or Bonnet	C.S. (3)				Shell Cover K.C.S. (Remov.)				41	Tubesheet - Stationary	K.C.S.				Channel Cover C.S.				42	Floating Head Cover	K.C.S.				Tubesheet - Floating K.C.S.				43	Baffles - Cross	MUNTZ		Type HOR. SEC.		Impingement Protection YES		% Cut 22,4 (Dia.) Spacing (c/c) 545 mm Inlet 610 mm		44	Baffles - Long	-				Seal Type -				45	Supports - Tube	MUNTZ				Type FLOATING HEAD				46	Bypass Seal Arrangement	3 PAIRS OF SEAL STRIPS				Tube - Tubesheet Joint TWO GROOVES & EXPANDED				47	Expansion Joint	-				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) - °C				48	Gaskets - Shell Side	STL JKTD.		Tube Side	STL JKTD.	Floating Head		SOLID METAL		49	Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1				Stamp YES		TEMA Class "R"		50	REMARKS:										51	(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.										52	(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.										53	(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.										54											55											56											57											58											59											60											61										
1	Service of Unit	DEBUTANIZER BOTTOMS TRIM COOLER						No. of Units	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2	Size	980-7310	Type	AET (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3	Surface/Unit (Eff.)	702	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	2	Surface/Shell (Eff.)			351																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Fluid Allocation		SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Fluid Name		DEBUTANIZER BOTTOMS				COOLING WATER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
7	Fluid Quantity, Total	192900		192900		399538		399538																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
8	Vapor (In/Out)	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
9	Liquid	192900		192900		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
10	Steam	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
11	Water	-		-		399538		399538																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
12	Noncondensable (MW)	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
13	Temperature (In/Out)	78,0		37,8		33,0		43,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
14	Density (Vapor/Liquid)	706,73		-		744,82		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
15	Viscosity (Vapor/Liquid)	0,275		-		0,41		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
16	Molecular Weight, Vapor	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
17	Specific Heat (Vapor/Liquid)	0,518		-		0,482		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
18	Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,098		-		0,108		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
19		-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
20	Latent Heat	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
21	Inlet Pressure	-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
22	Velocity	-		-		1,58		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
23	Pressure Drop (Allowable/Calculated)	0,4		0,4		1,1		1,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
24	Fouling Resistance (Min.)	-		0,0006		-		0,0007																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
25	Heat Exchanged	3990000		-		13,5		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
26	Transfer Rate (Service/Clean)	421		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
27		-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
30	Design Pressure	15,8		-		10,4		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
31	Design Temperature (Max/Min)	160 / -12		-		149 / -12		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
32	Corrosion Allowance	3		-		3		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
33	No. of Passes per Shell	1		-		2		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
34	Connections	8" - 300# RF		-		10" - 150# RF		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
35	Size & Rating	8" - 300# RF		-		10" - 150# RF		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
36		-		-		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
37	Tube No.	820	OD 19.05	mm Thk 2.11	mm (Avg.)	Length 7310	mm Pitch 25.4	mm Flow Angle 90	Deg.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
38	Tube Type	STRAIGHT																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
39	Shell	K.C.S.				Material SB-111 (UNS C44300)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
40	Channel or Bonnet	C.S. (3)				Shell Cover K.C.S. (Remov.)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
41	Tubesheet - Stationary	K.C.S.				Channel Cover C.S.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
42	Floating Head Cover	K.C.S.				Tubesheet - Floating K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
43	Baffles - Cross	MUNTZ		Type HOR. SEC.		Impingement Protection YES		% Cut 22,4 (Dia.) Spacing (c/c) 545 mm Inlet 610 mm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
44	Baffles - Long	-				Seal Type -																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
45	Supports - Tube	MUNTZ				Type FLOATING HEAD																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
46	Bypass Seal Arrangement	3 PAIRS OF SEAL STRIPS				Tube - Tubesheet Joint TWO GROOVES & EXPANDED																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
47	Expansion Joint	-				Metal Temp. for Expansion (Shell/Tube) - °C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
48	Gaskets - Shell Side	STL JKTD.		Tube Side	STL JKTD.	Floating Head		SOLID METAL																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
49	Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1				Stamp YES		TEMA Class "R"																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
50	REMARKS:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
51	(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
52	(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
53	(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

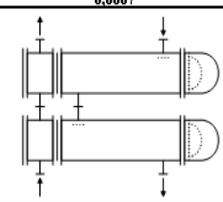


Figura E.5 Hoja de datos del Intercambiador E-105

SPECIFICATION SHEET																																																																																																																																																																																																																																																							
SHELL AND TUBE EXCHANGER																																																																																																																																																																																																																																																							
R E V I S I O N	Form (MKH Units)				Job No. _____ Page 1 of 1																																																																																																																																																																																																																																																		
					Client _____																																																																																																																																																																																																																																																		
					Location _____																																																																																																																																																																																																																																																		
					Item No. _____																																																																																																																																																																																																																																																		
					Process Unit FCCU																																																																																																																																																																																																																																																		
				Fabricator _____																																																																																																																																																																																																																																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1 Service of Unit</td> <td colspan="8">PROPANE PRODUCT COOLER</td> <td>No. of Units</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Size</td> <td>356-6096</td> <td>Type</td> <td colspan="2">BES (Horizontal)</td> <td>Connected in</td> <td>1</td> <td>Parallel</td> <td>1</td> <td>Series</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>3 Surface/Unit (Eff.)</td> <td>30</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Shells/Unit</td> <td>1</td> <td>Surface/Shell (Eff.)</td> <td>30</td> <td colspan="4">m<sup>2</sup></td> </tr> </table>										1 Service of Unit	PROPANE PRODUCT COOLER								No. of Units	1	2 Size	356-6096	Type	BES (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	1	Series	-	3 Surface/Unit (Eff.)	30	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (Eff.)	30	m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																																
1 Service of Unit	PROPANE PRODUCT COOLER								No. of Units	1																																																																																																																																																																																																																																													
2 Size	356-6096	Type	BES (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	1	Series	-																																																																																																																																																																																																																																													
3 Surface/Unit (Eff.)	30	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (Eff.)	30	m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																																																																
PERFORMANCE OF ONE UNIT																																																																																																																																																																																																																																																							
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> <tr> <th colspan="4">PROPANE PRODUCT</th> <th colspan="4">COOLING WATER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 Fluid Allocation</td> <td colspan="4">6164</td> <td colspan="4">20057</td> </tr> <tr> <td>6 Fluid Name</td> <td colspan="4">PROPANE PRODUCT</td> <td colspan="4">COOLING WATER</td> </tr> <tr> <td>7 Fluid Quantity, Total</td> <td colspan="4">6164</td> <td colspan="4">20057</td> </tr> <tr> <td>8 Vapor (In/Out)</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>9 Liquid</td> <td colspan="4">6164</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>10 Steam</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>11 Water</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">20057</td> </tr> <tr> <td>12 Noncondensable (MW)</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">20057</td> </tr> <tr> <td>13 Temperature (In/Out)</td> <td colspan="2">60,0</td> <td colspan="2">37,7</td> <td colspan="2">33,0</td> <td colspan="2">37,8</td> </tr> <tr> <td>14 Density (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">496,6</td> <td colspan="2">802,3</td> <td colspan="2">994,99</td> <td colspan="2">993,36</td> </tr> <tr> <td>15 Viscosity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,00007</td> <td colspan="2">0,00009</td> <td colspan="2">0,00074</td> <td colspan="2">0,00068</td> </tr> <tr> <td>16 Molecular Weight, Vapor</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>17 Specific Heat (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">3234,5</td> <td colspan="2">2749,7</td> <td colspan="2">4177,7</td> <td colspan="2">4177,1</td> </tr> <tr> <td>18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,083</td> <td colspan="2">0,089</td> <td colspan="2">0,6198</td> <td colspan="2">0,6261</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>21 Latent Heat</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>22 Inlet Pressure</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>23 Velocity</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">0,99</td> </tr> <tr> <td>24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)</td> <td colspan="2">19,61</td> <td colspan="2">18,9</td> <td colspan="2">98,1</td> <td colspan="2">93,87</td> </tr> <tr> <td>25 Fouling Resistances (Min.)</td> <td colspan="4">0,000171</td> <td colspan="4">0,000603</td> </tr> <tr> <td>26 Heat Exchanged</td> <td>116403</td> <td>W</td> <td colspan="2">MTD (Corrected) (Weighted)</td> <td>6,0</td> <td colspan="4">°C</td> </tr> <tr> <td>27 Transfer Rate (Service/Clean)</td> <td>453,57</td> <td colspan="2">kcal/hr m<sup>2</sup> °C</td> <td colspan="6"></td> </tr> </tbody> </table>											SHELL SIDE				TUBE SIDE				PROPANE PRODUCT				COOLING WATER				5 Fluid Allocation	6164				20057				6 Fluid Name	PROPANE PRODUCT				COOLING WATER				7 Fluid Quantity, Total	6164				20057				8 Vapor (In/Out)	-				-				9 Liquid	6164				-				10 Steam	-				-				11 Water	-				20057				12 Noncondensable (MW)	-				20057				13 Temperature (In/Out)	60,0		37,7		33,0		37,8		14 Density (Vapor/Liquid)	496,6		802,3		994,99		993,36		15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,00007		0,00009		0,00074		0,00068		16 Molecular Weight, Vapor	-				-				17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	3234,5		2749,7		4177,7		4177,1		18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,083		0,089		0,6198		0,6261		19	-				-				20	-				-				21 Latent Heat	-				-				22 Inlet Pressure	-				-				23 Velocity	-				0,99				24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	19,61		18,9		98,1		93,87		25 Fouling Resistances (Min.)	0,000171				0,000603				26 Heat Exchanged	116403	W	MTD (Corrected) (Weighted)		6,0	°C				27 Transfer Rate (Service/Clean)	453,57	kcal/hr m <sup>2</sup> °C																			
	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																		
	PROPANE PRODUCT				COOLING WATER																																																																																																																																																																																																																																																		
5 Fluid Allocation	6164				20057																																																																																																																																																																																																																																																		
6 Fluid Name	PROPANE PRODUCT				COOLING WATER																																																																																																																																																																																																																																																		
7 Fluid Quantity, Total	6164				20057																																																																																																																																																																																																																																																		
8 Vapor (In/Out)	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
9 Liquid	6164				-																																																																																																																																																																																																																																																		
10 Steam	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
11 Water	-				20057																																																																																																																																																																																																																																																		
12 Noncondensable (MW)	-				20057																																																																																																																																																																																																																																																		
13 Temperature (In/Out)	60,0		37,7		33,0		37,8																																																																																																																																																																																																																																																
14 Density (Vapor/Liquid)	496,6		802,3		994,99		993,36																																																																																																																																																																																																																																																
15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,00007		0,00009		0,00074		0,00068																																																																																																																																																																																																																																																
16 Molecular Weight, Vapor	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	3234,5		2749,7		4177,7		4177,1																																																																																																																																																																																																																																																
18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,083		0,089		0,6198		0,6261																																																																																																																																																																																																																																																
19	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
20	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
21 Latent Heat	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
22 Inlet Pressure	-				-																																																																																																																																																																																																																																																		
23 Velocity	-				0,99																																																																																																																																																																																																																																																		
24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	19,61		18,9		98,1		93,87																																																																																																																																																																																																																																																
25 Fouling Resistances (Min.)	0,000171				0,000603																																																																																																																																																																																																																																																		
26 Heat Exchanged	116403	W	MTD (Corrected) (Weighted)		6,0	°C																																																																																																																																																																																																																																																	
27 Transfer Rate (Service/Clean)	453,57	kcal/hr m <sup>2</sup> °C																																																																																																																																																																																																																																																					
CONSTRUCTION OF ONE SHELL																																																																																																																																																																																																																																																							
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>29 Design Pressure</td> <td colspan="2">2884,1</td> <td colspan="2">2221,0</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>30 Design Temperature (Max/Min)</td> <td colspan="2">130</td> <td colspan="2">-12</td> <td colspan="4">130 / -12</td> </tr> <tr> <td>31 Corrosion Allowance</td> <td colspan="4">3</td> <td colspan="4">3</td> </tr> <tr> <td>32 No. of Passes per Shell</td> <td colspan="4">1</td> <td colspan="4">4</td> </tr> <tr> <td>33 Connections</td> <td colspan="2">In</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="2">Out</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> </tr> <tr> <td>34 Size &amp; Rating</td> <td colspan="2">Intermediate</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="2">Intermediate</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> </tr> </tbody> </table>											SHELL SIDE				TUBE SIDE				29 Design Pressure	2884,1		2221,0						30 Design Temperature (Max/Min)	130		-12		130 / -12				31 Corrosion Allowance	3				3				32 No. of Passes per Shell	1				4				33 Connections	In		4"-300# RF		Out		4"-300# RF		34 Size & Rating	Intermediate		4"-300# RF		Intermediate		4"-300# RF																																																																																																																																																																																
	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																		
	29 Design Pressure	2884,1		2221,0																																																																																																																																																																																																																																																			
30 Design Temperature (Max/Min)	130		-12		130 / -12																																																																																																																																																																																																																																																		
31 Corrosion Allowance	3				3																																																																																																																																																																																																																																																		
32 No. of Passes per Shell	1				4																																																																																																																																																																																																																																																		
33 Connections	In		4"-300# RF		Out		4"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																																
34 Size & Rating	Intermediate		4"-300# RF		Intermediate		4"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																																
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>37 Tube No.</td> <td>84</td> <td>OD</td> <td>19,05</td> <td>mm</td> <td>Thk</td> <td>2,11</td> <td>mm (Avg.)</td> <td>Length</td> <td>6</td> <td>mm</td> <td>Fitch</td> <td>25,4</td> <td>mm</td> <td>Flow Angle</td> <td>30</td> <td>Deg.</td> </tr> <tr> <td>38 Tube Type</td> <td colspan="16">STRAIGHT</td> </tr> <tr> <td>39 Shell</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td>ID</td> <td>355</td> <td>OD</td> <td>368</td> <td>mm</td> <td>Material</td> <td colspan="8">SB-111 (UNS C44300)</td> </tr> <tr> <td>40 Channel or Bonnet</td> <td colspan="2">C.S. (3)</td> <td colspan="13">Channel Cover</td> <td>C.S.</td> </tr> <tr> <td>41 Tubesheet - Stationary</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td colspan="13">Tubesheet - Floating</td> <td>K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>42 Floating Head Cover</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td colspan="13">Impingement Protection</td> <td>YES</td> </tr> <tr> <td>43 Baffles - Cross</td> <td colspan="2">MUNTZ</td> <td>Type</td> <td colspan="12">HOR. SEC.</td> <td>% Cut</td> <td>17,5 (Dia.)</td> <td>Spacing (c/c)</td> <td>140</td> <td>mm</td> <td>Inlet</td> <td>490</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>44 Baffles - Long</td> <td colspan="17">-</td> </tr> <tr> <td>45 Supports - Tube</td> <td colspan="2">MUNTZ</td> <td colspan="13">Type</td> <td colspan="2">COMPLETE</td> </tr> <tr> <td>46 Bypass Seal Arrangement</td> <td colspan="17">2 PAIRS OF SEAL STRIPS</td> </tr> <tr> <td>47 Expansion Joint</td> <td colspan="17">-</td> </tr> <tr> <td>48 Gaskets - Shell Side</td> <td colspan="4">STL JKTD.</td> <td>Tube Side</td> <td colspan="4">STL JKTD.</td> <td>Floating Head</td> <td colspan="7">SOLID METAL</td> </tr> <tr> <td>49 Code Requirements</td> <td colspan="16">ASME SECT. VIII DIV. 1</td> <td>Stamp</td> <td>YES</td> <td>TEMA Class</td> <td colspan="2">"R"</td> </tr> </table>										37 Tube No.	84	OD	19,05	mm	Thk	2,11	mm (Avg.)	Length	6	mm	Fitch	25,4	mm	Flow Angle	30	Deg.	38 Tube Type	STRAIGHT																39 Shell	K.C.S.		ID	355	OD	368	mm	Material	SB-111 (UNS C44300)								40 Channel or Bonnet	C.S. (3)		Channel Cover													C.S.	41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.		Tubesheet - Floating													K.C.S.	42 Floating Head Cover	K.C.S.		Impingement Protection													YES	43 Baffles - Cross	MUNTZ		Type	HOR. SEC.												% Cut	17,5 (Dia.)	Spacing (c/c)	140	mm	Inlet	490	mm	44 Baffles - Long	-																	45 Supports - Tube	MUNTZ		Type													COMPLETE		46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS																	47 Expansion Joint	-																	48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.				Tube Side	STL JKTD.				Floating Head	SOLID METAL							49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1																Stamp	YES	TEMA Class	"R"	
37 Tube No.	84	OD	19,05	mm	Thk	2,11	mm (Avg.)	Length	6	mm	Fitch	25,4	mm	Flow Angle	30	Deg.																																																																																																																																																																																																																																							
38 Tube Type	STRAIGHT																																																																																																																																																																																																																																																						
39 Shell	K.C.S.		ID	355	OD	368	mm	Material	SB-111 (UNS C44300)																																																																																																																																																																																																																																														
40 Channel or Bonnet	C.S. (3)		Channel Cover													C.S.																																																																																																																																																																																																																																							
41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.		Tubesheet - Floating													K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																							
42 Floating Head Cover	K.C.S.		Impingement Protection													YES																																																																																																																																																																																																																																							
43 Baffles - Cross	MUNTZ		Type	HOR. SEC.												% Cut	17,5 (Dia.)	Spacing (c/c)	140	mm	Inlet	490	mm																																																																																																																																																																																																																																
44 Baffles - Long	-																																																																																																																																																																																																																																																						
45 Supports - Tube	MUNTZ		Type													COMPLETE																																																																																																																																																																																																																																							
46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS																																																																																																																																																																																																																																																						
47 Expansion Joint	-																																																																																																																																																																																																																																																						
48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.				Tube Side	STL JKTD.				Floating Head	SOLID METAL																																																																																																																																																																																																																																												
49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1																Stamp	YES	TEMA Class	"R"																																																																																																																																																																																																																																			
REMARKS:																																																																																																																																																																																																																																																							
(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.																																																																																																																																																																																																																																																							
(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.																																																																																																																																																																																																																																																							
(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.																																																																																																																																																																																																																																																							
55																																																																																																																																																																																																																																																							
56																																																																																																																																																																																																																																																							
57																																																																																																																																																																																																																																																							
58																																																																																																																																																																																																																																																							
59																																																																																																																																																																																																																																																							
60																																																																																																																																																																																																																																																							
61																																																																																																																																																																																																																																																							

Figura E.6. Hoja de datos del Intercambiador E-106

SPECIFICATION SHEET																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
SHELL AND TUBE EXCHANGER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
R E V I S I O N					Job No. _____ Page 1 of 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
					Client _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
					Location _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
					Item No. _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
					Process Unit FCCU																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
				Fabricator _____																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1 Service of Unit</td> <td colspan="6">PROPYLENE PRODUCT COOLER</td> <td>No. of Units</td> <td colspan="2">1</td> </tr> <tr> <td>2 Size</td> <td>432-7315</td> <td>Type</td> <td colspan="2">BES (Horizontal)</td> <td>Connected in</td> <td>1</td> <td>Parallel</td> <td>1</td> <td>Series</td> </tr> <tr> <td>3 Surface/Unit (Eff.)</td> <td>72</td> <td>m<sup>2</sup></td> <td>Shells/Unit</td> <td>1</td> <td>Surface/Shell (Eff.)</td> <td colspan="2">72</td> <td colspan="2">m<sup>2</sup></td> </tr> </table>										1 Service of Unit	PROPYLENE PRODUCT COOLER						No. of Units	1		2 Size	432-7315	Type	BES (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	1	Series	3 Surface/Unit (Eff.)	72	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (Eff.)	72		m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1 Service of Unit	PROPYLENE PRODUCT COOLER						No. of Units	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
2 Size	432-7315	Type	BES (Horizontal)		Connected in	1	Parallel	1	Series																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
3 Surface/Unit (Eff.)	72	m <sup>2</sup>	Shells/Unit	1	Surface/Shell (Eff.)	72		m <sup>2</sup>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Fluid Allocation</th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> <tr> <th>Fluid Name</th> <th colspan="4">PROPYLENE PRODUCT</th> <th colspan="4">COOLING WATER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7 Fluid Quantity, Total</td> <td colspan="4">25956</td> <td colspan="4">43344</td> </tr> <tr> <td>8 Vapor (In/Out)</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>9 Liquid</td> <td colspan="2">25956</td> <td colspan="2">25956</td> <td colspan="2">-</td> <td colspan="2">-</td> </tr> <tr> <td>10 Steam</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>11 Water</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="2">43344</td> <td colspan="2">43344</td> </tr> <tr> <td>12 Noncondensable (MW)</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>13 Temperature (In/Out)</td> <td colspan="2">49,6</td> <td colspan="2">37,7</td> <td colspan="2">33,0</td> <td colspan="2">37,8</td> </tr> <tr> <td>14 Density (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">512,36</td> <td colspan="2">515,63</td> <td colspan="2">994,99</td> <td colspan="2">993,36</td> </tr> <tr> <td>15 Viscosity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,00007</td> <td colspan="2">0,00007</td> <td colspan="2">0,00074</td> <td colspan="2">0,00068</td> </tr> <tr> <td>16 Molecular Weight, Vapor</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>17 Specific Heat (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">2955,26</td> <td colspan="2">2721,18</td> <td colspan="2">4177,7</td> <td colspan="2">4177,1</td> </tr> <tr> <td>18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)</td> <td colspan="2">0,092</td> <td colspan="2">0,096</td> <td colspan="2">0,6198</td> <td colspan="2">0,6261</td> </tr> <tr> <td>20 Latent Heat</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>22 Inlet Pressure</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">-</td> </tr> <tr> <td>23 Velocity</td> <td colspan="4">-</td> <td colspan="4">0,99</td> </tr> <tr> <td>24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)</td> <td colspan="2">34,33</td> <td colspan="2">14,81</td> <td colspan="2">98,1</td> <td colspan="2">89,96</td> </tr> <tr> <td>25 Fouling Resistance (Min.)</td> <td colspan="4">0,000172</td> <td colspan="4">0,000603</td> </tr> <tr> <td>26 Heat Exchanged</td> <td>242440</td> <td>W</td> <td colspan="2">MTD (Corrected) (Weighted)</td> <td>5,7</td> <td colspan="2">°C</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>27 Transfer Rate (Service/Clean)</td> <td>566,45</td> <td colspan="2"></td> <td>1219,1</td> <td colspan="2">kcal/hr m<sup>2</sup> °C</td> <td colspan="3"></td> </tr> </tbody> </table>										Fluid Allocation	SHELL SIDE				TUBE SIDE				Fluid Name	PROPYLENE PRODUCT				COOLING WATER				7 Fluid Quantity, Total	25956				43344				8 Vapor (In/Out)	-				-				9 Liquid	25956		25956		-		-		10 Steam	-				-				11 Water	-				43344		43344		12 Noncondensable (MW)	-				-				13 Temperature (In/Out)	49,6		37,7		33,0		37,8		14 Density (Vapor/Liquid)	512,36		515,63		994,99		993,36		15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,00007		0,00007		0,00074		0,00068		16 Molecular Weight, Vapor	-				-				17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	2955,26		2721,18		4177,7		4177,1		18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,092		0,096		0,6198		0,6261		20 Latent Heat	-				-				22 Inlet Pressure	-				-				23 Velocity	-				0,99				24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	34,33		14,81		98,1		89,96		25 Fouling Resistance (Min.)	0,000172				0,000603				26 Heat Exchanged	242440	W	MTD (Corrected) (Weighted)		5,7	°C				27 Transfer Rate (Service/Clean)	566,45			1219,1	kcal/hr m <sup>2</sup> °C																																																																																																																																																																																																																								
Fluid Allocation	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Fluid Name	PROPYLENE PRODUCT				COOLING WATER																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
7 Fluid Quantity, Total	25956				43344																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
8 Vapor (In/Out)	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
9 Liquid	25956		25956		-		-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
10 Steam	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
11 Water	-				43344		43344																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
12 Noncondensable (MW)	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
13 Temperature (In/Out)	49,6		37,7		33,0		37,8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
14 Density (Vapor/Liquid)	512,36		515,63		994,99		993,36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
15 Viscosity (Vapor/Liquid)	0,00007		0,00007		0,00074		0,00068																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
16 Molecular Weight, Vapor	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
17 Specific Heat (Vapor/Liquid)	2955,26		2721,18		4177,7		4177,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
18 Thermal Conductivity (Vapor/Liquid)	0,092		0,096		0,6198		0,6261																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
20 Latent Heat	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
22 Inlet Pressure	-				-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
23 Velocity	-				0,99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
24 Pressure Drop (Allowable/Calculated)	34,33		14,81		98,1		89,96																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
25 Fouling Resistance (Min.)	0,000172				0,000603																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
26 Heat Exchanged	242440	W	MTD (Corrected) (Weighted)		5,7	°C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
27 Transfer Rate (Service/Clean)	566,45			1219,1	kcal/hr m <sup>2</sup> °C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
<b>CONSTRUCTION OF ONE SHELL</b>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="4">SHELL SIDE</th> <th colspan="4">TUBE SIDE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 Design Pressure</td> <td colspan="4">2884,1</td> <td colspan="4">2221,0</td> </tr> <tr> <td>31 Design Temperature (Max/Min)</td> <td colspan="2">149</td> <td colspan="2">-12</td> <td colspan="2">149</td> <td colspan="2">-12</td> </tr> <tr> <td>32 Corrosion Allowance</td> <td colspan="4">3</td> <td colspan="4">3</td> </tr> <tr> <td>33 No. of Passes per Shell</td> <td colspan="4">1</td> <td colspan="4">4</td> </tr> <tr> <td>34 Connections</td> <td>In</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>35 Size &amp; Rating</td> <td>Out</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="2">4"-300# RF</td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>36 Intermediate</td> <td colspan="9"></td> </tr> </tbody> </table>											SHELL SIDE				TUBE SIDE				30 Design Pressure	2884,1				2221,0				31 Design Temperature (Max/Min)	149		-12		149		-12		32 Corrosion Allowance	3				3				33 No. of Passes per Shell	1				4				34 Connections	In	4"-300# RF		4"-300# RF						35 Size & Rating	Out	4"-300# RF		4"-300# RF						36 Intermediate																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	SHELL SIDE				TUBE SIDE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
30 Design Pressure	2884,1				2221,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
31 Design Temperature (Max/Min)	149		-12		149		-12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
32 Corrosion Allowance	3				3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
33 No. of Passes per Shell	1				4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
34 Connections	In	4"-300# RF		4"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
35 Size & Rating	Out	4"-300# RF		4"-300# RF																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
36 Intermediate																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>37 Tube No.</td> <td>166</td> <td>OD</td> <td>19,05</td> <td>mm</td> <td>Thk</td> <td>2,11</td> <td>mm (Avg.)</td> <td>Length</td> <td>7315</td> <td>mm</td> <td>Pitch</td> <td>25,4</td> <td>mm</td> <td>Flow Angle</td> <td>30</td> <td>Deg.</td> </tr> <tr> <td>38 Tube Type</td> <td colspan="15">STRAIGHT</td> </tr> <tr> <td>39 Shell</td> <td colspan="2">K.C.S.</td> <td>ID</td> <td>432</td> <td>OD</td> <td>457</td> <td>mm</td> <td>Shell Cover</td> <td colspan="7">K.C.S.</td> <td>(Remov.)</td> </tr> <tr> <td>40 Channel or Bonnet</td> <td colspan="15">C.S. (3)</td> </tr> <tr> <td>41 Tubesheet - Stationary</td> <td colspan="15">K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>42 Floating Head Cover</td> <td colspan="15">K.C.S.</td> </tr> <tr> <td>43 Baffles - Cross</td> <td>MUNTZ</td> <td>Type</td> <td colspan="13">HOR. SEG.</td> </tr> <tr> <td>44 Baffles - Long</td> <td colspan="15">-</td> </tr> <tr> <td>45 Supports - Tube</td> <td colspan="15">MUNTZ</td> </tr> <tr> <td>46 Bypass Seal Arrangement</td> <td colspan="15">2 PAIRS OF SEAL STRIPS</td> </tr> <tr> <td>47 Expansion Joint</td> <td colspan="15">-</td> </tr> <tr> <td>48 Gaskets - Shell Side</td> <td colspan="4">STL JKTD.</td> <td>Tube Side</td> <td colspan="4">STL JKTD.</td> <td>Floating Head</td> <td colspan="6">SOLID METAL</td> </tr> <tr> <td>49 Code Requirements</td> <td colspan="15">ASME SECT. VIII DIV. 1</td> </tr> <tr> <td>50 REMARKS:</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>51</td> <td colspan="15">(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.</td> </tr> <tr> <td>52</td> <td colspan="15">(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.</td> </tr> <tr> <td>53</td> <td colspan="15">(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.</td> </tr> <tr> <td>54</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>55</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>56</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>57</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>58</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>59</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>60</td> <td colspan="15"></td> </tr> <tr> <td>61</td> <td colspan="15"></td> </tr> </table>										37 Tube No.	166	OD	19,05	mm	Thk	2,11	mm (Avg.)	Length	7315	mm	Pitch	25,4	mm	Flow Angle	30	Deg.	38 Tube Type	STRAIGHT															39 Shell	K.C.S.		ID	432	OD	457	mm	Shell Cover	K.C.S.							(Remov.)	40 Channel or Bonnet	C.S. (3)															41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.															42 Floating Head Cover	K.C.S.															43 Baffles - Cross	MUNTZ	Type	HOR. SEG.													44 Baffles - Long	-															45 Supports - Tube	MUNTZ															46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS															47 Expansion Joint	-															48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.				Tube Side	STL JKTD.				Floating Head	SOLID METAL						49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1															50 REMARKS:																51	(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.															52	(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.															53	(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.															54																55																56																57																58																59																60																61															
37 Tube No.	166	OD	19,05	mm	Thk	2,11	mm (Avg.)	Length	7315	mm	Pitch	25,4	mm	Flow Angle	30	Deg.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
38 Tube Type	STRAIGHT																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
39 Shell	K.C.S.		ID	432	OD	457	mm	Shell Cover	K.C.S.							(Remov.)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
40 Channel or Bonnet	C.S. (3)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
41 Tubesheet - Stationary	K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
42 Floating Head Cover	K.C.S.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
43 Baffles - Cross	MUNTZ	Type	HOR. SEG.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
44 Baffles - Long	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
45 Supports - Tube	MUNTZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
46 Bypass Seal Arrangement	2 PAIRS OF SEAL STRIPS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
47 Expansion Joint	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
48 Gaskets - Shell Side	STL JKTD.				Tube Side	STL JKTD.				Floating Head	SOLID METAL																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
49 Code Requirements	ASME SECT. VIII DIV. 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
50 REMARKS:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
51	(1) FLOWS AND DUTY SHOWN INCLUDE 10% INCREASE OVER DESIGN RATES.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
52	(2) VENDOR IS TO CONFIRM OR ADJUST EXACT SHELL DIAMETER AND BAFFLE DETAILS WITHIN THE ARRANGEMENT SHOWN IN THEIR QUOTATION.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
53	(3) PROVIDE ANODES IN CHANNEL.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
54																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
56																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
57																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
58																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
59																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
60																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
61																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												

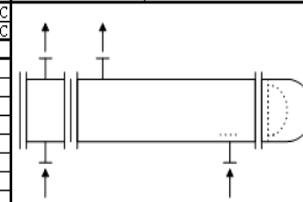


Figura E.7 Hoja de datos del Intercambiador E-107

**APÉNDICE F. Balance de masa de las corrientes de proceso de la SRV a condiciones actuales**

**Tabla F.1.** Balance de masa de la SRV

N <sup>a</sup> de corriente	1	2	3	4
<b>Descripción</b>	Fondo del agotador	Tope de la desbutanizadora	Gasolina FCC	Alimentación splitter propileno
<b>Flujo molar por componente, kgmol/h</b>				
Hidrógeno	1,643E-08	1,643E-08	1,643E-14	1,643E-08
Nitrógeno	1,139E-07	1,139E-07	1,453E-14	1,139E-07
Oxígeno	1,029E-07	1,029E-07	5,453E-14	1,029E-07
Dióxido de carbono	0,0085	0,0085	1,233E-14	
Metano	0,0007	0,0007	5,396E-14	6,989E-04
Eteno	1,2860	1,2860	2,773E-13	1,2860
Etano	5,8892	5,8892	3,570E-11	5,8892
Propeno	566,94	566,94	2,820E-05	560,11
Propano	143,40	143,40	2,269E-05	136,79
Total butilenos	536,50	531,50	3,0516	1,2045
i-Butano	196,41	195,30	0,0650	1,4101
n-Butano	44,67	44,26	0,2461	0,0275
C5+	1834,57	4,7255	1117,54	8,997E-07
Agua	1,0367	1,0367	9,212E-13	1,0367
H <sub>2</sub> S	20,83	20,83	1,111E-09	
SO <sub>2</sub>	0,1710	0,1710	8,612E-07	
<b>Total, kgmol/h</b>	<b>3350,71</b>	<b>1515,36</b>	<b>1120,90</b>	<b>707,76</b>
<b>Fase</b>	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
<b>Temperatura, °C</b>	110,7	53,4	38,0	38,6
<b>Presión, kPa-g</b>	1613,14	1717,0	490,3	2068,5
<b>Flujo, kg/h</b>	250587	75218	170102	29985
<b>Entalpía, kJ/h</b>	60612	9693	7564	2904
<b>Peso molecular</b>	74,79	49,64	95,55	42,37
<b>Densidad, kg/m<sup>3</sup></b>	577,4	505,4	743,9	480,4
<b>Temperatura crítica, °C</b>	207,9	120,9	279,8	92,7
<b>Presión crítica, kPa</b>	3803,1	4302,4	3390,9	4574,3
<b>Viscosidad, Pa.sx10<sup>3</sup></b>	0,1343	0,0951	0,4051	0,0833
<b>Conductividad térmica, kJ/h.m.K</b>	0,3481	0,3899	0,4506	0,3966

**Tabla F.2.** Balance de masa de la SRV (continuación)

Nº de corriente	5	6	7
<b>Descripción</b>	Producto de butanos y butilenos	Propano	Propileno
<b>Flujo molar por componente, kgmol/h</b>			
Hidrógeno	1,076E-14	2,715E-15	6,411E-11
Nitrógeno	2,348E-14	5,839E-15	6,486E-10
Oxígeno	1,307E-14	2,570E-15	8,227E-10
Dióxido de carbono			
Metano	4,829E-14	4,098E-15	9,166E-06
Eteno	9,301E-09	5,493E-15	0,1506
Etano	2,406E-06	1,159E-14	1,9282
Propeno	6,8281	6,3239	539,69
Propano	6,6110	117,61	18,86
Total butilenos	530,30	1,2045	1,137E-13
i-Butano	193,89	1,4101	3,997E-14
n-Butano	44,24	0,0275	2,366E-14
C5+	4,7255	8,997E-07	8,219E-13
Agua	2,076E-09	9,034E-29	0,0925
H <sub>2</sub> S			
SO <sub>2</sub>			
<b>Total, kgmol/h</b>	<b>786,59</b>	<b>126,58</b>	<b>560,72</b>
<b>Fase</b>	Líquido	Líquido	Líquido
<b>Temperatura, °C</b>	38,2	37,7	37,7
<b>Presión, kPa-g</b>	696,5	1960,6	2255,7
<b>Flujo, kg/h</b>	44511	5604	23606
<b>Entalpía, kJ/h</b>	3914	551	2210
<b>Peso molecular</b>	56,59	44,27	42,10
<b>Densidad, kg/m<sup>3</sup></b>	564,6	502,1	515,6
<b>Temperatura crítica, °C</b>	146,8	97,3	91,8
<b>Presión crítica, kPa</b>	3932,4	4259,0	4611,9
<b>Viscosidad, Pa.sx10<sup>3</sup></b>	0,1364	0,0878	0,0745
<b>Conductividad térmica, kJ/h.m.K</b>	383,9	0,3238	0,3473

**APÉNDICE G. Diámetros de carcasa estándar**

**Apéndice G.1. Número de tubos en la carcasa para tubos de 0.75 pulg de diámetro externo, 1 pulg de espaciado y arreglo cuadrado.**

**Tabla G.1.**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	32	26	20	20	-
10	52	52	40	36	-
12	81	76	68	68	60
13,25	97	90	82	76	70
15,25	137	124	116	108	108
17,25	177	166	158	150	142
19,25	224	220	204	192	188
21,25	277	270	246	240	234
23,25	341	324	308	302	292
25	413	394	370	356	346
27	481	460	432	420	408
29	553	526	480	468	456
31	657	640	600	580	560
33	740	718	688	676	648
35	845	824	780	766	748
37	934	914	886	866	838
39	1049	1024	982	968	948

**Apéndice G.2. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1 pulg de diámetro externo, 1¼ pulg de espaciado y arreglo cuadrado.**

**Tabla G.2**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	21	16	14	-	-
10	32	32	26	36	-
12	48	45	40	68	60
13,25	61	56	52	76	70
15,25	81	76	68	108	108
17,25	112	112	96	150	142
19,25	138	132	128	192	188
21,25	177	166	158	240	148
23,25	213	208	192	184	184
25	260	252	238	226	222
27	300	288	278	268	260
29	341	326	300	294	286
31	406	398	380	368	358
33	465	460	432	420	414
35	522	518	488	484	472
37	596	574	562	544	532
39	665	644	624	612	600

**Apéndice G.3. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1.25 pulg de diámetro externo, 19/16 pulg de espaciado y arreglo cuadrado.**

**Tabla G.3**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	-	-	-	-	-
10	16	12	10	-	-
12	30	24	22	16	16
13,25	32	30	30	22	22
15,25	44	40	37	35	31
17,25	56	53	51	48	44
19,25	78	73	71	64	56
21,25	96	90	86	82	78
23,25	127	112	106	102	96
25	140	135	127	123	115
27	166	160	151	146	140
29	193	188	178	174	166
31	226	220	209	202	193
33	258	252	244	238	226
35	293	287	275	268	258
37	334	322	311	304	293
39	370	362	348	342	336

**Apéndice G.4. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1.5 pulg de diámetro externo, 1 7/8 pulg de espaciado y arreglo cuadrado.**

**Tabla G.4**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
12	16	16	12	12	0
13,25	22	22	16	16	0
15,25	29	29	25	24	22
17,25	39	39	34	32	29
19,25	50	48	45	43	39
21,25	62	60	57	54	50
23,25	78	74	70	66	62
25	94	90	86	84	78
27	112	108	102	98	94
29	131	127	120	116	112
31	151	146	141	138	131
33	176	170	164	160	151
35	202	196	188	182	176
37	224	220	217	210	202
39	252	246	237	230	224

**APÉNDICE G.5. Número de tubos en la carcasa para tubos de 0.75 pulg de diámetro externo, 15/16 pulg de espaciado y arreglo triangular.**

**Tabla G.5**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	36	32	26	24	18
10	62	56	47	42	36
12	109	98	86	82	78
13,25	127	114	96	90	86
15,25	170	160	140	136	128
17,25	239	224	194	188	178
19,25	301	282	252	244	234
21,25	361	342	314	306	290
23,25	442	420	386	378	364
25	532	506	468	446	434
27	637	602	550	536	524
29	721	692	640	620	594
31	847	822	766	722	720
33	974	938	878	852	826
35	1102	1068	1004	988	958
37	1240	1200	1144	1104	1072
39	1377	1330	1258	1248	1211

**Apéndice G.6. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1 pulg de diámetro externo, 1 ¼ pulg de espaciado y arreglo triangular.**

**Tabla G.6**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	21	16	16	14	-
10	32	32	26	24	-
12	55	52	48	46	44
13,25	68	66	58	54	50
15,25	91	86	80	74	72
17,25	131	118	106	104	94
19,25	163	152	140	136	128
21,25	199	188	170	164	160
23,25	241	232	212	212	202
25	294	282	256	252	242
27	349	334	302	296	286
29	397	376	338	334	316
31	472	454	439	424	400
33	538	522	486	470	454
35	608	592	562	546	532
37	674	664	632	614	598
39	766	736	700	688	672

**Apéndice G.7. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1 ¼ pulg de diámetro externo, 19/16 pulg de espaciado y arreglo triangular.**

**Tabla G.7**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	-	-	-	-	-
10	20	18	14	-	-
12	32	30	26	22	20
13,25	38	36	32	28	26
15,25	54	51	45	42	38
17,25	69	66	62	58	54
19,25	95	91	86	78	69
21,25	117	112	105	101	95
23,25	140	136	130	123	117
25	170	164	155	150	140
27	202	196	185	179	170
29	235	228	217	212	202
31	275	270	255	245	235
33	315	305	297	288	275
35	357	348	335	327	315
37	407	390	380	347	357
39	449	436	425	419	407

**Apéndice G.8. Número de tubos en la carcasa para tubos de 1 ½ pulg de diámetro externo, 1 7/8 pulg de espaciado y arreglo triangular.**

**Tabla G.8**

<b>Dc (Pulg)</b>	<b>Número de Pasos por los tubos</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
8	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
12	18	14	14	12	12
13,25	27	22	18	16	14
15,25	36	34	32	30	27
17,25	48	44	42	38	36
19,25	61	58	55	51	48
21,25	76	72	70	66	61
23,25	95	91	86	80	76
25	115	110	105	98	95
27	136	131	125	118	115
29	160	154	147	141	136
31	184	177	172	165	160
33	215	206	200	190	184
35	246	238	230	220	215
37	275	268	260	252	246
39	307	299	290	284	275

**APÉNDICE H. Hojas de reporte de las evaluaciones realizadas con HTRI®**

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		16:11 SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>No Data Check Messages.</b>					
Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Alimentación desbutanizadora		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(kg/s)	76,5687		53,5853	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,088	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	109,40	126,20	191,40	141,60
Inlet P/Avg	(kPa)	1657,67	1642,91	1422,32	1399,78
dP/Allow.	(kPa)	29,520	68,648	45,074	68,648
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000516	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	3077,45	Actual U	(W/m2-K)	508,17
Tube h	(W/m2-K)	2574,81	Required U	(W/m2-K)	487,96
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	6,6521
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	315,697
EMTD	(Deg C)	43,2	Overdesign	(%)	4,14
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	1030,00	Baffle cut	(Pct Dia.)	27,50
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	649,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	9
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	258,877
Tube OD	(mm)	25,400	Shell outlet	(mm)	307,087
Length	(m)	7,310	Inlet height	(mm)	64,619
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	95,440
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	205,004
Tube count	(--)	550	Tube outlet	(mm)	205,004
Tube Pass	(--)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	16,51	Shellside	1,08	A	0.045
Tube	23,66	Tubeside	2,01	B	0.663
Fouling	57,66	Crossflow	0,99	C	0.201
Metal	2,170	Window	1,37	E	0.091
				F	0.000

**Figura H1.** Evaluación del intercambiador E-101 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00	16:27	SN: 1500212300	<b>SI Units</b>		
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>No Data Check Messages.</b>					
Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Alimentación desbutanizadora		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(kg/s)	90,3511		63,2306	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,090	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	109,40	126,20	191,40	141,60
Inlet P/Avg	(kPa)	1657,67	1640,28	1422,32	1393,29
dP/Allow.	(kPa)	34,782	68,648	58,056	68,648
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000516	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	3282,05	Actual U	(W/m2-K)	529,12
Tube h	(W/m2-K)	2938,71	Required U	(W/m2-K)	578,18
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	7,8782
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	315,697
EMTD	(Deg C)	43,2	Overdesign	(%)	-8,49
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	1030,00	Baffle cut	(Pct Dia.)	27,50
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	649,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	9
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	307,087
Tube OD	(mm)	25,400	Shell outlet	(mm)	336,551
Length	(m)	7,310	Inlet height	(mm)	76,672
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	83,388
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	258,877
Tubecount	(--)	550	Tube outlet	(mm)	258,877
Tube Pass	(--)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	16,12	Shellside	1,29	A	0.045
Tube	21,59	Tubeside	2,37	B	0.666
Fouling	60,03	Crossflow	1,18	C	0.199
Metal	2,260	Window	1,63	E	0.090
				F	0.000

Figura H2. Evaluación del intercambiador E-101 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		11:12 SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>No Data Check Messages.</b>					
Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Alimentación desbutanizadora		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(kg/s)	90,3511		63,2306	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,087	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	109,40	126,20	191,40	141,60
Inlet P/Avg	(kPa)	1657,67	1644,06	1422,32	1414,05
dP/Allow.	(kPa)	27,226	68,648	16,549	68,648
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000516	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	2854,20	Actual U	(W/m2-K)	447,15
Tube h	(W/m2-K)	1691,72	Required U	(W/m2-K)	289,21
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	7,8384
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	631,393
EMTD	(Deg C)	42,9	Overdesign	(%)	54,61
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	1030,00	Baffle cut	(Pct Dia.)	27,50
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	2	Central spacing	(mm)	515,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	13
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	205,004
Tube OD	(mm)	25,400	Shell outlet	(mm)	258,877
Length	(m)	7,310	Inlet height	(mm)	57,471
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	71,259
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	205,004
Tubecount	(--)	550	Tube outlet	(mm)	205,004
Tube Pass	(--)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	15,67	Shellside	0,84	A	0.055
Tube	31,69	Tubeside	1,18	B	0.638
Fouling	50,73	Crossflow	0,80	C	0.198
Metal	1,910	Window	0,88	E	0.109
				F	0.000

Figura H3. Evaluación del intercambiador E-101 en operación en paralelo.

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 4.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name		Prod. Domo Desbut.		Agua	
Flow rate	(kg/s)	22,9801		25,4101	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	53,00	37,80	33,00	41,50
Inlet P/Avg	(kPa)	2004,36		738,341	715,845
dP/Allow.	(kPa)	59,454	68,670	44,991	78,480
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	2543,56	Actual U	(W/m2-K)	615,63
Tube h	(W/m2-K)	5213,76	Required U	(W/m2-K)	614,36
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,9013
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	215,246
EMTD	(Deg C)	6,8	Overdesign	(%)	0,21
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	610,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,60
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	256,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	21
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	38,586
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	18,964
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	102,261
Tubecount	(--)	300	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	24,20	Shellside	0,74	A	0.188
Tube	15,17	Tubeside	0,99	B	0.540
Fouling	58,17	Crossflow	1,00	C	0.124
Metal	2,457	Window	1,32	E	0.148
				F	0.000

Figura H4. Evaluación del intercambiador E-102 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		3N: 1500212300			<b>SI Units</b>
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Prod. Domo Desbut		Agua	
Flow rate	(kg/s)	27,5798		25,4102	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	53,00	37,80	33,00	43,18
Inlet P/Avg	(kPa)	2004,36		738,341	715,884
dP/Allow.	(kPa)	79,289	68,670	44,913	78,480
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	2840,56	Actual U	(W/m2-K)	632,52
Tube h	(W/m2-K)	5261,99	Required U	(W/m2-K)	855,33
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	1,0804
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	215,246
EMTD	(Deg C)	5,9	Overdesign	(%)	-26,05
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	610,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,60
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	256,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	21
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	53,250
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	29,700
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	102,261
Tubecount	(--)	300	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	22,27	Shellside	0,88	A	0.187
Tube	15,44	Tubeside	0,99	B	0.535
Fouling	59,77	Crossflow	1,19	C	0.133
Metal	2,525	Window	1,57	E	0.146
				F	0.000

Figura H5. Evaluación del intercambiador E-102 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300			<b>SI Units</b>
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Prod. Domo Desbut		Agua	
Flow rate	(kg/s)	27,5798		25,4102	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	53,00	37,80	33,00	43,18
Inlet P/Avg	(kPa)	2004,36		738,341	704,639
dP/Allow.	(kPa)	119,170	68,670	67,403	78,480
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	2839,72	Actual U	(W/m2-K)	632,22
Tube h	(W/m2-K)	5247,72	Required U	(W/m2-K)	511,64
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	1,0804
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	322,869
EMTD	(Deg C)	6,5	Overdesign	(%)	23,57
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	610,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,60
Series	(--)	3	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	256,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	21
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	53,187
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	29,763
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	102,261
Tubecount	(--)	300	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	22,26	Shellside	0,89	A	0.187
Tube	15,47	Tubeside	0,99	B	0.536
Fouling	59,75	Crossflow	1,19	C	0.131
Metal	2,521	Window	1,57	E	0.146
				F	0.000

Figura H6. Evaluación del intercambiador E-102 en operación en serie

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	27,5798		25,4102	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	53,00	37,80	33,00	43,18
Inlet P/Avg	(kPa)	2004,36		738,341	704,639
dP/Allow.	(kPa)	46,888	68,670	67,404	78,480
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	2133,10	Actual U	(W/m2-K)	588,86
Tube h	(W/m2-K)	5251,53	Required U	(W/m2-K)	509,30
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	1,0804
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	322,869
EMTD	(Deg C)	6,6	Overdesign	(%)	15,62
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	610,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,60
Series	(--)	3	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	610,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	9
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	53,187
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	29,763
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	102,261
Tubecount	(--)	300	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	27,61	Shellside	0,48	A	0.048
Tube	14,40	Tubeside	0,99	B	0.695
Fouling	55,65	Crossflow	0,50	C	0.166
Metal	2,348	Window	1,57	E	0.091
				F	0.000

Figura H7. Evaluación del intercambiador E-102 en operación en serie modificada

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)			27,5798	25,4102
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	53,00	37,80	33,00	43,18
Inlet P/Avg	(kPa)	2004,36		738,341	732,191
dP/Allow.	(kPa)	22,195	68,670	12,299	78,480
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1862,64	Actual U	(W/m2-K)	514,47
Tube h	(W/m2-K)	3043,20	Required U	(W/m2-K)	427,96
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	1,0804
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	430,492
EMTD	(Deg C)	5,9	Overdesign	(%)	20,21
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	610,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,60
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	2	Central spacing	(mm)	256,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	21
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	38,586
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	18,964
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	102,261
Tubecount	(--)	300	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	27,62	Shellside	0,44	A	0,192
Tube	21,71	Tubeside	0,49	B	0,537
Fouling	48,62	Crossflow	0,60	C	0,120
Metal	2,054	Window	0,79	E	0,151
				F	0,000

Figura H8. Evaluación del intercambiador E-102 en operación en paralelo serie modificada

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>MKH Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Cold Shellside</b>		<b>Hot Tubeside</b>	
Fluid name		Alimentación despropanizador		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(1000-kg/hr)	81,9460		192,900	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,484	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	38,30	76,80	141,60	111,50
Inlet P/Avg	(kgf/cm2A)	19,033	18,784	14,033	13,765
dP/Allow.	(kgf/cm2)	0,498	0,700	0,536	0,700
Fouling	(m2-hr-C/kcal)	0,000400		0,000400	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(kcal/m2-hr-C)	3237,52	Actual U	(kcal/m2-hr-C)	603,25
Tube h	(kcal/m2-hr-C)	3335,34	Required U	(kcal/m2-hr-C)	583,78
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MM kcal/hr)	4,2156
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	97,802
EMTD	(Deg C)	57,0	Overdesign	(%)	3,33
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	690,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	25,60
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	196,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	19
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	205,004
Length	(mm)	4880,	Inlet height	(mm)	57,336
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	80,510
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	205,004
Tube count	(--)	342	Tube outlet	(mm)	205,004
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	18,63	Shellside	1,52	A	0.171
Tube	23,23	Tubeside	3,06	B	0.488
Fouling	55,16	Crossflow	1,72	C	0.205
Metal	2,984	Window	1,33	E	0.137
				F	0.000

Figura H9. Evaluación del intercambiador E-103 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300			<b>SI Units</b>
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Alimentación despropanizador		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(kg/s)	27,3154		63,2309	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0	0,484	0	0
Inlet/Outlet T	(Deg C)	38,3	76,8	141,6	111,5
Inlet P/Avg	(kPa)	1867	1834,47	1376	1341,91
dP/Allow.	(kPa)	64,17	68,648	68,63	68,648
Fouling	(m2-K/W)	0,000344		0,000344	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	4229	Actual U	(W/m2-K)	738,24
Tube h	(W/m2-K)	4430	Required U	(W/m2-K)	1045,91
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,8359
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	97,802
EMTD	(Deg C)	57,1	Overdesign	(%)	-29,42
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	690	Baffle cut	(Pct Dia.)	25,6
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	196
Orientation	(deg)	0	Crosspasses	(--)	19
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	154,051
Tube OD	(mm)	19,05	Shell outlet	(mm)	258,877
Length	(m)	4,88	Inlet height	(mm)	57,336
Pitch ratio	(--)	1,333	Outlet height	(mm)	80,51
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	258,877
Tube count	(--)	342	Tube outlet	(mm)	258,877
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	17,46	Shellside	1,88	A	0.170
Tube	21,40	Tubeside	3,61	B	0.492
Fouling	58,00	Crossflow	2,12	C	0.203
Metal	3,140	Window	1,64	E	0.135
				F	0.000

Figura H10. Evaluación del intercambiador E-103 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AET Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Cold Shellside</b>		<b>Hot Tubeside</b>	
Fluid name		Alimentación despropanizador		Fondo desbutanizadora	
Flow rate	(kg/s)	27,3154		63,2309	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,484	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	38,30	76,80	141,60	111,50
Inlet P/Avg	(kPa)	1866,56	1851,88	1376,22	1365,01
dP/Allow.	(kPa)	29,348	68,648	22,421	68,648
Fouling	(m2-K/W)	0,000344		0,000344	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	3044,44	Actual U	(W/m2-K)	601,93
Tube h	(W/m2-K)	2544,78	Required U	(W/m2-K)	523,89
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,8254
Cold regime	(--)	Flow	Area	(m2)	195,604
EMTD	(Deg C)	56,8	Overdesign	(%)	14,90
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	690,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	25,60
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	2	Central spacing	(mm)	196,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	21
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	128,194
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	154,051
Length	(m)	4,880	Inlet height	(mm)	57,336
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	80,510
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	154,051
Tubecount	(--)	342	Tube outlet	(mm)	154,051
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	19,77	Shellside	0,99	A	0.174
Tube	30,38	Tubeside	1,80	B	0.477
Fouling	47,29	Crossflow	1,14	C	0.210
Metal	2,560	Window	0,89	E	0.140
				F	0.000

Figura H11. Evaluación del intercambiador E-103 en operación en paralelo

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>					
		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name		Producto de butanos y butileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	13,6000		55,2900	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	102,10	38,00	33,00	43,42
Inlet P/Avg	(kPa)	1754,32		738,392	726,300
dP/Allow.	(kPa)	15,629	39,240	24,184	98,100
Fouling	(m2-KW)	0,000172		0,000603	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1325,68	Actual U	(W/m2-K)	494,85
Tube h	(W/m2-K)	4607,01	Required U	(W/m2-K)	487,56
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	2,4288
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	219,487
EMTD	(Deg C)	22,7	Overdesign	(%)	1,49
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	740,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,00
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	295,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	13
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	128,194
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	
Length	(m)	4,877	Inlet height	(mm)	
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	59,301
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	154,051
Tubecount	(--)	384	Tube outlet	(mm)	154,051
Tube Pass	(--)	1			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	37,33	Shellside	0,32	A	0,257
Tube	13,79	Tubeside	0,84	B	0,411
Fouling	46,86	Crossflow	0,37	C	0,143
Metal	2,014	Window	0,47	E	0,188
				F	0,000

Figura H12 Evaluación del intercambiador E-104 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name		Producto de butanos y butileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	16,3201		55,2903	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	102,10	38,00	33,00	45,50
Inlet P/Avg	(kPa)	1754,39		738,421	726,336
dP/Allow.	(kPa)	18,993	39,240	24,169	98,100
Fouling	(m2-KW)	0,000172		0,000603	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1484,37	Actual U	(W/m2-K)	516,04
Tube h	(W/m2-K)	4635,62	Required U	(W/m2-K)	598,89
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	2,9137
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	219,487
EMTD	(Deg C)	22,2	Overdesign	(%)	-13,84
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	740,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,00
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	295,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	13
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	128,194
Length	(m)	4,877	Inlet height	(mm)	
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	59,301
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	154,051
Tubecount	(--)	384	Tube outlet	(mm)	154,051
Tube Pass	(--)	1			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	34,76	Shellside	0,39	A	0.256
Tube	14,30	Tubeside	0,84	B	0.414
Fouling	48,84	Crossflow	0,44	C	0.143
Metal	2,101	Window	0,57	E	0.187
				F	0.000

Figura H13 Evaluación del intercambiador E-104 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name		Producto de butanos y butileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	16,3201		55,2903	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	102,10	38,00	33,00	45,51
Inlet P/Avg	(kPa)	1754,39		738,421	720,294
dP/Allow.	(kPa)	28,157	39,240	36,253	98,100
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000603	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1487,22	Actual U	(W/m2-K)	516,40
Tube h	(W/m2-K)	4633,54	Required U	(W/m2-K)	395,01
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	2,9137
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	329,231
EMTD	(Deg C)	22,4	Overdesign	(%)	30,73
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	740,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,00
Series	(--)	3	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	295,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	13
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	
Length	(m)	4,877	Inlet height	(mm)	
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	60,018
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	154,051
Tubecount	(--)	384	Tube outlet	(mm)	154,051
Tube Pass	(--)	1			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	34,72	Shellside	0,39	A	0.257
Tube	14,31	Tubeside	0,84	B	0.414
Fouling	48,87	Crossflow	0,44	C	0.142
Metal	2,092	Window	0,57	E	0.187
				F	0.000

Figura H14. Evaluación del intercambiador E-104 en operación en serie

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name		Producto de butanos y butileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	16,3201		55,2903	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	102,10	38,00	33,00	45,50
Inlet P/Avg	(kPa)	1754,39		738,421	733,069
dP/Allow.	(kPa)	7,571	39,240	10,703	98,100
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000603	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	968,17	Actual U	(W/m2-K)	397,56
Tube h	(W/m2-K)	2592,67	Required U	(W/m2-K)	299,61
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	2,9137
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	438,974
EMTD	(Deg C)	22,2	Overdesign	(%)	32,69
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	740,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	20,00
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	2	Central spacing	(mm)	295,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	13
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	102,261
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	102,261
Length	(m)	4,877	Inlet height	(mm)	61,453
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	61,453
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	128,194
Tubecount	(--)	384	Tube outlet	(mm)	128,194
Tube Pass	(--)	1			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	41,01	Shellside	0,19	A	0.262
Tube	19,72	Tubeside	0,42	B	0.405
Fouling	37,66	Crossflow	0,22	C	0.144
Metal	1,620	Window	0,28	E	0.190
				F	0.000

Figura H15. Evaluación del intercambiador E-104 en operación en paralelo

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 4.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	53,5836		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	43,00
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	696,120
dP/Allow.	(kPa)	28,867	39,230	84,441	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1489,82	Actual U	(W/m2-K)	460,75
Tube h	(W/m2-K)	7557,71	Required U	(W/m2-K)	460,17
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	4,5716
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	707,874
EMTD	(Deg C)	14,0	Overdesign	(%)	0,13
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(-)	AET	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(-)	2	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	545,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	11
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	65,600
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	57,150
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tube count	(-)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(-)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	30,93	Shellside	0,43	A	0.057
Tube	7,83	Tubeside	1,58	B	0.621
Fouling	59,39	Crossflow	0,42	C	0.221
Metal	1,857	Window	0,75	E	0.101
				F	0.000

Figura H16. Evaluación del intercambiador E-105 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	63,2306		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	44,47
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	696,188
dP/Allow.	(kPa)	40,004	39,230	84,306	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1656,13	Actual U	(W/m2-K)	475,76
Tube h	(W/m2-K)	7605,68	Required U	(W/m2-K)	561,41
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,3176
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	708,001
EMTD	(Deg C)	13,4	Overdesign	(%)	-15,26
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	545,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	11
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	65,600
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	57,150
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tubecount	(--)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	28,73	Shellside	0,51	A	0.062
Tube	8,03	Tubeside	1,58	B	0.619
Fouling	61,32	Crossflow	0,50	C	0.219
Metal	1,918	Window	0,88	E	0.100
				F	0.000

Figura H17. Evaluación del intercambiador E-105 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	63,2306		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	44,47
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	675,055
dP/Allow.	(kPa)	60,018	39,230	126,571	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1659,85	Actual U	(W/m2-K)	475,95
Tube h	(W/m2-K)	7577,12	Required U	(W/m2-K)	350,33
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,3175
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	1062,00
EMTD	(Deg C)	14,3	Overdesign	(%)	35,86
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(--)	3	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	545,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	11
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	65,600
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	57,150
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tubecount	(--)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	28,67	Shellside	0,51	A	0.062
Tube	8,07	Tubeside	1,58	B	0.619
Fouling	61,34	Crossflow	0,50	C	0.219
Metal	1,913	Window	0,89	E	0.100
				F	0.000

Figura H18. Evaluación del intercambiador E-105 en operación en serie

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	63,2306		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	44,47
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	723,947
dP/Allow.	(kPa)	36,058	39,230	28,788	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1443,12	Actual U	(W/m2-K)	431,87
Tube h	(W/m2-K)	4376,45	Required U	(W/m2-K)	335,80
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,3175
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	1062,00
EMTD	(Deg C)	14,9	Overdesign	(%)	28,61
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(--)	3	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	980,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	7
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	78,300
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	57,150
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tubecount	(--)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(--)	1			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	29,93	Shellside	0,31	A	0.027
Tube	12,88	Tubeside	0,79	B	0.682
Fouling	55,86	Crossflow	0,27	C	0.225
Metal	1,736	Window	0,88	E	0.066
				F	0.000

Figura H19. Evaluación del intercambiador E-105 en operación en serie modificada

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	63,2286		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	44,47
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	726,454
dP/Allow.	(kPa)	9,929	39,230	23,774	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1071,47	Actual U	(W/m2-K)	391,50
Tube h	(W/m2-K)	4401,52	Required U	(W/m2-K)	281,03
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,3174
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	1416,00
EMTD	(Deg C)	13,4	Overdesign	(%)	39,31
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(--)	AET	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(--)	2	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	2	Central spacing	(mm)	545,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	11
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	80,425
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	80,425
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tube count	(--)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(--)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	36,54	Shellside	0,26	A	0.042
Tube	11,42	Tubeside	0,79	B	0.631
Fouling	50,46	Crossflow	0,24	C	0.222
Metal	1,578	Window	0,44	E	0.105
				F	0.000

Figura H20. Evaluación del intercambiador E-105 en operación en paralelo

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00 I		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
: Summary Unit Horizontal With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	63,2286		110,984	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	78,00	37,80	33,00	44,47
Inlet P/Avg	(kPa)	1268,35		738,341	726,452
dP/Allow.	(kPa)	28,394	39,230	23,777	98,070
Fouling	(m2-K/W)	0,000516		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1293,47	Actual U	(W/m2-K)	417,65
Tube h	(W/m2-K)	4397,91	Required U	(W/m2-K)	284,31
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	5,3174
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	1416,00
EMTD	(Deg C)	13,2	Overdesign	(%)	46,90
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(-)	AET	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	980,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	22,40
Series	(-)	2	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	2	Central spacing	(mm)	245,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	25
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	202,718
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	202,718
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	80,425
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	80,425
Layout	(deg)	90	Tube inlet	(mm)	254,509
Tube count	(-)	820	Tube outlet	(mm)	254,509
Tube Pass	(-)	2			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	32,29	Shellside	0,38	A	0.303
Tube	12,20	Tubeside	0,79	B	0.410
Fouling	53,83	Crossflow	0,55	C	0.143
Metal	1,683	Window	0,44	E	0.144
				F	0.000

**Figura H21.** Evaluación del intercambiador E-105 en operación en paralelo, disminuyendo espaciado de deflectores

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: VEPICA COMPUTACION					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	1,7122		5,5714	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	60,00	37,80	33,00	37,80
Inlet P/Avg	(kPa)	2279,36	2277,35	738,341	705,893
dP/Allow.	(kPa)	4,020	19,614	64,896	98,068
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	908,49	Actual U	(W/m2-K)	442,34
Tube h	(W/m2-K)	7347,08	Required U	(W/m2-K)	440,42
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,1132
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	30,288
EMTD	(Deg C)	8,5	Overdesign	(%)	0,43
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(-)	AES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	355,800	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,50
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	139,700
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	39
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	52,502
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	52,502
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	26,201
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	16,897
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	77,927
Tube count	(-)	84	Tube outlet	(mm)	77,927
Tube Pass	(-)	4			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	48,89	Shellside	0,18	A	0.165
Tube	7,73	Tubeside	1,54	B	0.482
Fouling	41,80	Crossflow	0,23	C	0.189
Metal	1,778	Window	0,34	E	0.164
				F	0.000

Figura H22. Evaluación del intercambiador E-106 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300			<b>SI Units</b>
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propano		Agua	
Flow rate	(kg/s)		2,0547		5,5714
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	60,00	37,80	33,00	38,91
Inlet P/Avg	(kPa)	2279,36	2276,49	738,341	705,955
dP/Allow.	(kPa)	5,750	19,614	64,772	98,068
Fouling	(m2-K/W)		0,000172		0,000601
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1014,03	Actual U	(W/m2-K)	466,18
Tube h	(W/m2-K)	7390,69	Required U	(W/m2-K)	634,85
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,1375
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	30,288
EMTD	(Deg C)	7,2	Overdesign	(%)	-26,57
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(-)	AES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	355,800	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,50
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	139,700
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	39
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	52,502
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	52,502
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	26,201
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	16,897
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	77,927
Tubecount	(-)	84	Tube outlet	(mm)	77,927
Tube Pass	(-)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	45,97	Shellside	0,21	A	0.164
Tube	8,10	Tubeside	1,54	B	0.481
Fouling	44,05	Crossflow	0,27	C	0.192
Metal	1,874	Window	0,41	E	0.163
				F	0.000

Figura H23. Evaluación del intercambiador E-106 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propano		Agua	
Flow rate	(kg/s)		2,0547		5,5714
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	60,00	37,80	33,00	38,91
Inlet P/Avg	(kPa)	2279,36	2272,12	738,341	705,957
dP/Allow.	(kPa)	14,486	19,614	64,768	98,068
Fouling	(m2-K/W)		0,000172		0,000601
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1253,20	Actual U	(W/m2-K)	511,01
Tube h	(W/m2-K)	7390,63	Required U	(W/m2-K)	673,48
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,1375
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	30,288
EMTD	(Deg C)	6,7	Overdesign	(%)	-24,12
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(-)	AES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	355,600	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,50
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	71,120
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	75
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	52,502
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	52,502
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	26,201
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	16,897
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	77,927
Tube count	(-)	84	Tube outlet	(mm)	77,927
Tube Pass	(-)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	40,78	Shellside	0,34	A	0.229
Tube	8,88	Tubeside	1,54	B	0.383
Fouling	48,29	Crossflow	0,55	C	0.159
Metal	2,055	Window	0,41	E	0.229
				F	0.000

Figura H24. Evaluación del intercambiador E-106 a nuevas condiciones, con modificaciones menores

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propano		Agua	
Flow rate	(kg/s)	2,0547		5,5714	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	60,00	37,80	33,00	38,91
Inlet P/Avg	(kPa)	0,000	0,000	0,000	0,000
dP/Allow.	(kPa)	1,485	19,614	18,408	98,068
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	664,84	Actual U	(W/m2-K)	358,46
Tube h	(W/m2-K)	4274,97	Required U	(W/m2-K)	318,81
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,1375
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	60,575
EMTD	(Deg C)	7,1	Overdesign	(%)	12,44
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(-)	AES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	355,600	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,50
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	2	Central spacing	(mm)	139,700
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	39
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	52,502
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	52,502
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	26,201
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	16,897
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	77,927
Tube count	(-)	84	Tube outlet	(mm)	77,927
Tube Pass	(-)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	53,86	Shellside	0,11	A	0.165
Tube	10,78	Tubeside	0,77	B	0.486
Fouling	33,91	Crossflow	0,14	C	0.181
Metal	1,443	Window	0,20	E	0.168
				F	0.000

Figura H25. Evaluación del intercambiador E-106 en operación en paralelo

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BES Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>Process Conditions</b>		<b>Hot Shellside</b>		<b>Cold Tubeside</b>	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)	7,2131		11,6148	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	49,60	37,80	33,00	37,80
Inlet P/Avg	(kPa)	2472,37	2464,35	722,761	680,850
dP/Allow.	(kPa)	16,032	34,324	83,821	98,068
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
<b>Exchanger Performance</b>					
Shell h	(W/m2-K)	1701,88	Actual U	(W/m2-K)	574,73
Tube h	(W/m2-K)	7670,13	Required U	(W/m2-K)	569,10
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,2373
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	71,765
EMTD	(Deg C)	5,8	Overdesign	(%)	0,99
<b>Shell Geometry</b>			<b>Baffle Geometry</b>		
TEMA type	(-)	BES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	457,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,90
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	173,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	37
<b>Tube Geometry</b>			<b>Nozzles</b>		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	102,261
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	102,261
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	38,789
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	17,721
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	102,261
Tube count	(-)	166	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(-)	4			
<b>Thermal Resistance; %</b>		<b>Velocities; m/s</b>		<b>Flow Fractions</b>	
Shell	33,77	Shellside	0,41	A	0.197
Tube	9,62	Tubeside	1,63	B	0.454
Fouling	54,31	Crossflow	0,61	C	0.148
Metal	2,295	Window	0,86	E	0.200
				F	0.000

Figura H26. Evaluación del intercambiador E-107 a condiciones actuales

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300			<b>SI Units</b>
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BES Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	8,6562		11,6148	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	49,60	37,80	33,00	38,98
Inlet P/Avg	(kPa)	2472,37	2460,92	722,761	680,947
dP/Allow.	(kPa)	22,896	34,324	83,627	98,068
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1902,33	Actual U	(W/m2-K)	596,37
Tube h	(W/m2-K)	7725,83	Required U	(W/m2-K)	912,13
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,2902
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	71,765
EMTD	(Deg C)	4,4	Overdesign	(%)	-34,62
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(-)	BES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	457,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,90
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	1	Central spacing	(mm)	173,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	37
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	102,261
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	102,261
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	38,789
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	17,721
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	102,261
Tube count	(-)	166	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(-)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	31,35	Shellside	0,50	A	0.196
Tube	9,91	Tubeside	1,63	B	0.455
Fouling	56,36	Crossflow	0,73	C	0.150
Metal	2,382	Window	1,04	E	0.199
				F	0.000

Figura H27. Evaluación del intercambiador E-107 a nuevas condiciones

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300			<b>SI Units</b>
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA BES Shell With Single-Segmental Baffles					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propileno		Agua	
Flow rate	(kg/s)	8,6562		11,6148	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	49,60	37,80	33,00	38,98
Inlet P/Avg	(kPa)	2472,37	2469,42	722,761	710,867
dP/Allow.	(kPa)	5,901	34,324	23,788	98,068
Fouling	(m2-K/W)	0,000172		0,000601	
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	1244,44	Actual U	(W/m2-K)	481,73
Tube h	(W/m2-K)	4469,16	Required U	(W/m2-K)	457,21
Hot regime	(-)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,2902
Cold regime	(-)	Sens. Liquid	Area	(m2)	143,530
EMTD	(Deg C)	4,4	Overdesign	(%)	5,36
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(-)	BES	Baffle type	(-)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	457,000	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,90
Series	(-)	1	Baffle orientation	(-)	Perpend.
Parallel	(-)	2	Central spacing	(mm)	173,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(-)	37
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(-)	Plain	Shell inlet	(mm)	102,261
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	102,261
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	38,789
Pitch ratio	(-)	1,3333	Outlet height	(mm)	17,721
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	102,261
Tube count	(-)	166	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(-)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	38,71	Shellside	0,25	A	0.200
Tube	13,84	Tubeside	0,81	B	0.453
Fouling	45,52	Crossflow	0,37	C	0.143
Metal	1,924	Window	0,52	E	0.204
				F	0.000

Figura H28. Evaluación del intercambiador E-107 en operación en paralelo

<b>Output Summary</b>					Page 1
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>No Data Check Messages.</b>					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name		Propano		Agua	
Flow rate	(kg/s)		1,7122		5,5714
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	60,00	37,70	33,00	37,80
Inlet P/Avg	(kPa)	2279,36	2277,62	738,341	699,377
dP/Allow.	(kPa)	3,495	19,614	77,928	98,068
Fouling	(m2-K/W)		0,000172		0,000601
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	885,23	Actual U	(W/m2-K)	430,65
Tube h	(W/m2-K)	6196,15	Required U	(W/m2-K)	393,98
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,1134
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	33,554
EMTD	(Deg C)	8,6	Overdesign	(%)	9,31
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	336,551	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,50
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	168,000
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	33
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	52,502
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	52,502
Length	(m)	6,096	Inlet height	(mm)	29,304
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	16,743
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	77,927
Tubecount	(--)	93	Tube outlet	(mm)	77,927
Tube Pass	(--)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	48,67	Shellside	0,16	A	0.171
Tube	8,92	Tubeside	1,01	B	0.480
Fouling	40,68	Crossflow	0,20	C	0.204
Metal	1,731	Window	0,39	E	0.145
				F	0.000

Figura H29. Diseño del intercambiador E-106 (validación de DETC)

<b>Output Summary</b>				Page 1	
Released to the following HTRI Member Company: <i>VEPICA</i> <i>COMPUTACION</i>					
Xist Ver. 5.00		SN: 1500212300		<b>SI Units</b>	
Design - Horizontal Multipass Flow TEMA BES Shell With Single-Segmental Baffles					
<b>No Data Check Messages.</b>					
<b>See Runtime Message Report for Warning Messages.</b>					
Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)		7,2131		12,0437
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,000	0,000	0,000	0,000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	49,60	37,80	33,00	37,80
Inlet P/Avg	(kPa)	2472,37	2455,99	722,761	677,001
dP/Allow.	(kPa)	32,753	34,324	91,520	98,068
Fouling	(m2-K/W)		0,000172		0,000601
Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	2066,57	Actual U	(W/m2-K)	613,51
Tube h	(W/m2-K)	7968,49	Required U	(W/m2-K)	597,70
Hot regime	(--)	Sens. Liquid	Duty	(MegaWatts)	0,2416
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Area	(m2)	70,942
EMTD	(Deg C)	5,7	Overdesign	(%)	2,65
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	BES	Baffle type	(--)	Single-Seg.
Shell ID	(mm)	435,050	Baffle cut	(Pct Dia.)	17,90
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	Perpend.
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	120,527
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	55
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	102,261
Tube OD	(mm)	19,050	Shell outlet	(mm)	102,261
Length	(m)	7,315	Inlet height	(mm)	25,565
Pitch ratio	(--)	1,3333	Outlet height	(mm)	17,543
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	102,261
Tube count	(--)	164	Tube outlet	(mm)	102,261
Tube Pass	(--)	4			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	29,69	Shellside	0,56	A	0.237
Tube	9,89	Tubeside	1,71	B	0.401
Fouling	57,98	Crossflow	0,93	C	0.131
Metal	2,450	Window	0,98	E	0.231
				F	0.000

Figura H30. Diseño del intercambiador E-107 (validación de DETC)

APÉNDICE I. Hojas de reporte del programa DETC

Diseño de un Intercambiador de Tipo Tubos y Carcasa					
<b>Condiciones de Proceso</b>		Carcasa		Tubos	
Fluido		Propano		Agua	
Flujo másico	kg/h	6163,91		20056,97	
Temp Entrada/Salida	°C	60,3	38,1	33,3	38,0
ΔP Calculada/Permitida	kPa	7,12	19,61	74,88	98,07
Factor de Ensuciamiento	m <sup>2</sup> .K/W	0,000172		0,000601	
<b>Comportamiento del Intercambiador</b>					
ho	W/(m <sup>2</sup> .K)	929,01	U	W/(m <sup>2</sup> .K)	481,69
hi	W/(m <sup>2</sup> .K)	7474,09	Área requerida	m <sup>2</sup>	19,943
DTmLm	K	11,4	Área disponible	m <sup>2</sup>	31,374
Calor	MW	0,1095	%Área exceso	%	36,43
<b>Geometría</b>					
Diámetro de la carcasa	mm	304,8	Pasos por los tubos	4	
Diámetro ext. tubos	mm	19,05	Número de tubos	86	
Diámetro int. tubos	mm	14,8336	Número de deflectores	40	
Longitud de los tubos	m	6,096			
Espaciado deflectores	mm	152,4			
<b>Otros resultados</b>			<b>Resistencia Térmica, %</b>		
Tpo	K	306,22	Carcasa	51,85	
Tpi	K	305,43	Tubos	8,28	
Vt	m/s	1,51	Metal	2,65	
Vc	m/s	0,37	Ensuciamiento	37,22	
Ret	--	31080,25			
Rec	--	32529,51			
Gt	kg/(h.m <sup>2</sup> )	5398312,02			
Gc	kg/(h.m <sup>2</sup> )	663499,42			
Aft	m <sup>2</sup>	0,00			
Afc	m <sup>2</sup>	0,01			
Nut	--	177,51			
Prt	--	4,79			
Nuc	--	149,69			
Prc	--	2,75			
fdt	--	0,03			
fdc	--	0,24			
<b>Propiedades</b>					
		Carcasa		Tubos	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	496,145	502,209	995,257	993,626
Cap. Calorífica	kJ/(kg.K)	3,234	2,797	4,178	4,177
Cond. Térmica	W/(m.K)	0,083	0,090	0,620	0,626
Viscosidad	cP	0,070	0,088	0,749	0,682

Figura I.1. Diseño del intercambiador E-106.

<b>Diseño de un Intercambiador de Tipo Tubos y Carcasa</b>						
<b>Condiciones de Proceso</b>			<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>	
Fluido			Propileno		Agua	
Flujo másico	kg/h		25967,12		43357,25	
Temp Entrada/Salida	°C		49,9	38,0	33,3	38,1
ΔP Calculada/Permitida	kPa		29,58	34,32	79,81	98,07
Factor de Ensuciamiento	m <sup>2</sup> .K/W		0,000172		0,000601	
<b>Comportamiento del Intercambiador</b>						
h <sub>o</sub>	W/(m <sup>2</sup> .K)	1474,74		U	W/(m <sup>2</sup> .K)	594,02
h <sub>i</sub>	W/(m <sup>2</sup> .K)	7232,23		Área requerida	m <sup>2</sup>	55,044
DTmLm	K	7,4		Área disponible	m <sup>2</sup>	84,930
Calor	MW	0,2416		%Área exceso	%	54,29
<b>Geometría</b>						
Diámetro de la carcasa	mm	438,15		Pasos por los tubos		4
Diámetro ext. tubos	mm	19,05		Número de tubos		194
Diámetro int. tubos	mm	14,8336		Número de deflectores		33
Longitud de los tubos	m	7,3152				
Espaciado deflectores	mm	219,075				
<b>Otros resultados</b>			<b>Resistencia Térmica, %</b>			
T <sub>po</sub>	K	306,52		Carcasa	40,28	
T <sub>pi</sub>	K	305,83		Tubos	10,55	
V <sub>t</sub>	m/s	1,45		Metal	3,27	
V <sub>c</sub>	m/s	0,73		Ensuciamiento	45,90	
Ret	--	29813,15				
Rec	--	72135,40				
G <sub>t</sub>	kg/(h.m <sup>2</sup> )	5173103,41				
G <sub>c</sub>	kg/(h.m <sup>2</sup> )	1352671,37				
A <sub>ft</sub>	m <sup>2</sup>	0,01				
A <sub>fc</sub>	m <sup>2</sup>	0,02				
Nu <sub>t</sub>	--	171,74				
Pr <sub>t</sub>	--	4,78				
Nu <sub>c</sub>	--	217,51				
Pr <sub>c</sub>	--	2,18				
fd <sub>t</sub>	--	0,03				
fd <sub>c</sub>	--	0,21				
<b>Propiedades</b>						
		<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>		
		<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	512,499	515,770	995,251	993,584	
Cap. Calorífica	kJ/(kg.K)	2,958	2,724	4,178	4,177	
Cond. Térmica	W/(m.K)	0,092	0,097	0,620	0,626	
Viscosidad	cP	0,070	0,075	0,749	0,681	

Figura I.2. Diseño del intercambiador E-107

<b>Evaluación de un Intercambiador de Tipo Tubos y Carcasa</b>						
<b>Condiciones de Proceso</b>			<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>	
Fluido			Propano		Agua	
Flujo másico	kg/h		6163,91		20056,61	
Temp Entrada/Salida	°C		60,3	38,0	33,3	38,3
ΔP Calculada/Permitida	kPa		7,12	19,61	74,84	98,07
Factor de Ensuciamiento	m <sup>2</sup> .KWV		0,000172		0,000601	
<b>Comportamiento del Intercambiador</b>						
ho	W/(m <sup>2</sup> .K)	929,18	U actual		W/(m <sup>2</sup> .K)	481,79
hi	W/(m <sup>2</sup> .K)	7484,38	U requerido		m <sup>2</sup>	360,551
DTmLn	K	10,8	Área		m <sup>2</sup>	31,374
Calor	MW	0,1152	%Sobrediseño		%	33,63
<b>Geometría</b>						
Diámetro de la carcasa	mm	304,8	Pasos por los tubos		4	
Diámetro ext. tubos	mm	19,05	Número de tubos		86	
Diámetro int. tubos	mm	14,8336	Número de deflectores		40	
Longitud de los tubos	m	6,096				
Espaciado deflectores	mm	152,4				
<b>Otros resultados</b>			<b>Resistencia Térmica, %</b>			
Tpo	K	306,37	Carcasa		51,85	
Tpi	K	305,59	Tubos		8,27	
Vt	m/s	1,51	Metal		2,65	
Vc	m/s	0,37	Ensuciamiento		37,23	
Ret	--	31155,45				
Rec	--	32513,05				
Gt	kg/(h.m <sup>2</sup> )	5398215,13				
Gc	kg/(h.m <sup>2</sup> )	663499,42				
Aft	m <sup>2</sup>	0,004				
Afc	m <sup>2</sup>	0,009				
Nut	--	177,70				
Prt	--	4,78				
Nuc	--	149,68				
Prc	--	2,75				
fdt	--	0,03				
fdc	--	0,24				
<b>Propiedades</b>						
		<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>		
		<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	496,145	502,237	995,257	993,541	
Cap. Calorífica	kJ/(kg.K)	3,234	2,795	4,178	4,177	
Cond. Térmica	W/(m.K)	0,083	0,090	0,620	0,627	
Viscosidad	cP	0,070	0,088	0,749	0,679	

Figura I.3. Evaluación del intercambiador E-106

<b>Evaluación de un Intercambiador de Tipo Tubos y Carcasa</b>						
<b>Condiciones de Proceso</b>			<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>	
Fluido			Propileno		Agua	
Flujo másico	kg/h		24800,22		41813,21	
Temp Entrada/Salida	°C		49,9	38,0	33,3	38,1
ΔP Calculada/Permitida	kPa		27,22	34,32	74,76	98,07
Factor de Ensuciamiento	m <sup>2</sup> .KW		0,000172		0,000601	
<b>Comportamiento del Intercambiador</b>						
ho	W/(m <sup>2</sup> .K)	1437,53		U actual	W/(m <sup>2</sup> .K)	586,02
hi	W/(m <sup>2</sup> .K)	7017,13		U requerido	m <sup>2</sup>	368,444
DTmLn	K	7,4		Área	m <sup>2</sup>	84,930
Calor	MW	0,2330		%Sobrediseñ	%	59,05
<b>Geometría</b>						
Diámetro de la carcasa	mm	438,15		Pasos por los tubos		4
Diámetro ext. tubos	mm	19,05		Número de tubos		194
Diámetro int. tubos	mm	14,8336		Número de deflectores		33
Longitud de los tubos	m	7,3152				
Espaciado deflectores	mm	219,075				
<b>Otros resultados</b>			<b>Resistencia Térmica, %</b>			
Tpo	K	306,07		Carcasa	40,77	
Tpi	K	305,27		Tubos	10,73	
Vt	m/s	1,39		Metal	3,23	
Vc	m/s	0,70		Ensuciamient	45,28	
Ret	--	28751,45				
Rec	--	68893,81				
Gt	kg/(h.m <sup>2</sup> )	4988878,95				
Gc	kg/(h.m <sup>2</sup> )	1291885,51				
Aft	m <sup>2</sup>	0,008				
Afc	m <sup>2</sup>	0,019				
Nut	--	166,64				
Prt	--	4,78				
Nuc	--	212,02				
Prc	--	2,18				
fdt	--	0,03				
fdc	--	0,21				
<b>Propiedades</b>						
		<b>Carcasa</b>		<b>Tubos</b>		
		<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	512,499	515,770	995,251	993,584	
Cap. Calorífico	kJ/(kg.K)	2,958	2,724	4,178	4,177	
Cond. Térmico	W/(m.K)	0,092	0,097	0,620	0,626	
Viscosidad	cP	0,070	0,075	0,749	0,681	

Figura I.4. Evaluación del intercambiador E-107

**APENDICE J. Cálculos tipos para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y carcasa**

Para los cálculos de diseño de un intercambiador de tubos y carcasa, se utilizará como ejemplo el intercambiador E-106, usando como datos las condiciones actuales de la unidad de FCC estudiada.

Datos:

- Fluido en la carcasa: Producto de propano
- Temperatura de entrada,  $T_1 = 60$  °C
- Temperatura de salida,  $T_2 = 37,7$  °C.
- Flujo másico en la carcasa,  $M = 6193,92$  kg/h.
- Fluido en los tubos: Agua de enfriamiento.
- Temperatura de entrada,  $t_1 = 60$  °C
- Temperatura de salida,  $t_2 = 37,7$  °C.
- Flujo másico en los tubos,  $m = 20056,64$  kg/h
- Longitud de los tubos,  $L = 6,096$  m.
- Diámetro externo de los tubos,  $D_o$ : 19,05 mm.
- Arreglo de los tubos: triangular

Una vez introducidos los datos requeridos por el programa, se hace el cambio de unidades correspondiente al Sistema Inglés, si se requiere, ya que el procedimiento utilizado en las hojas de cálculo se basa en este sistema; y se sigue el siguiente procedimiento.

**Paso 1.** Calcular las temperaturas promedio de los fluidos.

*Temperatura promedio en la carcasa*

$$T_1(R) = T_1(^{\circ}C) \cdot 1,8 + 492 = 60 \cdot 1,8 + 492 = 600R$$

$$T_2 = 559,9R$$

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{600 + 559,9}{2} = 579,9R$$

*Temperatura promedio en los tubos*

$$t_1 = 551,4R$$

$$t_2 = 560,0R$$

$$t_{prom} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{551,4 + 560,0}{2} = 555,7R$$

**Paso 2.** Para obtener los valores de cada propiedad, evaluada a la temperatura promedio de los fluidos, realizar un ajuste lineal de las propiedades, de acuerdo a los datos introducidos mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla J.1.** Datos de las propiedades de los fluidos del intercambiador E-106, introducidos al programa DETC

Temperatura (°C)	Densidad, $\rho$		Capacidad calorífica, $C_p$		Conductividad térmica, $k$		Viscosidad dinámica, $\mu$	
	kg/m <sup>3</sup>	lb/pie <sup>3</sup>	kJ/kg.K	BTU/lb.R	W/m.K	BTU/h.pie.R	cP	lb/pie.h
<b>Carcasa</b>								
37,7	502,10	31,22	2,7949	0,6679	0,0899	0,0521	0,088	0,2130
60	496,01	30,94	3,2342	0,7729	0,0825	0,0478	0,071	0,1724
<b>Tubos</b>								
33	994,99	62,07	4,1777	0,9985	0,6198	0,3577	0,7488	1,8121
37,8	993,32	61,97	4,1771	0,9984	0,6263	0,3229	0,6808	1,6475

Para la densidad en la carcasa:

$$\rho_2 = a \cdot T_2 + b \tag{Ec. 3}$$

$$a = \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1} \tag{Ec. 4}$$

Donde:

$T1, T2$ = temperaturas introducidas como datos (R).

$\rho1, \rho2$  = densidades evaluadas a las temperaturas  $T1$  y  $T2$  (lb/pie<sup>3</sup>)

$$a = \frac{31,22 - 30,94}{559,9 - 600,0} = -0,0095$$

$$b = \rho2 - a \cdot T2 = 31,22 - (-0,0095) \cdot 559,9 = 36,63$$

Así, el ajuste de la densidad para la carcasa es:

$$\rho_c = -0,0095 \cdot T + 36,63$$

El valor de la densidad del fluido de la carcasa a la temperatura promedio es por tanto:

$$\rho_c(T_{prom}) = -0,0095 \cdot 579,9 + 36,63 = 31,14 \frac{lb}{pie^3}$$

Los coeficientes de los ajustes obtenidos para las propiedades en los tubos y en la carcasa y se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla J.2.** Coeficientes de los ajustes de las propiedades de los fluidos del intercambiador E-106.

Coeficientes del ajuste	Densidad	Capacidad calorífica	Conductividad	Viscosidad dinámica
Carcasa				
a	-0,0095	0,0026	-0,0001	-0,0011
b	36,63	-0,7964	0,1119	0,8133
Tubos				
a	-0,0120	0,0000	0,0004	-0,0190
b	68,72	1,0076	0,1188	12,3142

Los resultados de las propiedades del fluido en la carcasa, evaluadas a  $T_{prom}$  son:

$$\rho (T_{prom}) = 31,41 \text{ lb/pie}^3$$

$$C_p (T_{prom}) = 0,720 \text{ BTU/lb.R}$$

$$k (T_{prom}) = 0,050 \text{ BTU/h.pie.R}$$

$$\mu (T_{prom}) = 0,191 \text{ lb/h.pie}$$

Los resultados de las propiedades del fluido en los tubos, evaluadas a  $t_{prom}$  son:

$$\rho (t_{prom}) = 62,04 \text{ lb/pie}^3$$

$$C_p (t_{prom}) = 0,998 \text{ BTU/lb.R}$$

$$k (t_{prom}) = 0,361 \text{ BTU/h.pie.R}$$

$$\mu (t_{prom}) = 1,730 \text{ lb/h.pie}$$

**Paso 3.** Calcular el calor transferido.

$$q = M \cdot C \cdot (T_1 - T_2) = 13591,44 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 0,720 \frac{\text{BTU}}{\text{lb.R}} \cdot (600,0R - 559,9R) = 381500,32 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

**Paso4.** Calcular la diferencia de temperatura media logarítmica,  $\Delta Tm_{LN}$ , para flujos en contracorriente.

$$\Delta Tm_{Ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\text{Ln} \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} = \frac{(600,0R - 560,0R) - (559,9R - 551,4R)}{\text{Ln} \left( \frac{600,0R - 560,0R}{559,9R - 551,4R} \right)} = 20,29R$$

**Paso 5.** Determinar los parámetros  $P$  y  $R$ :

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{560,0R - 551,4R}{600,0R - 551,4R} = 0,178$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{600,0R - 559,9R}{560,0R - 551,4R} = 4,646$$

**Paso 6.** Obtener el factor de corrección de temperaturas,  $F$ :

$$F = \frac{\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{2 \cdot (R - 1)} \cdot \ln\left(\frac{1 - P}{1 - R \cdot P}\right)}{\ln\left(\frac{\frac{2}{P} - 1 - R + \frac{2}{P} \cdot \sqrt{(1 - P) \cdot (1 - R \cdot P)} + \sqrt{R^2 + 1}}{\frac{2}{P} - 1 - R + \frac{2}{P} \cdot \sqrt{(1 - P) \cdot (1 - R \cdot P)} - \sqrt{R^2 + 1}}\right)} = \frac{1,0118}{1,0511} = 0,963$$

**Paso 7.** Suponer un valor de coeficiente global de transferencia de calor.

$$U_s = 450 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 72,298 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 8.** Calcular el área de transferencia de calor en base al  $U_s$ :

$$A_s = \frac{q}{U_s \cdot F \cdot \Delta Tm_{Ln}} = \frac{381500,92 \frac{BTU}{h}}{72,298 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R} \cdot 0,963 \cdot 20,29R} = 246,31 \text{ pie}^2$$

**Paso 9.** Calcular el área de transferencia de calor de cada tubo, previa selección del diámetro exterior y longitud del mismo:

$$a_t = \pi \cdot D_o \cdot L = 3,1416 \cdot 0,063 \text{ pie} \cdot 20 \text{ pie} = 3,927 \frac{\text{pie}^2}{\text{tubo}}$$

**Paso 10.** Determinar el número de tubos en el intercambiador.

$$N_t = \frac{A_s}{a_t} = \frac{246,31 \text{ pie}^2}{3,927 \frac{\text{pie}^2}{\text{tubo}}} = 62,72 \text{ tubos} \approx 63 \text{ tubos}$$

**Paso 11.** Seleccionar el diámetro mínimo de la carcasa ( $D_c$ ), a partir de la tabla D5 del Apéndice D, en base al número de pasos por los tubos, número de tubos calculado y arreglo de los mismos. En este paso se establece como nuevo número de tubos, el valor inmediatamente superior al número de tubos calculado en el paso 10.

$$N_t = 86$$

$$D_c = 1 \text{ pie}$$

$$pt = 0,078 \text{ pies}$$

**Paso 12.** Corregir el área de transferencia de calor en base al nuevo número de tubos, obteniendo el área de transferencia de calor disponible:

$$A_D = N_t \cdot a_t = 86 \text{ tubos} \cdot 3,927 \frac{\text{pie}^2}{\text{tubo}} = 337,72 \text{ pie}^2$$

**Paso 14.** Calcular el coeficiente global de transferencia de calor disponible, en base al área de transferencia de calor disponible:

$$U_{Disp} = \frac{q}{A_D \cdot F \cdot \Delta Tm_{Ln}} = \frac{381500,92 \text{ BTU/h}}{337,72 \text{ pie}^2 \cdot 0,963 \cdot 20,29R} = 57,83 \frac{\text{BTU}}{h \cdot \text{pie}^2 \cdot R}$$

**Paso 15.** Fijar el espaciado de los deflectores  $B$

$$B = \frac{1}{2} D_c = 0,5 \text{ pies}$$

**Paso 16.** Calcular el número de deflectores ( $N_b$ ) y se aproxima al número entero superior:

$$N_b = \frac{L}{B} = \frac{20 \text{ pies}}{0,5 \text{ pies}} \approx 40$$

**Cálculos para el lado de la carcasa:**

**Paso 17.** Determinar el Área de flujo de la carcasa:

$$A_{fc} = D_c \cdot \left( \frac{pt - D_o}{pt} \right) \cdot B = 1 \text{ pie} \cdot \frac{0,078 \text{ pies} - 0,063 \text{ pies}}{0,078 \text{ pies}} \cdot 0,5 \text{ pies} = 0,1 \text{ pie}^2$$

**Paso 18.** Calcular la velocidad másica en la carcasa

$$G_c = \frac{m_c}{A_{fc}} = \frac{13591,44 \frac{lb}{h}}{0,1 \text{ pie}^2} = 136914,44 \frac{lb}{h \cdot \text{pie}^2}$$

**Paso 19.** Calcular el diámetro equivalente ( $D_e$ ), para arreglos de tubos triangulares.

$$D_e = \frac{4 \cdot \left( \frac{1}{2} pt \cdot 0,87 \cdot pt - \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi \cdot D_o} = \frac{4 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot 0,87 (0,078 \text{ pies})^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{3,1415 \cdot (0,063 \text{ pies})^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \cdot 3,1415 \cdot 0,063 \text{ pies}}$$

$$D_e = 0,046 \text{ pies}$$

**Paso 20.** Determinar el número de Reynolds para la carcasa.

$$Re_c = \frac{D_e \cdot G_c}{\mu_o} = \frac{0,046 \text{ pies} \cdot 136914,44 \frac{lb}{h \cdot \text{pie}^2}}{0,191 \frac{lb}{\text{pie} \cdot h}} = 32513,05$$

**Paso 21.** Determinar el número de Prandtl ( $Pr_c$ ) para el lado de la carcasa.

$$Pr_c = \frac{\mu(T_{prom}) \cdot Cp(T_{prom})}{k(T_{prom})} = \frac{0,191 \frac{lb}{\text{pie} \cdot h} \cdot 0,720 \frac{BTU}{lb \cdot R}}{0,05 \frac{BTU}{h \cdot \text{pie} \cdot R}} = 2,754$$

**Paso 22.** Calcular el número de Nusselt en la carcasa ( $Nu_c$ ). Para este cálculo se asume que el factor de corrección de viscosidad  $(\mu/\mu_{po})^{0,14}$  es igual a la unidad ya que aún no se conoce la temperatura de pared externa.

$$Nu_c = 0,36 \cdot Re_c^{0,55} \cdot Pr_c^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_o}{\mu_{po}} \right)^{0,14} = 0,36 \cdot (32513,05)^{0,55} \cdot (2,754)^{1/3} \cdot 1 = 192,97$$

**Paso 23.** A partir del número de Nusselt para el fluido de la carcasa, calcular el coeficiente individual de convección externa ( $h_o$ ).

$$h_o = \frac{Nu_c \cdot k(T_{prom})}{D_e} = \frac{192,97 \cdot 0,05 \frac{BTU}{h \cdot pie \cdot R}}{0,046 \text{ pies}} = 209,75 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Cálculos para el lado de los tubos:**

**Paso 24.** Calcular el área de flujo por tubo ( $a_{ft}$ ):

$$a_{ft} = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot (0,0487 \text{ pies})^2}{4} = 0,0018 \text{ pie}^2$$

**Paso 25.** Calcular el área de flujo total en el lado de los tubos ( $A_{Ft}$ ):

$$A_{Ft} = \frac{a_{ft} \cdot N_t}{N_p} = \frac{0,0018 \text{ pies}^2 \cdot 86}{4} = 0,040 \text{ pies}^2$$

**Paso 26.** Calcular la velocidad másica en los tubos ( $G_t$ ):

$$G_t = \frac{m_t}{A_{Ft}} = \frac{44224,89 \frac{lb}{h}}{0,040 \text{ pies}^2} = 1105796,55 \frac{lb}{\text{pies}^2 \cdot h}$$

**Paso 27.** Determinar el número de Reynolds para el lado de los tubos ( $Re_t$ ):

$$Re_t = \frac{D_i \cdot G_t}{\mu(tprom)} = \frac{0,0487 \text{ pies} \cdot 1105796,55 \frac{\text{lb}}{\text{pies}^2 \cdot \text{h}}}{1,730 \frac{\text{lb}}{\text{pie} \cdot \text{h}}} = 31110,49$$

**Paso 28.** Determinar el número de Prandtl ( $Pr_t$ ) para el lado de los tubos:

$$Pr_t = \frac{\mu(tprom) \cdot Cp(tprom)}{k(tprom)} = \frac{1,730 \frac{\text{lb}}{\text{pie} \cdot \text{h}} \cdot 0,998 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot \text{R}}}{0,361 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie} \cdot \text{R}}} = 4,784$$

**Paso 29.** Calcular el número de Nusselt del fluido en el lado de los tubos ( $Nu_t$ ), para fluidos en régimen turbulento. Para este cálculo se asume que el factor de corrección de viscosidad es igual a la unidad ya que, aún no se conoce la temperatura de pared interna.

$$Nu_t = 0,027 \cdot Re_t^{0,8} \cdot Pr_t^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_t}{\mu_{pi}} \right)^{0,14} = 0,027 \cdot 31110,49^{0,8} \cdot 4,784^{1/3} \cdot 1 = 178,77$$

**Paso 30.** A partir del número de Nusselt para el fluido en el lado de los tubos, calcular el coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ ).

$$h_i = \frac{Nu_t \cdot k(tprom)}{D_i} = \frac{178,77 \cdot 0,361 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie} \cdot \text{R}}}{0,0487 \text{ pies}} = 1327,17 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}}$$

**Paso 31.** Corregir el coeficiente individual de convección interna.

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{D_i}{D_o} = 1327,17 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}} \cdot \frac{0,0487 \text{ pies}}{0,063 \text{ pies}} = 1025,92 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}}$$

A continuación se realiza la corrección por temperatura de pared:

**Paso 32.** Calcular la temperatura de pared interna ( $T_{pi}$ )

$$\frac{\frac{t_{prom} - T_{pi}}{1}}{h_i \cdot \pi \cdot D_i \cdot L} = \frac{T_{pi} - T_{prom}}{\frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot \pi \cdot D_o \cdot L}}$$

$$\frac{555,7R - T_{pi}}{2,4624 \cdot 10^{-4} \frac{h \cdot R}{BTU}} = \frac{T_{pi} - 579,9R}{1,245 \cdot 10^{-3} \frac{h \cdot R}{BTU}}$$

El cálculo de la temperatura de pared interna, es un proceso iterativo resuelto a partir de la función *buscar objetivo* de Microsoft® Excel, el cual alcanza la solución al variar el valor de  $T_{pi}$  hasta que ambos lados de la ecuación se igualen.

$$T_{pi} = 558,9R$$

**Paso 33.** Calcular la temperatura de pared externa ( $T_{po}$ ).

$$T_{po} = T_{pi} - \frac{\frac{t_{prom} - T_{pi}}{1}}{h_i \cdot \pi \cdot D_i \cdot L} \cdot \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$$

$$T_{po} = 558,9R - \frac{555,7R - 558,9R}{2,4624 \cdot 10^{-4} \frac{h \cdot R}{BTU}} \cdot \frac{\ln\left(\frac{0,063 \text{ pies}}{0,048 \text{ pies}}\right)}{3141,59 \frac{BTU}{h \cdot R}} = 559,93R$$

**Paso 34.** Evaluar las viscosidades de los fluidos a las temperaturas de pared interna y externa, ( $\mu_{pi}$ ) y ( $\mu_{po}$ ) respectivamente.

$$\mu_{pi} = -0,019 \cdot 558,9R + 12,3142 = 1,814 \frac{lb}{h \cdot pie}$$

$$\mu_{po} = -0,0011 \cdot 559,93R + 0,8133 = 0,223 \frac{lb}{h \cdot pie}$$

**Paso 35.** Corregir el coeficiente individual de convección interna ( $h_{ioc}$ ):

$$h_{ioc} = h_{io} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_{pi}} \right)^{0.14} = 1025,92 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R} \cdot \left( \frac{1,730}{1,814} \right)^{0.14} = 1019,13 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 36.** Corregir el coeficiente individual de convección externa ( $h_{oc}$ ):

$$h_{oc} = h_o \cdot \left( \frac{\mu_o}{\mu_{po}} \right)^{0.14} = 209,75 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R} \cdot \left( \frac{0,191}{0,223} \right)^{0.14} = 205,25 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 37.** Calcular el coeficiente global limpio de transferencia de calor ( $U_L$ ):

$$U_L = \frac{1}{\frac{1}{h_{ioc}} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_{oc}}}$$

$$U_L = \frac{1}{\frac{1}{1019,13 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}} + \frac{0,063 \text{ pie} \cdot \ln\left(\frac{0,063}{0,0487}\right)}{25 \frac{BTU}{h \cdot pie \cdot R} \cdot 2} + \frac{1}{205,25 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}}}$$

$$U_L = 135,17 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 38.** Calcular el coeficiente global de transferencia de calor de diseño ( $U_D$ ):

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_L} + r_i + r_o = \frac{1}{137,17 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}} + 0,0034 \frac{h \cdot pie^2 \cdot R}{BTU} + 0,00097 \frac{h \cdot pie^2 \cdot R}{BTU}$$

$$\frac{1}{U_D} = 0,0018 \frac{h \cdot pie^2 \cdot R}{BTU} \rightarrow U_D = 84,86 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 40.** Calcular el área de transferencia de calor requerida ( $A_{req}$ ):

$$A_{req} = \frac{381500,93 \frac{BTU}{h}}{84,86 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R} \cdot 0,963 \cdot 20,29R} = 230,17 \text{ pies}^2$$

**Paso 41.** Calcular el porcentaje de área en exceso.

$$\% A_{exc} = \frac{A_{Disp} - A_{req}}{A_{req}} \cdot 100 = \frac{337,72 - 230,17}{230,17} \cdot 100 = 46,76\%$$

**Cálculos de caída de presión:**

**Paso 42.** Calcular el factor de fricción de Darcy para el lado de la carcasa ( $f_D$ )

$$f_D = 1,756 \cdot \text{Re}_c^{-0,192} = 1,756 \cdot (32513,05)^{-0,192} = 0,239$$

**Paso 43.** Calcular la caída de presión en la carcasa ( $\Delta P_C$ ), a partir de la ecuación.

$$\Delta P_C = 2,679 \cdot 10^{-10} \frac{f_D \cdot G_C^2 \cdot D_C \cdot \frac{L}{B}}{g \cdot D_e \cdot \rho_C \cdot \left(\frac{\mu_o}{\mu_{po}}\right)^{0,14}}$$

$$\Delta P_C = 2,679 \cdot 10^{-10} \frac{\text{pies}^2 \cdot h^2}{\text{pulg}^2 \cdot s^2} \frac{0,239 \cdot \left(135914,44 \cdot \frac{lb}{h \cdot \text{pie}^2}\right)^2 \cdot 1 \text{pie} \cdot \frac{20 \text{pies}}{0,5 \text{pies}}}{32,2 \frac{\text{pie}}{s^2} \cdot 0,046 \text{pies} \cdot 31,141 \frac{lb}{\text{pie}^3} \cdot \left(\frac{0,191}{0,223}\right)^{0,14}}$$

$$\Delta P_C = 1,033 \frac{lb}{\text{pulg}^2} = 1,033 \text{psi}$$

**Paso 44.** Calcular el factor de Darcy para el lado de los tubos ( $f_D$ )

$$f_D = 0,411 \cdot \text{Re}_t^{-0,252} = 0,411 \cdot (31110,495)^{-0,252} = 0,030$$

**Paso 45.** Calcular la caída de presión para el lado de los tubos ( $\Delta P_t$ ),

$$\Delta P_t = 1,667 \cdot 10^{-11} \left[ 4 \cdot N_p + f_D \cdot \left(\frac{L \cdot N_p}{D_i}\right) \right] \cdot \frac{G_t^2}{2 \cdot \rho_t \cdot \left(\frac{\mu_i}{\mu_{pi}}\right)^{0,14}}$$

$$\Delta P_t = 1,667 \cdot 10^{-11} \frac{\text{psi} \cdot h^2 \cdot \text{pie}}{\text{lb}} \left[ 4 \cdot 4 + 0,030 \cdot \left( \frac{20 \text{ pies} \cdot 4}{0,0487 \text{ pies}} \right) \right] \cdot \frac{1105796,548 \frac{\text{lb}}{h \cdot \text{pie}^2}}{2 \cdot 62,035 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \cdot \left( \frac{1,730}{1,814} \right)^{0.14}}$$

$$\Delta P_t = 10,861 \text{ psi}$$

**Paso 46.** Se realiza la conversión de unidades para obtener cada uno de los resultados mostrados en el reporte del Apéndice I

**APENDICE K. Cálculos tipos para la evaluación de intercambiadores de calor de tubos y carcasa**

Para los cálculos de la evaluación de un intercambiador de tubos y carcasa, se utilizará como ejemplo el intercambiador E-106, en el cual se determina la temperatura de salida del agua de enfriamiento, usando como datos las condiciones actuales de la unidad de FCC estudiada.

Datos:

- Diámetro de la carcasa: 304,8 mm.
- Longitud de los tubos: 6,096 m.
- Diámetro externo de los tubos: 19,05 mm.
- Espesor BWG de los tubos: 14
- Número de pasos por los tubos: 4
- Número de tubos: 86
- Material de los tubos: acero al carbono
- Espaciado entre deflectores:  $\frac{1}{2}$  del diámetro de la carcasa.
- Arreglo de los tubos: triangular.
- Flujo másico en la carcasa: 6163,92 kg/h.
- Temperaturas de Entrada / Salida en la carcasa: 60,0 / 37,7 °C
- $\Delta P$  permisible en la carcasa: 19,61 kPa.
- Flujo másico en los tubos: 20056,64 kg/h.
- Temperatura de Entrada en los tubos: 33°C

Una vez introducidos los datos requeridos por el programa, se hace el cambio de unidades correspondiente al Sistema Inglés, si se requiere, ya que el procedimiento utilizado en las hojas de cálculo se basa en este sistema; y se sigue el siguiente procedimiento.

**Paso 1.** Para obtener los valores de cada propiedad, realizar un ajuste lineal de las propiedades, de acuerdo a los datos introducidos mostrados en la Tabla J.1 del Apéndice J, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla J.2 del Apéndice J.

**Paso 2.** Calcular el calor transferido por la corriente de la carcasa (propileno), según la ecuación mostrada en el paso 3 del Apéndice J.

$$q = 381500,32 \frac{BTU}{h}$$

**Paso 3.** Calcular la temperatura de salida del agua de enfriamiento (tubos), mediante un proceso iterativo realizado con la función *Buscar objetivo*, de Microsoft Excel®, a partir de la siguiente ecuación.

$$q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \rightarrow 381500,32 \frac{BTU}{h} = 44224,89 \frac{lb}{h} \cdot c \cdot (t_2 - 551,4R)$$

Obteniéndose:

$$t_2 = 560,6 R$$

**Paso 4.** Evaluar las propiedades de ambos fluidos a la temperatura promedio.

**Paso 5.** Seguir los pasos del 4 al 6, de los cálculos tipo para el diseño, mostrados en el Apéndice J.

**Paso 7.** Calcular el área de transferencia de calor

$$A = N_t \cdot \pi \cdot D \cdot L = 86 \cdot 3,1416 \cdot 0,063 \text{ pies} \cdot 20 \text{ pies} = 337,72 \text{ pies}^2$$

**Paso 8.** Calcular el coeficiente global de calor requerido por el proceso ( $U_{req}$ ), mediante, en base al área de transferencia de calor real calculada en el paso anterior.

$$U_{req} = \frac{q}{A \cdot F \cdot \Delta Tm_{LN}} = 63,51 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 9.** Seguir los pasos del 17 al 26 de los cálculos tipo para el diseño, mostrados en el Apéndice J.

**Paso 19.** Determinar el número de Reynolds para el lado de los tubos ( $Re_t$ ):

$$\text{Re}_t = \frac{D_i \cdot G_t}{\mu(\text{tprom})} = \frac{0,0487 \text{ pies} \cdot 1105796,55 \frac{\text{lb}}{\text{pies}^2 \cdot \text{h}}}{1,727 \frac{\text{lb}}{\text{pie} \cdot \text{h}}} = 31155,45$$

**Paso 20.** Determinar el número de Prandtl ( $\text{Pr}_t$ ) para el lado de los tubos:

$$\text{Pr}_t = \frac{\mu(\text{tprom}) \cdot C_p(\text{tprom})}{k(\text{tprom})} = \frac{1,727 \frac{\text{lb}}{\text{pie} \cdot \text{h}} \cdot 0,998 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot \text{R}}}{0,361 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie} \cdot \text{R}}} = 4,776$$

**Paso 21.** Calcular el número de Nusselt del fluido en el lado de los tubos ( $Nu_t$ ), para fluidos en régimen turbulento. Para este cálculo se asume que el factor de corrección de viscosidad es igual a la unidad ya que, aún no se conoce la temperatura de pared interna.

$$Nu_t = 0,027 \cdot \text{Re}_t^{0,8} \cdot \text{Pr}_t^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_{pi}} \right)^{0,14} = 0,027 \cdot 31155,45^{0,8} \cdot 4,776^{1/3} \cdot 1 = 178,87$$

**Paso 22.** A partir del número de Nusselt para el fluido en el lado de los tubos, calcular el coeficiente individual de convección interna ( $h_i$ ).

$$h_i = \frac{Nu_t \cdot k(\text{tprom})}{D_i} = \frac{178,87 \cdot 0,361 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie} \cdot \text{R}}}{0,0487 \text{ pies}} = 1325,91 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}}$$

**Paso 23.** Corregir el coeficiente individual de convección interna.

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{D_i}{D_o} = 1325,91 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}} \cdot \frac{0,0487 \text{ pies}}{0,063 \text{ pies}} = 1024,95 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}}$$

**Paso 24.** Calcular la temperatura de pared interna ( $T_{pi}$ ) por medio de la ecuación mostrada en el paso 32 del Apéndice J.

$$T_{pi} = 558,71$$

**Paso 25.** Calcular la temperatura de pared externa ( $T_{po}$ ) por medio de la ecuación mostrada en el caso 33 del Apéndice J.

$$T_{po} = 559,35R$$

**Paso 26.** Evaluar las viscosidades de los fluidos a las temperaturas de pared interna y externa, ( $\mu_{pi}$ ) y ( $\mu_{po}$ ) respectivamente.

$$\mu_{pi} = 1,881 \frac{lb}{h \cdot pie}$$

$$\mu_{po} = 0,267 \frac{lb}{h \cdot pie}$$

**Paso 27.** Corregir el coeficiente individual de convección interna ( $h_{ioc}$ ):

$$h_{ioc} = h_{io} \cdot \left( \frac{\mu_i}{\mu_{pi}} \right)^{0.14} = 1026,57 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 28.** Corregir el coeficiente individual de convección externa ( $h_{oc}$ ):

$$h_{oc} = h_o \cdot \left( \frac{\mu_o}{\mu_{po}} \right)^{0.14} = 163,67 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 29.** Calcular el coeficiente global de transferencia de calor actual  $U_{actual}$ .

$$U_{actual} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ioc}} + \frac{D_o \cdot \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{k} + \frac{1}{h_{oc}} + r_o + r_i} = 84,87 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot R}$$

**Paso 31.** Determinar el porcentaje de sobrediseño (%S):

$$\%S = \frac{U_{actual} - U_{req}}{U_{req}} \cdot 100 = \frac{84,87 - 63,51}{84,87} \cdot 100 = 33,63\%$$

**Paso 32.** Realizar la conversión de unidades para obtener cada uno de los resultados mostrados en el reporte del Apéndice I.