

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO**



**EVALUACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR
PERTENECIENTES AL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA
UNIDAD DE CRUDO DEL MEJORADOR PETROPIAR EN EL COMPLEJO
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI**

PRESENTADO POR:

JUAN PABLO JESÚS NAVARRO JIMÉNEZ

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

INGENIERO DE PETRÓLEO.

Puerto la Cruz, Junio de 2011.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO



EVALUACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR
PERTENECIENTES AL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA
UNIDAD DE CRUDO DEL MEJORADOR PETROPIAR EN EL COMPLEJO
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI

ASESORES:

Ing. Rayda Patiño C.
Asesor Académico

Ing. Noel E. Guape
Asesor Industrial

Puerto la Cruz, Junio de 2011.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO**



**EVALUACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR
PERTENECIENTES AL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA
UNIDAD DE CRUDO DEL MEJORADOR PETROPIAR EN EL COMPLEJO
JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI**

JURADO CALIFICADOR:

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

Ing. Rayda Patiño C.
Asesor Académico

Ing. Rafael Barrueta
Jurado Principal

Ing. Gabriel Guzmán
Jurado Principal

Puerto la Cruz, Junio de 2011.



RESOLUCIÓN

DE ACUERDO CON EL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, EL CUAL LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.



DEDICATORIAS

Dedicado principalmente a **DIOS**, por darme las fuerzas y la sabiduría para haber alcanzado esta etapa de mi camino por la vida.

A mis padres, por haberme apoyado en cada instante y seguir creyendo en mí por encima de tantos tropiezos en la vida. LOS AMO.

A mis hermanos, por ser parte de mi vida y ser parte de mí, a mi sobrina por ser esa gota de alegría que desborda mi vida. LOS ADORO.

A mi princesa hermosa, por ser la luz de mi existir y siempre ver lo mejor en mí, más allá de lo aparente, por estar siempre a mi lado. TE AMO.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por guiar cada uno de mis pasos y bendecir siempre mi camino con su luz divina, por darme el aliento de vida y por estar conmigo en las más regocijotes alegrías, en más la profunda soledad y en los momentos más difíciles de la vida.

A mis padres, **Sol María Jiménez** y **Ali Navarro**, por haberme enseñado tantas cosas importantes, por mantener siempre tanta fe en mi, por ser los mejores padres, por apoyarme cada día y por todo ese inmenso amor que han sembrado en mi alma, por darnos todo, a mi y a mis hermanos, sin esperar nada, por haberme enseñado a ser quien soy, son mi fuerza y mi inspiración, los amo.

A mis abuelos, **Abdón Jiménez** y **Cecilia Ávila**, por siempre haberme dado todo su cariño y amor incondicional, por ser el más grande ejemplo de amor y perseverancia que jamás imaginé conocer en mi vida, los amo mis viejos, son los tesoros de mi vida.

A mi princesa hermosa, **Karelis Díaz**, por ser mi mejor amiga, mi confidente, mi alma gemela, mi todo; por estar todo este tiempo a mi lado y apoyarme con tanta paciencia y amor, eres la única estrella en mi firmamento, te amo con todo mi ser.

A mis tíos, **Novelis**, **Xiomara**, **Abdón (Tito)** y **Alexander (Tate)**, por siempre haber compartido conmigo momentos especiales de mi vida y apoyarme cuando lo he necesitado, por también haberme enseñado tanto, los quiero.



A mis amigos de la Universidad, **Luis José Gómez** (el popular Toto), **Jesús Salcedo** (El Negro), **Manuel Manzano**, **Orlando Rojas** (El Gordo), **Jackeline Azócar** (La Negra), **Verónica Cedeño**, **Celia Marini** (La Gorda), **Johana Aparicio**, **Ana Camargo**, **Simón Malaver**, **Elizabeth Leal**, **Daniela Noguera**, **Daniel Marcano y Braulio Silva**; por haber compartido conmigo tantos momentos, por los instantes de arduo estudio, por las risas compartidas, por haber estado siempre allí, por acompañarme en este largo camino, a todos ustedes, mi más sincera amistad y aprecio, gracias los doy desde lo más profundo de mi corazón.

A mi asesora académica, **Ing. Rayda Patiño**, por enseñarme y guiarme, por soportar las locuras de este “extraterrestre”, por ser una gran profesora y una gran amiga, por haberme asesorado con tanta paciencia y ser un gran ejemplo del profesional que anhelo algún día ser.

Al **Ing. Joaquín Barazarte**, por ser un gran amigo, maravillosa persona y excelente profesional, por ser un ejemplo inmenso para mi y apoyarme tanto, por haberme enseñado tanto, por haber compartido tus conocimientos conmigo y haberme guiado con tu gran carisma en la realización de este trabajo, infinitas gracias.

A mi asesor industrial, **Ing. Noel Guape**, por ayudarme en la realización de este trabajo, por brindarme su amistad y apoyarme.

MUCHAS GRACIAS A TODOS...



RESUMEN

La evaluación de los intercambiadores de calor pertenecientes al Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo del Mejorador de PDVSA Petropiar, tuvo como finalidad proponer un programa de mantenimiento y de limpieza preventivo en función de la pérdida de eficiencia de los equipos por ensuciamiento. Para lo cual se creó un modelo de simulación con el software Pro II versión 7.0 y una hoja de cálculo con un procedimiento a fin de comparar resultados. Inicialmente se validaron los resultados de factor de ensuciamiento y de calor transferido en la evaluación de los datos de diseño de los equipos, donde se obtuvieron valores con diferencias despreciables con respecto a los establecidos en el diseño de los intercambiadores de calor. Posteriormente, se introdujeron los datos operacionales en los modelos de simulación y en las hojas de cálculo con el fin de obtener los valores de calor transferido y del factor de ensuciamiento de cada intercambiador desde el año 2.010 hasta la actualidad. Así mismo, se tomaron mediciones de las presiones de entrada y de salida de ambos lados para todos los equipos para verificar el comportamiento de estas unidades. Los factores mencionados fueron los principales parámetros analizados en la evaluación. Esto permitió conocer que los intercambiadores de calor 10-E-009, 10-E-006 A-D, 10-E-007 A-D y 10-E-004 A/B/C, tienen un bajo rendimiento en el proceso de transferencia de calor debido al elevado factor de ensuciamiento que presentan, los cuales sobrepasan aproximadamente en 400%, 70%, 80% y 230% respectivamente los valores de ensuciamiento esperados por el diseño de estos equipos, y los valores de calor transferido actualmente presentan deficiencias de 76%, 72%, 45% y 23% respectivamente para cada uno de estos equipos con respecto al calor que se espera transfieran por diseño. Por lo cual se recomendó realizar el mantenimiento preventivo inmediato de los intercambiadores de calor mencionados.



CONTENIDO

	Pág.
RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIAS	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VIII
CONTENIDO	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
CAPÍTULO I	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	21
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	21
CAPÍTULO II	22
MARCO TEÓRICO	22
2.1 ANTECEDENTES	22
2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA	23
2.2.1 <i>Asociaciones Estratégicas en la Faja Petrolífera del Orinoco</i>	23
2.2.2 <i>Breve Descripción de Transporte de Hidrocarburos</i>	23
2.2.3 <i>Objetivo del Mejorador</i>	24
2.2.4 <i>Descripción General del Mejorador Petropiar</i>	24
2.2.5 <i>Descripción de las Unidades de Proceso del Mejorador</i>	26
2.2.6 <i>Descripción de Secciones de la Unidad de Crudo</i>	33
2.3 BASES TEÓRICAS	41



2.3.1 Intercambiadores de Calor	41
2.3.2 Tipos de Intercambiadores de Calor.....	41
2.3.3 Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza.....	42
2.3.3.1 Partes de un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza.....	43
2.3.3.2 Tipos de Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza	52
2.3.4 Problemas Operacionales Típicos en los Intercambiadores de Calor.....	57
2.3.5 Simulación de Procesos Químicos	62
2.3.5.1 Paquetes de Simulación	62
2.3.5.2 Clasificación de los Métodos de Simulación	63
2.3.5.3 Simulación de Procesos en Estado Estacionario Secuenciales	64
2.3.5.4 Simulador de Procesos PRO II versión 7.0.....	65
2.3.5.5 Intercambiadores de Calor en Simulador PRO II versión 7.0.....	68
2.3.5.6 Propiedades Físicoquímicas de los fluidos y Ecuaciones Termodinámicas utilizadas en Simulador PRO II versión 7.0.....	73
CAPÍTULO III.....	77
DESARROLLO DEL TRABAJO	77
3.1 IDENTIFICAR LAS CONDICIONES DE DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR INCLUYENDO CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y VARIABLES OPERACIONALES MÁS IMPORTANTES.	77
3.1.1 Características de Diseño de los Intercambiadores de Calor	77
3.2 DIAGNOSTICAR LAS CONDICIONES ACTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR EN FUNCIÓN AL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO Y DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.	78
3.2.1 Condiciones de Operación Actuales de los Intercambiadores de Calor.....	78
3.2.2 Evaluación Térmica de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza.	80
3.2.2.1 Procedimiento de Cálculo para la Evaluación de los Intercambiadores de....	81
3.2.2.2 Desarrollo de la Simulación para los Intercambiadores de Tubo y Coraza .	103
3.3 ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR TOMANDO COMO BASE SUS CONDICIONES DE DISEÑO.....	113
3.4 PROPONER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA PREVENTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE ACUERDO A LAS PROYECCIONES DE SUS COMPORTAMIENTOS HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS DURANTE SU TIEMPO EN OPERACIÓN.	114



CAPÍTULO IV.....	115
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	115
4.1 IDENTIFICAR LAS CONDICIONES DE DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR INCLUYENDO CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y VARIABLES OPERACIONALES MÁS IMPORTANTES.	115
4.1.1 <i>Tren de Pre calentamiento en Frío de la Unidad de Crudo</i>	115
4.1.2 <i>Características de Diseño de los Intercambiadores de Calor</i>	117
4.2 DIAGNOSTICAR LAS CONDICIONES ACTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR EN FUNCIÓN AL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO Y DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.	119
4.2.1 <i>Datos de las Condiciones Operacionales Actuales de los Intercambiadores de Calor</i>	119
4.2.2 <i>Resultados de la Evaluación Térmica de los Intercambiadores de Calor</i>	136
4.3 ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR TOMANDO COMO BASE SUS CONDICIONES DE DISEÑO.....	144
4.3.1 <i>Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C</i>	144
4.3.2 <i>Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C</i>	147
4.3.3 <i>Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-005</i>	148
4.3.4 <i>Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-006 A-D</i>	153
4.3.5 <i>Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-007 A-D</i>	154
4.3.6 <i>Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-008</i>	158
4.3.7 <i>Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-009</i>	159
4.3.8 <i>Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-010</i>	162
4.4 PROPONER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA PREVENTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE ACUERDO A LAS PROYECCIONES DE SUS COMPORTAMIENTOS HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS DURANTE SU TIEMPO EN OPERACIÓN.	167
CONCLUSIONES.....	170
RECOMENDACIONES	171
BIBLIOGRAFÍA.....	172



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 2.1 DATOS DE LOS TUBOS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR. ^[6]	48
TABLA 2.2 CATEGORÍAS DEL ENSUCIAMIENTO. ^[9]	59
TABLA 2.3 ENSUCIAMIENTO APORTADO POR ALGUNOS FLUIDOS. ^[9]	61
TABLA 3.1 TRANSMISORES DE LAS VARIABLES DE PROCESO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO.	79
TABLA 4.1 DATOS FÍSICOS Y DIMENSIONALES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO.	120
TABLA 4.2 DATOS OPERACIONALES DE DISEÑO LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO.	121
TABLA 4.3 DATOS DE DISEÑO DE LOS FLUIDOS EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO.	122
TABLA 4.4 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001.	123
TABLA 4.5 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-004.	123
TABLA 4.6 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-005.	124
TABLA 4.7 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-006.	124
TABLA 4.8 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-007.	125
TABLA 4.9 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-008.	125
TABLA 4.10 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-009.	126
TABLA 4.11 DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-010.	126
TABLA 4.12 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001.	127
TABLA 4.13 DATOS DE LA NAFTA DILUENTE EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001.	128
TABLA 4.14 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-004.	128
TABLA 4.15 DATOS DEL MVGO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-004.	129



TABLA 4.16 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-005.	129
TABLA 4.17 DATOS DE LA NAFTA DILUENTE EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-005.	130
TABLA 4.18 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-006.	130
TABLA 4.19 DATOS DEL DESTILADO LIVIANO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-006.	131
TABLA 4.20 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-007.	131
TABLA 4.21 DATOS DEL MVGO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-007.....	132
TABLA 4.22 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-008.	132
TABLA 4.23 DATOS DEL DESTILADO COMBINADO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-008.	133
TABLA 4.24 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-009.	133
TABLA 4.25 DATOS DEL HVGO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-009.	134
TABLA 4.26 DATOS DEL CRUDO DILUIDO EN EL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-010.	134
TABLA 4.27 DATOS DEL DESTILADO LIVIANO EN EL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-010.	135
TABLA 4.28 DATOS DE PRESIÓN ACTUALES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO PARA MARZO DEL 2.010.	135
TABLA 4.29 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-001 A/B/C.	136
TABLA 4.30 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DE LOS INTERCAMBIADORES 10-E-001 A/B/C.	136
TABLA 4.31 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-004 A/B/C.	137
TABLA 4.32 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DE LOS INTERCAMBIADORES 10-E-004 A/B/C.	137



TABLA 4.33 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-005.....	138
TABLA 4.34 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DEL INTERCAMBIADOR 10-E-005.....	138
TABLA 4.35 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-006 A-D.....	139
TABLA 4.36 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DE LOS INTERCAMBIADORES 10-E-006 A-D.....	139
TABLA 4.37 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-007 A-D.....	140
TABLA 4.38 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DE LOS INTERCAMBIADORES 10-E-007 A-D.....	140
TABLA 4.39 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-008.....	141
TABLA 4.40 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DEL INTERCAMBIADOR 10-E-008.....	141
TABLA 4.41 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-009.....	142
TABLA 4.42 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DEL INTERCAMBIADOR 10-E-009.....	142
TABLA 4.43 RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-010.....	143
TABLA 4.44 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y LOS CÁLCULOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN ACTUALES DEL INTERCAMBIADOR 10-E-010.....	143
TABLA 4.45 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA PREVENTIVO DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO.....	168



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 2.1 UBICACIÓN DEL CAMPO HAMACA EN LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO. ^[4]	23
FIGURA 2.2 ESQUEMA GENERAL DEL MEJORADOR DE CRUDO PESADO PETROPIAR. ^[4]	25
FIGURA 2.3 UNIDADES DEL MEJORADOR DE CRUDO PESADO PETROPIAR. ^[4]	32
FIGURA 2.4 DIAGRAMA DE LA UNIDAD DE CRUDO DEL MEJORADOR PETROPIAR. ^[5]	40
FIGURA 2.5 CABEZALES Y CORAZAS DE INTERCAMBIADORES SEGÚN LA T.E.M.A. ^[8]	44
FIGURA 2.6 PARTES DE UN INTERCAMBIADOR DE TUBO Y CORAZA. ^[6]	45
FIGURA 2.7 TUBO ROLADO Y CASQUILLO. ^[6]	46
FIGURA 2.8 ARREGLOS COMUNES PARA LOS TUBOS DE INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CORAZA. ^[6]	49
FIGURA 2.9 CABEZAL DE TUBOS DE UN INTERCAMBIADOR DE TUBO Y CORAZA. ^[9]	50
FIGURA 2.10 DETALLE DE DEFLECTORES SEGMENTADOS. ^[6]	51
FIGURA 2.11 DEFLECTOR DE DISCO Y CORONA Y DEFLECTOR DE ORIFICIO. ^[6]	51
FIGURA 2.12 DISTRIBUCIÓN DE TUBOS EN EL CABEZAL O TAPA PARA UNA CORAZA DE 13 ¼ PLG DI CON TUBOS DE 1 PLG DE Y EN ARREGLO DE PASO TRIANGULAR DE 1 ¼ PLG ACOMODADO PARA SEIS PASOS POR LOS TUBOS. ^[6]	52
FIGURA 2.13 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CABEZAL DE TUBOS ESTACIONARIO. ^[6]	52
FIGURA 2.14 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL DE TUBOS FIJOS CON CARRETES INTEGRALES. ^[6]	53
FIGURA 2.15 INTERCAMBIADOR 1-2 DE CABEZAL DE TUBOS FIJO. ^[6]	54
FIGURA 2.16 INTERCAMBIADOR 1-2 CON CABEZAL FLOTANTE DE ARRASTRE. ^[6]	54
FIGURA 2.17 INTERCAMBIADOR 1-2 CON HAZ DE TUBOS EN U. ^[9]	56
FIGURA 2.18 INTERCAMBIADOR CON FLUJO DIVIDIDO EN LA CORAZA. ^[6]	57
FIGURA 2.19 VENTANA DEL SIMULADOR DE PROTFCESES PRO II VERSIÓN 7.0. ^[11]	67
FIGURA 2.20 VENTANA CONFIGURACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR RIGUROSO. ^[PROPIA]	70
FIGURA 2.21 VENTANA DATOS DE LOS TUBOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR RIGUROSO. ^[PROPIA]	71



FIGURA 2.22 VENTANA DATOS DE LOS DEFLECTORES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR RIGUROSO. [PROPIA]71

FIGURA 2.23 VENTANA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR RIGUROSO. [PROPIA]72

FIGURA 2.24 VENTANA DEL RESULTADOS PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR RIGUROSO. [PROPIA]73

FIGURA 2.25 VENTANA DE DATOS PARA CARACTERIZAR LOS FLUIDOS EN EL SIMULADOR PRO II. [PROPIA]74

FIGURA 2.26 VENTANA DE FLUJO PARA FLUIDOS EN EL SIMULADOR PRO II. [PROPIA]75

FIGURA 2.27 VENTANA DE CONDICIONES DE FLUJO PARA FLUIDOS EN EL SIMULADOR PRO II. [PROPIA]76

FIGURA 3.1 FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA CALÓRICA. [6]87

FIGURA 3.2 CURVA DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL LADO TUBO. [6]96

FIGURA 3.3 CURVA DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL LADO CORAZA. [6]97

FIGURA 3.4 VENTANA DEL SIMULADOR PRO II CON EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]103

FIGURA 3.5 VENTANA PARA EL INTERCAMBIADOR DE CALOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]104

FIGURA 3.6 VENTANA DE CONFIGURACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]105

FIGURA 3.7 VENTANA DATOS DE LOS TUBOS DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]106

FIGURA 3.8 VENTANA DATOS DE LOS DEFLECTORES DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]106

FIGURA 3.9 VENTANA DE DATOS DEL CRUDO EN EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]107

FIGURA 3.10 VENTANA DE FLUJO PARA EL CRUDO EN EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]108

FIGURA 3.11 VENTANA DE CONDICIONES DE PROCESO PARA EL CRUDO EN LA ENTRADA DEL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]109

FIGURA 3.12 VENTANA DE CONDICIONES DE PROCESO PARA EL CRUDO EN LA SALIDA DEL LADO CORAZA DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]109

FIGURA 3.13 VENTANA DE DATOS DE LA NAFTA EN EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]110

FIGURA 3.14 VENTANA DE FLUJO PARA LA NAFTA EN EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. [PROPIA]110



FIGURA 3.15 VENTANA DE CONDICIONES DE PROCESO PARA LA NAFTA DILUENTE EN LA ENTRADA DEL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. ^[PROPIA]111

FIGURA 3.16 VENTANA DE CONDICIONES DE PROCESO PARA LA NAFTA DILUENTE EN LA SALIDA DEL LADO TUBO DEL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. ^[PROPIA]111

FIGURA 3.17 UBICACIÓN DEL BOTÓN RUN EN LA VENTANA DEL SIMULADOR PRO II. ^[PROPIA]112

FIGURA 3.18 VENTANA DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA EL MES DE ABRIL DEL 2.010 PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C. ^[PROPIA]112

FIGURA 4.1 CONFIGURACIÓN Y SECUENCIA DE FLUJO DEL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO. ^[PROPIA]116

FIGURA 4.2 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-001 A/B/C.....146

FIGURA 4.3 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-001 A/B/C.....146

FIGURA 4.4 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-001 A/B/C.147

FIGURA 4.5 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-004 A/B/C.....149

FIGURA 4.6 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-004 A/B/C.....149

FIGURA 4.7 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-004 A/B/C.150

FIGURA 4.8 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-005.151

FIGURA 4.9 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-005.152

FIGURA 4.10 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-005.....152

FIGURA 4.11 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-006 A-D.154

FIGURA 4.12 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-006 A-D.155

FIGURA 4.13 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-006 A-D.....155



FIGURA 4.14 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-007 A-D.157

FIGURA 4.15 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-007 A-D.157

FIGURA 4.16 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA LOS INTERCAMBIADORES 10-E-007 A-D.....158

FIGURA 4.17 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-008.160

FIGURA 4.18 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-008.160

FIGURA 4.19 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-008.....161

FIGURA 4.20 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-009.163

FIGURA 4.21 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-009.163

FIGURA 4.22 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-009.....164

FIGURA 4.23 RESULTADOS DEL CALOR TRANSFERIDO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-010.165

FIGURA 4.24 RESULTADOS DEL COEFICIENTE TOTAL OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-010.166

FIGURA 4.25 RESULTADOS DEL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO OBTENIDOS A TRAVÉS DEL SIMULADOR PRO II Y DE LOS CÁLCULOS PARA EL INTERCAMBIADOR 10-E-010.....166



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la unidad de crudo del Mejorador de PDVSA Petropiar existe una serie de intercambiadores de calor que en su conjunto conforman el tren de precalentamiento en frío de la unidad, el cual se encarga de transferir el calor de diferentes corrientes de productos destilados de las torres atmosférica y de vacío al crudo diluido que ingresa a esta unidad, con la finalidad de disminuir la temperatura de estos productos antes de ir a almacenamiento o ser usados en las diferentes unidades del mejorador, y de aumentar la temperatura del crudo diluido antes de que pase por el proceso de desalación y posteriormente entre en la torre atmosférica para su destilación.

Los fluidos que pasan a través de los intercambiadores de calor en muchos casos pueden estar arrastrando sólidos en suspensión que tienden a depositarse adentro y alrededor de los tubos de los intercambiadores ensuciándolos y, en consecuencia, ocurre un incremento de la resistencia a la transferencia de calor que degradan el funcionamiento de estos equipos de forma progresiva. El ensuciamiento de los intercambiadores de calor, generado por la incrustación o deposición de los sólidos en suspensión en la superficie de los tubos, puede producirse por cristalización, sedimentación, reacciones químicas, polimerización, coquización, crecimiento de materia orgánica como algas y por corrosión; estas causas pueden ocurrir en conjunto o de forma independiente.

La deficiencia en la transferencia de calor producida por el ensuciamiento de los intercambiadores, originaría que el crudo a la entrada de los desaladores llegue con una temperatura menor a la requerida (290 a 300 °F), lo cual dificultaría en gran medida mantener de forma continua la eficiencia de los desaladores provocando



diversos problemas operacionales. Sin embargo, el que más resalta es el aumento súbito de la presión en la torre de destilación atmosférica ocasionado por la vaporización del agua contenida en la carga de crudo al entrar en la cámara pre-flash, ya que puede provocar daños a los internos de la misma, como desprendimiento de platos, bajantes y sellos internos; además de que también ocurriría un problema de almacenamiento y manejo de los productos destilados que le transfieren calor al crudo por sus altas temperaturas, lo que evidencia la estrecha interrelación que tienen los equipos dentro de la unidad de crudo y con el resto de la unidades en el mejorador.

Todos los problemas que generaría la pérdida de transferencia de calor de los intercambiadores en la unidad de crudo, como los que se mencionaron anteriormente, podrían conducir a un mantenimiento no programado de estos equipos, lo que conlleva consigo problemas operacionales que podrían terminar en una parada total de la unidad de crudo, afectando así a todas las unidades del mejorador que dependen de ésta. Lo que se traduciría en gastos por mantenimiento correctivos, pérdidas de producción e incumplimiento de los compromisos comerciales de la empresa PDVSA Petropiar.

Por tal motivo en este trabajo se enfocó en la realización de una evaluación de las condiciones/variables de operación actuales de los intercambiadores de calor del tren de precalentamiento en frío y de las variables de diseño y arranque inicial del Mejorador de PDVSA Petropiar, que permitió generar un diagnóstico de la condición actual de los intercambiadores de calor con la finalidad de proponer un programa de mantenimiento y limpieza preventivo de estos equipos de acuerdo a las proyecciones de sus comportamientos hidráulicos y térmicos durante su tiempo en operación.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar los intercambiadores de calor pertenecientes al tren de precalentamiento en frío de la unidad de crudo del Mejorador Petropiar en el Complejo José Antonio Anzoátegui.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1.** Identificar las condiciones de diseño de los intercambiadores de calor incluyendo características dimensionales y variables operacionales más importantes.
- 2.** Diagnosticar las condiciones actuales de funcionamiento de los intercambiadores de calor en función del factor de ensuciamiento y de la caída de presión.
- 3.** Analizar el comportamiento y la eficiencia de los intercambiadores de calor tomando como base sus condiciones de diseño.
- 4.** Proponer un programa de mantenimiento y limpieza preventivo de los intercambiadores de calor de acuerdo a las proyecciones de sus comportamientos hidráulicos y térmicos durante su tiempo en operación.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Gómez estudió intercambiadores de doble tubo y determinó que estos equipos presentaban deficiencias en la velocidad de transferencia de calor, por lo que recomendó el cambio de dichos intercambiadores por otros del tipo coraza y tubo, con lo cual se aumentaría la temperatura de entrada de los hornos en 23 °F, lo que permitiría facilitar las condiciones de trabajo en los hornos de la unidad. ^[1]

Rodríguez y Rafael realizaron la evaluación de los intercambiadores de calor del tren de procesos A de la planta de extracción San Joaquín, con el fin de determinar la necesidad de limpieza en función de la pérdida de eficiencia del equipo debido al ensuciamiento. Crearon modelos de simulación con el programa PRO II y los validaron con los datos de diseño de cada equipo, obteniendo resultados satisfactorios. Luego, simularon las condiciones operacionales en ese año y obtuvieron el valor del calor transferido y el factor de ensuciamiento de los intercambiadores. Y determinaron así que algunos intercambiadores de calor tenían un bajo rendimiento en el proceso debido al alto factor de ensuciamiento, los cuales presentaron una desviación entre un 20 y 50 % de sus valores permisibles y las altas caídas de presión que rebasan en más de un 15% el diseño de estos equipos. ^[2]

Cedeño realizó una simulación con los programas HEXTRAN 9.1 y HTRI *Xchanger Suite 3*, y obtuvo buenos resultados de validación de estos programas, con desviaciones sólo del 5-6% con respecto a los datos de la planta, con dichos resultados propuso cambios en la configuración del tren para reducción de costos y optimización de los procesos dentro de la planta. ^[3]



2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

2.2.1 Asociaciones Estratégicas en la Faja Petrolífera del Orinoco

La Faja Petrolífera del Orinoco (**Figura 2.1**), se considera única en el mundo por sus cuantiosos recursos. Por ello, PDVSA se unió con tecnología y capital a diferentes empresas petroleras multinacionales para explotar estas reservas. Para 1.999 en el país se habían establecido cuatro asociaciones para el aprovechamiento de las reservas de la Faja del Orinoco: Petrozuata, Cerro Negro, Sincor y Ameriven, actual Petro-Anzoátegui, Petro-Monagas, Petro-Cedeño y Petro-Piar, respectivamente. Las plantas de mejoramiento de crudo de estas cuatro asociaciones se encuentran ubicadas en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, en la costa centro norte del estado Anzoátegui. ^[4]

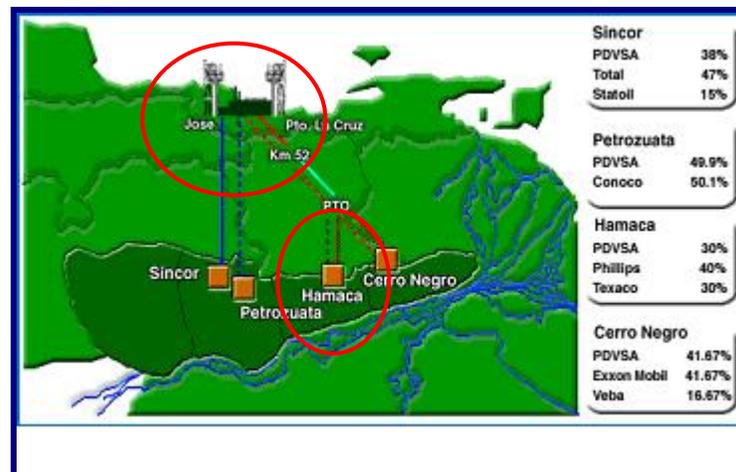


Figura 2.1 Ubicación del Campo Hamaca en la Faja Petrolífera del Orinoco. ^[4]

2.2.2 Breve Descripción de Transporte de Hidrocarburos

Petropiar produce crudo extra pesado del Campo Hamaca de la Faja Petrolífera del Orinoco, es diluido con nafta pesada, para reducir su densidad y viscosidad, y así poder realizar su bombeo al Mejorador. Se utilizan bombas multifásicas para bombear la producción del pozo a la estación central COB (Centro de Operaciones



Bare), donde se separa el gas y el agua del crudo. Posteriormente, se envía el crudo diluido a almacenaje intermedio PTO (Patio de Tanque Oficina). Desde aquí el crudo diluido es bombeado al Mejorador por lotes, a través de un oleoducto compartido con Cerro Negro. Del mismo modo, la nafta diluyente es bombeada por lotes a través de una tubería separada paralela, compartida con Cerro Negro, de regreso hacia el Campo de Producción. ^[4]

2.2.3 Objetivo del Mejorador

El mejorador de crudo de PDVSA Petropiar, procesa la mezcla de 190.000 BSPD (barriles estándar por día) de crudo extra-pesado de 8,5 °API, diluido con 58.000 BSPD de nafta de 47 °API, para una carga total de crudo diluido de 248.000 BSPD de 16 °API. Al final del proceso se obtiene 180.000 BSPD de crudo sintético de 25,5 °API, al cual se le ha mejorado considerablemente su calidad, con un menor contenido de contaminantes. ^[4]

2.2.4 Descripción General del Mejorador Petropiar

El mejorador de crudo pesado de PDVSA Petropiar (**Figura 2.2**), utiliza las tecnologías de coquificación retardada e hidroprocesamiento para convertir la carga crudo extra pesado del Campo Hamaca en un producto liviano de mayor valor, a través de la descomposición térmica con rechazo de carbono, adición de hidrógeno (H₂) y extracción de contaminantes como azufre y nitrógeno. La transformación del crudo se lleva a cabo en ciertas unidades de proceso, que a la vez se apoyan en unidades de generación o distribución de servicios utilitarios y otras unidades externas como patio de tanques, mechurrios, tratamiento de efluentes, etc. ^[4]



El crudo diluido es desalado y fraccionado en nafta, destilados y residual atmosférico en la torre de destilación atmosférica en la Unidad de Crudo. La nafta es recirculada al campo de producción para ser reusada como diluyente del crudo virgen, el residual atmosférico es fraccionado en gasóleos y residuo de vacío en la columna de destilación al vacío en la unidad de crudo. La mayor parte del residuo de vacío alimenta a la Unidad de Coquificación Retardada, donde es térmicamente craqueado para producir destilados y coque de petróleo. El residuo de vacío restante es directamente mezclado en el crudo comercial.^[4]

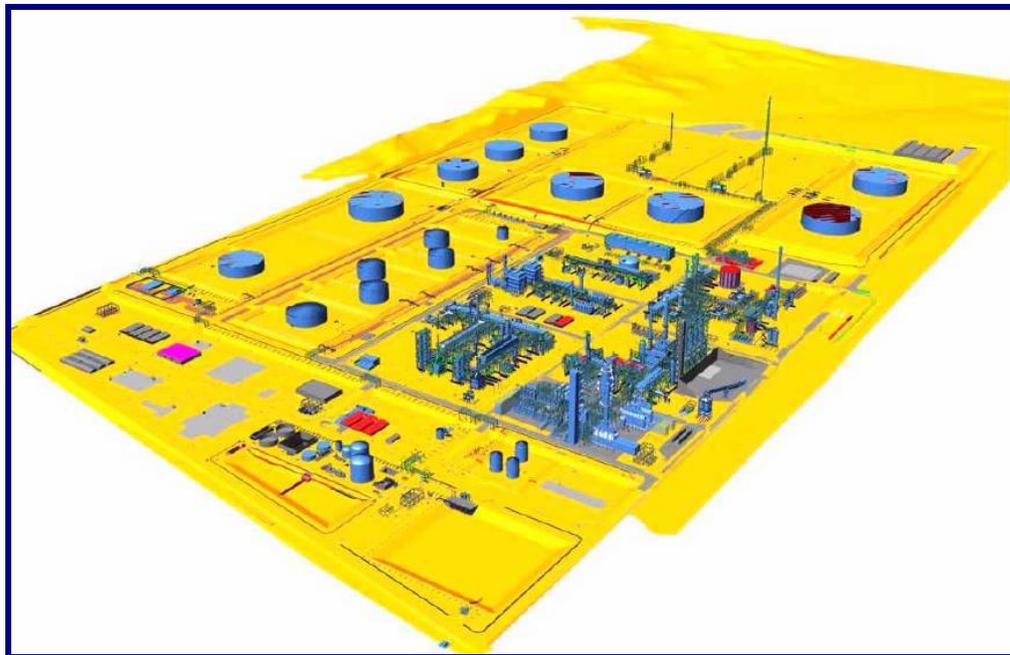


Figura 2.2 Esquema General del Mejorador de Crudo Pesado Petropiar^[4]

El mejorador de PDVSA Petropiar cuenta actualmente con dos unidades de hidroprocesamiento, la Unidad de Hidrotratamiento de Aceites Livianos y la Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados. En estas unidades se remueve el azufre, nitrógeno y otras impurezas al butano, nafta, destilados y gasóleos mediante el tratamiento catalítico con hidrógeno (H_2), el cual proviene de la Unidad de Producción de Hidrógeno. Los productos de las unidades de hidroprocesamiento son tratados luego en la Unidad de Soporte al Hidrotratamiento. En esta unidad se efectúa



la mezcla final de los productos intermedios para obtener un crudo comercial de 26 °API. Los compuestos contaminantes de azufre, nitrógeno y otras impurezas son removidos por agua de lavado o absorción con soluciones acuosas de aminas que luego son tratadas en la Unidad de Aguas Agrias y en la Unidad de Regeneración de Aminas. Los gases ricos en azufre y amoníaco provenientes de estas unidades son procesados en la Unidad de Recuperación de Azufre para la producción de azufre como subproducto y destrucción del amoníaco. ^[4]

2.2.5 Descripción de las Unidades de Proceso del Mejorador

◆ Unidad de Crudo (Unidad 10):

La Unidad de Destilación de Crudo (Unidad 10) está conformada principalmente por los procesos de Destilación Atmosférica y Destilación al Vacío, que son procesos de separación física de hidrocarburos, de acuerdo al punto de ebullición de sus componentes. Además, se llevan a cabo otros procesos como calentamiento de crudo en intercambiadores de calor/hornos y desalación como acondicionamiento del crudo con las especificaciones para ser llevado a destilación atmosférica. ^[4]

La unidad de Destilación atmosférica tiene la capacidad de procesar 190.000 BPDO de Crudo Diluido Hamaca, separándola en varios productos intermedios como nafta diluyente que será enviada de regreso a COB, destilados livianos y pesados que serán procesados en las Unidades de Hidroprocesos y residuo atmosférico para ser procesado en destilación al vacío. La unidad de destilación al vacío tiene la capacidad de procesar 165.261 BPDO de Residuo Atmosférico, separa esta a alimentación en los siguientes productos: Gasóleo Liviano de Vacío (LVGO) de cual una parte se envía como alimentación a la Unidad de Hidrotratamiento de Aceites Livianos (Unidad 14), otra se usa como Aceite Pobre en la Unidad de Recuperación de Gas (Unidad 18) y el remanente se envía a almacenaje; Gasóleo Mediano de



Vacío (MVGO), que es usado para el suministro de aceite de limpieza, como insumo a la mezcla de Crudo Comercial y como diluyente del Residuo de Vacío que va hacia almacenaje; Gasóleo Pesado de Vacío (HVGO), que se envía como alimentación a la Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados (Unidad 16) y el Residuo de Vacío, que sirve de alimentación a la Unidad de Coquificación Retardada (Unidad 12) y otra parte va hacia almacenaje. ^[4]

◆ **Unidad de Coquificación Retardada (Unidad 12):**

La Coquificación Retardada es un proceso térmico en el cual la alimentación fresca, típicamente fondos de vacío, se calienta a alta velocidad en un horno hasta aproximadamente 900 °F, para luego enviarlo a una zona de reacción (Tambores de Coquificación). ^[4]

La configuración de la planta contempla pares de tambores denominados trenes. En estos tambores, bajo condiciones apropiadas de presión y temperatura, para que ocurran las reacciones de craqueo y polimerización, la fracción de hidrocarburo no vaporizada se convierte en vapores y coque. Siendo las reacciones de coquificación reacciones endotérmicas, los vapores salen del tambor a 100 °F, más fríos que la temperatura de entrada. Los productos de la sección de reacción de una unidad de Coquificación Retardada son gas combustible, gas licuado de petróleo, nafta, gasóleo liviano, gasóleo pesado y coque. ^[4]

◆ **Unidad de Recuperación de Gas (Unidad 18):**

Esta unidad esta diseñada para recuperar butanos y propanos del gas neto de la Unidad de Crudo y de la nafta no estabilizada producidos en la Unidad de Coquificación Retardada, utilizando un proceso de absorción con aceite (aceite pobre o MVGO), el cual se encarga de absorber los componentes más livianos de la corriente gaseosa. Adicionalmente, se trata el gas con aminas para extraer el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) que éste contenga. ^[4]



◆ **Unidad de Gas Combustible (Unidad 45):**

Esta unidad es usada para mezclar gases, mantener la presión en los cabezales y distribuir el mismo a través de todo el mejorador. El gas del mejorador es producido en las Unidades de Coquificación e Hidroprocesamiento. Este gas es tratado con aminas para reducir el contenido azufre (H_2S) por debajo de 160 ppm, luego es mezclado con Gas Natural de Alta Presión (HP) importado y se suministra a los usuarios del Mejorador como Gas Combustible. ^[4]

◆ **Unidad de Manejo de Coque (Unidad 68):**

Esta unidad está diseñada para recibir, reducir el tamaño del coque producido en la Unidad de Coquificación Retardada a 2-4 pulgadas, y cargar el total de coque producido en la planta de 4.040 STPD o 168 st/hr. La Fosa de Coque en la Unidad de Coquificación Retardada está diseñada para acomodar la producción completa de 4.034 STPD (seca). De los Tambores de Coque, el coque cortado y el agua son descargadas por medio del Tobogán a la Fosa de Coque, donde se acumula el coque enfrente del área de los Tambores de Coque. El agua drena de esta acumulación de coque a la Fosa de Coque y lleva consigo finos de coque. El coque es removido de la Fosa de Coque por palas mecánicas al área de almacenamiento de la fosa para continuar drenándose por un tiempo mas largo. De ahí es cargado de nuevo por palas mecánicas las cuales lo transportan al Triturador en la unidad. ^[4]

◆ **Unidad de Producción de Hidrógeno (Unidad 22):**

La Unidad de Producción de Hidrógeno esta encargada de obtener, mediante el proceso de Reformación con Gas Natural el Hidrógeno de alta pureza (99,9%vol) requerido por las dos unidades de Hidroprocesamiento del Complejo Mejorador. Para lograr la pureza requerida, los vapores ricos en hidrógeno pasan a un proceso de purificación PSA, ubicado en el límite de batería. Además de producir hidrógeno, en la unidad se obtiene Vapor de Alta Presión sobrecalentado (600 psig), para ser utilizado en el complejo. ^[4]



◆ **Unidad de Hidrotratamiento de Destilados Livianos (Unidad 14):**

Esta unidad está diseñada para procesar una mezcla de corriente de destilados vírgenes de la Unidad de Crudo, gasóleo liviano de la Unidad de Coquificación Retardada, nafta liviana y pesada enviada de la planta de gas y destilados fríos del área de almacenaje. La mezcla de la carga combinada se mezcla con hidrógeno (H_2) y vapor, luego va a los reactores de hidrotratamiento que trabajan en serie, con la finalidad de desulfurar, desnitrificar y saturar parcialmente las olefinas y aromáticos. El efluente sale del fondo del reactor y se envía a la sección de separación donde se obtienen productos que se envían a la Unidad de Soporte a Hidroprocesos.^[4]

◆ **Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados (Unidad 16):**

Esta unidad de Hidrocraqueo fue creada para producir productos livianos a partir de productos más pesados. El proceso persigue maximizar la producción de naftas o destilados, simultáneamente al proceso de Hidrocraqueo se logra, prácticamente, la Hidrodesulfurización e Hidrodenitrogenación total, además de la saturación de las olefinas. El Hidrocraqueo se logra al pasar una mezcla de un gas rico en hidrógeno y una corriente de hidrocarburo gasóleo sobre un catalizador, en un ambiente a presión y temperatura controladas. La Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados, ubicada en el área 50 de Hidroprocesos, está diseñada para procesar una mezcla de corrientes de Gasóleo Pesado Virgen de la Unidad de Crudo (Unidad 10), Gasóleo Pesado de la Unidad de Coquificación Retardada (Unidad 12) y Gasóleo Pesado frío de almacenaje.^[4]

◆ **Unidad de Soporte a Hidroprocesos (Unidad 15):**

La Unidad de Soporte al Hidroprocesamiento es una unidad de servicio común a la Unidad de Hidrotratamiento de Aceites Livianos (Unidad 14) y a la Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados (Unidad 16). La unidad está diseñada para procesar el producto líquido y el gas separado en los Tambores de Separación de Instantánea de las Unidades de Hidrotratamiento de Aceites



Livianos e Hidrocrackeo de Gasóleos Pesados. Los productos de la unidad incluyen Crudo Comercial, Nafta Pesada Diluyente, Gas Rico en hidrógeno y Gas Combustible.^[4]

◆ **Unidad de Regeneración de Amina (Unidad 24):**

Esta unidad posee dos trenes de 1.900 gpm cada uno. Cada tren la capacidad de suministrar 63 % de la amina pobre normal requerida en la Unidad de Recuperación de Gas y en las Unidades de Hidroprocesamiento. Se provee un tambor de vaporización instantánea de amina para ambos trenes. Cada Regenerador de Amina está diseñado para despojar H_2S de la amina rica para producir amina pobre con un nivel de H_2S de 0,01 H_2S/mol . La línea de gas ácido proveniente de los regeneradores de amina que va hacia la Unidad de Recuperación de Azufre.^[4]

◆ **Unidad Despojadora de Aguas Agrias (Unidad 26):**

La Unidad de Agua Agria tiene como finalidad disminuir el contenido de H_2S y NH_3 en el agua agria. El H_2S y el NH_3 que se obtienen, se envían a la Unidad de Recuperación de Azufre. Aproximadamente la mitad del agua despojada es reusada, una parte como agua de lavado en el área de hidroprocesamiento, otra como agua de reposición en la Unidad de Coquificación Retardada, y otra como agua de reposición en los desaladores de la Unidad de Crudo. El resto del agua despojada que no es reusada, se envía a la Unidad de Tratamiento de Efluentes para su correspondiente tratamiento y posterior disposición.^[4]

◆ **Unidad Recuperadora de Azufre (Unidad 28):**

Esta unidad esta encargada de procesar el H_2S proveniente de la Unidad de Recuperación de Aminas y de la Unidad Despojadora de Aguas Agrias. El H_2S a concentraciones bajas, alrededor de los 10 ppm causa serios problemas de salud, concentraciones más elevadas puede causar hasta la muerte. Por ello, los procesos para el tratamiento de las corrientes de gases obtenidas de los



procesos de desulfurización se han hecho cada vez más especializados e indispensables, permitiendo la recuperación de hasta el 99,99% de azufre y reduciendo las emisiones de contaminantes (H_2S) a valores inferiores a las especificaciones establecidas en las regulaciones ambientales.^[4]

◆ **Unidad de Pastilladora de Azufre (Unidad 32):**

Esta unidad se encarga la solidificación del azufre extraído en la Unidad Recuperadora de Azufre, en partículas hemisféricas de 3,0 a 5,5 mm de diámetro, mediante el uso de enfriadores en cinta de acero inoxidable.^[4]

◆ **Unidad de Manejo de Azufre (Unidad 64):**

Esta unidad carga las pastillas de azufre formadas del azufre líquido en la Unidad Pastilladora de Azufre y las envía por correas dentro de recipientes, desde donde el azufre es cargado a camiones móviles, y transportado desde el mejorador al área de almacenamiento del condominio.^[4]

◆ **Unidad de Generación y Distribución de Vapor (Unidad 41):**

Esta unidad incluye dos calderas de vapor de alta presión (HP) con sus respectivos accesorios, para mantener la presión en el cabezal de vapor en tres diferentes niveles: vapor sobrecalentado de alta presión (vapor HP), vapor saturado de mediana presión (vapor MP) y vapor saturado de baja presión (vapor LP). Este vapor producido en la Unidad 41 se distribuye por todo el mejorador para diversos usos, en especial en la Unidad de Coquificación Retardada y en las Unidades de Hidroprocesamiento.^[4]

La ubicación de las unidades del Mejorador de PDVSA Petropiar se pueden observar en la **Figura 2.3**.

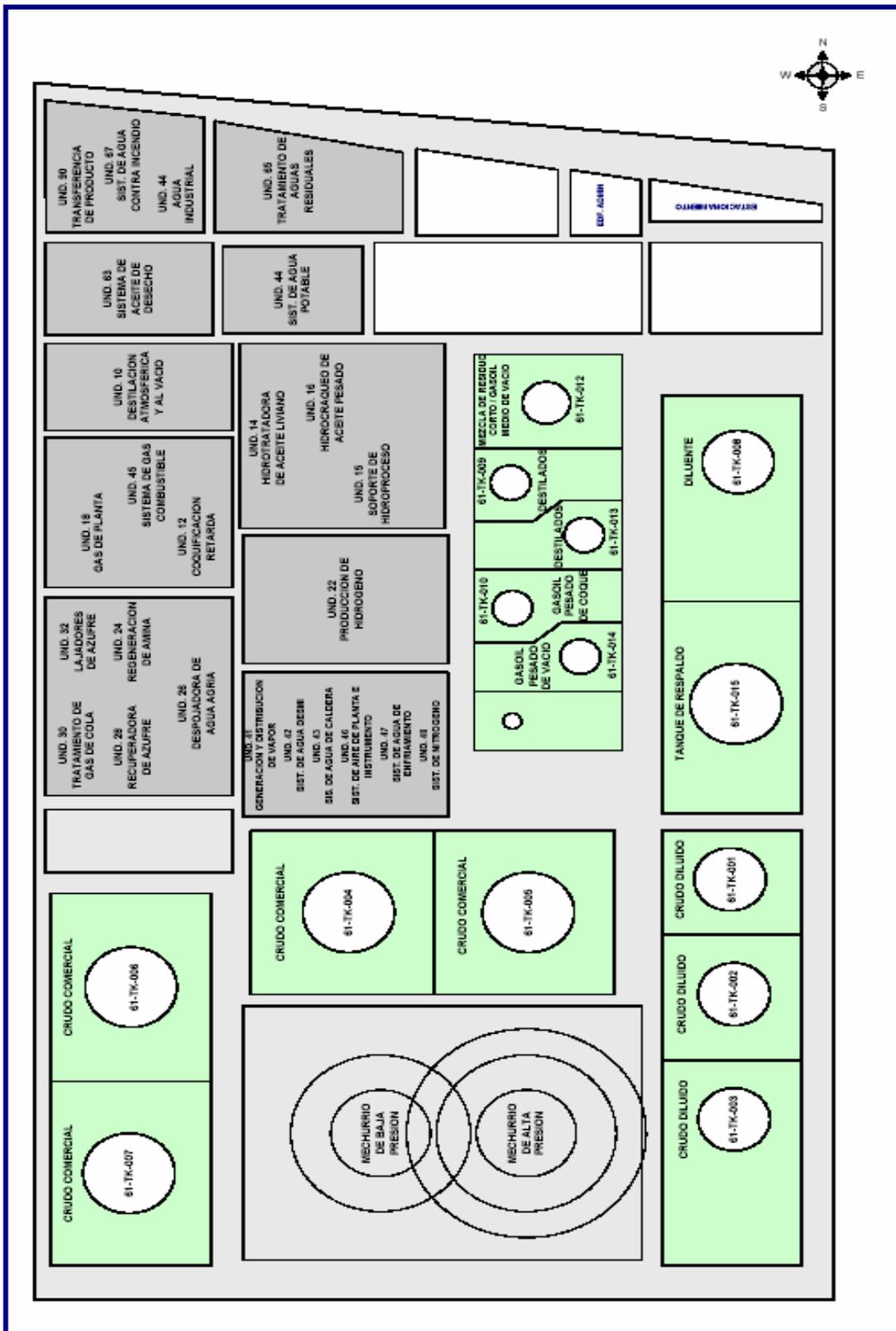


Figura 2.3 Unidades del Mejorador de Crudo Pesado Petropiar.^[4]



2.2.6 Descripción de Secciones de la Unidad de Crudo

La Unidad de Crudo consta de las siguientes secciones:

☞ **Pre calentamiento de Crudo Diluido – Extremo Frío:**

El crudo diluido Hamaca se bombea dentro de la sección de Pre calentamiento de Crudo Diluido por medio de las Bombas de Carga de la Unidad de Crudo, 61-P-001 A/B, localizada en el patio de tanques. A medida que el crudo entra en la Unidad, recibe una dosis de desmulsificante para garantizar la mezcla completa del agente antes que el crudo alcance los desaladores.^[5]

Luego el crudo es conduce a través de varios intercambiadores de calor de pre calentamiento. El primer juego de intercambiadores está formado por: Intercambiador de Crudo/Nafta Diluyente, 10-E-001 A/C, Intercambiador de Crudo/Vapores de la Torre Atm. 10-E-002 A/J, y el Intercambiador de Crudo/ Producto MVGO, 10-E-004 A/C. Los caudales de flujo para cada línea paralela se controlan manualmente por válvulas de globo localizadas antes de los intercambiadores. El crudo se calienta posteriormente a través del Intercambiador de Crudo/Nafta Diluyente, 10-E-005, el Intercambiador de Crudo/ Pumpharound de Destilado Liviano, 10-E-006, y el Intercambiador de Crudo/ Producto y Pumpharound de MVGO, 10-E-007 A/D.^[5]

☞ **Pre calentamiento y Desalinización del Crudo Diluido:**

El crudo se calienta posteriormente a través del Intercambiador de Crudo/ Destilado Combinado, 10-E-008, Intercambiador de Crudo/ Producto HVGO, 10-E-009, y el Intercambiador de Crudo/ Pumpharound de Destilado Liviano, 10-E-010.^[5]



La presión del crudo se reduce luego antes de entrar en los Desaladores, 10-V-002 A/B y 10-V-003 A/B. Es necesario llevar a cabo este paso de reducción de la presión de tal manera de no se sobrepresionen los Desaladores, los cuales no están diseñados para resistir la presión de la descarga total desde la Bomba de Alimentación de la Unidad de Crudo, 61-P-001 A/B. ^[5]

El crudo precalentado se separa en dos corrientes paralelas e ingresa a la Primera Etapa de los Desaladores, 10-V-002 A y V-003 A, después de combinarse con agua de lavado y ser bien mezclado a través de válvulas de mezclado. El crudo parcialmente desalado sale de la primera etapa y se combina con el agua de lavado fresca. La mezcla se efectúa por completo a través de la combinación de la válvula de mezclado y del mezclador estático, 10-MX-001 y 10-MX-002, e ingresa a la Segunda Etapa de los Desaladores, 10-V-002 B y V-003 B para el paso final de desalación. ^[5]

El agua de lavado se origina en los fondos del Despojador de Agua Agria en la Unidad 26. El agua de compensación se calienta por el agua efluente de las primeras etapas en el Intercambiador de Agua de Lavado/ Efluente del Desalador, 10-E-011 A/B. El agua de lavado caliente es luego conducida a la segunda etapa bajo control de flujo. El agua efluente se enfría usando agua de enfriamiento a través del Enfriador del Efluente del Desalador, 10-E-012 y se libera a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. ^[5]

☞ **Precalentamiento del Crudo Expandido – Extremo Caliente**

El crudo desalado se expande a través de la válvula de control de flujo en la Cámara de Preflash, 10-C-002. La cámara se ventea a la zona flash de la Torre Atmosférica, 10-C-001, y la mayor parte del agua en el crudo y los hidrocarburos livianos se vaporizan hacia en la torre. ^[5]



Bajo presión reforzada proveída por la Bomba del Crudo Expandido, 10-P-002 A/B, la alimentación expandida se somete a un nivel mayor de precalentamiento a través del Intercambiador de Crudo Expandido/Producto y Pumparound de MVGO, 10-E-014 A/B. El crudo se separa en tres corrientes paralelas y entra al Intercambiador de Crudo Expandido/Residuo de Vacío, 10-E-015 A/L, Intercambiador Crudo Expandido/Pumparound y Producto Destilado Pesado, 10-E-016 A/C, y el Intercambiador de Crudo Expandido/Producto y Pumparound de HVGO, 10-E-017 A/L. El crudo se conduce al paso final del precalentamiento a través del Intercambiador de Crudo Expandido/Residuo de Vacío, 10-E-018 A/C. ^[5]

☞ **Horno de Carga de la Torre Atmosférica:**

El Horno de Carga, 10-H-001, es un horno de dos celdas con seis pasos de tubo y 20 quemadores en cada celda. El crudo de alimentación se separa en doce corrientes iguales por controladores de paso de flujo. Con la temperatura de salida del horno para producir el levantamiento y expansión deseada del producto, el controlador de flujo de gas combustible balancea la función del horno. Parte de los serpentines de convección se usan para sobrecalentar el vapor de baja presión con el fin de usarlo como corriente despojadora para la Torre Atmosférica, 10-C-001, el Despojador de Destilado Liviano, 10-C-003, y la Torre de Vacío, 10-C-004. ^[5]

☞ **Torre Atmosférica:**

La alimentación de crudo parcialmente evaporado entra a la Torre Atmosférica, 10-C-001, en la zona flash. Esta torre tiene un diámetro de 20'- 6" y está equipada con 38 platos de dos y cuatro pasos, 32 platos de válvula sobre la zona



flash y seis platos de tamiz en la sección de despojamiento. El vapor del tope de la Torre Atmosférica, después de tomar una dosis de amina de película y amina de neutralización, se condensa parcialmente a través de los intercambiadores en el tren de precalentamiento de alimentación de crudo. Las salidas de estos intercambiadores fluyen por gravedad a través de enfriadores de aire, Condensador Atmosférico de Tope, 10-EA-002 A/E, al Acumulador de la Torre Atmosférica, 10-V-001. ^[5]

La Bomba de Reflujo de la Torre Atmosférica, 10-P-008 A/B exporta la mayoría de los condensados al tope de la torre como reflujo, mientras una corriente pequeña se dirige al sistema de destilación combinada para controlar la destilación del producto diluyente. El producto Nafta Diluyente, extraído al plato #35, se bombea por medio de la Bomba de Nafta Diluyente, 10-P-004. La corriente se enfría a través de los intercambiadores en el tren de precalentamiento de alimentación de crudo y el Enfriador de Nafta Diluyente de Aire Enfriado, 10-EA-004, antes que sea conducido al almacenamiento. ^[5]

El pumparound de destilado liviano se extrae del plato #22. La Bomba de Pumparound de Destilado Liviano, 10-P-005 A/B, lo circula a través de los intercambiadores en el tren de precalentamiento de alimentación de crudo y se exporta al plato #24. Una parte del producto extraído se distribuye en cascada al Despojador de Destilado Liviano, 10-C-003. ^[5]

La Bomba de Producto Destilado Pesado, 10-P-007 A/B, efectúa la succión desde el fondo del despojador y descarga dentro de la línea del Producto Destilado Pesado. El destilado pesado se extrae al plato #15 como el producto y para circulación a través del lazo de enfriamiento de pumparound a través de 10-E-016 con el crudo. El producto Destilado Pesado se combina con el Destilado Liviano, enfriado a través de los intercambiadores en el tren de precalentamiento de alimentación de crudo y se conduce al sistema de conducción de Destilado Combinado. ^[5]



El sistema de conducción de Destilado Combinado combina el Destilado Liviano y Pesado, la Nafta de Purga y el Gasóleo Liviano de Vacío (LVGO) producido en la Torre de Vacío. La mayor parte de esta corriente se conduce directamente a la Unidad de Hidrotratamiento de Destilados Livianos, mientras que una pequeña corriente deslizante se dirige al almacenamiento. El overflash recolectado en el plato #7 se mide y exporta al plato chimenea debajo de la zona flash. La sección despojadora está equipada con seis platos tamiz de cuatro pasos. El vapor despojador se introduce debajo del plato de fondo para retirar cualquier componente liviano que de otra manera se cargaría en el sistema de vacío en la Torre de Vacío, 10-C-004. Los fondos de la torre se bombean por medio de la Bomba de Residuo Atmosférico, 10-P-010 A/B, a través de Hornos de Vacío, 10-H-002 A/B.^[5]

☞ **Horno de Vacío:**

Los Hornos de Vacío, 10-H-002 A/B, son dos hornos separados de celda sencilla, cada uno con ocho tubos de paso y ocho quemadores. El residuo de alimentación atmosférica se separa en 16 corrientes iguales por medio de controladores de paso de flujo. El vapor a alta velocidad se inyecta en el paso individual del horno para promover la transferencia de calor y reducir la tendencia de coquificación en los tubos. Con la temperatura de salida del horno establecida para producir el levantamiento y expansión del producto deseados, el controlador de flujo de gas combustible balancea la función del horno.^[5]

☞ **Torre de Vacío:**

La alimentación de residuo atmosférico parcialmente evaporado entra en la Torre de Vacío, 10-C-004, en la zona flash. Esta torre es una columna multi-



diámetro con cuatro secciones empacadas y una sección de despojamiento con platos. Su diámetro mayor es 42'-0" en las secciones de HVGO y de Lavado y el menor es 19'-0" en la sección LVGO en el tope. ^[5]

El sistema eyector de vacío mantiene una presión reducida en la Torre de Vacío. Este sistema consta de tres trenes paralelos con Precondensadores, 10-E-019 A/C, Eyectores de Primera Etapa, 10-EJ-001 A/C, Intercondensadores, 10-E-020 A/C, Eyectores de Segunda Etapa, 10-EJ-002 A/C y Post-condensadores, 10-E-021 A/C. Los condensados provenientes de varios condensadores drenan al Tambor del Tope de la Torre de Vacío, 10-V-004, donde se separan el aceite y el agua. El aceite del tope se recircula de regreso a la entrada de la Cámara de Preflash. El vapor del tope de la torre atmosférica se combina con el gas de desecho proveniente del sistema de vacío y alimenta el Compresor Térmico de Gas de Desecho, 10-EJ-003 A/B. La descarga se enfría en el Enfriador de Gas de Desecho, 10-E-024 y el gas de desecho se conduce hacia la Unidad de Coquificación Retardada y el condensado se exporta al Tambor del Tope de la Torre de Vacío. El pumparound y los productos LVGO se extraen del plato chimenea ubicado en el nivel más superior. El líquido extraído se bombea por medio de la Bomba de Producto y Pumparound de LVGO, 10-P-011 A/B a través del Enfriador de Pumparound de LVGO de aire enfriado, 10-EA-001 A/B. La mayor parte del líquido enfriado se exporta al tope del lecho de LVGO y el resto se conduce al cabezal de conducción de Destilado Combinado. ^[5]

El Producto y Pumparound de MVGO se extrae del tope del segundo plato chimenea. El líquido extraído se bombea por medio de la Bomba de Producto y Pumparound de MVGO, 10-P-014 A/B a través de 10-E-014 y 10-E-007 A/D para enfriamiento contra la alimentación de crudo entrante. La mayor parte de la corriente enfriada se exporta al tope del lecho de MVGO y el producto sobrante MVGO se enfría posteriormente en el tren de precalentamiento de crudo. El Producto y Pumparound de HVGO se extrae del tope del tercer plato chimenea. El líquido extraído se bombea por medio de la



Bomba de Producto y Pumparound de HVGO, 10-P-012 A/B a través de 10-E-017 A/L y 10-E-009 para enfriamiento contra la alimentación de crudo entrante. La mayor parte de la corriente enfriada se exporta a la parte superior del lecho HVGO como reflujo bombeado, mientras que el producto HVGO es posteriormente enfriado con la alimentación de crudo y conducido a la Unidad de Hidrocraqueo de Gasóleos Pesados o al almacenamiento.^[5]

Parte del HVGO caliente proveniente de la bomba de descarga se filtra y rocía sobre la parte superior del lecho de lavado. Esta tasa de flujo se fija como fue establecida para diseño, independientemente de la tasa de alimentación de la Torre de Vacío, para mantener el lecho empacado completamente húmedo con aceite de lavado. La Bomba de Residuo de Vacío, 10-P-013 A/B, bombea los fondos de la torre. La mayor parte del Residuo de Vacío va directamente a la Unidad de Coquificación Retardada con su tasa de flujo controlada por el resto de Residuo de Vacío se enfría a través del tren de intercambiadores de precalentamiento de crudo. Una parte del residuo frío se usa para el enfriamiento brusco de los fondos de la torre y el sobrante se mezcla con el MVGO camino al almacenamiento.^[5]

El diagrama de todos los equipos y los procesos en la Unidad de Crudo del Mejorador de PDVSA Petropiar se puede observar en la **Figura 2.4**.

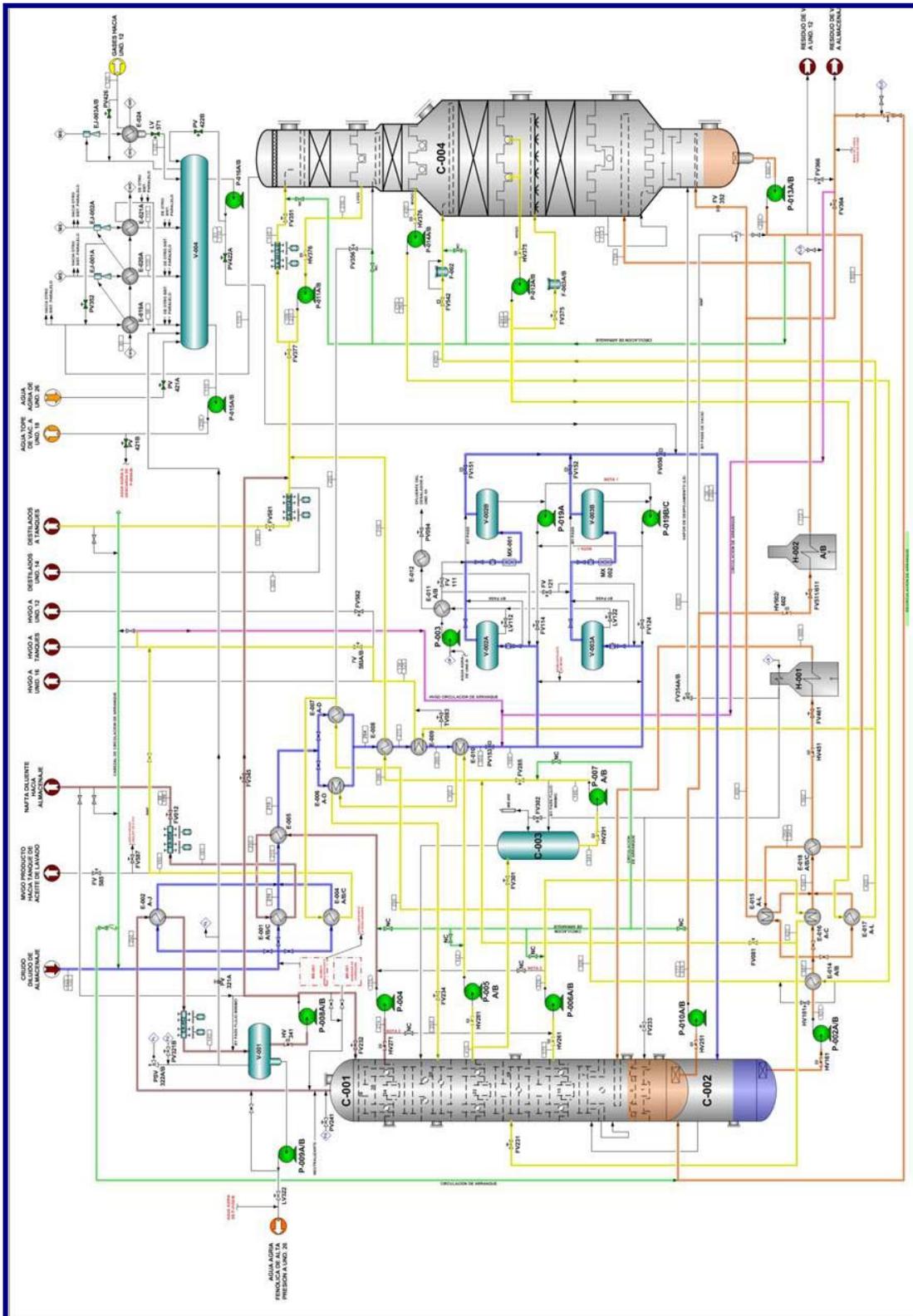


Figura 2.4 Diagrama de la Unidad de Crudo del Mejorador Petropiar. [5]



2.3 BASES TEÓRICAS

2.3.1 Intercambiadores de Calor

Un Intercambiador de Calor es un equipo utilizado para enfriar un fluido que está más caliente de lo deseado, transfiriendo este calor a otro fluido que está frío y necesita ser calentado. La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos. ^[6] Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son muy variadas y reciben diferentes nombres:

- **Intercambiador de Calor:** Realiza la función doble de calentar y enfriar dos fluidos.
- **Condensador:** Condensa un vapor o mezcla de vapores.
- **Enfriador:** Enfriar un fluido por medio de agua.
- **Calentador:** Aplica calor sensible a un fluido.
- **Rehervidor:** Conectado a la base de una torre fraccionadora proporciona el calor de reebullición que se necesita para la destilación.
- **Vaporizador:** Un calentador que vaporiza parte del líquido. ^[6]

2.3.2 Tipos de Intercambiadores de Calor

- **Intercambiadores de Doble Tubo:** son intercambiadores que constan de dos juegos de tubos concéntricos, dos conectoras, un cabezal de retorno y un codo en U. El intercambiador de doble tubo es extremadamente útil y de fácil ensamblaje. ^[6]
- **Intercambiadores de Tubo y Coraza:** Dispositivos de transferencia de calor conformado por un tubo de gran tamaño llamado coraza que contiene un haz de tubos pequeños. Son los intercambiadores más empleados en la industria de procesos y pueden emplearse en múltiples funciones. ^[6]



- **Intercambiadores de Placas:** Los intercambiadores de placa consisten en placas estándares, que sirven como superficies de transferencia de calor. La caída de presión es baja y resulta imposible que haya fugas de fluidos. ^[6]
- **Intercambiadores de Aire:** Los intercambiadores de calor enfriados por aire incluyen un haz de tubos, que están sobre un ventilador que impulsa el aire a través de los tubos y está dotado de un impulsor. Los motores eléctricos son los impulsores más comunes. ^[6]
- **Intercambiadores Espirales:** Los intercambiadores de calor en espiral consisten en un grupo de serpentines concéntricos arrollados en espiral, por lo general conectados por múltiples (*manifolds*), sumergidos en un tanque o una coraza. ^[6]
- **Intercambiadores de Bayoneta:** Una bayoneta consiste en un par de tubos concéntricos, estando el exterior sellado en un extremo. La superficie del tubo exterior es la principal fuente de transferencias de calor. ^[6]

2.3.3 Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza

La satisfacción de muchas demandas industriales requiere el uso de un gran número de horquillas de doble tubo. Estas consumen considerable área superficial así como presentan un número considerable de puntos en los cuales se puede hacer fugas. Cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor, pueden ser obtenidas por medio de equipo de tubo y coraza. Este tipo de intercambiador consiste en un haz de tubos, por donde se hace pasar una corriente de intercambio, que se introducen dentro de una coraza en cuyo interior a hace circular la otra corriente de intercambio. ^[6]



La T.E.M.A. es el organismo que regula y norma la construcción, operación y mantenimiento de estos equipos, los cuales se clasifican en tres clases: R, C y B. Cada intercambiador consta de un cabezal anterior, un cabezal posterior y una coraza. En la **Figura 2.5** se representan los diferentes cabezales y corazas existentes. La designación de estos intercambiadores se realiza con un código que contiene el tamaño y tipo del mismo, de acuerdo a la especificación del diámetro de la coraza en pulgadas, seguido por la longitud nominal de los tubos en pulgadas y las letras que designen al cabezal anterior, la coraza y el cabezal posterior respectivamente. Así, un intercambiador 23-192 TIPO CEN, tiene una coraza con un diámetro interno de 23 pulgadas, tubos nominales de 16 pies (o 192 pulgadas), de espejo fijo con cabezal estacionario C, coraza de un solo paso E y cabezal posterior N como parte integrante de los espejos.^[7]

La coraza tipo E es la más común debido a su simplicidad y economía. La coraza F o de dos pasos se usa cuando se requiere incrementar la diferencia efectiva de temperatura y/o existe un cruce térmico⁷, presentando una mayor caída de presión que la E. Las tipos J y X se usan para aplicaciones donde la caída de presión requerida sea mínima, generalmente condensadores al vacío o gases a baja presión.^[7]

La tipo K o “Kettle” es la coraza típica para rehervidores, en tanto que las G y H son utilizados en aplicaciones muy específicas. Los diámetros internos de coraza típicos oscilan entre 8 y 48 pulgadas (≈ 0.2 y ≈ 1.2 m.), y su espesor es por lo general de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{8}$ de pulgada (≈ 0.0064 y ≈ 0.0095 m.).^[7]

2.3.3.1 Partes de un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza

Las partes de un intercambiador de calor de Tubo y Coraza se muestran en la **Figura 2.6**, como se muestra a continuación:



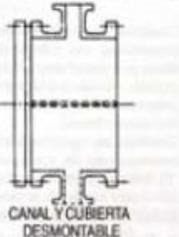
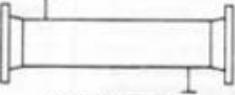
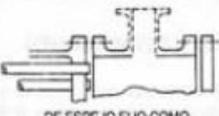
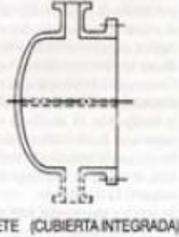
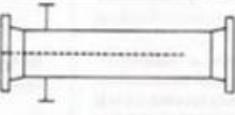
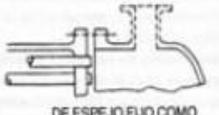
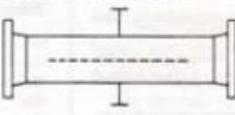
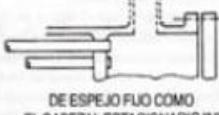
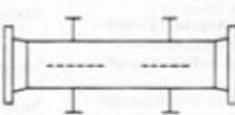
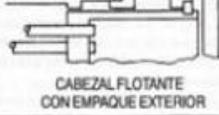
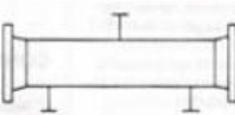
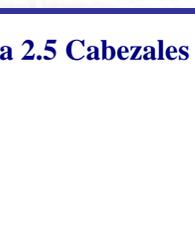
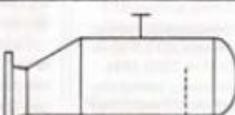
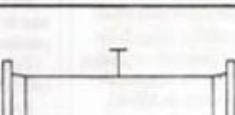
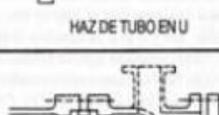
TIPOS DE CABEZAL ESTACIONARIO, EXTREMO FRONTAL	TIPOS DE CORAZAS	TIPOS DE CABEZALES, EXTREMO POSTERIOR
<p>A</p>  <p>CANAL Y CUBIERTA DESMONTABLE</p>	<p>E</p>  <p>CORAZA DE UN PASO</p>	<p>L</p>  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "A"</p>
<p>B</p>  <p>CASQUETE (CUBIERTA INTEGRADA)</p>	<p>F</p>  <p>CORAZA DE DOS PASOS CON DEFLECTOR LONGITUDINAL</p>	<p>M</p>  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "B"</p>
<p>C</p>  <p>SOLO HAZ DE TUBOS DESMONTABLE</p> <p>CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE</p>	<p>G</p>  <p>DE FLUJO PARTIDO</p>	<p>N</p>  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "N"</p>
<p>N</p>  <p>CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE</p>	<p>H</p>  <p>DE FLUJO PARTIDO DOBLE</p>	<p>P</p>  <p>CABEZAL FLOTANTE CON EMPAQUE EXTERIOR</p>
<p>D</p>  <p>CIERRE ESPECIAL A ALTA PRESIÓN</p>	<p>J</p>  <p>DE FLUJO DIVIDIDO</p>	<p>S</p>  <p>CABEZAL FLOTANTE CON DISPOSITIVO DE APOYO</p>
<p>D</p>  <p>HAZ DE TUBO EN U</p>	<p>K</p>  <p>REHERVIDOR DE CALDERA</p>	<p>T</p>  <p>CABEZAL FLOTANTE SIN CONTRABRIDA</p>
<p>D</p>  <p>ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE</p>	<p>X</p>  <p>FLUJO CRUZADO</p>	<p>U</p>  <p>HAZ DE TUBO EN U</p>
	<p>W</p>  <p>ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE</p>	<p>W</p>  <p>ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE</p>

Figura 2.5 Cabezales y Corazas de Intercambiadores según la T.E.M.A. [8]

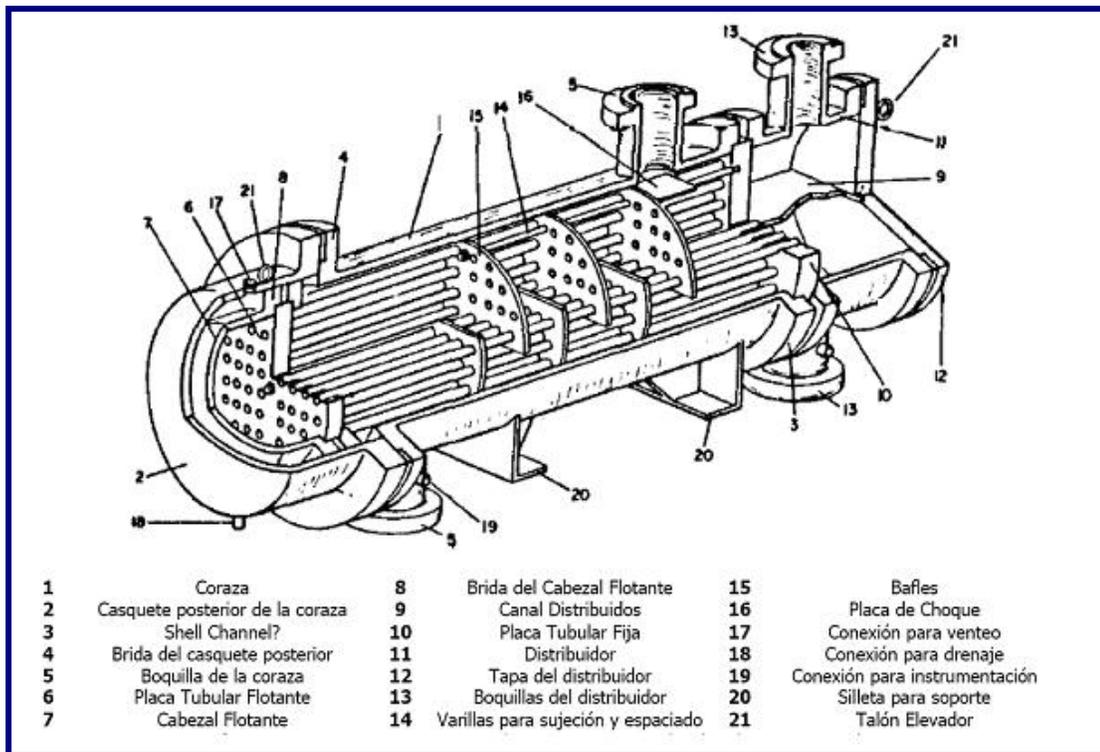


Figura 2.6 Partes de un Intercambiador de Tubo y Coraza. ^[6]

∞ El elemento tubular:

El equipo de tubo y coraza involucra la expansión de un tubo en un espejo y la formación de un sello que no fuga bajo condiciones razonables de operación. Un ejemplo simple y común de tubo expandido se muestra en la **Figura 2.7**. En el espejo se perfora un orificio cuyo diámetro es apenas mayor que el diámetro exterior del tubo, además se cortan dos o más hendiduras en la pared de este orificio. ^[6]

Se coloca el tubo dentro del orificio, y se inserta un rolator en el final del tubo. El rolator es un mandril rotatorio que tiene conicidad pequeña. Es capaz de exceder el límite elástico del metal del tubo y transformarlo a una condición semiplástica, de manera que se escurra hasta las hendiduras y forme así un sello perfecto. ^[6]



El rolado de los tubos es un arte, ya que el tubo puede dañarse si se rola hasta adelgazarlo demasiado, de manera que el sello tiene poca resistencia estructural. En algunos usos industriales es deseable instalar tubos en el espejo, de manera que puedan ser fácilmente removidos, como se muestra en la **Figura 2.7**. En la práctica, los tubos se empacan en el espejo mediante casquillos, y usando anillos de metal suave como empaques. También se puede utilizar la soldadura del tubo en el cabezal según sea los requerimientos de operación y material de construcción del intercambiador.^[6]

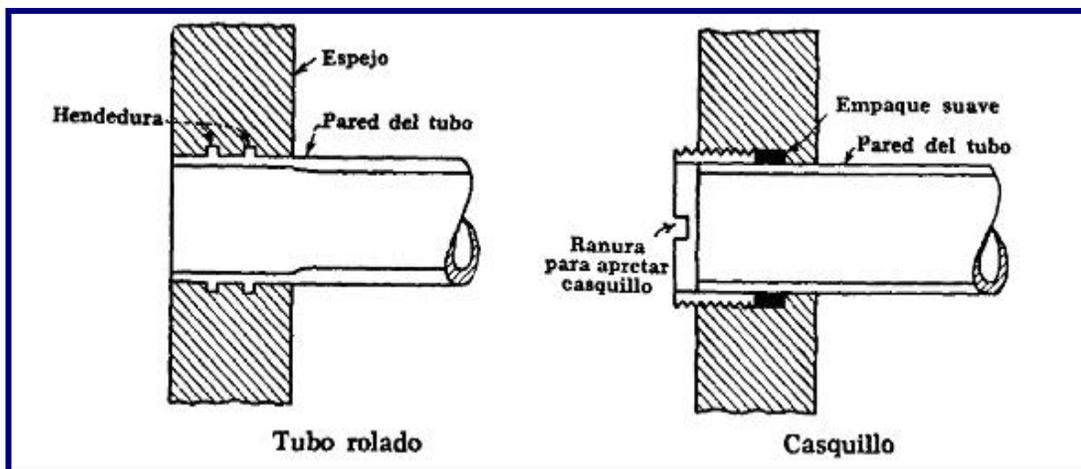


Figura 2.7 Tubo rolado y casquillo.^[6]

☞ Tubos para Intercambiadores de Calor:

Los tubos para intercambiadores de calor también se conocen como tubos para condensador y no deberán confundirse con tubos de acero u otro tipo de tubería obtenida por extrusión a tamaños normales de tubería de hierro. El diámetro exterior de los tubos para condensador o intercambiador de calor, es el diámetro exterior real en pulgadas dentro de tolerancias muy estrictas.^[6]



Estos tubos para intercambiador se encuentran disponibles en varios metales, los que incluyen acero, cobre, admiralty, metal Muntz, latón, 70-30 cobre-níquel, aluminio-bronce, aluminio y aceros inoxidable. Se pueden obtener en diferentes gruesos de pared, definidos por el calibrador Birmingham para alambre, que en la práctica se refiere como el calibrador BWG del tubo. En la **Tabla 2.1** se enlistan los tamaños de tubo y las características 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. ^[6]

☞ Espaciado de los Tubos:

Los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno de otro, ya que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes, debilita estructuralmente el cabezal de tubos. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes es el *claro o ligadura*, y éstos a la fecha, son casi estándar. Los tubos se colocan en arreglos ya sean triangulares o cuadrados, como se muestra en la **Figura 2.8**. La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tienen pequeña caída de presión. El *espaciado de los tubos* es la distancia menor de centro a centro en tubos adyacentes. ^[6]

Los espaciados más comunes para arreglos cuadrados son de 3/4 plg DE en un espaciado cuadrado de 1 plg y de 1 plg DE en un espaciado en cuadro de 1 ^{1/4} plg. Para arreglos triangulares éstos son, de 3/4 plg DE en espaciado triangular de 15/16 plg, 3/4 plg DE en un arreglo triangular de 1 plg, y 1 plg DE en un arreglo triangular 1% plg. Si los tubos se separan suficientemente, es posible dejar los pasajes indicados para limpieza. ^[6]



Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg ²	Superficie por pie lin. pies ²		Peso por pie lineal lb, de acero
					Exterior	Interior	
½	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
¾	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
17	0.058	0.884	0.613	0.2314	0.639		
18	0.049	0.902	0.639	0.2361	0.545		
1¼	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
17	0.058	1.13	1.01	0.2969	0.808		
18	0.049	1.15	1.04	0.3015	0.688		
1½	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
17	0.058	1.38	1.50	0.3623	0.978		
18	0.049	1.40	1.54	0.3670	0.831		

Tabla 2.1 Datos de los Tubos para Intercambiadores de Calor. ^[6]

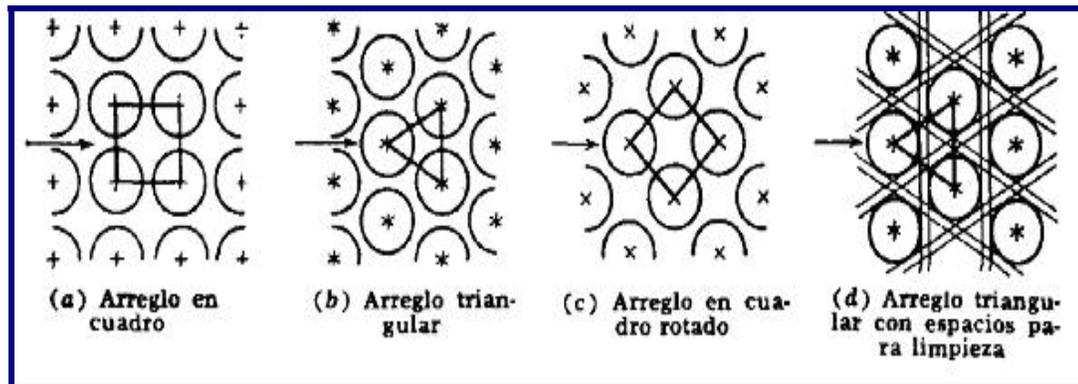


Figura 2.8 Arreglos comunes para los Tubos de Intercambiadores de Tubo y Coraza. ^[6]

∞ Corazas:

Las corazas hasta de 12 plg de diámetro IPS se fabrican de tubo de acero. Sobre 12plg y hasta 24 plg el diámetro exterior real y el diámetro nominal del tubo son los mismos. El grueso estándar para corazas con diámetros interiores de 12 a 24 plg inclusive, es de 3/8 plg, lo que es satisfactorio para presiones de operación por el lado de la coraza hasta de 300 lb/plg. Se pueden obtener mayores gruesos para presiones superiores. Las corazas mayores de 24 plg de diámetro se fabrican rolando placa de acero. ^[6]

∞ Cabezal, Espejo o Placa:

Es la pieza metálica de la que se sujetan los tubos, esta debe ser de un material similar al de los tubos para evitar la corrosión galvánica y debe tener un espesor considerable para soportar las condiciones de operación (presión, temperatura y corrosión). En la **Figura 2.9** se muestra un cabezal de tubos para un intercambiador de 8 pasos por el lado tubo. ^[6]



Figura 2.9 Cabezal de Tubos de un Intercambiador de Tubo y Coraza. ^[9]

☞ Deflectores:

Aumentando la turbulencia en el líquido se aumenta el coeficiente de transferencia de calor. Para inducir esta turbulencia fuera de los tubos, es costumbre emplear deflectores que hacen que el líquido fluya a través de la coraza en ángulo recto con el haz de tubos. Estos causan una considerable turbulencia aun cuando por la coraza fluya una cantidad pequeña de líquido. ^[6]

Los deflectores también son utilizados como soporte del haz de tubos a fin de que estos no se pandeen a lo largo del intercambiador. Hay varios tipos de deflectores, los más usados son los deflectores segmentados, los cuales son hojas de metal perforadas cuyas alturas son generalmente 75 % del diámetro interior de la coraza. Estos se conocen como *deflectores de 25 % de corte*. En la **Figura 2.10** se muestran los detalles de los deflectores segmentados y en la **Figura 2.11** se muestran otros tipos de deflectores como los de disco y corona y el deflector de orificio. Aun cuando algunas veces se emplean otros tipos, no son de importancia general. ^[6]

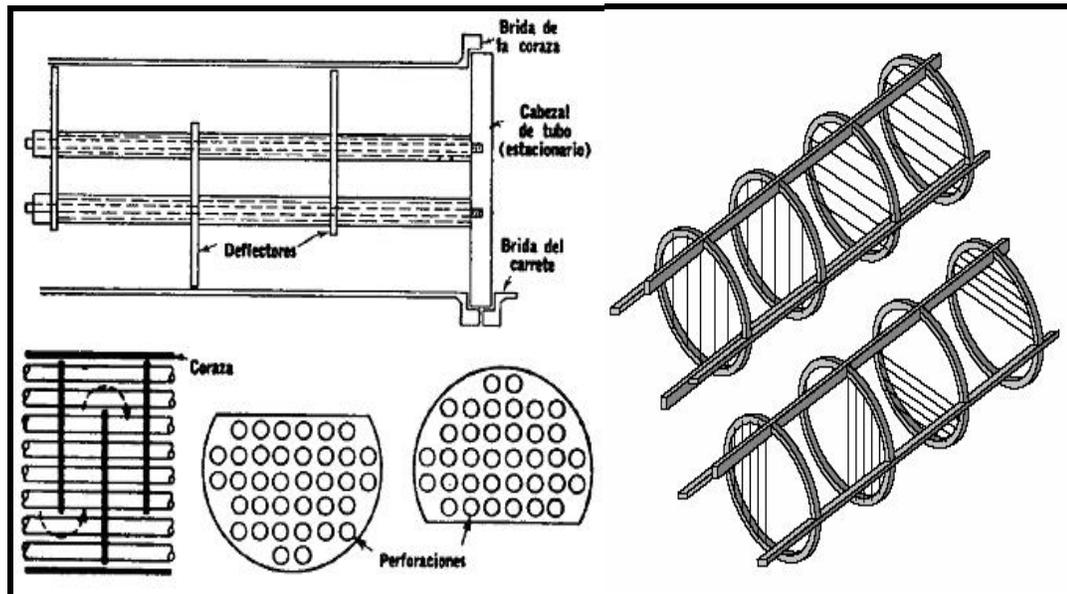


Figura 2.10 Detalle de deflectores segmentados. [6]

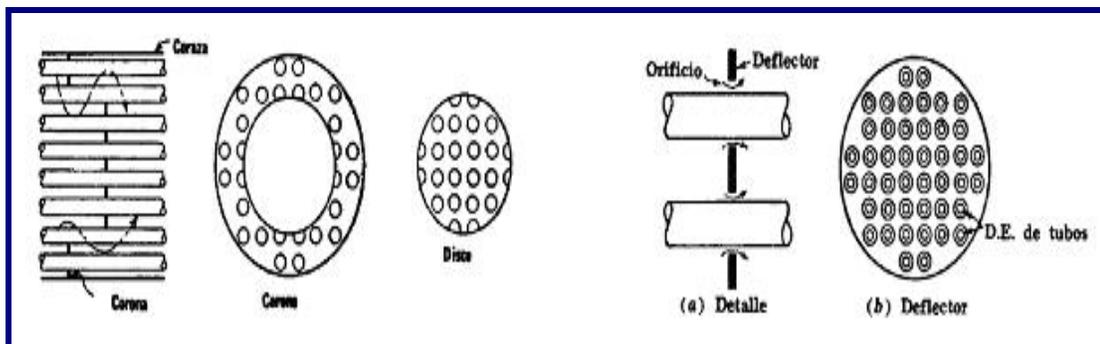


Figura 2.11 Deflector de Disco y Corona y Deflector de Orificio. [6]

∞ Distribución de cabezal de tubos y numeración de tubos:

Una distribución típica de tubos para un intercambiador de cabezal flotante de anillo dividido, se muestra en la **Figura 2.12**. [6]

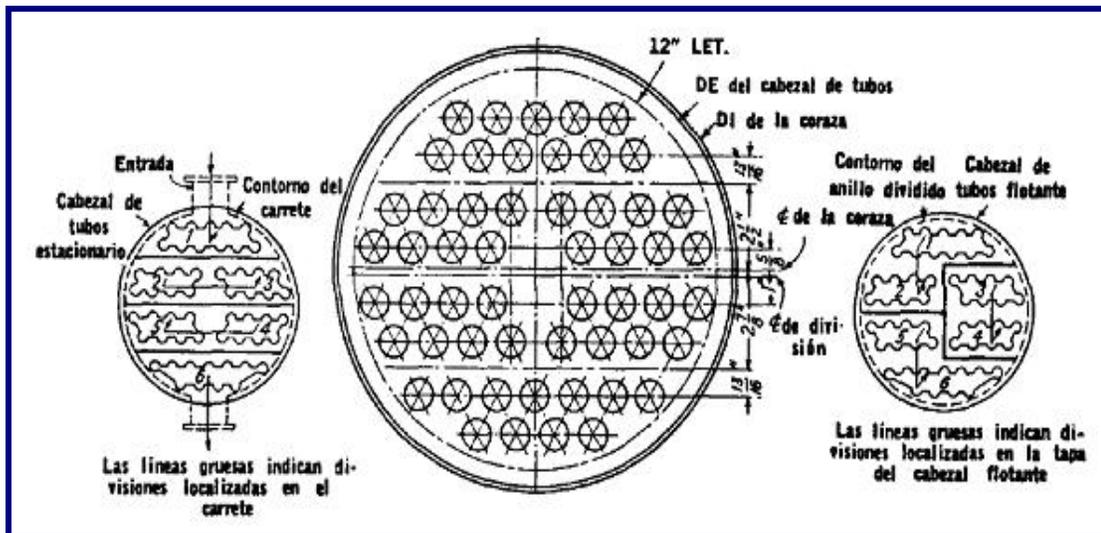


Figura 2.12 Distribución de tubos en el cabezal o tapa para una coraza de $13 \frac{1}{4}$ plg DI con tubos de 1 plg DE y en arreglo de paso triangular de $1 \frac{1}{4}$ plg acomodado para seis pasos por los tubos.^[6]

2.3.3.2 Tipos de Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza

Los Principales Tipos de Intercambiadores de Tubo y Coraza son:

- **Intercambiadores con Cabezal de Tubos Estacionario:**

Este es el tipo más simple de intercambiador, de los cuales el mostrado en la **Figura 2.13** se muestra un ejemplo.

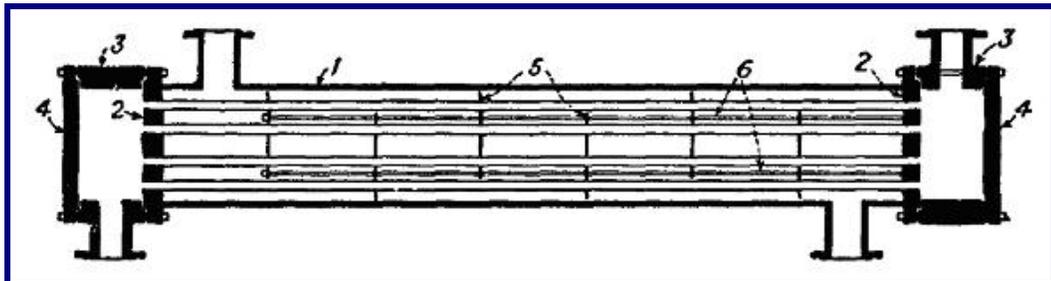


Figura 2.13 Intercambiador de Calor de Cabezal de Tubos Estacionario.^[6]



- **Intercambiadores con Cabezal de Tubos fijos con Tapas Integrales.**

Al usar intercambiadores con cabezal de tubos fijos, es a menudo necesario tomar en cuenta la expansión térmica diferencial entre los tubos y la coraza durante la operación, o de otra manera se desarrollarán esfuerzos térmicos a través del espejo o cabezal de tubos. Esto puede efectuarse usando una *junta de expansión ó junta de dilatación* en la coraza, de las cuales hay disponible un gran número de ellas, como se muestra en la **Figura 2.14**.^[6]

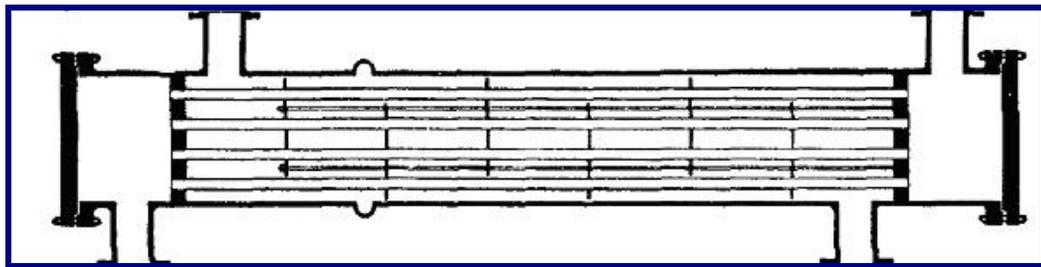


Figura 2.14 Intercambiador de Cabezal de Tubos fijos con Carretes Integrales.^[6]

- **Intercambiadores de Calor 1-2 con Cabezal de Tubos fijo:**

El intercambiador en el cual el fluido de la coraza fluye en un paso por la coraza y el fluido de los tubos en dos ó más pasos, es el *intercambiador 1-2*. Se emplea una sola tapa con una división para permitir la entrada y salida del fluido de los tubos por la misma tapa. En el extremo opuesto del intercambiador está colocada una división para permitir que el fluido de los tubos pase del primer al segundo paso. La parte externa de los tubos es inaccesible para la limpieza mecánica. El interior de los tubos puede ser limpiado removiendo únicamente la pared del carrete y usando un limpiador rotatorio.^[6]

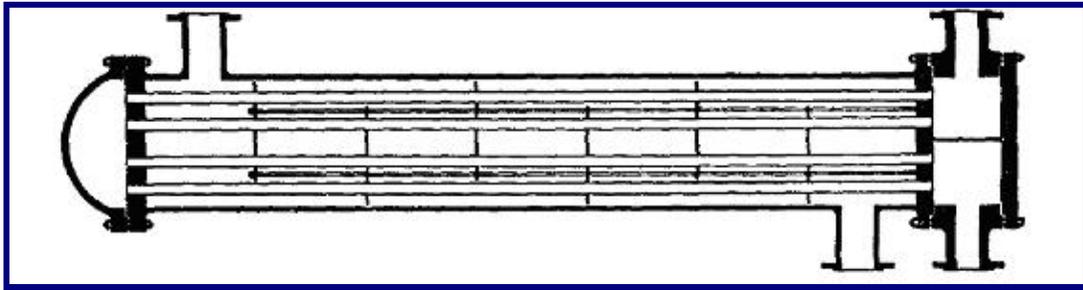


Figura 2.15 Intercambiador 1-2 de Cabezal de Tubos Fijo. ^[6]

- Intercambiadores de Calor 1-2 de Cabezal flotante:

En la siguiente **Figura 2.16** se muestra un contratipo del intercambiador 1-2, que tiene el banco de tubos removible de la coraza.

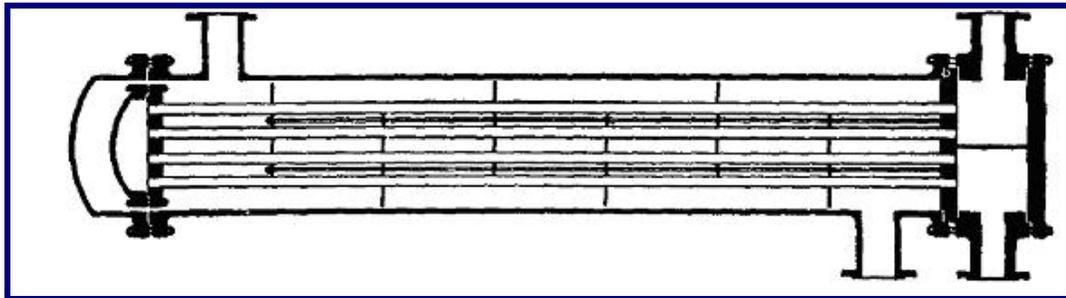


Figura 2.16 Intercambiador 1-2 con Cabezal Flotante de arrastre. ^[6]

Consiste en un cabezal de tubos estacionario, que se encuentra sujeto entre la brida de una tapa y la brida de la coraza. En el extremo opuesto al haz de tubos, éstos se expanden en un *cabezal de tubos flotantes* que se mueve libremente. Al *cabezal de tubos* se atornilla un *casquete de cabezal flotante* y todo el haz de tubos puede extraerse por el extremo de la tapa. La desventaja de usar cabezal flotante es de simple geometría. ^[6]



- **Intercambiadores con Tubos en U:**

Los intercambiadores 1-2 que se muestra a continuación en la **Figura 2.17** está formado por tubos que se doblan en forma de U y se rolan después en la tapa (espejo o cabezal de tubos). Se caracteriza por tener solo una placa de tubos en forma de U, que tienen la particularidad de moverse libremente con relación a la coraza lo que elimina el problema de la expansión diferencial.

Los bancos de tubos se pueden remover para limpieza mecánica, pero el interior de estos se limpia en general químicamente. ^[6]

Los tubos pueden dilatarse libremente, eliminando la necesidad del cabezal de tubos flotante, la tapa del cabezal, la brida de la coraza y la tapa removible de esta última. El diámetro más pequeño al cual se puede doblar un tubo sin deformar su diámetro exterior en un doblez en U, es de tres a cuatro veces el diámetro exterior del tubo, Esto significa que es necesario omitir algunos tubos en el centro del haz, dependiendo de la distribución. ^[6]

- **Intercambiadores de Calor 2-4, 3-6, 4-8:**

Un intercambiador 2-4, 3-6 o 4-8 puede usarse cuando las temperaturas del proceso dan un Factor de Corrección (Ft) de menos de 0,75 para un intercambiador 1-2 y se requiere una mayor transferencia de calor. ^[6]

Un intercambiador 2-4 difiere en varios aspectos de un intercambiador 1-2, en primer lugar el factor de corrección será diferente y calculado por otra fórmula, el área de flujo para los deflectores será la mitad de los valores estimados debido a que el área de coraza estará dividida entre dos y por último el número de cruces en el lado tubo incrementa la caída de presión. ^[6]

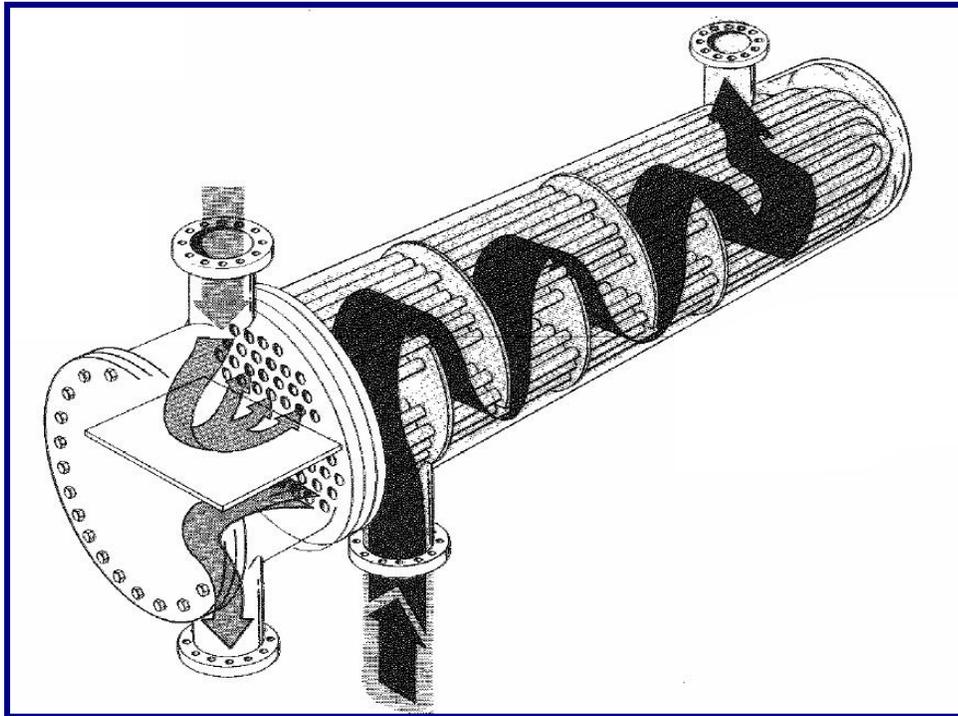


Figura 2.17 Intercambiador 1-2 con haz de tubos en U.^[9]

- **Intercambiadores con Flujo Dividido en la Coraza:**

Muchas veces no es posible cumplir con los requerimientos de caída de presión en los intercambiadores 1-2 o 2-4. Esto puede suceder debido a que la diferencia de temperatura es muy grande, siendo indicado entonces un intercambiador pequeño para la cantidad de calor que debe transferirse, también puede ocurrir porque uno de los flujos tiene un rango de temperatura demasiado pequeño comparado con el otro. Entonces se utiliza, para este caso, un intercambiador de flujo dividido para disminuir los efectos de caída de presión. Este tipo de intercambiador se utiliza como condensador y parte puede utilizarse con enfriador. El desviador central divide el flujo en dos y el resto de desviadores lo llevan a través de los tubos para enfriarse. Un ejemplo de intercambiador de flujo dividido en la coraza se muestra en la **Figura 2.18**.

[6]

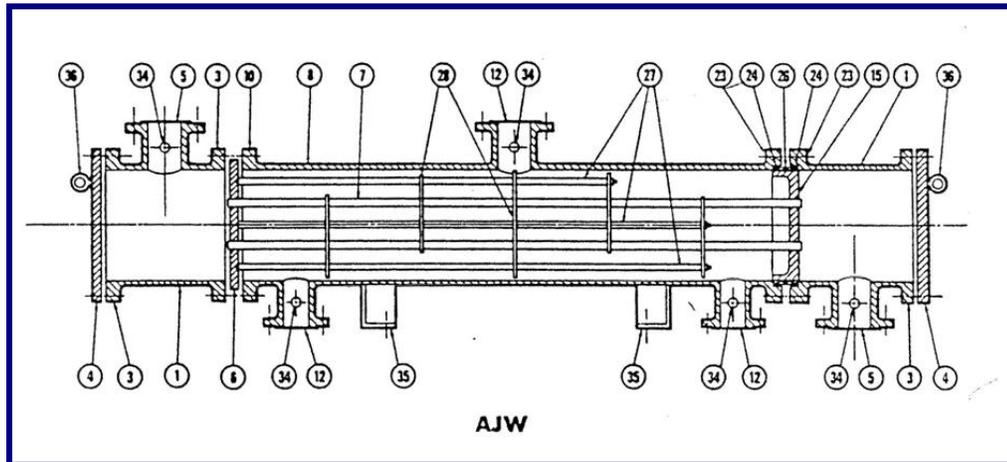


Figura 2.18 Intercambiador con Flujo Dividido en la Coraza. [6]

2.3.4 Problemas Operacionales Típicos en los Intercambiadores de Calor

Los problemas operacionales que se presentan con más frecuencia en los intercambiadores de calor son los siguientes:

◆ Vibración:

La vibración es la causa más seria y frecuente de falla de los intercambiadores de calor, especialmente cuando se trata de unidades grandes, con altas tasas de flujo o altas velocidades en el lado coraza. La vibración puede ser transmitida mecánicamente, o a través del fluido en forma de pulsaciones provenientes de un flujo a elevadas velocidades. La mayoría de los casos de vibración inducida por el flujo, se asume que es causada por el desprendimiento de vórtices desde la corriente del lado tubo aguas abajo del equipo, y como consecuencia el patrón de flujo generado por estos vórtices alteran la distribución de la presión, generando oscilaciones en la magnitud y la dirección de las fuerzas ejercidas por la presión en los tubos, provocando que los tubos vibren, causando la dispersión de un fluido en otro. [9]



◆ **Corrosión y Erosión:**

La corrosión y la erosión se generan por la pérdida del material de construcción del equipo debido a reacciones químicas o electroquímicas con impurezas en los fluidos, y a la alta velocidad o cambios en la dirección del flujo. La corrosión y la erosión de los tubos son unas de las causas más frecuentes de problemas en los intercambiadores de calor debido a que el desgaste del material de los tubos puede llevar a su pérdida total de la transferencia de calor por fugas internas y mezcla de los fluidos que fluyen por el equipo. ^[9]

Por esta razón se hace necesaria la revisión periódica de los intercambiadores de calor y mantener un exhaustivo control en los sistemas anticorrosivos y de las propiedades de los fluidos y sus velocidades a fin de evitar pérdidas de producción de forma innecesaria debido al deterioro de los equipos de forma parcial o absoluta. Por lo tanto es de vital importancia el monitoreo y evaluación de las condiciones de operación de los intercambiadores de calor para mantener controlados posibles problemas por corrosión y erosión. ^[9]

◆ **Derrame de Fluidos:**

El derrame de fluidos en un intercambiador de calor puede ser causado por los cambios térmicos constantes en el equipo que generarían expansión térmica y vibración de los tubos y de las empacaduras del intercambiador. El derrame de fluidos ocasiona grandes pérdidas de producción, de altos costos de operación y de mantenimiento. Por lo cual se debe mantener una revisión constante de los equipos para detectar posibles puntos que por desgaste operacional puedan fallar y terminar en un no deseable derrame de fluidos en el intercambiador de calor. ^[8]



◆ **Ensuciamiento:**

El ensuciamiento (“fouling”) es la acumulación de sustancias indeseables en la superficie de intercambio de calor; dicho ensuciamiento influye directamente en la eficiencia del intercambiador debido a la reducción en el intercambio de calor por la resistencia adicional causada. Las categorías de ensuciamiento propuestas se resumen en la **Tabla 2.2.** ^[9]

TIPO DE ENSUCIAMIENTO	DESCRIPCIÓN
PARTICULADO	Consiste en la acumulación de partículas sólidas contenidas en alguna de las corrientes involucradas. La naturaleza de dichas partículas puede ser orgánica o inorgánica y con una gran variedad de tamaños.
BIOLÓGICO	Microorganismos como bacterias y algas, u organismos como pueden “incrustarse” en ciertas partes del intercambiador, generalmente cuando el agua de mar se emplea como fluido en los equipos de intercambio.
CORROSIÓN	Si la corriente de fluido es corrosiva, entonces puede reaccionar con la superficie del intercambiador con la que este en contacto y generar ensuciamiento.
POR CRISTALIZACIÓN	Cuando existen sales disueltas en alguna corriente, y debido al calentamiento o enfriamiento se sobrepasa la condición de “saturación”, entonces dichas sales se depositan en la superficie del intercambiador
POR REACCIÓN QUÍMICA	Algunos depósitos se forman por reacción química que ocurre en alguna corriente como resultado, por ejemplo, de la acción catalítica de la superficie del intercambiador. Procesos como polimerizaciones y craqueos son ejemplos típicos.

Tabla 2.2 Categorías del ensuciamiento. ^[9]

Las etapas que existen en el fenómeno de ensuciamiento son la iniciación, en la cual los factores que lo originan empiezan a actuar, y ciertas condiciones en el intercambiador por la rugosidad de su superficie (que sirve como sitios de para el ensuciamiento por cristalización), su naturaleza y recubrimiento interactúan para preparar el camino al transporte, etapa en la cual ocurren fenómenos como la sedimentación de las partículas, difusión de iones, termofóresis, etc. ^[9]



Luego ocurre su adherencia a la superficie; una parte del material depositado es removido por el cizallamiento que ofrece el fluido, la erosión o la dilución. Finalmente, la capa que no es removida comienza a envejecer, debido a que la estructura cristalina de la capa cambia con el tiempo, así como su espesor, además comienzan a depositarse microorganismos debido a la corrosión, etc. ^[9]

La predicción del ensuciamiento es muy difícil debido a que su efecto neto es el resultado de muchos fenómenos que no actúan individualmente, y por la complicación adicional de su dependencia con el tiempo. ^[9]

El valor del Factor de Ensuciamiento (Rd), es el valor que presenta la resistencia al tiempo en el cual se ha planificado realizar el mantenimiento del equipo, el cual es típicamente de un año o año y medio. Al cabo de este tiempo, el valor del ensuciamiento es mayor, y por tanto el calor neto que se intercambia es menor al de diseño; por esta razón la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor (T.E.M.A.) provee listas de valores típicos “los cuales son probablemente el recurso más citado de factores de ensuciamiento utilizados en el diseño de intercambiadores de calor”. En la **Tabla 2.3** se encuentran algunos valores reportados por TEMA. ^[9]



Lado de la cubierta (o coraza)	Lado de los tubos	U de diseño	Incluye la suciedad total	Lado de la cubierta (o coraza)	Lado de los tubos	U de diseño	Incluye la suciedad total
Medios de liquido-liquido							
Aroclor 1248	Combust. para jet	100-150	0.0015	Aire, N ₂ , etc. (comprimidos)	Agua o salmuera	40-80	.005
Asfalto diluido	Agua	10-20	.01	Aire, N ₂ , etc., A	Agua o salmuera	10-50	.005
Agua desmineralizada	Agua	300-500	.001	Agua o salmuera	Aire, N ₂ (comprimido)	20-40	.005
Soluciones de 10-25% de etanolamino (ME:A o DE:A)	Soluciones de agua, DE:A o ME:A	140-200	.003	Agua o salmuera	Aire, N ₂ , etc., A	5-20	.005
Combustóleo	Agua	15-25	.007	Agua	Mezclas de gas natural que contienen hidrogeno	80-125	.003
Combustóleo	Petróleo	10-15	.008	Vaporizadores			
Gasolina	Agua	60-100	.003				
Aceites pesados	Accites pesados	10-40	.004				
Accites pesados	Agua	15-50	.005				
Corriente reformadora rica en hidrogeno	Corriente reformadora rica en hidrogeno	90-120	.002	Amoniaco anhidro	Condensación de vapor	150-300	.0015
Queroseno o gasoil	Agua	25-50	.005	Cloro	Condensación de vapor	150-300	.0015
Queroseno o gasoil	Petróleo	20-35	.005	Cloro	Acetite ligero de transferencia de calor	40-60	.0015
Queroseno o comb. para jet	Tricloroetileno	40-50	.0015	Propano, butano, etc.	Condensación de vapor	200-300	.0015
Agua para la cubierta	Agua	230-300	.002	Agua	Condensación de vapor	250-400	.0015
Acetite lub. (baja viscosidad)	Agua	25-50	.002				
Acetite lub. (alta viscosidad)	Agua	40-80	.003				
Acetite lubricante	Petróleo	11-20	.006				
Nafta	Agua	50-70	.005				
Nafta	Petróleo	25-35	.005				
Disolventes organicos	Agua	50-150	.003				
Disolventes organicos	Salmuera	35-90	.003				
Disolventes organicos	Disolventes organicos	20-60	.002				
Derivados de acetite de resina, acetites vegetales, etc.	Agua	20-50	.004				

Tabla 2.3 Ensuciamiento aportado por algunos fluidos. ^[9]



2.3.5 Simulación de Procesos Químicos

2.3.5.1 Paquetes de Simulación

Son programas utilizados en la industria para facilitar los cálculos de ingeniería que tomarían más tiempo y trabajo llevarse a cabo con métodos tradicionales o manuales. Con este tipo de programas se logra simular en la computadora los procesos que se desarrollan en los equipos con diferentes datos de diseño y operación de los mismos.^[10]

En la industria son muchos los datos, equipos, corrientes y especificaciones que deben manejarse simultáneamente, y en este sentido los paquetes de simulación ofrecen una herramienta útil para tener una idea del comportamiento real y las condiciones de los procesos que se llevan a cabo en la industria. La simulación de procesos químicos está vinculada al cálculo de balances de materia y energía, naturalmente a partir de datos suministrados de los procesos y de las características y condiciones de los fluidos.^[10]

En los primeros pasos de la simulación, los procesos se basan principalmente en circuitos análogos, ya que todos los principios físicos tienen asociados modelos matemáticos equivalentes. En el año 1974 apareció el primer simulador de procesos químicos llamado FLOWTRAN, a partir de entonces se crearon una sucesión de acontecimientos que permitieron que en la actualidad existan diversos y eficientes simuladores de procesos químicos comerciales como por ejemplo: ASPEN PLUS, SPEED UP, PRO II, CHEMCAD, HEXTRAN, entre otros más.^[10]



2.3.5.2 Clasificación de los Métodos de Simulación

Se pueden considerar la simulación como aquella labor en la cual se le proporciona ciertos valores de entrada a un simulador para obtener ciertos resultados o valores de salida, con el fin de estimar el comportamiento de un sistema real bajo condiciones reales. La simulación puede ser:

◆ **Simulación Cuantitativa y Cualitativa:**

La simulación cualitativa tiene por objeto principal el estudio de las relaciones de causa y efecto en las tendencias del comportamiento de un sistema, así como también las propagaciones de las perturbaciones a través de un proceso dado.^[10]

Son varios los campos de este tipo de simulación, como el análisis de tendencias, supervisión y diagnóstico de fallas, análisis e interpretación de riesgos, control estadístico de los procesos, etc.^[10]

Por otro lado, la simulación cuantitativa es aquella que describe numéricamente el comportamiento de un proceso, a través de un modelo matemático del mismo. Esto se lleva a cabo a través de la resolución de balances de materia, energía y cantidad de movimiento, junto con las ecuaciones de restricción que imponen aspectos funcionales y fundamentales del sistema.^[10]



◆ Simulación Estacionaria y Dinámica:

La simulación en estado estacionario implica resolver balances de un sistema no involucrando la variable Tiempo, mientras que la simulación dinámica plantea los balances en dependencia con el tiempo, ya sea para representar el funcionamiento de los equipos progresivamente, o para analizar la evolución que se manifiesta entre dos estados estacionarios de un equipo o de la planta completa. ^[10]

2.3.5.3 Simulación de Procesos en Estado Estacionario Secuenciales

Los simuladores que están orientados por ecuaciones tienen como principales características el representar cada equipo por las ecuaciones que lo modelan, siendo este modelo la integración de todos los subsistemas que componen el equipo, simplificando así los problemas de diseño. Sin embargo mientras más complejo sea el sistema, menor confiabilidad tendrán los resultados obtenidos por problemas de convergencia y carencia de sentido físico. ^[10]

El enfoque de la teoría secuencial modular por definición supone que se conocen específicamente todas las variables de los fluidos que alimentan los equipos, mientras que pueden calcularse las variables de las corrientes de salida y algunos parámetros de operación si fuera necesario. ^[10]

Por ejemplo, en los intercambiadores de calor en contracorriente se supone que se conocen las variables de los fluidos de entrada (presión, temperatura, flujo, composición, propiedades fisicoquímicas, etc.), se pueden calcular las características de las corrientes de salida a través del sistema de ecuaciones correspondientes, solamente si se designan ciertos parámetros del equipo y del proceso de transferencia de calor. ^[10]



Los Simuladores Secuenciales poseen características notables como lo son una biblioteca de módulo, orden de resolución fijo o iteraciones en tres niveles: cálculos fisicoquímicos, módulos de equipos (columnas de destilación, cámaras flash, compresores, turbinas, intercambiadores de calor, etc), las variables de iteración (presión, temperatura, flujo, composición y características de los fluidos), y así se puede resolver modelos individuales eficientemente. Este tipo de simuladores es fácilmente manejable por los usuarios que no sean expertos en simulación, ya que estos simuladores tienen sistemas de convergencia robustos y la información es ingresada por el usuario de manera sencilla y los resultados son fácilmente verificables e interpretables.^[10]

El simulador PRO II versión 7.0, así como muchos simuladores comerciales utilizados en las industrias a nivel mundial, son Simuladores Secuenciales Modulares.^[10]

2.3.5.4 Simulador de Procesos PRO II versión 7.0

El simulador PRO II es un software desarrollado por SimSci-Esscor Inc. Este riguroso simulador realiza balances de masa y energía para una amplia gama de procesos, tales como separación de petróleo y gas, destilación reactiva, compresión, transferencia de calor y todos los procesos que se llevan a cabo en la industria petrolera. PRO II combina los recursos de datos de una gran biblioteca de componentes químicos y extensas propiedades termodinámicas, con métodos de predicción con la más avanzada y flexible de la unidad de operaciones técnicas. Los ingenieros pueden beneficiarse a través de este simulador de procesos computacional para ejecutar la evaluación de todas las instalaciones de la masa y la energía necesarias para el cálculo del balance modelo de estado en los procesos de la industria química, petróleo, gas natural, tratamiento de sólidos, y la industria de polímeros. PRO II, se ejecuta en una interfaz basada en entorno gráfico de Windows.^[11]



PRO II está diseñado para el manejo de cálculos de crudos pesados mejorados, aunque este software de simulación fue desarrollado tradicionalmente para modelar crudos convencionales. Esto normalmente representaría un problema, pero SimSci-Esscor Inc y PRO II tienen representación en la industria petrolera mundial y se han comprometido a desarrollar capacidades adicionales que expanden los servicios y las funciones de este simulador en este importante mercado.^[11]

Por esta razón, PRO II es el mejor simulador debido a sus excelentes metodologías en el manejo de crudos pesados, además también cuenta con un sistema de caracterización para crudos pesados que extrapola propiedades críticas y el peso molecular de componentes del petróleo con puntos de ebullición normales iguales o superiores a 1000 °K.^[11]

El simulador PRO II es de gran utilidad en los cálculos de ingeniería enfocados en la integración de todos los equipos dentro de una unidad de operación o dentro de una planta industrial. Este software se enfoca en los cálculos de transferencia de calor, balances de masa, propiedades termodinámicas y composicionales de los fluidos, entre otros, en procesos que se desarrollan en equipos como los siguientes: torres de destilación, torres de vaporización instantánea (flash), intercambiadores de calor, compresores, válvulas, bombas, reactores, separadores, entre otros.^[11]

◆ **Aplicaciones del Simulador PRO II**

- **Diseño de nuevos procesos:** El simulador PRO II permite establecer e introducir nuevos parámetros de operación, introducir nuevos equipos dentro de una unidad o planta para evaluar su impacto los procesos realizados en la misma con gran exactitud, permitiendo el análisis la influencia de nuevos procesos dentro del sistema de la unidad en general.^[11]

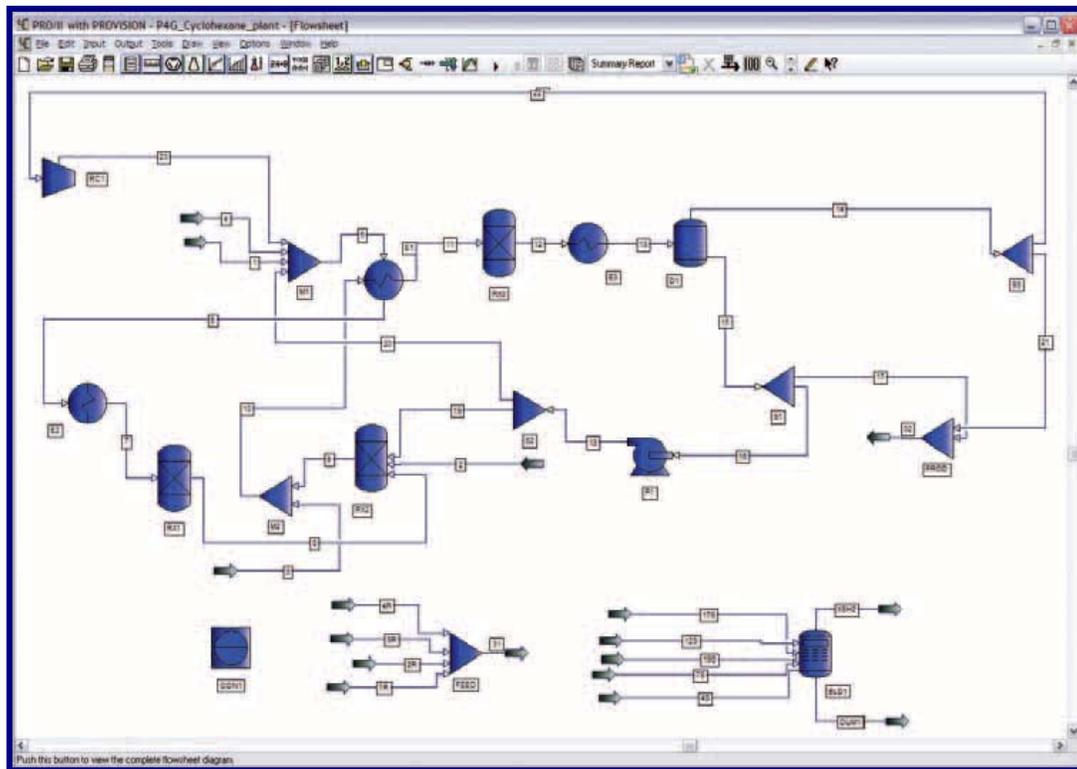


Figura 2.19 Ventana del Simulador de Procesos PRO II Versión 7.0. ^[11]

- **Evaluar configuraciones alternas de la planta:** El simulador PRO II permite también el posible rediseño o reordenamiento de la configuración de la unidad o de la planta de procesos y plantear configuraciones alternas, con el objetivo de evaluar posibles mejoras en busca de la optimización del funcionamiento de la misma. ^[11]
- **Solución de problemas de la planta de procesos:** El simulador PRO II permite a sus usuarios evaluar las condiciones de los equipos y los procesos dentro de una unidad o planta de procesos, brindando facilidades para la solución de problemas operacionales existentes en la misma a través del análisis de diversas modificaciones o mejoras propuestas en el simulador, se miden sus efectos y se puede encontrar una solución de forma segura. ^[11]



- **Monitorear, optimizar, mejorar los rendimientos y la rentabilidad de la planta:** El simulador PRO II permite monitorear y evaluar las condiciones actuales de una unidad o planta de procesos ingresándole datos reales, permite también optimizar cualquier proceso que presente algún problema en el sistema a fin de optimizar el rendimiento de los equipos y de la producción de la misma para obtener una mayor rentabilidad.^[11]

2.3.5.5 Intercambiadores de Calor en Simulador PRO II versión 7.0

El Simulador PRO II brinda a sus usuarios diversas herramientas para la evaluación de procesos de transferencia de calor para intercambiadores de tubo y coraza, a través de correlaciones de estado para obtener cálculos de factores de ensuciamiento, cálculos de caídas de presión y cálculos rigurosos para la determinación de propiedades termodinámicas e hidráulicas de los fluidos que intercambian calor.^[11]

◆ Opciones de simulación para Intercambiadores de Calor en PRO II

- **Intercambiador de Calor LNG:** Esta opción simula un intercambiador de calor de cualquier número de corrientes calientes y frías. El intercambiador es dividido en celdas que representan elementos individuales de contraflujo. Las celdas son designadas como CALIENTES cuando las corrientes son enfriadas, o como FRÍAS cuando las corrientes son calentadas. Este equipo debe contener al menos una celda caliente y una celda fría. El número de celdas es inicialmente definido en la ventana de configuración del Intercambiador de Calor LNG que aparece cuando el equipo es cargado en el programa. Las celdas pueden ser adicionadas o eliminadas de la ventana del menú del Intercambiador de Calor LNG.^[11]



- **Intercambiador de Calor Simple:** Este intercambiador puede ser usado para calentar o enfriar una sola corriente de proceso, para intercambiar calor entre dos corrientes de proceso o para intercambiar calor entre una corriente de proceso y una corriente de utilidad. Los cálculos rigurosos pueden ser configurados para sistemas VLLE. También es posible adjuntar un intercambiador de calor a cualquier columna de destilación e intercambiar calor entre una corriente de proceso y una corriente interna de la columna de destilación, sea líquido o vapor.^[11]

- **Intercambiador de Calor Riguroso:** Simula la operación de un intercambiador de calor existente. La geometría y características del equipo deben ser definidas, y las unidades en las que se determinarán al calor transferido, las temperaturas de salida, las caída de presión y el factor de ensuciamiento.^[11]

- ◆ **Desarrollo de simulación para Intercambiador de Calor Riguroso**

Una vez abierta la ventana del simulador PRO II, seleccionar el módulo de Intercambiador de Calor Riguroso entre la lista de equipos y módulos disponibles y agregarlo a la ventana. Luego se agregan las corrientes de entrada y de salida tanto en el lado tubo como en el lado casco a las cuales se deben definir características de proceso y las propiedades físicas y composicionales de los fluidos. Posteriormente en la ventana del intercambiador de calor riguroso de debe especificar la siguiente información:



- **Detalles de Configuración:**

Números de equipos en serie o en paralelo, número de pasos por el lado tubo dentro de la coraza, orientación (horizontal o vertical), configuración de flujo (paralelo o contracorriente) y el tipo de configuración TEMA del equipo.^[11]

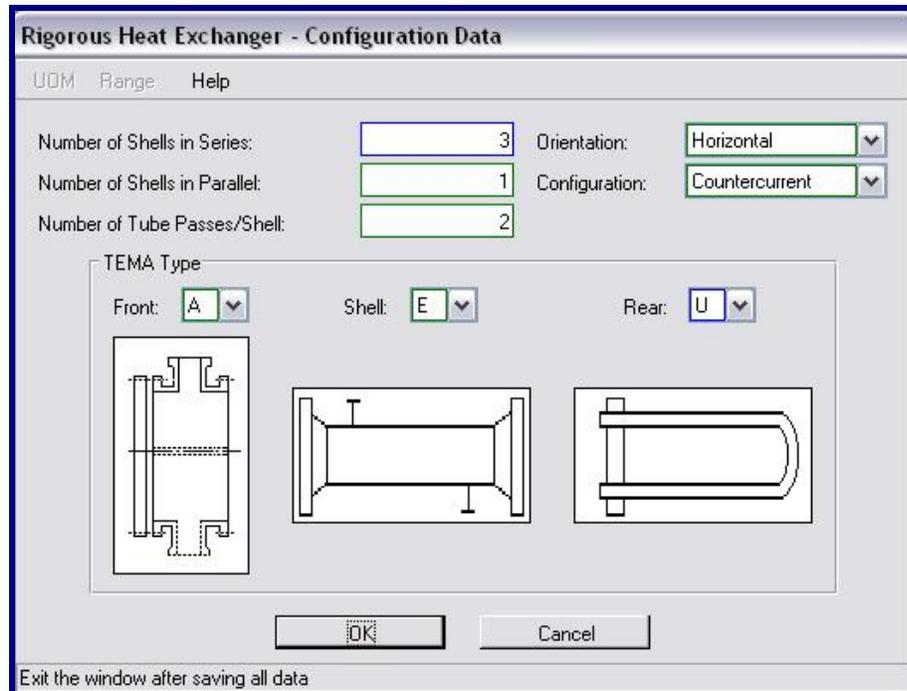


Figura 2.20 Ventana Configuración del Intercambiador de Calor Riguroso.^[Propia]

- **Características de los Tubos:**

Espesor del tubo (BWG), longitud, diámetro externo, espaciado entre los tubos (pitch) y el arreglo de los tubos (cuadrado, triangular, etc).^[11]

- **Deflectores:**

Tipo de deflector (simple o doble), porcentaje de área libre o área libre neta y el espaciado entre los deflectores.^[11]

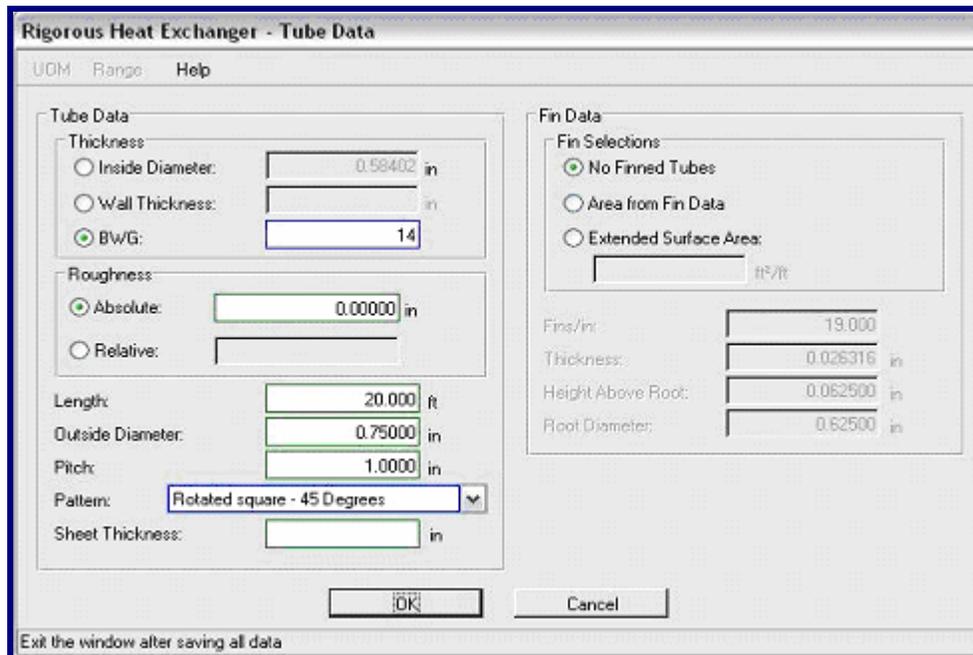


Figura 2.21 Ventana Datos de los Tubos del Intercambiador de Calor Riguroso. [Propia]



Figura 2.22 Ventana Datos de los Deflectores del Intercambiador de Calor Riguroso. [Propia]



- **Tubos y Coraza:**

Diámetro interno de la coraza, números de tubos en la coraza y temperatura de entrada de alguno de los lados (tubo o coraza).^[11]

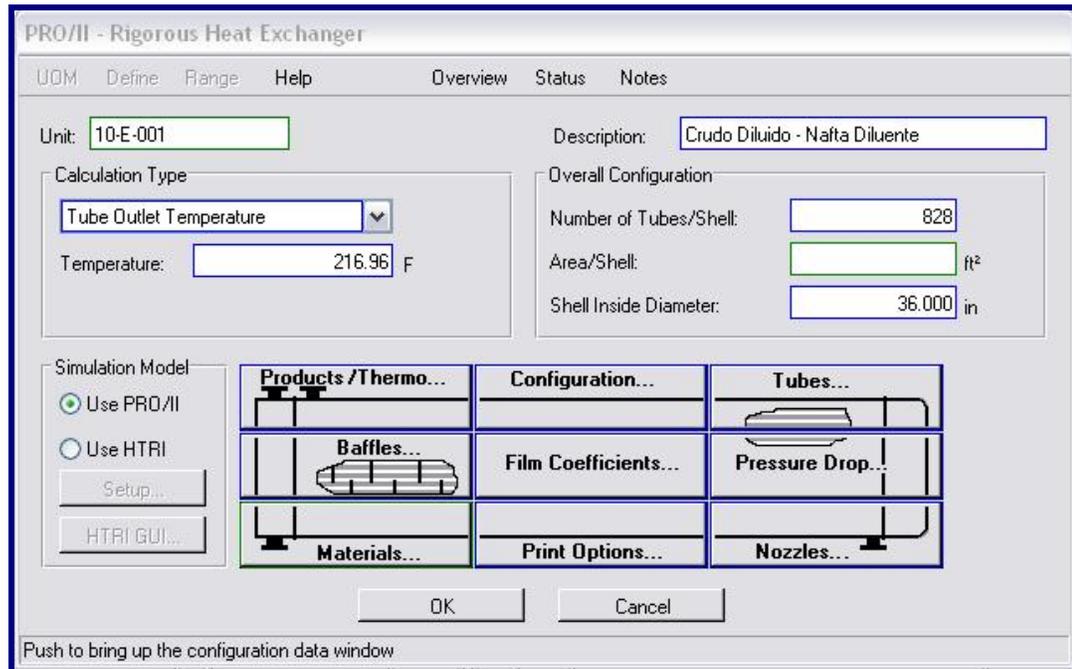


Figura 2.23 Ventana del Intercambiador de Calor Riguroso.^[Propia]

Luego de haber especificado toda la información requerida según la configuración del intercambiador que se desea evaluar, se corre la simulación y se obtienen los resultados en una ventana adicional en forma de texto con los valores de calor transferido (MMBTU/hr), coeficiente de transferencia de calor ($\text{BTU} / \text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}$) y el factor de ensuciamiento ($\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F} / \text{BTU}$), del equipo simulado.^[11]



	User Input	Calculated
Shell Outlet Temp, F		196.24
Tube Outlet Temp, F	216.96	216.96
Duty, MM BTU/HR		23.1466
U, BTU/HR-FT ² -F	N/A	20.0395
Total Installed Area, FT ²	3198.75	11134.17
LMTD, F	N/A	104.9964
Shell Fouling, HR-FT ² -F/BTU	0.0000	0.0000
Tube Fouling, HR-FT ² -F/BTU	0.0000	0.0000
Required Fouling, HR-FT ² -F/BTU	N/A	6.8927E-03

Figura 2.24 Ventana del Resultados para Intercambiador de Calor Riguroso. ^[Propia]

2.3.5.6 Propiedades Físicoquímicas de los fluidos y Ecuaciones Termodinámicas utilizadas en Simulador PRO II versión 7.0

El simulador PRO II ofrece las más extensas gamas de propiedades físicoquímicas de los fluidos existentes en la actualidad para los cálculos de transferencia de calor en la simulación. En la industria a nivel mundial puede encontrar en PRO II una gran librería avalada por métodos estandarizados para aplicaciones en todo tipo de procesos de transferencias de calor como: recuperación y realización de energía, procesos de calentamiento y enfriamiento, generación de vapor, entre otros. ^[11]

El simulador PRO II además también es capaz de predecir las propiedades termodinámicas y de transporte requeridas para los cálculos de calor y balances de masa, factores de ensuciamiento y caída de presión para diferentes fluidos



tales como: hidrocarburos líquidos y gaseosos, destilados de hidrocarburos, refrigerantes, agua líquida y vapor, aire, fluidos no condensables, y a más de mil componentes químicos puros, fluidos especiales como aminas y muchos más. En el caso del petróleo y los destilados de hidrocarburos, el simulador requiere que se le ingrese datos de laboratorio como los valores de las curvas de destilación TBP (True Boiling Point), ASTM D86, ASTM D1160 o ASTM D2887, además de la gravedad API. Estos fluidos son caracterizados por pseudocomponentes y sus propiedades físicas y termodinámicas (calor específico, calor latente, entalpía, etc.) son calculadas a partir de ecuaciones como las de Peng-Robinson, Lee-Kesler, Johnswon-Kesler-Plocker, Grayson-Streed, BWRS, Curl-Pitzer, etc. ^[11]

Stream Data - Assay Definition

UOM Range Help Tag

Assay data for stream CRUD01

Distillation

True Boiling Point

ASTM D86

ASTM D1160

ASTM D2887

TBP Basis

Liquid Volume

Weight

Pressure: 14.696 psia

Correct for Cracking
(Recommended for API 63 and Edmister-Dkamoto Interconversion only)

Gravity Data

API Gravity Average: 15.550

Specific Gravity

Watson K-Factor

Gravity Curve...

Cut	Percent Distilled	Temperature F
Copy		
Paste		
Insert		
1	10.00	326.10
2	20.00	473.50
3	50.00	907.70
4	80.00	1285.60
5		
6		
7		
8		
9		
10		

View Curve...

Additional Data

Molecular Weight... Refinery Inspection Properties...

Lightends... User-defined Special Properties...

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Figura 2.25 Ventana de Datos para caracterizar los Fluidos en el Simulador PRO II. ^[Propia]



Las propiedades de transporte de los fluidos como la conductividad térmica y la viscosidad al igual de la densidad son calculadas por el simulador por ecuaciones como las de Peng-Robinson, BWRS, Johnwson-Kesler-Plocker, y Soave-Redlich-Kwong, tanto para líquidos como para gases. ^[11]

También se debe suministrar al simulador PRO II las condiciones de operación en las que se encuentran los fluidos caracterizados en las diferentes corrientes de proceso, como temperatura, flujo másico y presión, para obtener una mayor precisión en la evaluación del desempeño de cualquier sistema o equipos de proceso. ^[11]

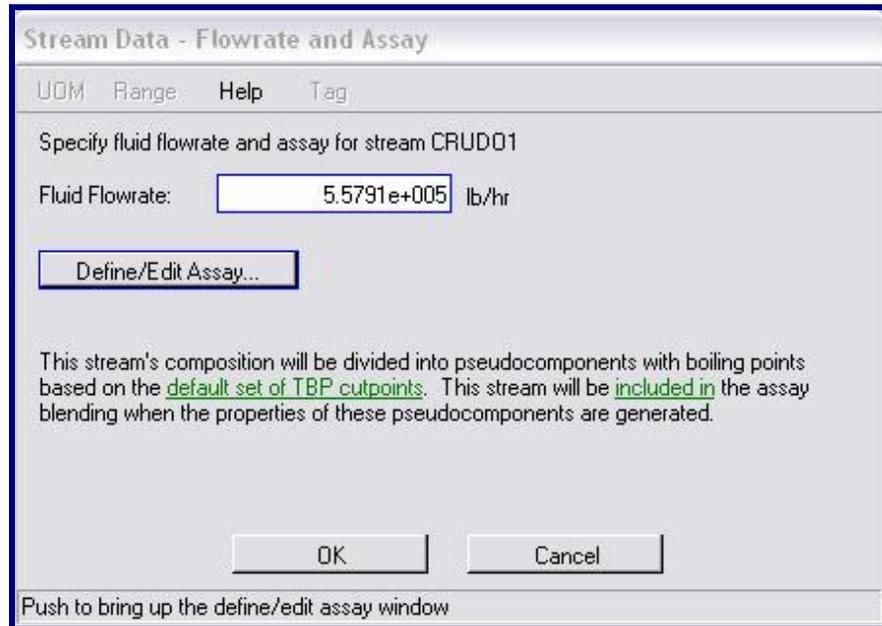


Figura 2.26 Ventana de Flujo para Fluidos en el Simulador PRO II. ^[Propia]

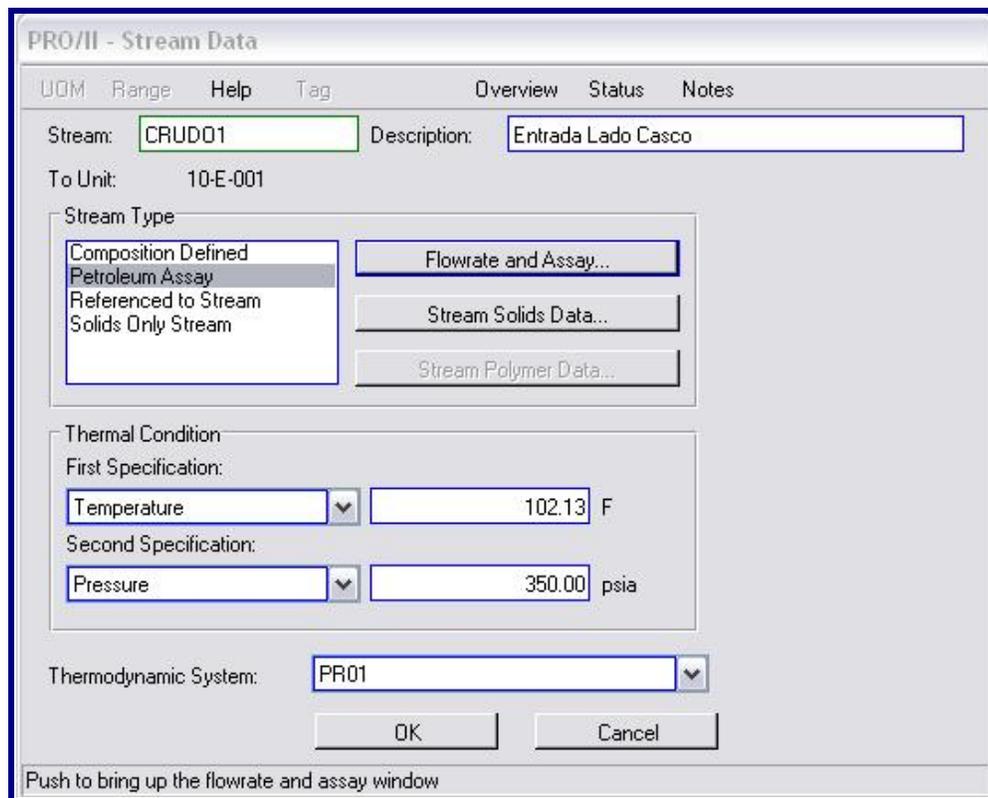


Figura 2.27 Ventana de Condiciones de Flujo para Fluidos en el Simulador PRO II.
[Propia]



CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 IDENTIFICAR LAS CONDICIONES DE DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR INCLUYENDO CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y VARIABLES OPERACIONALES MÁS IMPORTANTES.

3.1.1 Características de Diseño de los Intercambiadores de Calor

La información requerida acerca de las características de diseño de todos los intercambiadores de calor pertenecientes al Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo en el Mejorador PDVSA Petropiar, fue obtenida en las hojas de datos de diseño del fabricante de los equipos (DataSheets), las cuales se encuentran almacenadas en la base de datos “Documentum”, que es una biblioteca virtual interna en la empresa. En el **APÉNDICE A** se muestran copias de las hojas de datos de diseño de todos los intercambiadores evaluados.

Además de la descripción física y dimensional de los intercambiadores de calor según su diseño, fue también necesario tomar en cuenta las condiciones operacionales bajo las cuales fueron estos equipos diseñados, y éstas sirvieron como referencia a las variables operacionales actuales del proceso de transferencia de calor en el precalentamiento del crudo. Las condiciones o variables más importantes que se consideraron para la evaluación de los intercambiadores de calor son: temperatura, presión, flujo y las características composicionales de los fluidos involucrados. Todas estas variables fueron consideradas en el diseño de los equipos para su función dentro de la planta, y estas mismas variables fueron indispensables para la evaluación de la transferencia de calor y eficiencia actual de los intercambiadores.



3.2 DIAGNOSTICAR LAS CONDICIONES ACTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR EN FUNCIÓN AL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO Y DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.

3.2.1 Condiciones de Operación Actuales de los Intercambiadores de Calor

Los datos operacionales de todos los equipos y de los procesos que se llevan a cabo dentro de todas las unidades del Mejorador de PDVSA Petropiar pueden obtenerse a través de la herramienta de monitoreo ASPEN Process Explorer, la cual es una base de datos de la empresa en la que se almacenan y se muestran variables de proceso que se miden en la planta en tiempo real a través de transmisores ubicados en los equipos y en las líneas de flujo, distribuidos por todas las unidades del Mejorador. Para obtener los puntos de medición y los respectivos transmisores de las variables de proceso más importantes en la evaluación de los intercambiadores de calor del Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo, fue necesaria la revisión y estudio de los planos de instrumentación de la Unidad de Crudo (P&ID), además del reconocimiento visual en planta y levantamiento de todos los transmisores según la secuencia de flujo de los intercambiadores de calor.

En el **APÉNDICE B** se muestran los diagramas realizados a partir del reconocimiento visual, revisión de los planos de instrumentación de la Unidad de Crudo (P&ID) y el levantamiento de todos los transmisores de los intercambiadores de calor pertenecientes al Tren de Precalentamiento en Frío.

En la **Tabla 3.1** se muestran los transmisores de las variables de flujo más importantes en la evaluación del Tren de Precalentamiento en Frío, como lo son temperatura, presión y flujo. Cabe mencionar que las líneas de flujo de los intercambiadores de calor pertenecientes a este tren no cuentan con transmisores de presión, tanto en el lado tubo como en el lado coraza, excepto a la salida del lado coraza del intercambiador 10-E-010, por lo que las mediciones de presión necesarias



para evaluar estos equipos fueron tomadas en campo con elementos tubulares equipados con un manómetro, diafragma y una válvula de fuga, cuyos diagramas están representados en el **APÉNDICE C**, los cuales se ubicaron en los puntos de presión de cada equipo.

TRANSMISORES DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR							
INTERCAMBIADORES	LADO CORAZA				LADO TUBO		
	Temp. Ent.	Temp. Sal.	Flujo	Pres. Sal.	Temp. Ent.	Temp. Sal.	Flujo
10-E-001 A/B/C	10-TI-011	10-TI-012	10-FI-011		10-TI-016	10-TI-015	10-FIC-012
10-E-004 A/B/C	10-TI-011	10-TI-051	10-FI-031		10-TI-072	10-TI-032	10-FIC-585 10-FI-586 10-FIC-587
10-E-005	10-TI-056	10-TI-057	10-FI-053 10-FI-051		10-TI-262	10-TI-016	10-FIC-012
10-E-006 A-D	10-TI-057	10-TI-053	10-FI-053		10-TI-086	10-TI-054	10-FIC-234
10-E-007 A-D	10-TI-057	10-TI-071	10-FI-051		10-TI-183	10-TI-072	10-FIC-585 10-FI-586 10-FIC-587 10-FIC-356
10-E-008	10-TI-074	10-TI-073	10-FI-053 10-FI-051		10-TI-096	10-TI-075	10-FIC-285 10-FIC-081
10-E-009	10-TI-073	10-TI-084	10-FI-053 10-FI-051		10-TI-188	10-TIC-083	10-FIC-582 10-FIC-583
10-E-010	10-TI-084	10-TI-085	10-FI-053	10-PIC-153	10-TI-281	10-TI-086	10-FIC-234

Tabla 3.1 Transmisores de las Variables de Proceso de los Intercambiadores de Calor del Tren de Pre calentamiento en Frío.

Las características composicionales de las corrientes que fluyen por los diferentes intercambiadores de calor del Tren de Pre calentamiento en Frío pudieron obtenerse a partir de los datos almacenados en el Portal UIS Project de PDVSA Petropiar, en el cual se almacenan los resultados de muestreo que el laboratorio de la empresa, el cual cuenta con los equipos necesarios para realizar mensualmente pruebas y análisis de todas las corrientes del mejorador desde el inicio de su operación. Análisis importantes como la destilación TBP y la NORMA ASTM D86, Gravedad API, viscosidad, acidez, contenido de azufre, contenido de metales, etc., se realizan a fluidos como: crudo diluido, nafta diluyente, MVGO, HVGO, destilado



liviano, destilado combinado, entre otros, para caracterizarlos de acuerdo a normas y estándares internacionales en la industria petrolera, permitiendo monitorear las variaciones de la calidad y de las características de los fluido.

A partir del software ASPEN Process Explorer y del Portal UIS Project se obtuvieron los datos de las variables operacionales más importantes para la realización de la evaluación del tren de precalentamiento, los cuales fueron tomados para cada intercambiador de acuerdo a los momentos de mayor estabilidad operacional de estos equipos, considerados entre Enero del 2.010 y Marzo del 2.011, con el propósito de obtener una mayor representatividad de los resultados en la evaluación de las condiciones térmicas actuales de los mismos. Para la evaluación hidráulica solamente se tomaron presiones durante el mes de Marzo del 2.011, para comparar la caída de presión actual de los intercambiadores en base a la caída de presión máxima permitida según su diseño.

3.2.2 Evaluación Térmica de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza.

Para realizar la evaluación térmica, el primer paso realizado fue el cálculo y la simulación del Tren de Precalentamiento en Frío según los datos de diseño de cada equipo, a fin de verificar la representatividad de los resultados obtenidos a través del simulador PRO II versión 7.0 y los obtenidos a través de las hojas de cálculo elaboradas con el procedimiento de cálculo descrito a continuación. Una vez realizado este paso, se procedió a la evaluación térmica actual de cada intercambiador de calor perteneciente a este tren, utilizando los valores de condiciones de proceso y de características composicionales tomados entre Enero del 2.010 y Marzo del 2.011 para cada equipo. La evaluación se llevo a cabo tanto en el Simulador PRO II versión 7.0, como en las hojas de cálculo, para comparar los valores de calor transferido, coeficiente total y de factor de ensuciamiento obtenidos para cada intercambiador con el objetivo de realizar un análisis profundo de las condiciones de operación actuales y la eficiencia de la transferencia de calor en estos equipos.



3.2.2.1 Procedimiento de Cálculo para la Evaluación de los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza

Para realizar la evaluación de la eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubo existente, se emplea el procedimiento de cálculo descrito en el Capítulo siete (7) del libro de “Procesos de Transferencia de Calor” de Donald Kern y Asociados ^[6], en el cual se calcula el calor transferido, el coeficiente total de transferencia de calor y el factor de ensuciamiento del equipo, tomando en cuenta ciertas consideraciones de acuerdo al tipo de intercambiador de coraza y tubo que se desee evaluar.

Las variables de proceso y características de los fluidos requeridas para los cálculos son:

	Variables de Proceso	Características de Fluidos
Lado Tubo y Lado Coraza	Temp. Ent. (°F) Temp. Sal. (°F) Flujo Másico (lb/hr)	Viscosidad (cps) Calor Esp. (BTU/lb.°F) Cond. Term. (BTU/hr.pie.°F) Destilación TBP ó ASTM Gravedad API

También se requiere conocer datos de configuración y características de diseño del intercambiador de calor como los siguientes:

	Lado Coraza	Lado Tubo
Datos Requeridos	Diámetro Int. (pulg) Esp. Deflectores (pulg) Nº de Pasos	Nº de Tubos Longitud (pies) Diámetro Ext. (pulg) Espesor (BWG) Esp. entre Tubos (pulg) Nº de Pasos

Una vez se dispongan de estos datos se procede a calcular los coeficientes de transferencia de calor y el factor de ensuciamiento a través de los siguientes pasos:



1. Cálculo del Calor:

$$Q = W_C \cdot C_{e_C} \cdot (T_1 - T_2)$$

Ecuación 3.1 ^[6]

Donde:

Q = Calor Transferido (BTU/hr)

W_C = Flujo Másico del Fluido Caliente (lb/hr)

C_{e_C} = Calor Específico del Fluido Caliente (BTU/lb.°F)

T₁ = Temperatura de Entrada del Fluido Caliente (°F)

T₂ = Temperatura de Salida del Fluido Caliente (°F)

De los datos anteriores generalmente se conocen las temperaturas y el flujo másico sino es un valor dado, se puede calcular a partir del flujo volumétrico, que es un valor generalmente medido en campo, y de la gravedad API del hidrocarburo con las siguientes ecuaciones:

$$W = \frac{5615 \cdot Q \cdot \rho}{24}$$

Ecuación 3.2 ^[12]

$$\rho = 62,427961 \cdot \gamma$$

Ecuación 3.3 ^[12]

$$\gamma = \frac{141,5}{(131,5 + API)}$$

Ecuación 3.4 ^[12]

Donde:

W = Flujo Másico (lb/hr)

Q = Flujo Volumétrico (MBNS/día)

ρ = Densidad (lb/pie³)

API = Gravedad API (Adimensional)

γ = Gravedad Específica (Adimensional)



Por otro lado, el calor específico de un fluido se puede calcular, a partir de los valores de la curva de destilación TBP o destilación ASTM y de la gravedad API, a cualquier temperatura a través de las siguientes ecuaciones:

- Para Crudo, a partir de la curva de destilación TBP:

$$T_b = \frac{T_{20} + T_{50} + T_{80}}{3}$$

Ecuación 3.5 ^[12]

- Para una Fracción de Petróleo, a partir de la curva de destilación ASTM:

$$T_b = \frac{T_{10} + (2.T_{50}) + T_{90}}{4}$$

Ecuación 3.6 ^[12]

Donde:

T_b = Temperatura de Ebullición (°F)

T_i = Temperatura a la que ha destilado el i% del fluido (°F)

$$K_w = \frac{\sqrt[3]{T_b + 459,67}}{\gamma}$$

Ecuación 3.7 ^[12]

$$C_e = \left[(0,6811 - (0,308.\gamma)) + T.(0,000815 - (0,000306.\gamma)) \right] \cdot \left[(0,055.K_w) + 0.35 \right]$$

Ecuación 3.8 ^[12]

Donde:

C_e = Calor Específico (BTU/lb.°F)

K_w = Factor de Caracterización de Watson (Adimensional)

T_b = Temperatura de Ebullición (°F)

T = Temperatura (°F)

γ = Gravedad Específica (Adimensional)



2. Cálculo de la Diferencia de Temperatura Verdadera:

$$\begin{aligned}\Delta T_c &= T_1 + t_2 \\ \Delta T_f &= T_2 + t_1\end{aligned}$$

Ecuación 3.9 ^[6]

$$DTML = \frac{(\Delta T_c - \Delta T_f)}{\ln(\Delta T_c / \Delta T_f)}$$

Ecuación 3.10 ^[6]

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Ecuación 3.11 ^[6]

Donde:

DTML = Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (°F)

ΔT_c = Diferencia de Temperatura en los Extremos Calientes (°F)

ΔT_f = Diferencia de Temperatura en los Extremos Fríos (°F)

T_1 = Temperatura de Entrada del Fluido Caliente (°F)

T_2 = Temperatura de Salida del Fluido Caliente (°F)

t_1 = Temperatura de Entrada del Fluido Frío (°F)

t_2 = Temperatura de Salida del Fluido Frío (°F)

R y S = Términos para Calcular Ft (Adimensionales)

El factor de corrección (Ft) para calcular la diferencia de temperatura verdadera, se calcula dependiendo de la configuración del intercambiador de calor, ya sea un intercambiador 1-2, 2-4, 3-6, de flujo dividido o intercambiadores en serie, el factor de corrección se calcula a través de las siguientes ecuaciones:



- Para Intercambiador de Calor de UN paso por la coraza y “n” número de pasos pares por los tubos (n = 2, 4, 6, 8, 10.....)

$$F t = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \cdot L n \left(\frac{1 - S}{1 - R \cdot S} \right)}{(R - 1) \cdot L n \left(\frac{2 - S \cdot (R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - S \cdot (R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})} \right)}$$

Ecuación 3.12 ^[9]

- Para Intercambiador de Calor de DOS pasos por la coraza y “n” número de pasos pares por los tubos (n = 2, 4, 6, 8, 10.....)

$$F t = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \cdot L n \left(\frac{1 - S}{1 - R \cdot S} \right)}{2 \cdot (R - 1) \cdot L n \left(\frac{\frac{2}{S} - 1 - R + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{(1 - S) \cdot (1 - R \cdot S)}}{S} \right) + \sqrt{R^2 + 1}}{\frac{2}{S} - 1 - R + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{(1 - S) \cdot (1 - R \cdot S)}}{S} \right) - \sqrt{R^2 + 1}} \right)}$$

Ecuación 3.13 ^[9]

- Para Intercambiador de Calor de TRES ó CUATRO pasos por la coraza y “n” número de pasos pares por los tubos (n = 2, 4, 6, 8, 10.....)

$$P_x = \frac{S}{(N_s - (N_s \cdot S) + S)}$$

Ecuación 3.14 ^[9]



$$F t = \frac{\frac{P x \cdot \sqrt{R^2 + 1}}{(1 - P x)}}{L n \left[\frac{\left(\frac{2}{P x} \right) - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{\left(\frac{2}{P x} \right) - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}} \right]}$$

Ecuación 3.15 ^[9]

Donde:

Ft = Factor de Corrección de la DTML (Adimensional)

R y S = Términos para Calcular Ft (Adimensionales)

N_s = Número de pasos por la Coraza

Luego de conocer la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (DTML) y el Factor de Corrección de acuerdo a la configuración del intercambiador de calor, se calcula la Diferencia de Temperatura Verdadera (Δt).

$$\Delta t = Ft \cdot DTML$$

Ecuación 3.16 ^[6]

Donde:

Ft = Factor de Corrección de la DTML (Adimensional)

DTML = Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (°F)

Δt = Diferencia de Temperatura Verdadera (°F)

3. Cálculo de la Temperatura Calórica:

Se calcula: $\frac{\Delta t_f}{\Delta t_c}$

Y con la gravedad API del fluido en el lado coraza, y la diferencia de temperatura de entrada y salida en la coraza ($t_2 - t_1$), se estima el valor del Factor de Corrección de la Temperatura Calórica (Ft) en **Figura 3.1**.

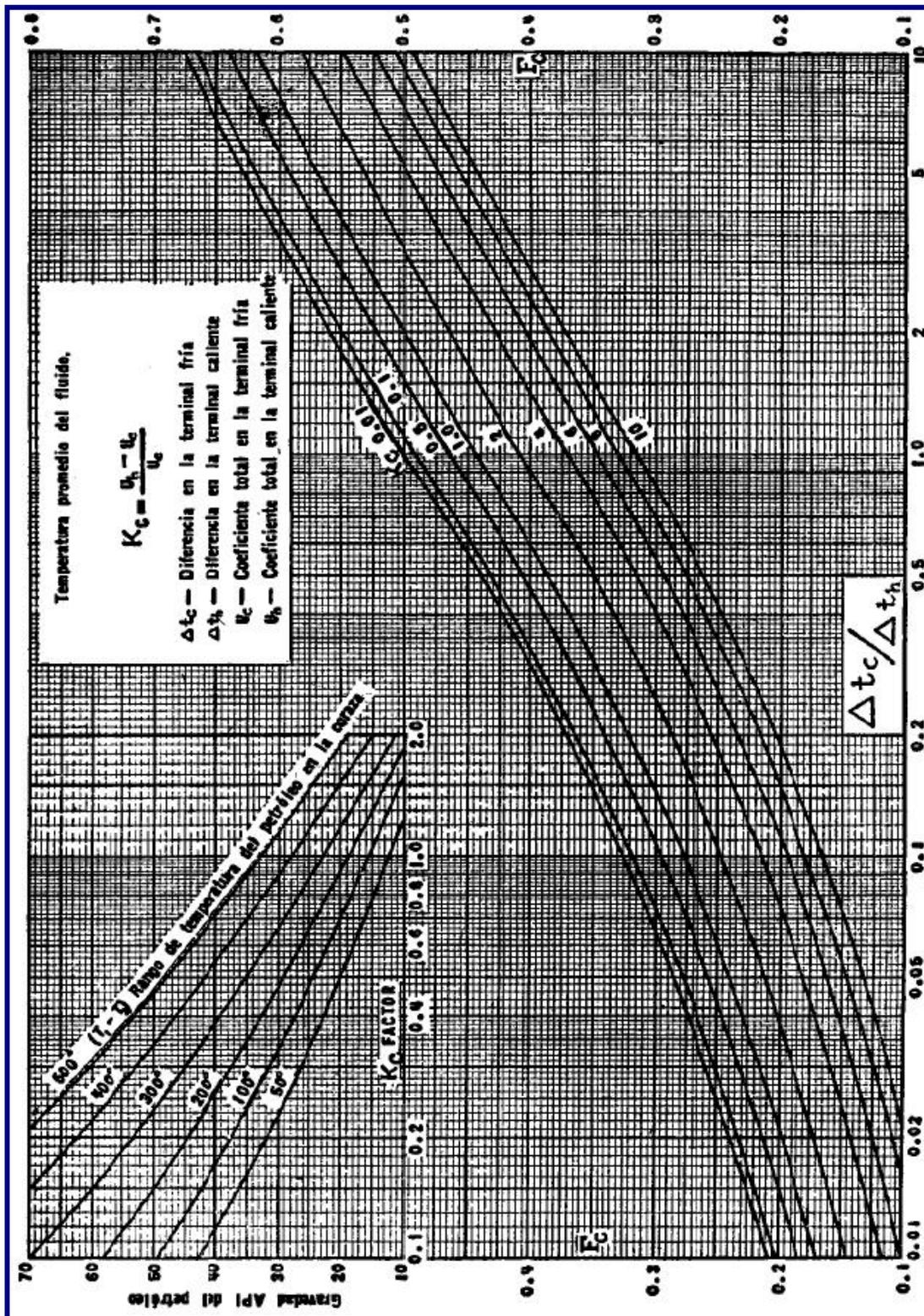


Figura 3.1 Factor de Corrección de la Temperatura Calórica. [6]



Una vez estimado el valor del Factor de Corrección de la Temperatura Calórica (Ft), se calcula la temperatura calorífica tanto para el lado coraza como para el lado tubo.

$$\begin{aligned} T_c &= T_2 + F_C \cdot (T_1 - T_2) \\ t_c &= t_1 + F_C \cdot (t_2 - t_1) \end{aligned}$$

Ecuación 3.17 ^[6]

Donde:

T_c = Temperatura Calórica del fluido caliente (°F)

t_c = Temperatura Calórica del fluido frío (°F)

Ft = Factor de Corrección de la Temperatura Calórica (Adimensional)

T_1 = Temperatura de Entrada del fluido caliente (°F)

T_2 = Temperatura de Salida del fluido caliente (°F)

t_1 = Temperatura de Entrada del fluido frío (°F)

t_2 = Temperatura de Salida del fluido frío (°F)

4. Cálculo del Área de Flujo y de la Velocidad Másica:

▲ Lado Tubo:

$$A_t = \frac{N^\circ \text{ Tubos} \cdot A_{1T}}{144 \cdot N^\circ \text{ Pasos}}$$

Ecuación 3.18 ^[6]

$$G_t = \frac{W_T}{A_t}$$

Ecuación 3.19 ^[6]

Donde:

A_t = Área de flujo por los Tubos (pies²)

A_{1T} = Área de un (1) tubo (pie²) **Tabla 2.1**

Nº Tubos = Número de Tubos en el Intercambiador

Nº Pasos = Número de Pasos de los Tubos en la Coraza

W_T = Flujo Másico por el Lado Tubo (lb/hr)

G_t = Velocidad Másica en los Tubos (lb/hr.pie²)



▲ Lado Coraza:

$$a_c = \frac{D I_c \cdot C' \cdot B}{144 \cdot P t}$$

Ecuación 3.20 ^[6]

$$C' = P t - D E_T$$

Ecuación 3.21 ^[6]

$$G_c = \frac{W_c}{a_c}$$

Ecuación 3.22 ^[6]

Donde:

A_c = Área de flujo por la Coraza (pies²)

$D I_c$ = Diámetro Interno de la Coraza (pulg)

B = Espaciado entre los Deflectores (pulg)

C' = Espacio Libre entre los Tubos (pulg)

$P t$ = Espaciado entre los Tubos (pulg)

W_c = Flujo Másico por el Lado Coraza (lb/hr)

G_c = Velocidad Másica en la Corza (lb/hr.pie²)

5. Cálculo de la Viscosidad a la Temperatura Calórica:

El cálculo de las viscosidades de los fluidos se hará a través de las siguientes correlaciones de acuerdo al tipo de fluido:

▲ Para Fracciones de Petróleo:

$$\nu_{100} = \nu_{ref} + \nu_{cor}$$

Ecuación 3.23 ^[13]

$$\nu_{ref} = 10^{-1,35579 + (8,16059 \cdot 10^{-4} \cdot T_b) + (8,38505 \cdot 10^{-7} \cdot T_b^2)}$$

Ecuación 3.24 ^[13]

$$\nu_{cor} = 10^{(A_1 + (A_2 \cdot K_w))}$$

Ecuación 3.25 ^[13]



$$A_1 = c_1 + c_2 \cdot T_b + c_3 \cdot T_b^2 + c_4 \cdot T_b$$

Ecuación 3.26 ^[13]

$$A_2 = d_1 + d_2 \cdot T_b + d_3 \cdot T_b^2 + d_4 \cdot T_b$$

Ecuación 3.27 ^[13]

$$C_1 = 3,49310 \cdot 10^1$$

$$d_1 = -2,02649$$

$$C_2 = -8,84387 \cdot 10^{-2}$$

$$d_2 = 6,98405 \cdot 10^{-3}$$

$$C_3 = 6,73513 \cdot 10^{-5}$$

$$d_3 = -5,09947 \cdot 10^{-6}$$

$$C_4 = -1,01394 \cdot 10^{-8}$$

$$d_4 = 7,49378 \cdot 10^{-10}$$

Donde:

V_{100} = Viscosidad Cinemática a 100 °F (centistokes)

T_b = Temperatura de Ebullición (°R)

K_w = Factor de Caracterización de Watson (Adimensional)

$$v = 10^{\left[(\text{Log}(v_{100}) + 0,8696) \cdot \left[\frac{559,67}{(T + 459,67)} \right]^{(0,28008 \cdot \text{Log}(v_{100}) + 1,8616)} - 0,8696 \right]}$$

Ecuación 3.28 ^[13]

Donde:

V = Viscosidad Cinemática a "T" (centistokes)

T = Temperatura (°F)

V_{100} = Viscosidad Cinemática a 100 °F (centistokes)

Por último, para calcular la viscosidad dinámica se multiplica la viscosidad cinemática por la densidad del fluido, la cual se obtiene a partir de la gravedad específica del mismo.



$$\mu = \nu \cdot \rho_l$$

Ecuación 3.29 ^[12]

$$\rho_l = \gamma \cdot \rho_w$$

Ecuación 3.30 ^[12]

Donde:

 μ = Viscosidad Dinámica (centipoises) ν = Viscosidad Cinemática (centistokes) ρ_l = Densidad del fluido (gr/cm³) ρ_w = Densidad del agua a 60 °F (1 gr/cm³)

▲ **Para Crudo:**

$$\begin{aligned} \text{Log}(v_{100}) = & 4,39371 - 1,94733 \cdot K_w + 0,12169 \cdot K_w^2 \\ & + (3,2629 \cdot 10^{-4} \cdot API^2) - (1,18246 \cdot 10^{-2} \cdot K_w \cdot API) \\ & + \frac{(0,171617 \cdot K_w^2 + 10,9943 \cdot API + 9,50663 \cdot 10^{-2} \cdot API^2 - 0,860218 \cdot K_w \cdot API)}{(API + 50,3642 - 4,78231 \cdot K_w)} \end{aligned}$$

Ecuación 3.31 ^[12]

$$\begin{aligned} \text{Log}(v_{210}) = & -0,463634 - 0,166532 \cdot API + \\ & (5,13447 \cdot 10^{-4} \cdot API^2) - (8,48995 \cdot 10^{-3} \cdot K_w \cdot API) \\ & + \frac{(8,0325 \cdot 10^{-2} \cdot K_w^2 + 1,24899 \cdot API + 0,19768 \cdot API^2)}{(API + 26,786 - 2,6296 \cdot K_w)} \end{aligned}$$

Ecuación 3.32 ^[12]

Donde:

 v_{100} = Viscosidad Cinemática a 100 °F (centistokes) v_{210} = Viscosidad Cinemática a 210 °F (centistokes)

API = Gravedad API (Adimensional)

 K_w = Factor de Caracterización de Watson (Adimensional)Nota: Estas correlaciones no deben usarse si $K_w < 10$ y $API < 0$



Para el cálculo de la viscosidad del crudo por debajo de la temperatura de ebullición (T_b), se emplean las siguientes ecuaciones a partir de las viscosidades cinemáticas a 100 °F y 200 °F, calculadas con las **Ecuaciones 3.31 y 3.32** y transformadas a viscosidades dinámicas con la **Ecuación 3.29**:

$$A = \frac{[T_{100} \cdot \text{Ln}(\mu_{100}) - T_{210} \cdot \text{Ln}(\mu_{210})] \cdot T_{210}}{T_{100} \cdot (T_{100} - T_{210})} \quad \text{Ecuación 3.33}^{[12]}$$

$$B = [\text{Ln}(\mu_{210}) - A] \cdot T_{210} \quad \text{Ecuación 3.34}^{[12]}$$

$$\mu = e^{\left(A + \frac{B}{T} \right)} \quad \text{Ecuación 3.35}^{[12]}$$

Donde:

μ_{100} = Viscosidad Dinámica a 100 °F (centipoises)

μ_{210} = Viscosidad Dinámica a 210 °F (centipoises)

T_{100} = Temperatura de 100 °F (310,93 °K)

T_{210} = Temperatura de 210 °F (372,04 °K)

T = Temperatura a la cual se desea calcular la viscosidad (°K)

μ = Viscosidad Dinámica a la Temperatura “T” (centipoises)

Para el cálculo de la viscosidad del crudo por encima de la temperatura de ebullición (T_b), se utilizan las siguientes ecuaciones a partir de las viscosidades cinemáticas a 100 °F y 200 °F, calculadas con las **Ecuaciones 3.31 y 3.32**:

$$Z_2 = v_{210} + 0,7 + e^{[-1,47 - (1,84 \cdot v_{210}) - (0,51 \cdot v_{210}^2)]} \quad \text{Ecuación 3.36}^{[13]}$$



$$Z_1 = v_{100} + 0,7 + e^{\left[-1,47-(1,84 \cdot v_{100})-(0,51 \cdot v_{100}^2)\right]} \quad \text{Ecuación 3.37}^{[13]}$$

$$B = \frac{\left[\text{Log}(\text{Log}(Z_1)) - \text{Log}(\text{Log}(Z_2))\right]}{\left(\text{Log}(T_{100}) - \text{Log}(T_{210})\right)} \quad \text{Ecuación 3.38}^{[13]}$$

$$Z = 10^{10 \left[(\text{Log}(\text{Log}(Z_2))) + B \cdot (\text{Log}(T) - \text{Log}(T_{100})) \right]} \quad \text{Ecuación 3.39}^{[13]}$$

$$v = Z - 0,7 - e^{\left[-0,7487 - 3,295 \cdot (Z - 0,7) + 0,6119 \cdot (Z - 0,7)^2 - 0,3193 \cdot (Z - 0,7)^3\right]}$$

Ecuación 3.40^[13]

Donde:

V_{100} = Viscosidad Cinemática a 100 °F (centistokes)

V_{210} = Viscosidad Cinemática a 210 °F (centistokes)

T_{100} = Temperatura de 100 °F (559,67 °R)

T_{210} = Temperatura de 210 °F (669,67 °R)

T = Temperatura a la cual se desea calcular la viscosidad (°R)

V = Viscosidad Cinemática a la Temperatura “T” (centistokes)

Por último, empleando la **Ecuación 3.29** se calcula la viscosidad dinámica a partir de la viscosidad cinemática.

6. Cálculo del Número de Reynolds:

Una vez calculada la viscosidad de los fluidos que fluyen por el intercambiador a la Temperatura Calórica, se calcula el número de Reynolds para ambos lados del equipo:



▲ **Lado Tubo:**

$$Re_T = \frac{DI_T \cdot Gt}{\mu_T}$$

Ecuación 3.41 ^[6]

Donde:

Re_T = Número de Reynolds en el Lado Tubo (Adimensional)

DI_T = Diámetro Interno de los Tubos (pies) **Tabla 2.1**

Gt = Velocidad Másica en los Tubos (lb/hr.pie²)

μ_T = Viscosidad Dinámica del Fluido en los Tubos (centipoises)

▲ **Lado Coraza:**

$$De = \frac{4 \cdot \left(Pt^2 - \frac{\pi \cdot DE_T^2}{4} \right)}{\pi \cdot DE_T}$$

Ecuación 3.42 ^[6]

$$Re_C = \frac{De \cdot Gc}{\mu_C}$$

Ecuación 3.43 ^[6]

Donde:

Re_C = Número de Reynolds en el Lado Coraza (Adimensional)

DE_T = Diámetro Externo de los Tubos (pulg)

Pt = Espaciado entre los Tubos (pulg)

Gc = Velocidad Másica en la Coraza (lb/hr.pie²)

De = Diámetro Efectivo en la Coraza (pulg) (**pies en la Ecuación 3.43**)

μ_C = Viscosidad Dinámica del Fluido en la Coraza (centipoises)

7. Cálculo de Jh:

Luego de haber calculado el Número de Reynolds tanto para el lado tubo como para el lado coraza, se calcula el valor de Jh para ambos lados.

**▲ Lado Tubo:**

Se obtiene el valor del cociente entre la longitud y el diámetro interno de los tubos, L_T/DI_T y junto con el valor del número de Reynolds en el lado tubo (Re_T), se haya el valor de J_h en el lado tubo en la **Figura 3.2**.

▲ Lado Coraza:

Una vez se obtiene el valor del número de Reynolds en el lado coraza (Re_C), es posible hallar el valor de J_h en el lado coraza en la **Figura 3.3**.

8. Cálculo del Calor Específico y la Conductividad Térmica a T_c :

Conociendo los valores de gravedad específica (γ) y de factor de caracterización de Watson (K_w), para los fluidos tanto del lado coraza como del lado tubo, se calcula el calor específico (C_e) de cada fluido a la temperatura calórica de cada lado del intercambiador calculado en el **Paso 3**, a través de la **Ecuación 3.8**.

Para calcular la conductividad térmica de los fluidos a la temperatura térmica de cada lado del intercambiador se emplea la siguiente ecuación:

$$k = \frac{0,118}{\rho} \cdot [1 - 0,00054 \cdot (T - 273)] \cdot 577,789$$

Ecuación 3.44 ^[13]

Donde:

k = Conductividad Térmica del Fluido (BTU/hr.pie.°F)

ρ = Densidad de Fluido (Kg/m³)

T = Temperatura a la que se desea calcular la Conductividad Térmica (°K)

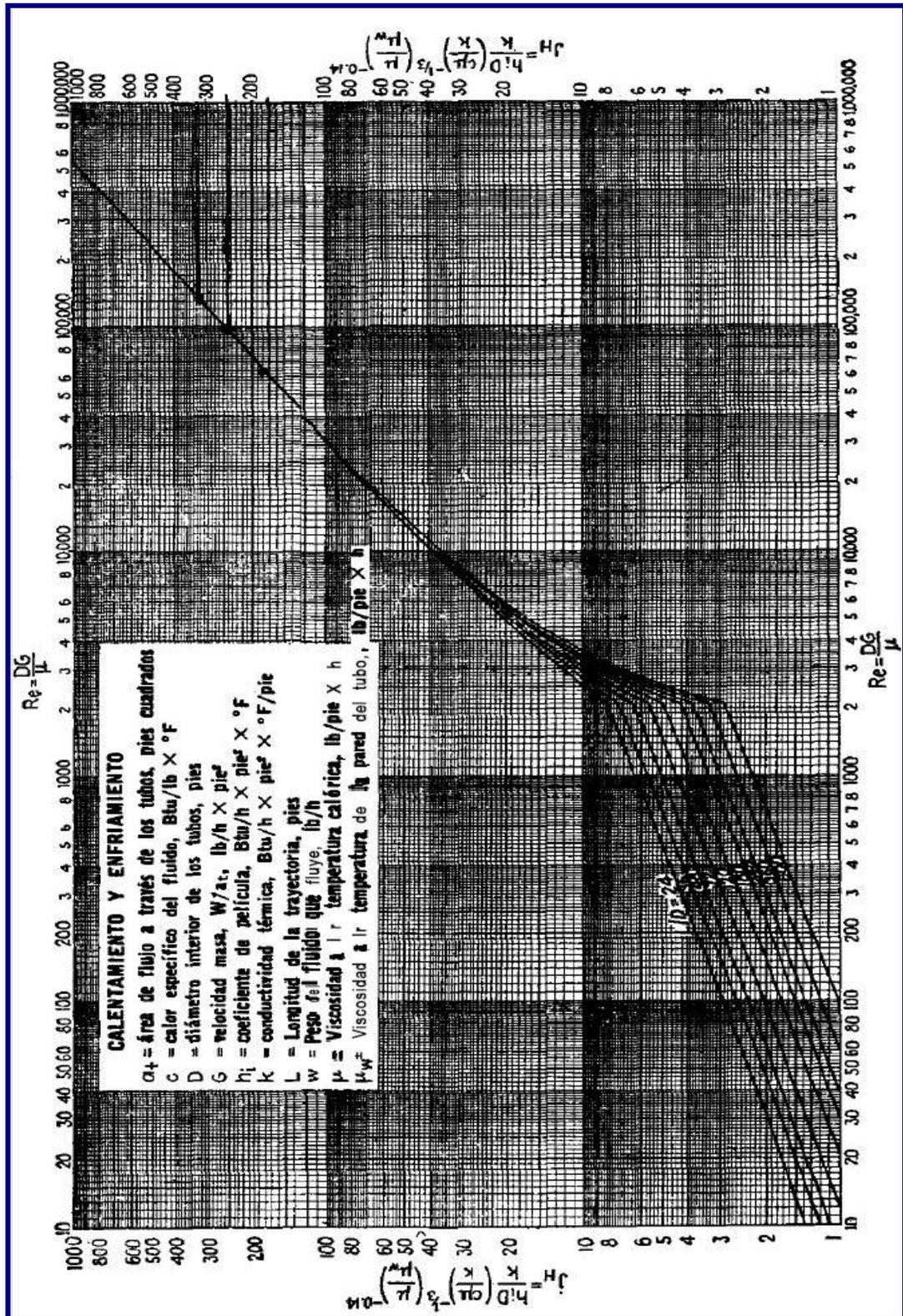


Figura 3.2 Curva de Transferencia de Calor para el Lado Tubo. [6]

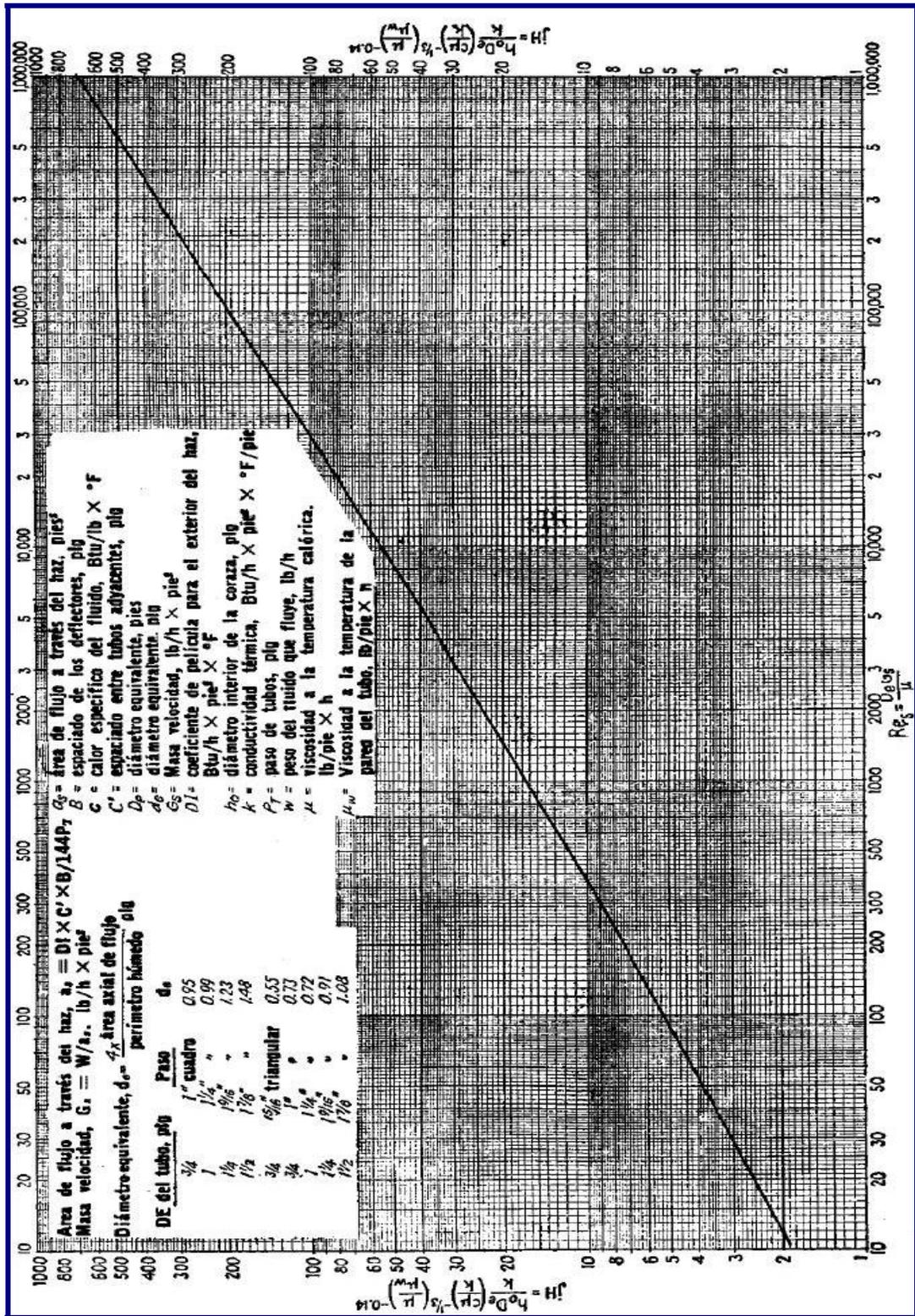


Figura 3.3 Curva de Transferencia de Calor para el Lado Coraza. [6]



9. Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor:

▲ Lado Tubo:

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor en el lado tubo a través de las siguientes ecuaciones, utilizando las propiedades del fluido calculadas a la temperatura calórica.

$$\frac{H_i}{\Phi_T} = Jh \cdot \left(\frac{k_T}{DI_T} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{C e_T \cdot \mu_T}{k_T}} \quad \text{Ecuación 3.45}^{[6]}$$

$$\frac{H_{io}}{\Phi_T} = \frac{H_i}{\Phi_T} \cdot \frac{DI_T}{DE_T} \quad \text{Ecuación 3.46}^{[6]}$$

Donde:

H_i/Φ_T = Coeficiente de Transferencia en el interior del Tubo (BTU/hr.pie².°F)

H_{io}/Φ_T = Coeficiente de Transferencia a través del Tubo (BTU/hr.pie².°F)

Jh = Transferencia de Calor en el Lado Tubo (Adimensional)

K_T = Conductividad Térmica del Fluido en el Lado Tubo (BTU/hr.pie.°F)

Ce_T = Calor Específico del Fluido en el Lado Tubo (BTU/lb. °F)

μ_T = Viscosidad del Fluido en el Lado Tubo (lb/pie.hr) (**1 lb/pie.hr = 2.42.Cps**)

DI_T = Diámetro interno de los tubos (pies)

DE_T = Diámetro externo de los tubos (pies)

▲ Lado Coraza:

También se calcula el coeficiente de transferencia de calor en el lado coraza a través de la siguiente ecuación, utilizando las propiedades del fluido calculadas a la temperatura calórica.



$$\frac{Ho}{\Phi_C} = Jh \cdot \left(\frac{k_C}{De} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{Ce_C \cdot \mu_C}{k_C}}$$

Ecuación 3.47 ^[6]

Donde:

Ho/Φ_C = Coeficiente de Transferencia en el Lado Coraza (BTU/hr.pie².°F)

Jh = Transferencia de Calor en el Lado Coraza (Adimensional)

K_C = Conductividad Térmica del Fluido en el Lado Coraza (BTU/hr.pie.°F)Ce_C = Calor Específico del Fluido en el Lado Coraza (BTU/lb. °F)μ_C = Viscosidad del Fluido en el Lado Coraza (lb/pie.hr) (**1 lb/pie.hr = 2.42.Cps**)

De = Diámetro Efectivo en la Coraza (pies)

10. Cálculo de la Temperatura en la Pared de los Tubos y la Viscosidad:

$$T_W = T_C - \left[\frac{Ho/\Phi_C}{Ho/\Phi_C + Hio/\Phi_T} \cdot (T_C - t_c) \right]$$

Ecuación 3.48 ^[6]

Donde:

T_w = Temperatura de la Pared de los Tubos (°F)Ho/Φ_C = Coeficiente de Transferencia en el Lado Coraza (BTU/hr.pie².°F)Hio/Φ_T = Coeficiente de Transferencia a través del Tubo (BTU/hr.pie².°F)T_C = Temperatura Calórica del fluido caliente (°F)t_c = Temperatura Calórica del fluido frío (°F)

Luego de conocer la temperatura de la pared de los tubos, se calculan las viscosidades de los fluidos que fluyen tanto por el lado coraza como por el lado tubo, a través de las ecuaciones descritas en el **Paso 5**, empleando desde la **Ecuación 3.23** hasta la **Ecuación 3.40** se vuelven a calcular las viscosidades de estos fluidos, pero ahora a la temperatura de la pared de los tubos.



11. Corrección de los Coeficientes de Transferencia de Calor:

▲ Lado Tubo:

Se calcula el factor de corrección por efectos de la variación de la viscosidad del fluido y se calcula el verdadero valor del coeficiente de transferencia de calor en el lado tubo.

$$\Phi_T = \left(\frac{\mu_{CT}}{\mu_W} \right)^{0,14}$$

Ecuación 3.49 ^[6]

$$Hio = \frac{Hio}{\Phi_T} \cdot \Phi_T$$

Ecuación 3.50 ^[6]

Donde:

Hio/Φ_T = Coeficiente de Transferencia a través del Tubo (BTU/hr.pie².°F)

Hio = Coeficiente Corregido de Transferencia a través del Tubo (BTU/hr.pie².°F)

Φ_T = Factor de Corrección por viscosidad en el Lado Tubo (Adimensional)

μ_{CT} = Viscosidad del Fluido en el Lado Tubo a la Temp. Calórica (lb/pie.hr)

μ_W = Viscosidad del Fluido en el Lado Tubo a la T_w (lb/pie.hr)

▲ Lado Coraza:

Se calcula el factor de corrección por efectos de la variación de la viscosidad del fluido y se calcula el verdadero valor del coeficiente de transferencia de calor en el lado coraza.

$$\Phi_C = \left(\frac{\mu_{CC}}{\mu_W} \right)^{0,14}$$

Ecuación 3.51 ^[6]



$$H_o = \frac{H_{io}}{\Phi_c} \cdot \Phi_c$$

Ecuación 3.52 ^[6]

Donde:

H_o/Φ_c = Coeficiente de Transferencia en el Lado Coraza (BTU/hr.pie².°F)

H_o = Coeficiente Corregido de Transferencia en el Lado Coraza (BTU/hr.pie².°F)

Φ_c = Factor de Corrección por viscosidad en el Lado Coraza (Adimensional)

μ_{cc} = Viscosidad del Fluido en el Lado Coraza a la Temp. Calórica (lb/pie.hr)

μ_w = Viscosidad del Fluido en el Lado Coraza a la T_w (lb/pie.hr)

12. Cálculo del Coeficiente Total Limpio y el Coeficiente Total de Diseño:

▲ Coeficiente Total Limpio:

$$U_c = \frac{H_{io} \cdot H_o}{H_{io} + H_o}$$

Ecuación 3.53 ^[6]

Donde:

H_o = Coeficiente Corregido de Transferencia en el Lado Coraza (BTU/hr.pie².°F)

H_{io} = Coeficiente Corregido de Transferencia a través del Tubo (BTU/hr.pie².°F)

U_c = Coeficiente Total Limpio (BTU/hr.pie².°F)

▲ Coeficiente Total de Diseño:

Antes de Calcular el Coeficiente Total de Diseño, se debe calcular el área de transferencia total en el intercambiador de calor.

$$A_T = N^{\circ} \text{Tubos} \cdot L \cdot a''$$

Ecuación 3.54 ^[6]

$$U_d = \frac{Q}{\Delta t \cdot A_T}$$

Ecuación 3.55 ^[6]



Donde:

U_d = Coeficiente Total de Diseño (BTU/hr.pie².°F)

Q = Calor Transferido (BTU/hr)

Δt = Diferencia de Temperatura Verdadera (°F)

A_T = Área total de transferencia de calor (pies²)

N°Tubos = Número de Tubos en el Intercambiador (Adimensional)

L = Longitud de los Tubos (pies)

a'' = Área superficial por pie de Tubo (pie²/pie) **Tabla 2.1**

13. Cálculo del Factor de Ensuciamiento:

Finalmente se calcula el factor de ensuciamiento con los valores del coeficiente total de diseño y el coeficiente total limpio a través de la siguiente ecuación:

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c \cdot U_d}$$

Ecuación 3.56 ^[6]

Este procedimiento de cálculo fue utilizado para la evaluación de la transferencia de calor del Tren de Pre calentamiento en Frío, a través de hojas de cálculo en Microsoft Excel elaborada para cada intercambiador de calor, como respaldo y medio de comparación de los resultados obtenidos en la evaluación de los intercambiadores desarrollada a través del simulador PRO II. Lo cual permitió una comparación y análisis más profundo de las condiciones operacionales y del actual ensuciamiento que presentan estos equipos.



3.2.2.2 Desarrollo de la Simulación para los Intercambiadores de Tubo y Coraza

Todos los intercambiadores del Tren de Precalentamiento en Frío se evaluaron en el simulador PRO II, especificando condiciones operacionales como el flujo cada corriente de fluido, las temperaturas de entrada y salida de cada corriente y las caídas de presión para cada corriente. Además de esto también fue necesario suministrarle al simulador características composicionales de cada fluido de acuerdo a las condiciones de operación de cada equipo.

Para evaluar un intercambiador existente en el simulador PRO II, se seleccionó el ítem del Intercambiador de Calor Riguroso (Rigorous HX) en la lista de equipos disponibles en el simulador, luego se le agregaron las líneas de las corrientes que intercambian calor en el equipo y se nombraron. En la **Figura 3.4** se muestra la ventana del simulador PRO II con el intercambiador de Crudo Diluido / Nafta Diluyente 10-E-001 A/B/C.

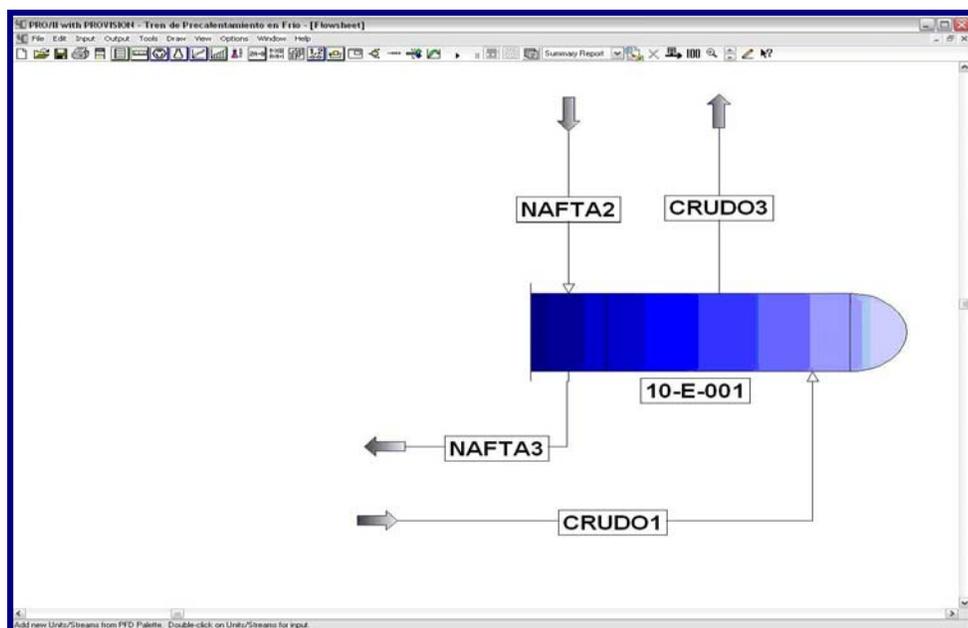


Figura 3.4 Ventana del Simulador PRO II con el Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



Luego se procedió a abrir la ventana del intercambiador riguroso y se empezó a ingresar los datos físicos y dimensionales del intercambiador de calor 10-E-001 A/B/C. En la **Figura 3.5** observa la ventana del intercambiador de calor, donde se especificó el número de tubos por cada coraza (Number of Tubes/Shell), el diámetro interno de la coraza (Shell Inside Diameter) y la Temperatura de Salida del Lado Tubo (Tube Outlet Temperatura). En este ejemplo se muestra el desarrollo de la simulación realizada en mes de Abril del 2.010.

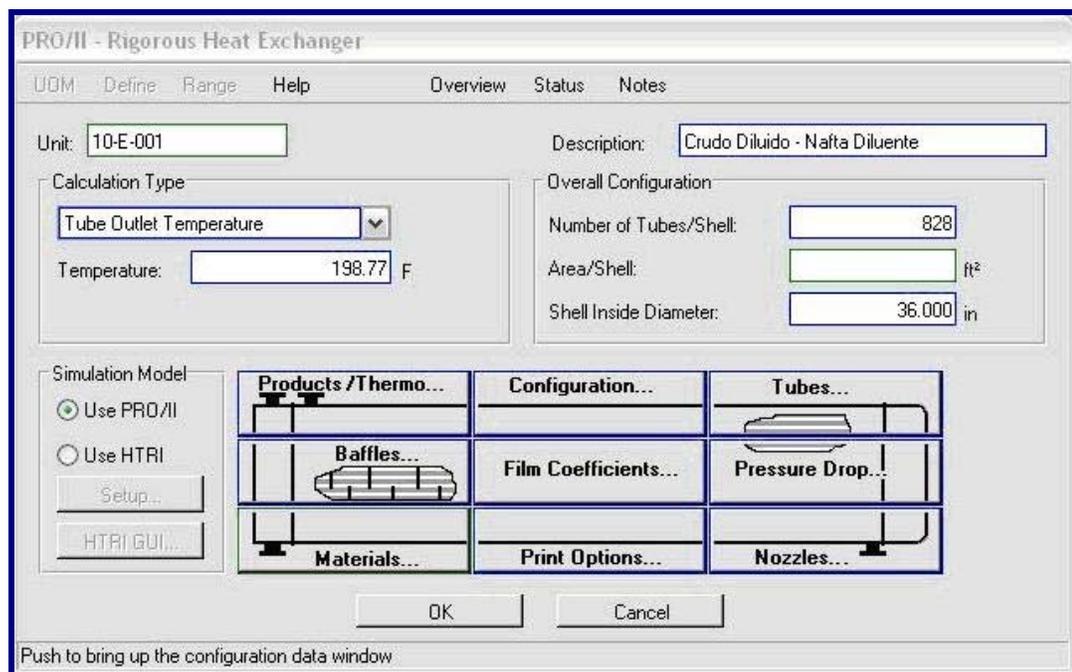


Figura 3.5 Ventana para el Intercambiador de Calor 10-E-001 A/B/C. [Propia]

Posteriormente se ingresaron las siguientes características de configuración del intercambiador de calor: el número de equipos en serie o en paralelo (Number of Shells in Series, in Parallel), número de pasos por el lado tubo por cada coraza (Number of Tube Passes/Shell), orientación (Orientation), configuración de flujo (Configuration) y el tipo de configuración TEMA del equipo. En la **Figura 3.6** se observan los datos de configuración del intercambiador 10-E-001 A/B/C.

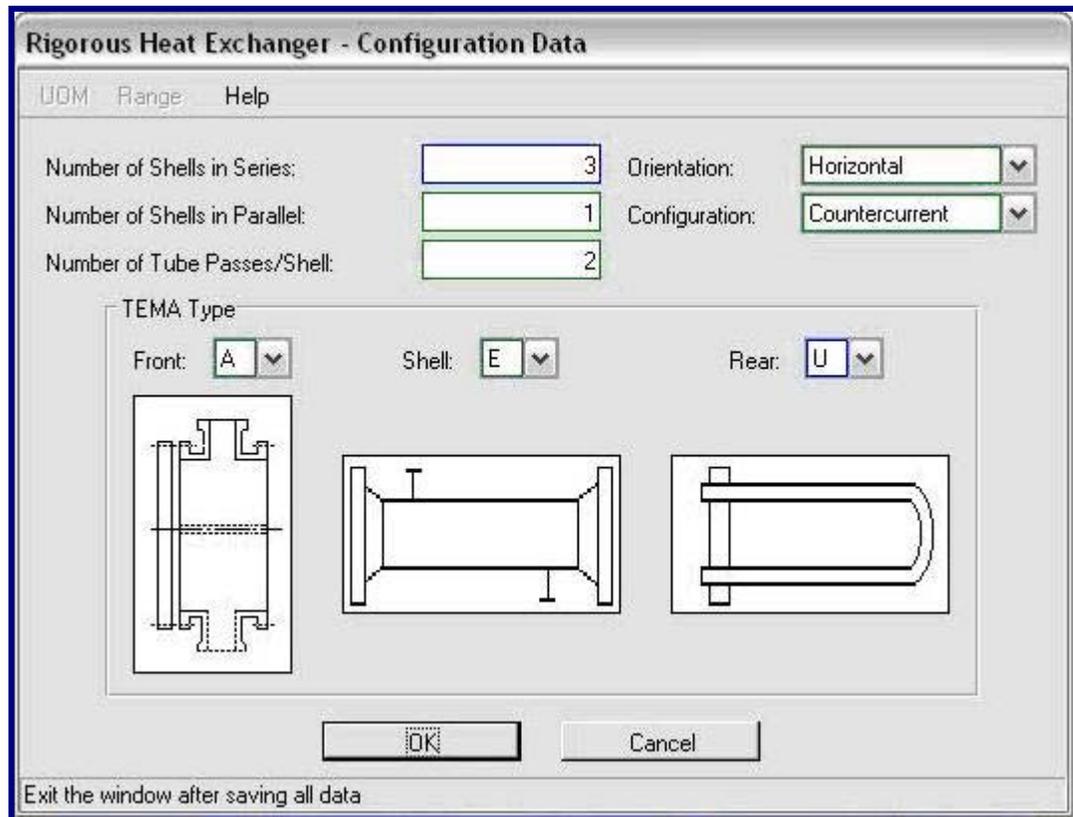


Figura 3.6 Ventana de Configuración del Intercambiador de Calor 10-E-001 A/B/C.
[Propia]

Después se ingresaron los datos de los tubos como Espesor del tubo (Thickness BWG), longitud (Length), diámetro externo (Outside Diameter), espaciado entre los tubos (Pitch) y el arreglo de los tubos (Pattern) del intercambiador 10-E-001 A/B/C, como se muestra en la **Figura 3.7**.

También se introdujeron los datos de los deflectores del intercambiador de calor, como el tipo de deflector (Baffle Type), porcentaje de área libre o área libre neta (Baffle Geometry Data) y el espaciado entre los deflectores (Spacing Center), tal como se observa en la **Figura 3.8** a continuación.



Rigorous Heat Exchanger - Tube Data

UDM Range Help

Tube Data:

Thickness:

- Inside Diameter: 0.58402 in
- Wall Thickness: in
- BWG: 14

Roughness:

- Absolute: 0.00000 in
- Relative: in

Length: 20.000 ft

Outside Diameter: 0.75000 in

Pitch: 1.0000 in

Pattern: Rotated square - 45 Degrees

Sheet Thickness: in

Fin Data:

Fin Selections:

- No Finned Tubes
- Area from Fin Data
- Extended Surface Area: in²/ft

Fins/in: 19.000

Thickness: 0.025316 in

Height Above Root: 0.062500 in

Root Diameter: 0.62500 in

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Figura 3.7 Ventana Datos de los Tubos del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]

Rigorous Heat Exchanger - Baffle Data

UDM Range Help

Baffle Type: Single

Baffle Geometry Data:

- Cut: 0.29200
- Net Free Area Ratio: in

Center Spacing: 17.300 in

Inlet Spacing: in

Outlet Spacing: in

Thickness: in

Number of Sealing Strips: 0

OK Cancel

Exit the window after saving all data

Figura 3.8 Ventana Datos de los Deflectores del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



Un vez se especificaron todos los datos físicos y dimensionales que caracterizan al intercambiador de calor, de acuerdo a su configuración y diseño, se prosiguió a ingresar tanto en las líneas de entrada como de salida de cada lado del intercambiador de calor, las características composicionales de los fluidos y de las condiciones de proceso para el momento que se desea evaluar, en este caso Abril del 2.010.

Se inició cargando los datos del Crudo Diluido en la entrada del lado coraza del intercambiador para el mes de Abril del 2.010, introduciendo las temperaturas de corte de destilación (True Boiling Point) y la gravedad API (API Gravity) del crudo como se muestra en la **Figura 3.9**.

Cut	Percent Distilled	Temperature F
Copy	10.00	360.10
Paste	20.00	573.20
Insert	50.00	1134.60
4	80.00	1227.10
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Figura 3.9 Ventana de Datos del Crudo en el Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



Luego se introdujeron los datos de las condiciones de flujo y temperatura para el Crudo Diluido como se observan en la **Figura 3.10** y en la **Figura 3.11**. Una vez ingresados los datos de este fluido a la entrada, se debió especificar de igual forma las mismas características composicionales y de flujo del Crudo Diluido a la salida del lado coraza del intercambiador 10-E-001 A/B/C, variando únicamente la temperatura de salida como se muestra en la **Figura 3.12**.

Posteriormente se cargaron los datos de la Nafta Diluyente en la entrada del lado tubo del este equipo para el mes de Abril del 2.010, introduciendo las temperaturas de corte de destilación (ASTM D86) y la gravedad API (API Gravity) de la Nafta como se muestra en la **Figura 3.13**. Para continuar se introdujeron los datos de las condiciones de flujo y temperatura para la Nafta Diluyente como se muestran en la **Figura 3.14** y en la **Figura 3.15**. Ya una vez se ingresaron estos datos para la entrada, se introdujo de igual forma las mismas características composicionales y de flujo para la Nafta Diluyente a la salida del lado tubo del intercambiador 10-E-001 A/B/C, especificando la temperatura de salida como se muestra en la **Figura 3.16**.

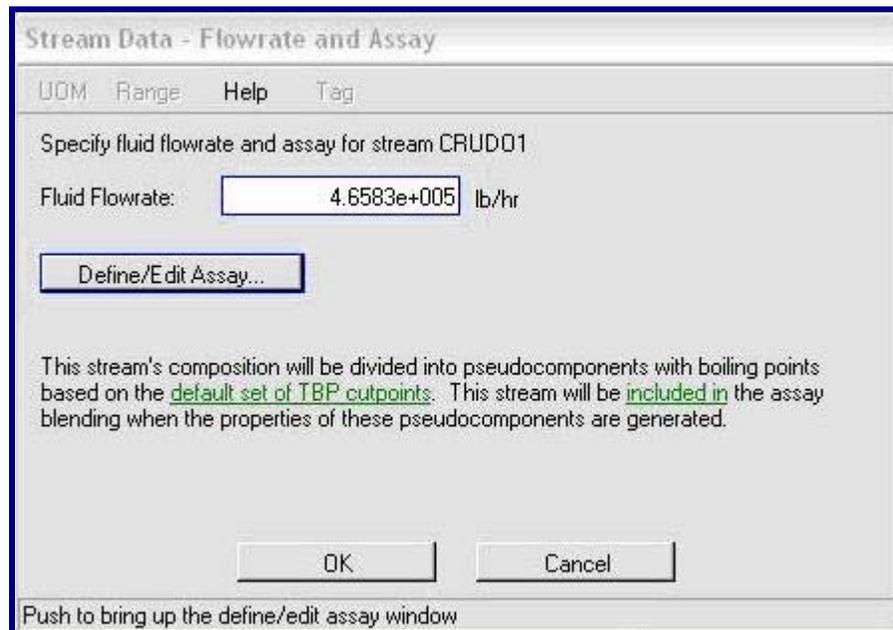


Figura 3.10 Ventana de Flujo para el Crudo en el Intercambiador 10-E-001 A/B/C.
[Propia]



The screenshot shows the 'PRO/II - Stream Data' window for stream CRUD01. The 'Description' field is 'Entrada Lado Casco' and the 'To Unit' is '10-E-001'. Under 'Stream Type', 'Petroleum Assay' is selected. The 'Thermal Condition' section has 'Temperature' set to 105.89 F and 'Pressure' set to 390.00 psia. The 'Thermodynamic System' is 'PR01'. Buttons for 'Flowrate and Assay...', 'Stream Solids Data...', and 'Stream Polymer Data...' are visible. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and assay window'.

Figura 3.11 Ventana de Condiciones de Proceso para el Crudo en la Entrada del Lado Coraza del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]

The screenshot shows the 'PRO/II - Stream Data' window for stream CRUD03. The 'Description' field is 'Salida Lado Casco' and the 'From Unit' is '10-E-001'. The 'To Unit' is '(Product Stream)'. The 'Supply Initial Estimate for Stream Data' checkbox is checked. Under 'Stream Type', 'Petroleum Assay' is selected. The 'Thermal Condition' section has 'Temperature' set to 224.18 F and 'Liquid Mole Fraction' set to 0.9999. The 'Thermodynamic System' is 'PR01'. Buttons for 'Flowrate and Assay...', 'Stream Solids Data...', and 'Stream Polymer Data...' are visible. At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, and a note: 'Push to bring up the flowrate and assay window'.

Figura 3.12 Ventana de Condiciones de Proceso para el Crudo en la Salida del Lado Coraza del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



Stream Data - Assay Definition

UDM Range Help Tag

Assay data for stream NAFTA2

Distillation

True Boiling Point
 ASTM D86
 ASTM D1160
 ASTM D2887

D86 Basis

Liquid Volume
 Weight

Pressure: psia

Correct for Cracking
(Recommended for API 63 and Edmister-Okamoto Interconversion only)

Gravity Data

API Gravity Average:
 Specific Gravity
 Watson K-Factor

Additional Data

Cut	Percent Distilled	Temperature F
Copy		
Paste		
Insert		
1	10.00	295.20
2	20.00	311.70
3	50.00	363.10
4	80.00	428.70
5	90.00	494.90
6		
7		
8		
9		
10		

Enter the percent distilled

Figura 3.13 Ventana de Datos de la Nafta en el Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]

Stream Data - Flowrate and Assay

UDM Range Help Tag

Specify fluid flowrate and assay for stream NAFTA2

Fluid Flowrate: lb/hr

This stream's composition will be divided into pseudocomponents with boiling points based on the default set of TBP cutpoints. This stream will be included in the assay blending when the properties of these pseudocomponents are generated.

Push to bring up the define/edit assay window

Figura 3.14 Ventana de Flujo para la Nafta en el Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



PRO/II - Stream Data

UOM Range Help Tag Overview Status Notes

Stream: NAFTA2 Description: Entrada Lado Tubo

To Unit: 10-E-001

Stream Type

Composition Defined
Petroleum Assay
Referenced to Stream
Solids Only Stream

Flowrate and Assay...
Stream Solids Data...
Stream Polymer Data...

Thermal Condition

First Specification:
Temperature 285.13 F

Second Specification:
Pressure 170.00 psia

Thermodynamic System: PR01

OK Cancel

Push to bring up the flowrate and assay window

Figura 3.15 Ventana de Condiciones de Proceso para la Nafta Diluyente en la Entrada del Lado Tubo del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]

PRO/II - Stream Data

UOM Range Help Tag Overview Status Notes

Stream: NAFTA3 Description: Salida Lado Tubo

From Unit: 10-E-001
To Unit: (Product Stream)

Supply Initial Estimate for Stream Data

Stream Type

Composition Defined
Petroleum Assay
Referenced to Stream
Solids Only Stream

Flowrate and Assay...
Stream Solids Data...
Stream Polymer Data...

Thermal Condition

First Specification:
Temperature 198.77 F

Second Specification:
Liquid Mole Fraction 0.9999 Fraction

OK Cancel

Push to bring up the flowrate and assay window

Figura 3.16 Ventana de Condiciones de Proceso para la Nafta Diluyente en la Salida del Lado Tubo del Intercambiador 10-E-001 A/B/C. [Propia]



Finalmente, estando cargados todos los datos del intercambiador, las condiciones operacionales y las características composicionales de los fluidos en el simulador PRO II, se presionó el botón RUN , ubicado en la barra superior de la ventana del simulador como se muestra en la **Figura 3.17**. En ese instante se corrió la simulación y para culminar el desarrollo de la simulación, se observan los resultados de la evaluación térmica del intercambiador 10-E-001 A/B/C para el mes de Abril de 2.010, en una ventana de resultados como la que se observa en la **Figura 3.18**.

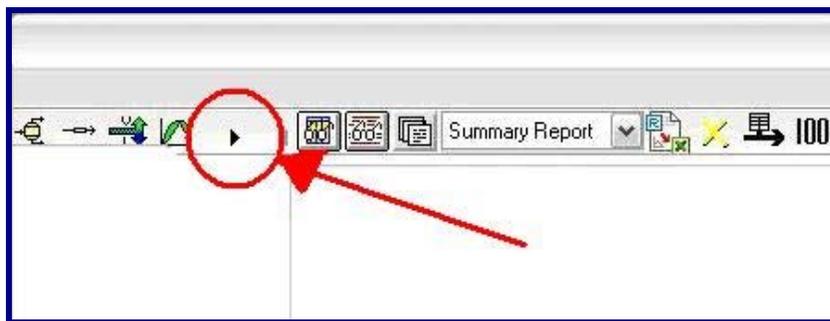
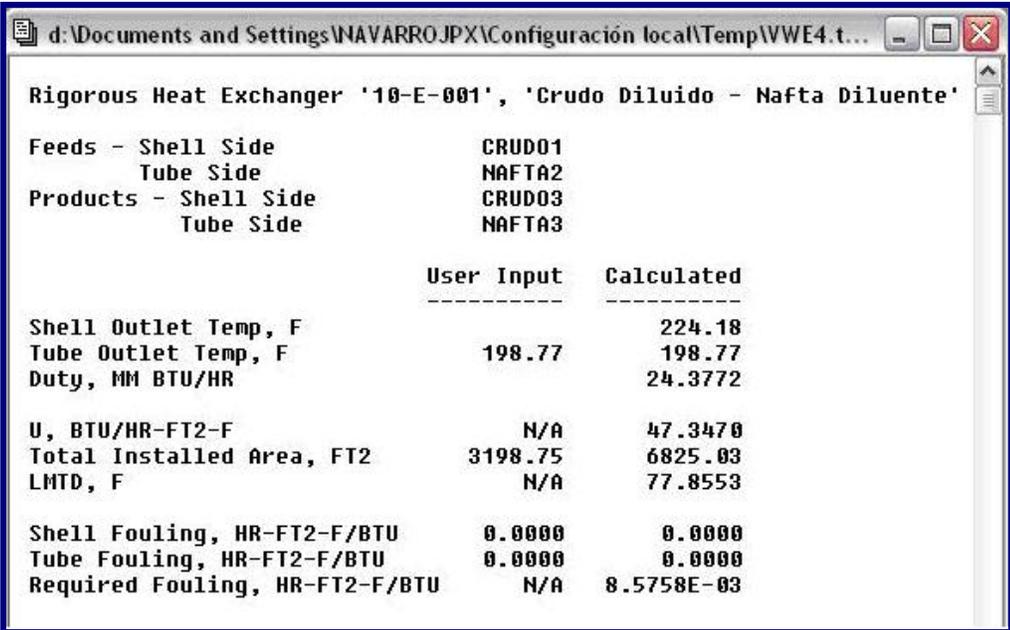


Figura 3.17 Ubicación del Botón RUN en la Ventana del Simulador PRO II. ^[Propia]



Rigorous Heat Exchanger '10-E-001', 'Crudo Diluido - Nafta Diluyente'

Feeds - Shell Side	CRUD01	
Tube Side	NAFTA2	
Products - Shell Side	CRUD03	
Tube Side	NAFTA3	
	User Input	Calculated
	-----	-----
Shell Outlet Temp, F		224.18
Tube Outlet Temp, F	198.77	198.77
Duty, MM BTU/HR		24.3772
U, BTU/HR-FT ² -F	N/A	47.3470
Total Installed Area, FT ²	3198.75	6825.03
LMTD, F	N/A	77.8553
Shell Fouling, HR-FT ² -F/BTU	0.0000	0.0000
Tube Fouling, HR-FT ² -F/BTU	0.0000	0.0000
Required Fouling, HR-FT ² -F/BTU	N/A	8.5758E-03

Figura 3.18 Ventana de Resultados de la Simulación para el mes de Abril del 2.010 para el Intercambiador 10-E-001 A/B/C. ^[Propia]



3.3 ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR TOMANDO COMO BASE SUS CONDICIONES DE DISEÑO.

Con el objetivo de facilitar la interpretación del comportamiento del calor transferido, del coeficiente total de transferencia de calor y el comportamiento del factor de ensuciamiento de cada intercambiador durante la evaluación, se realizaron gráficas de los resultados obtenidos en los cálculos y en la simulación, para realizar así un análisis comparativo de las condiciones actuales de cada una de las variables graficadas para cada equipo tomando como base las características de diseño, lo que permitió la evaluación de su eficiencia actual de cada uno de estos equipos.

Además, el análisis del comportamiento hidráulico de los intercambiadores se enfocó en la caída de presión en el lado tubo, debido a que en esta parte del intercambiador de calor es más pronunciado el ensuciamiento en el diámetro interno de los tubos por ser más reducido. De ocurrir un ensuciamiento progresivo en la parte interna de los tubos, esto dificultaría el flujo del fluido a través de los mismos, lo cual se vería reflejado en un incremento de la caída de presión, mientras que en el lado coraza generalmente se observan grandes caídas de presión originadas por el flujo turbulento que se induce con los deflectores a fin de incrementar la eficiencia de la transferencia de calor en estos equipos; sin embargo, se verificó que la caída de presión en el lado coraza y en el lado tubo no exceda la caída de presión máxima permitida por el equipo según su diseño.



3.4 PROPONER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA PREVENTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE ACUERDO A LAS PROYECCIONES DE SUS COMPORTAMIENTOS HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS DURANTE SU TIEMPO EN OPERACIÓN.

El programa de mantenimiento que se propuso para los intercambiadores del Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo de Mejorador de PDVSA Petropiar, se planteó a partir del análisis de cada uno de estos equipos de acuerdo a sus caídas de presión actual, y sus comportamientos de factor de ensuciamiento, calor transferido y coeficiente total de transferencia de calor desde el año 2.010 hasta la actualidad.

Sin embargo, la predicción del comportamiento del factor de ensuciamiento y del calor transferido en los intercambiadores de calor es algo complejo, debido a que el ensuciamiento es originado por diversas causas como: acumulación de sólidos en suspensión contenidos en alguno de los fluidos, corrosión de la tubería, cristalización de las sales contenida en los fluidos, y por reacciones químicas entre los fluidos y las superficies de algunas partes de los intercambiadores de calor, entre otros; que pueden estar actuando de forma individual o en conjunto, además el calor y el coeficiente varían de acuerdo a las condiciones operacionales. Por esta razón es difícil saber con exactitud cual será el comportamiento a futuro del calor transferido, del coeficiente total y del factor de ensuciamiento que presentará un intercambiador de calor, sobre todo porque generalmente las características de los fluidos involucrados en el intercambio de calor y las condiciones de proceso no permanecen constantes en el tiempo, y al variar estas, varían las condiciones de ensuciamiento de los intercambiadores de calor, y como se pudo observar durante la evaluación de los intercambiadores de calor des Tren de Precalentamiento en Frío, la composición de los fluidos y las condiciones de proceso ha variado consecutivamente durante el último año (2.010-2.011). Por ello se recomendó la limpieza de los equipos con mayores deficiencias en la transferencia de calor y continuar el monitoreo de los otros equipos a fin de detectar pérdidas de transferencia de calor por ensuciamiento o por otros posibles problemas operacionales.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 IDENTIFICAR LAS CONDICIONES DE DISEÑO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR INCLUYENDO CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y VARIABLES OPERACIONALES MÁS IMPORTANTES.

4.1.1 Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo

El Tren de Precalentamiento en Frío se encarga de realizar el primer proceso en la Unidad de Crudo del Mejorador, y esta consiste en transmitirle calor al crudo que entra con una temperatura de 100°F y 420 psig de presión, hasta llevarlo a la temperatura requerida para el proceso de desalación y deshidratación (290 – 300°F).

El precalentamiento del crudo se lleva a cabo mediante una serie de intercambiadores de calor, en los cuales se calienta el crudo y se enfrían otras corrientes de destilados del crudo que se manejan dentro de la planta, provenientes de las torres de destilación atmosférica y de vacío. En la **Figura 4.1** se muestra la distribución y secuencia de flujo de los intercambiadores de calor que componen este tren.

El Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo está conformado por ocho (8) unidades de intercambiadores, las cuales están identificadas por letras y números para diferenciarlas a cada una dentro de la unidad de crudo. Estas unidades de intercambiadores son las siguientes: 10-E-001 A/B/C, 10-E-004 A/B/C, 10-E-005, 10-E-006 A-D, 10-E-007 A-D, 10-E-008, 10-E-009 y 10-E-010, Que en total suman dieciocho (18) equipos de intercambio de calor que no se toman de forma individual, sino como ocho (8) unidades de intercambio.

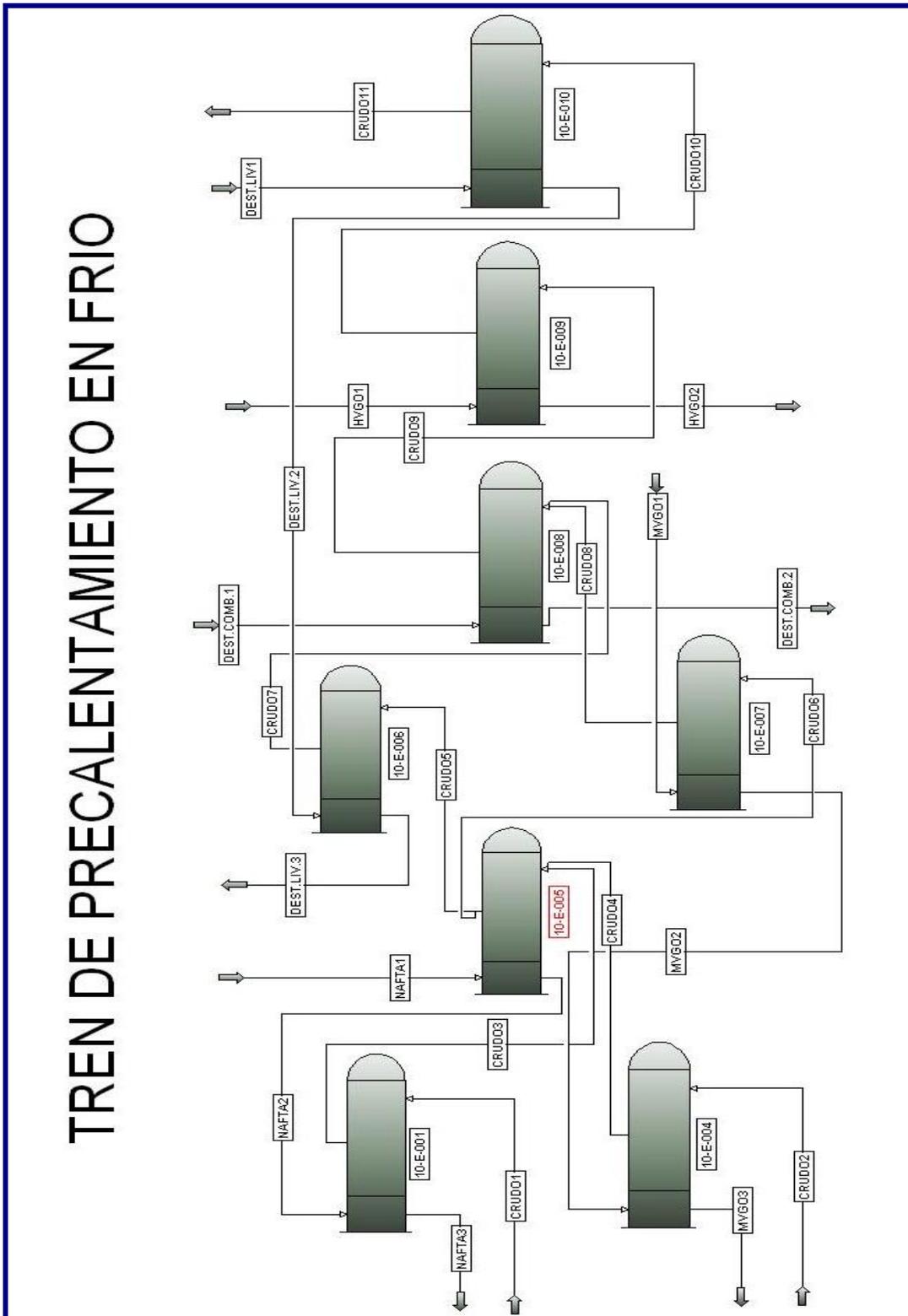


Figura 4.1 Configuración y Secuencia de Flujo del Tren de Precalentamiento en Frío.
[Propia]



Todas las unidades de intercambio de calor que conforman el Tren de Precaentamiento en Frío son intercambiadores de tubo y coraza horizontales, de configuración en contracorriente, con diferentes características, de acuerdo a especificaciones de sus diseños y parámetros bajo los que fueron fabricados.

4.1.2 Características de Diseño de los Intercambiadores de Calor

La unidad de intercambio 10-E-001 A/B/C consta de tres (3) intercambiadores de calor de un (1) paso por el lado coraza y dos (2) pasos por el lado tubo dispuestos en serie que intercambian calor entre Nafta Diluyente y Crudo Diluido. Cada Equipo que conforma esta unidad es un intercambiador de tipo AEU según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que son equipos de cabezal de canal y cubierta desmontable y de haz de tubos en “U”.

La unidad de intercambio 10-E-004 A/B/C esta compuesta por tres (3) intercambiadores de calor de un (1) paso por el lado coraza y ocho (8) pasos por el lado tubo dispuestos en serie que intercambian calor entre MVGO y Crudo Diluido. Cada Equipo que conforma esta unidad es un intercambiador de tipo AET según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que son equipos de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.

La unidad de intercambio 10-E-005 esta compuesta por un (1) intercambiador de calor de flujo dividido en el lado coraza y dos (2) pasos por el lado tubo que intercambia calor entre Nafta Diluyente y Crudo Diluido. Este Equipo es un intercambiador de tipo AJU según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que es un equipo de cabezal de canal y de haz de tubos en “U”.



La unidad de intercambio 10-E-006 A-D consta de cuatro (4) intercambiadores de calor de un (1) paso por el lado coraza y de cuatro (4) pasos por el lado tubo, dispuestos en dos (2) pares paralelos dos (2) equipos en serie, que intercambian calor entre el Destilado Liviano y Crudo Diluido. Cada Equipo que conforma esta unidad es un intercambiador de tipo AET según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que son equipos de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.

La unidad de intercambio 10-E-007 A-D esta formada por cuatro (4) intercambiadores de calor de un (1) paso por el lado coraza y de ocho (8) pasos por el lado tubo, dispuestos en dos (2) pares paralelos dos (2) equipos en serie, que intercambian calor entre MVGO y Crudo Diluido. Cada Equipo que conforma esta unidad es un intercambiador de tipo AET según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que son equipos de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.

La unidad de intercambio 10-E-008 esta compuesta por un (1) intercambiador de calor de flujo dividido en el lado coraza y cuatro (4) pasos por el lado tubo que intercambia calor entre Destilado Combinado y Crudo Diluido. Este Equipo es un intercambiador de tipo AJT según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que es un equipo de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.

La unidad de intercambio 10-E-009 consta de un (1) intercambiador de calor de flujo dividido en el lado coraza y diez (10) pasos por el lado tubo que intercambia calor entre HVGO y Crudo Diluido. Este Equipo es un intercambiador de tipo AJT según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que es un equipo de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.



Y por último la unidad de intercambio 10-E-010 consta de un (1) intercambiador de calor de flujo dividido en el lado coraza y cuatro (4) pasos por el lado tubo que intercambia calor entre Destilado Liviano y Crudo Diluido. Este Equipo es un intercambiador de tipo AJT según la clasificación T.E.M.A., lo cual indica que es un equipo de cabezal de canal y de cabezal flotante sin contrabrida.

Todos los datos de las características físicas y dimensionales más importantes de los intercambiadores de calor que conforman el Tren de Precalentamiento en Frío se muestran en la **Tabla 4.1**. En la **Tabla 4.2** y en la **Tabla 4.3** se observan las condiciones operacionales de proceso (Temperatura de entrada y salida, Caída de Presión y Flujo tanto de lado coraza como del lado tubo), y las características de los fluidos bajo las cuales fueron diseñados los intercambiadores de calor de este tren de precalentamiento de crudo.

4.2 DIAGNOSTICAR LAS CONDICIONES ACTUALES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR EN FUNCIÓN AL FACTOR DE ENSUCIAMIENTO Y DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.

4.2.1 Datos de las Condiciones Operacionales Actuales de los Intercambiadores de Calor

A continuación se muestran desde la **Tabla 4.4** hasta la **Tabla 4.11** los datos de las variables de proceso como temperatura de entrada y salida y el flujo tanto del lado coraza como del lado tubo que fueron tomadas para la evaluación de cada intercambiador del Tren de Precalentamiento en Frío, los cuales se tomaron entre Enero de 2.010 y Marzo de 2.011, escogiendo aquellos meses de mayor estabilidad operacional de los equipos, con la finalidad de tener una mayor representatividad en el cálculo del calor transferido y del factor de ensuciamiento actual de los equipos.



TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO													
INTERCAMBIADORES	Número de Unidades	Tipo de Equipo según T.E.M.A.	LADO CASCO				LADO TUBO						
			N° de Pasos	D.I. (pulg)	N° de Pasos	N° de Tubos	Long. (pulg)	D.E. (pulg)	Espesor (BWG)	Esp. Tub (pulg)	Deflectores		
											Esp.(pulg)	Corte (%)	
10-E-001 A/B/C	3 (Serie)	AEU	1	36	2	414	240	0,75	14	1	17,3	29,2	
10-E-004 A/B/C	3 (Serie)	AET	1	44	8	564	240	1	14	1,25	8,8	24	
10-E-005	1	AJU	Flujo Dividido	41	2	427	192	0,75	14	1	13,8	17,4	
10-E-006 A-D	4 (Serie/Paralelo)	AET	1	52	4	1350	240	0,75	14	1	18,5	30,3	
10-E-007 A-D	4 (Serie/Paralelo)	AET	1	60	8	1184	240	1	14	1,25	13,5	17,7	
10-E-008	1	AJT	Flujo Dividido	48	4	961	240	0,75	14	1	19,5	16,9	
10-E-009	1	AJT	Flujo Dividido	69	10	1597	240	1	14	1,25	19,5	20,6	
10-E-010	1	AJT	Flujo Dividido	68	4	2501	240	0,75	14	1	15,5	25	

Tabla 4.1 Datos Físicos y Dimensionales de los Intercambiadores de Calor del Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo.



TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO																		
INTERCAMBIADORES	LADO CASCO							LADO TUBO										
	P Ent. (Psig)	P Sal. (Psig)	ΔP (Psig)	Δpmax (Psig)	T Ent. (°F)	T Sal. (°F)	Tmax (°F)	Flujo (Lb/hr)	FLUIDO	P Ent. (Psig)	P Sal. (Psig)	ΔP (Psig)	Δpmax (Psig)	T Ent. (°F)	T Sal. (°F)	Tmax (°F)	Flujo (Lb/hr)	FLUIDO
	10-E-001 A/B/C	380	353,7	26,3	30	101	210	260	476223	CRUDO	160	148,8	11,2	20	250	181	300	639532
10-E-004 A/B/C	380	354,4	25,6	30	101	210	260	197802	CRUDO	218	173,6	44,4	71	250	165	300	242366	MVGO
10-E-005	342	331,7	10,3	25	210	215	265	3501700	CRUDO	173	169,9	3,1	10	275	250	325	639532	Nafta Diluente
10-E-006 A-D	307	292,3	14,7	15	215	264	315	2258600	CRUDO	132	118,2	13,8	20	350	255	415	1074700	Destilado Liviano
10-E-007 A-D	321,7	308,3	13,4	15	215	264	315	1243100	CRUDO	248,7	233	15,7	16	325	250	375	788217	MVGO
10-E-008	284	277,7	6,3	10	264	273	325	3501700	CRUDO	157	151	6	10	396	316	450	352914	Destilado Combinado
10-E-009	274	267,2	6,8	15	273	285	325	3501700	CRUDO	161	144,1	16,9	25	400	325	450	555642	HVGO
10-E-010	259	253,9	5,1	10	285	307	360	3501700	CRUDO	142	133,9	8,1	10	415	350	465	1074700	Destilado Liviano

Tabla 4.2 Datos Operacionales de Diseño los Intercambiadores de Calor del Tren de Precalentamiento en Frío.



TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO											
INTERCAMBIADORES	LADO CASCO						LADO TUBO				
	FLUIDO	Densidad (lb/pie ³)	Viscosidad (cps)	Cond. Term. (BTU/h.pie.°F)	Calor Esp. (BTU/lb.°F)	FLUIDO	Densidad (lb/pie ³)	Viscosidad (cps)	Cond. Term. (BTU/h.pie.°F)	Calor Esp. (BTU/lb.°F)	
10-E-001 A/B/C	Crudo	59,1	507	0,057	0,419	Nafta	44	0,24	0,06	0,545	
	Diluido					Diluyente					
10-E-004 A/B/C	Crudo	59,1	507	0,057	0,419	MVGO	55,8	2,77	0,055	0,498	
	Diluido										
10-E-005	Crudo	56,6	18,2	0,052	0,486	Nafta	43,2	0,21	0,058	0,557	
	Diluido					Diluyente					
10-E-006 A-D	Crudo	56,5	16,48	0,052	0,489	Destilado Liviano	48,1	0,4	0,052	0,563	
	Diluido										
10-E-007 A-D	Crudo	56,5	16,48	0,052	0,489	MVGO	54,3	1,44	0,052	0,536	
	Diluido										
10-E-008	Crudo	55,3	7,81	0,05	0,515	Destilado Combinado	48,4	0,42	0,05	0,579	
	Diluido										
10-E-009	Crudo	55,1	7,07	0,05	0,52	HVGO	54,9	2,11	0,048	0,571	
	Diluido										
10-E-010	Crudo	54,8	6,15	0,049	0,526	Destilado Liviano	46,3	0,3	0,049	0,59	
	Diluido										

Tabla 4.3 Datos de Diseño de los Fluidos en los Intercambiadores de Calor del Tren de Precalentamiento en Frío.



10-E-001	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Abril de 2010 20/04/2010 5:00 p.m.	105,89	224,18	33,33	285,13	198,77	46,21
Mayo de 2010 23/05/2010 12:00 a.m.	106,61	216,06	32,26	287,35	210,64	46,45
Junio de 2010 03/06/2010 6:00 p.m.	105,71	217,48	29,72	287,72	216,9	47,14
Julio de 2010 23/07/2010 2:00:00p.m.	103,62	214,19	30,48	289,01	212,37	43,37
Octubre de 2010 09/10/2010 3:00 p.m.	103,29	218,53	27,93	292,01	222,23	46,37
Noviembre de 2010 05/11/2010 7:00 p.m.	103,45	208,57	34,11	295,13	219,87	46,20
Marzo de 2011 18/03/2011 9:00 p.m.	102,13	196,50	39,70	291,98	216,96	49,76

Tabla 4.4 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-001.

10-E-004	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Abril de 2010 24/04/2010 10:00 p.m.	106,78	176,92	18,54	229,04	152,04	17,57
Julio de 2010 17/07/2010 8:00 p.m.	103,18	158,66	17,82	214,81	138,44	16,58
Septiembre de 2010 02/09/2010 1:00 a.m.	103,72	169,29	16,54	225,24	143,52	15,78
Noviembre de 2010 15/11/2010 3:00 p.m.	102,90	176,45	13,61	230,79	146,30	14,11
Enero de 2011 20/01/2011 6:00 a.m.	101,45	162,53	15,73	227,52	139,17	13,41

Tabla 4.5 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-004.



10-E-005	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Abril de 2010 17/04/2010 2:00 a.m.	200,41	209,28	252,81	322,58	276,28	46,34
Mayo de 2010 23/05/2010 10:00 a.m.	198,68	209,24	238,49	338,65	287,96	47,39
Agosto de 2010 07/08/2010 1:00 a.m.	199,1	210,13	257,26	347,55	296,21	52,37
Noviembre de 2010 13/11/2010 6:00 a.m.	204,02	214,71	238,60	351,05	290,90	38,56
Diciembre de 2010 08/12/2010 3:00 p.m.	207,67	218,76	213,28	354,41	294,34	39,33
Enero de 2011 15/01/2011 4:00 p.m.	189,82	200,73	213,47	332,81	278,70	42,33
Febrero de 2011 12/02/2011 5:00 p.m.	191,39	202,09	217,31	334,59	280,33	40,71

Tabla 4.6 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-005.

10-E-006	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Enero de 2010 09/01/2010 1:00 a.m.	209,22	228,65	126,26	300,58	218,48	32,22
Febrero de 2010 12/02/2010 1:00 a.m.	210,3	235,55	119,64	308,19	222,96	34,30
Marzo de 2010 06/03/2010 3:00 a.m.	208,62	232,13	128,78	304,84	219,75	31,81
Abril de 2010 26/04/2010 11:00 a.m.	210,33	240,75	107,17	315,51	224,36	29,23
Junio de 2010 08/06/2010 8:00 p.m.	209,49	235,82	124,15	310,02	222,64	30,15
Octubre de 2010 01/10/2010 7:00 p.m.	211,32	227,9	118,78	297,50	218,59	25,13

Tabla 4.7 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-006.



10-E-007	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Enero de 2010 09/01/2010 9:00 p.m.	208,02	243,74	106,39	309,17	230,48	43,93
Febrero de 2010 15/02/2010 6:00 a.m.	214,04	252,98	97,68	321,35	234,79	38,79
Marzo de 2010 05/03/2010 3:00 p.m.	209,25	239,54	107,39	309,13	226,71	37,77
Abril de 2010 04/04/2010 10:00 a.m.	188,22	217,32	64,18	288,21	201,47	27,61
Mayo de 2010 20/05/2010 9:00 a.m.	208,71	231,81	106,57	294,84	220,02	30,74
Julio de 2010 10/07/2010 9:00 p.m.	210,42	239,87	73,59	310,21	222,14	25,48
Noviembre de 2010 11/11/2010 2:00 p.m.	217,41	244,21	79,92	307,21	229,03	27,37

Tabla 4.8 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-007.

10-E-008	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Enero de 2010 03/01/2010 10:00 a.m.	234,65	250,54	218,18	464,28	276,42	15,43
Febrero de 2010 21/02/2010 3:00 p.m.	239,25	256,23	208,78	447,36	284,99	18,82
Marzo de 2010 15/03/2010 8:20 p.m.	233,45	247,93	241,36	447,54	274,98	17,31
Julio de 2010 01/07/2010 8:00 a.m.	243,61	260,37	165,41	437,78	286,71	14,59
Agosto de 2010 20/08/2010 5:00 a.m.	237,26	253,86	170,3	432,25	282,18	15,23
Noviembre de 2010 11/11/2010 7:00 p.m.	243,45	260,55	175,17	445,59	286,82	13,64
Diciembre de 2010 18/12/2010 1:00 p.m.	264,25	278,26	162,85	449,45	298,49	12,39

Tabla 4.9 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-008.



10-E-009	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Enero de 2010 02/01/2010 8:00 a.m.	245,91	252,47	218,41	335,04	284,56	29,89
Febrero de 2010 15/02/2010 1:00 a.m.	260,18	270,15	211,47	382,82	316,19	31,30
Abril de 2010 04/04/2010 11:00 a.m.	259,22	264,79	178,68	344,88	288,56	19,45
Julio de 2010 06/07/2010 6:00:00 p.m.	264,62	270,37	146,13	355,15	291,4	16,28
Septiembre de 2010 25/09/2010 6:40 a.m.	272,02	278,25	141,64	392,52	301,72	13,26
Marzo de 2011 04/03/2011 5:05 p.m.	259,08	262,71	226,56	327,20	283,46	17,31

Tabla 4.10 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-009.

10-E-010	LADO CORAZA			LADO TUBO		
	T Ent.	T Sal.	Flujo	T Ent.	T Sal.	Flujo
	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)
Marzo de 2010 05/03/2010 6:20 p.m.	258,75	287,77	238,11	509,63	301,32	25,72
Abril de 2010 25/04/2010 8:00 p.m.	263,97	296,14	204,17	490,50	314,19	29,51
Junio de 2010 10/06/2010 11:00 p.m.	261,62	295,02	216,42	495,60	311,6	28,81
Septiembre de 2010 03/09/2010 2:02 p.m.	261,82	290,44	206,32	506,93	303,95	19,37
Octubre de 2010 28/10/2010 10:00 a.m.	290,22	311,48	197,94	537,10	329,42	18,78
Enero de 2011 10/01/2011 10:20 a.m.	248,45	281,43	217,21	501,25	298,67	19,61

Tabla 4.11 Datos De Temperatura y Flujo del Intercambiador 10-E-010.



Además de los datos de temperatura y flujo, para la evaluación se requirieron las características composicionales de los fluidos involucrados en el intercambio de calor en el Tren de Pre calentamiento en Frío, estos datos se muestran desde la **Tabla 4.12** hasta la **Tabla 4.27**, para cada fluido tanto en el lado coraza como en el lado tubo de los intercambiadores de calor. Estos datos de los fluidos se tomaron para las mismas fechas que se escogieron las variables operacionales para cada equipo de acuerdo a la mayor estabilidad de sus condiciones operacionales entre Enero de 2.010 y Marzo de 2.011.

INTERCAMBIADOR 10-E-001 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abr. 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	33,33	465829
May. 2010	15,38	337,5	509,6	993,4	1307,6	32,26	453883
Jun. 2010	15,39	332,3	478,5	953,2	1331,3	29,72	418118
Jul. 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	30,48	428605
Oct. 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	27,93	393015
Nov. 2010	15	360,9	488,5	935,2	1305,6	34,11	481156
Mar. 2011	15,55	326,1	473,5	907,7	1285,6	39,7	557914

Tabla 4.12 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-001.

La única variable operacional que no pudo obtenerse en la base de datos ASPEN Process Explorer, fue la caída de presión de entrada y salida tanto del lado tubo como del lado coraza de cada intercambiador de calor perteneciente a este tren de pre calentamiento. Las cuales se midieron con manómetros locales durante la medición realizada en Marzo del 2.011, dichos valores de presión obtenidos se muestran en la **Tabla 4.28**.



INTERCAMBIADOR 10-E-001 (Lado Tubo)								
Nafta Diluyente	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abr. 2010	41,52	295,2	311,7	363,1	428,7	494,9	46,21	551927
May. 2010	40,66	304	320,7	371,5	453,1	503,1	46,45	557565
Jun. 2010	40,66	304	320,7	371,5	453,1	503,1	47,14	565847
Jul. 2010	40,66	304	320,7	371,5	453,1	503,1	43,37	520594
Oct. 2010	40,76	296,5	313,9	361,2	440,6	481,3	46,37	556281
Nov. 2010	40,76	296,5	313,9	361,2	440,6	481,3	46,2	554242
Mar. 2011	40,73	297,5	313,7	365,9	442,4	504,3	49,76	597054

Tabla 4.13 Datos de la Nafta Diluyente en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-001.

INTERCAMBIADOR 10-E-004 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abril 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	18,54	259120
Julio 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	17,82	250582
Septiembre 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	16,54	232742
Noviembre 2010	15	360,9	488,5	935,2	1305,6	13,61	191983
Enero 2011	1,05	344,9	472,5	909,9	1286,6	15,73	221812

Tabla 4.14 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-004.



INTERCAMBIADOR 10-E-004 (Lado Tubo)								
MVGO	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abril 2010	16,89	651,4	676,8	737	815,7	847,6	17,57	244686
Julio 2010	18,29	621,6	643,9	689,1	769,4	805	16,58	228741
Septiembre 2010	18,08	615,9	637,7	699,9	780,2	814,8	15,78	218009
Noviembre 2010	18,26	612	637,5	699,5	778,9	812,5	14,11	194703
Enero 2011	19,06	592,1	622	688	769	803,5	13,41	184061

Tabla 4.15 Datos del MVGO en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-004.

INTERCAMBIADOR 10-E-005 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abr. 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	252,81	3533340
May. 2010	15,38	337,5	509,6	993,4	1307,6	238,49	3355439
Ago. 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	257,26	3617554
Nov. 2010	15	360,9	488,5	935,2	1305,6	238,6	3365694
Dic. 2010	15,35	310,8	424	806,5	1152	213,28	3001360
Ene. 2011	15,05	344,9	472,5	909,9	1286,6	213,47	3010183
Feb. 2011	15,12	348,7	516,3	992,7	1369,9	217,31	3062869

Tabla 4.16 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-005.



INTERCAMBIADOR 10-E-005 (Lado Tubo)								
Nafta Diluyente	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Abr. 2010	41,52	295,2	311,7	363,1	428,7	494,9	46,34	553480
May. 2010	40,66	304	320,7	371,5	453,1	503,1	47,39	568848
Ago. 2010	40,76	296,5	313,9	361,2	440,6	481,3	52,37	628261
Nov. 2010	40,76	296,5	313,9	361,2	440,6	481,3	38,56	462588
Dic. 2010	40,76	296,5	313,9	361,2	440,6	481,3	39,33	471825
Ene. 2011	42,86	308,3	322	374,6	464,9	506,7	42,33	501699
Feb. 2011	42,86	308,3	322	374,6	464,9	506,7	40,71	482499

Tabla 4.17 Datos de la Nafta Diluyente en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-005.

INTERCAMBIADOR 10-E-006 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	126,26	1772556
Febrero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	119,64	1679618
Marzo 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	128,78	1807934
Abril 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	107,17	1497836
Junio 2010	15,39	332,3	478,5	953,2	1331,3	124,15	1746612
Octubre 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	118,78	1671405

Tabla 4.18 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-006.



INTERCAMBIADOR 10-E-006 (Lado Tubo)								
Destilado Liviano	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	32,22	424803
Febrero 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	34,3	452227
Marzo 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	31,81	419397
Abril 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	29,23	385381
Junio 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	30,15	397511
Octubre 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	25,13	331325

Tabla 4.19 Datos del Destilado Liviano en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-006.

INTERCAMBIADOR 10-E-007 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	106,39	1493602
Febrero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	97,68	1371323
Marzo 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	107,39	1507641
Abril 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	64,18	896997
Mayo 2010	15,38	337,5	509,6	993,4	1307,6	106,57	1499389
Julio 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	73,59	1034812
Noviembre 2010	15	360,9	488,5	935,2	1305,6	79,92	1127352

Tabla 4.20 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-007.



INTERCAMBIADOR 10-E-007 (Lado Tubo)								
MVGO	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	16,07	668,5	705,6	775,1	843	869,6	43,92557	615122
Febrero 2010	16,35	615,3	646,5	657,9	695,4	776,7	38,79229	542208
Marzo 2010	15,57	651,8	689,5	750,5	816,3	843,4	37,77098	530733
Abril 2010	16,89	651,4	676,8	737	815,7	847,6	27,61319	384551
Mayo 2010	17,4	636,1	658,3	712,4	787,2	819,8	30,73771	426598
Julio 2010	18,29	621,6	643,9	689,1	769,4	805	25,47907	351514
Noviembre 2010	18,26	612	637,5	699,5	778,9	812,5	27,36629	377626

Tabla 4.21 Datos del MVGO en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-007.

INTERCAMBIADOR 10-E-008 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	218,18	3063014
Febrero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	208,78	2931048
Marzo 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	241,36	3388437
Julio 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	165,41	2325972
Agosto 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	170,3	2394735
Noviembre 2010	15	360,9	488,5	935,2	1305,6	175,17	2470950

Tabla 4.22 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-008.



INTERCAMBIADOR 10-E-008 (Lado Tubo)								
Destilado Combinado	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	15,4272	200344
Febrero 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	18,81946	244398
Marzo 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	17,30881	224780
Julio 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	14,58806	189447
Agosto 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	15,22776	197754
Noviembre 2010	27,63	431,4	454,9	515,1	604,6	659,5	13,64097	177148

Tabla 4.23 Datos del Destilado Combinado en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-008.

INTERCAMBIADOR 10-E-009 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	218,41	3066243
Febrero 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	211,47	2968813
Abril 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	178,68	2497279
Julio 2010	15,46	355,2	512,1	973,2	1295,4	146,13	2054859
Septiembre 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	141,64	1993078
Marzo 2011	15,55	326,1	473,5	907,7	1285,6	226,56	3183905

Tabla 4.24 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-009.



INTERCAMBIADOR 10-E-009 (Lado Tubo)								
HVGO	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Enero 2010	12,72	775,1	812,6	866,9	911,5	933,5	29,89369	428347
Febrero 2010	12,93	750,3	790,3	852,8	906,6	952,4	31,3028	447886
Abril 2010	12,76	760,1	801,2	871,8	940,3	973,2	19,45317	278668
Julio 2010	13,29	740,8	778,5	849,4	913,6	942,8	16,28123	232376
Septiembre 2010	13,26	764	790,9	858	925,3	953,4	13,25641	189243
Marzo 2011	13,62	761,2	790,1	853,4	922,7	960,3	17,30863	246478

Tabla 4.25 Datos del HVGO en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-009.

INTERCAMBIADOR 10-E-010 (Lado Coraza)							
Crudo Diluido	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Marzo 2010	15,7	266,5	380,5	772,2	1223	238,11	3342810
Abril 2010	16,36	360,1	573,2	1134,6	1227,1	204,17	2853534
Junio 2010	15,39	332,3	478,5	953,2	1331,3	216,42	3044718
Septiembre 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	206,32	2903218
Octubre 2010	15,36	316,9	486,1	941,1	1311,9	197,94	2785300
Enero 2011	15,05	344,9	472,5	909,9	1286,6	217,21	3062922

Tabla 4.26 Datos del Crudo Diluido en el Lado Coraza del Intercambiador 10-E-010.



INTERCAMBIADOR 10-E-010 (Lado Tubo)								
Destilado Liviano	°API	T ₁₀ (°F)	T ₂₀ (°F)	T ₅₀ (°F)	T ₈₀ (°F)	T ₉₀ (°F)	Flujo Vol. (MBSD)	Flujo Másico (lb/h)
Marzo 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	25,72	339104
Abril 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	29,51	389073
Junio 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	28,81	379844
Septiembre 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	19,37	255383
Octubre 2010	25,24	482,9	516,1	575,1	620,8	644,4	18,78	247604
Enero 2011	25,04	484,8	541,1	606,4	652,4	677,3	19,61	258877

Tabla 4.27 Datos del Destilado Liviano en el Lado Tubo del Intercambiador 10-E-010.

TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO								
FECHA DE MEDICIÓN	LADO CASCO				LADO TUBO			
	P Ent. (Psig)	P Sal. (Psig)	ΔP (Psig)	Δpmax (Psig)	P Ent. (Psig)	P Sal. (Psig)	ΔP (Psig)	Δpmax (Psig)
MARZO DE 2011								
10-E-001 A/B/C	392	364	28	30	172	156	16	20
10-E-004 A/B/C	392	363	29	30	233	180	63	71
10-E-005	353	337	16	25	180	175,5	4,5	10
10-E-006 A-D	326	311	15	15	135	119	16	20
10-E-007 A-D	327	312,5	14,5	15	257	242	15	16
10-E-008	299	291	8	10	162	156,5	5,5	10
10-E-009	285	271	14	15	174	151	23	25
10-E-010	267	261	6	10	153	145,5	7,5	10

Tabla 4.28 Datos de Presión actuales de los Intercambiadores de Calor del Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo para Marzo del 2.010.



4.2.2 Resultados de la Evaluación Térmica de los Intercambiadores de Calor

✦ Intercambiadores de Calor 10-E-001 A/B/C

A continuación en la **Tabla 4.29** se encuentran reflejados los resultados del cálculo de verificación y validación del factor de ensuciamiento según el diseño de los intercambiadores en serie 10-E-001 A/B/C, y en la **Tabla 4.30** se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones de operación y ensuciamiento actual de estos equipos, obtenidos tanto del simulador PRO II, como del procedimiento de cálculo realizado.

INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (Nafta Diluyente)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
35,19	101	210	60,61	250	181
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
23,31	53,09	43,31	0,005	0,00524	

Tabla 4.29 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C.

INTERCAMBIADOR 10-E-001 A/B/C							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Abr-10	26,51	54,48	37,12	0,00858	24,38	47,35	0,00857
May-10	23,61	54,50	28,55	0,01668	21,97	28,52	0,01652
Jun-10	22,14	53,74	25,95	0,01992	20,66	26,01	0,02037
Jul-10	22,04	52,89	25,40	0,02046	20,52	25,46	0,02103
Oct-10	21,47	52,96	23,72	0,02327	20,45	23,53	0,02371
Nov-10	23,03	56,56	23,79	0,02436	21,65	22,62	0,02465
Mar-11	24,68	60,95	24,43	0,02453	23,16	22,14	0,02501

Tabla 4.30 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales de los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C.



✦ Intercambiadores de Calor 10-E-004 A/B/C

En la **Tabla 4.31** se muestran los resultados del cálculo de validación y verificación del valor del factor de ensuciamiento según las condiciones de diseño de los intercambiadores en serie 10-E-004 A/B/C, y en la **Tabla 4.32** se observan los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones de operación actuales y el ensuciamiento que presentan estos equipos de transferencia de calor, obtenidos a través de los cálculos y de la simulación con PRO II.

INTERCAMBIADOR 10-E-004 A/B/C					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (MVGO)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
14,62	101	210	18,30	250	165
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
9,77	28,15	23,21	0,007	0,00756	

Tabla 4.31 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C.

INTERCAMBIADOR 10-E-004 A/B/C							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Abr-10	8,83	31,10	21,44	0,01447	8,78	21,20	0,01154
Jul-10	8,01	30,99	20,98	0,01539	8,02	18,81	0,01307
Sep-10	8,21	30,79	20,48	0,01634	8,18	15,98	0,0151
Nov-10	7,61	28,84	18,59	0,01910	7,65	13,39	0,01813
Ene-11	7,50	30,04	17,61	0,02350	7,52	14,17	0,02314

Tabla 4.32 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales de los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C.



✦ Intercambiador de Calor 10-E-005

Los resultados del cálculo de la validación y verificación del valor del factor de ensuciamiento de acuerdo a las condiciones de diseño del intercambiador 10-E-005 se observan en la **Tabla 4.33**, y los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones de operación actuales de este intercambiador tanto por los cálculos realizados como por el simulador PRO II, se observan en la **Tabla 4.34**.

INTERCAMBIADOR 10-E-005					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (Nafta Diluyente)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
264,70	210	215	62,70	275	250
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
8,81	106,41	67,19	0,004	0,00457	

Tabla 4.33 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para el Intercambiador 10-E-005.

INTERCAMBIADOR 10-E-005							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Abr-10	15,07	93,42	60,68	0,00577	14,87	69,81	0,00637
May-10	16,93	93,55	58,86	0,00630	16,78	62,29	0,00675
Ago-10	19,02	100,83	61,53	0,00634	18,91	61,50	0,00689
Nov-10	16,32	88,92	55,94	0,00663	15,40	57,17	0,00724
Dic-10	16,39	90,88	56,42	0,00672	15,83	57,04	0,00752
Ene-11	15,94	89,15	54,97	0,00697	15,36	54,66	0,00781
Feb-11	15,57	86,24	53,58	0,00707	14,39	53,31	0,00799
Mar-11	17,12	97,49	57,29	0,00720	16,36	56,19	0,00824

Tabla 4.34 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales del Intercambiador 10-E-005.



★ Intercambiadores de Calor 10-E-006 A-D

Los valores obtenidos en el cálculo de verificación del valor del factor de ensuciamiento de acuerdo a las condiciones de diseño de los intercambiadores 10-E-006 A-D se encuentran en la **Tabla 4.35**, y en la **Tabla 4.36** se observan los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones actuales y el ensuciamiento de estos intercambiadores de calor.

INTERCAMBIADOR 10-E-006 A-D					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (Destilado Liviano)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
86,33	215	264	46,56	350	255
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
27,67	68,45	46,05	0,007	0,00711	

Tabla 4.35 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para los Intercambiadores 10-E-006 A-D.

INTERCAMBIADOR 10-E-006 A-D							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Ene-10	8,83	39,24	29,63	0,00827	10,57	30,55	0,00865
Feb-10	9,82	39,85	29,48	0,00883	11,48	29,48	0,00925
Mar-10	9,06	39,35	28,54	0,00963	9,92	28,21	0,00998
Abr-10	9,28	36,35	26,78	0,00984	9,57	26,15	0,01086
Jun-10	9,03	37,60	26,42	0,01126	8,93	24,01	0,01193
Oct-10	6,73	35,33	25,07	0,01158	6,14	19,69	0,01252
Dic-10	7,34	35,82	25,19	0,01178	6,57	19,52	0,01306

Tabla 4.36 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales de los Intercambiadores 10-E-006 A-D.



✦ Intercambiadores de Calor 10-E-007 A-D

Los resultados obtenidos en el cálculo de verificación del valor del factor de ensuciamiento de acuerdo a las condiciones de diseño de los intercambiadores 10-E-007 A-D se encuentran en la **Tabla 4.37**, y los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones actuales y el ensuciamiento de estos intercambiadores de calor se observan en la **Tabla 4.38**.

INTERCAMBIADOR 10-E-007 A-D					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (MVGO)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
47,52	215	264	30,60	325	250
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
15,30	42,76	28,49	0,009	0,00915	

Tabla 4.37 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para los Intercambiadores 10-E-007 A-D.

INTERCAMBIADOR 10-E-007 A-D							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Ene-10	11,88	37,89	25,88	0,01224	14,34	26,59	0,01342
Feb-10	11,45	38,16	25,62	0,01283	13,72	26,11	0,01401
Mar-10	10,63	36,58	24,72	0,01312	11,94	25,80	0,01433
Abr-10	8,27	30,52	21,58	0,01356	10,39	23,26	0,01506
May-10	7,94	34,39	23,34	0,01377	9,67	21,77	0,01548
Jul-10	7,79	31,14	21,74	0,01390	8,84	19,71	0,01626
Nov-10	7,41	32,24	22,04	0,01436	7,87	19,12	0,01748
Dic-10	8,55	34,88	23,17	0,01449	7,75	20,10	0,01837
Ene-11	9,26	32,76	22,12	0,01468	7,55	18,80	0,01874

Tabla 4.38 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales de los Intercambiadores 10-E-007 A-D.



✦ Intercambiador de Calor 10-E-008

Los resultados del cálculo de validación del valor del factor de ensuciamiento según las condiciones de diseño del intercambiador 10-E-008 se observan en la **Tabla 4.39**, y los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones operacionales actuales y el factor de ensuciamiento de este intercambiador tanto por el simulador PRO II como por los cálculos realizados, se observan en la **Tabla 4.40**.

INTERCAMBIADOR 10-E-008					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (Destilado Combinado)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
271,13	264	273	30,57	396	316
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
15,87	81,72	51,96	0,007	0,00701	

Tabla 4.39 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para el Intercambiador 10-E-008.

INTERCAMBIADOR 10-E-008							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Ene-10	21,39	60,21	56,87	0,00098	21,04	58,26	0,00129
Feb-10	22,47	65,85	61,75	0,00101	22,11	63,25	0,00149
Mar-10	21,86	64,78	60,48	0,00110	21,51	62,06	0,00161
Jul-10	16,49	53,77	48,68	0,00195	15,94	49,35	0,00237
Ago-10	17,02	54,71	49,11	0,00208	16,46	50,19	0,00259
Nov-10	16,18	52,91	46,50	0,00261	15,72	48,57	0,00292

Tabla 4.40 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales del Intercambiador 10-E-008.



✦ Intercambiador de Calor 10-E-009

En la **Tabla 4.41** mostrada a continuación se encuentran los datos del cálculo de verificación del valor del factor de ensuciamiento según las condiciones de diseño del intercambiador 10-E-009, y en la **Tabla 4.42** se encuentran los resultados obtenidos de la evaluación tanto por el simulador PRO II como por los cálculos realizados de las condiciones operacionales y el factor de ensuciamiento actual de este equipo de transferencia de calor.

INTERCAMBIADOR 10-E-009					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (HVGO)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
272,44	273	285	42,72	400	325
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
23,06	47,52	35,64	0,009	0,00901	

Tabla 4.41 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para el Intercambiador 10-E-009.

INTERCAMBIADOR 10-E-009							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Ene-10	10,86	42,09	22,84	0,02003	9,92	21,65	0,01725
Feb-10	15,56	46,38	23,37	0,02123	14,86	22,60	0,01937
Abr-10	8,21	35,85	19,87	0,02244	8,25	20,33	0,02178
Jul-10	7,72	33,53	18,83	0,02328	7,82	19,78	0,02441
Sep-10	9,14	31,91	17,90	0,02451	9,25	18,06	0,02544
Mar-11	5,52	36,73	16,27	0,03423	5,61	16,34	0,03509

Tabla 4.42 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales del Intercambiador 10-E-009.



✦ Intercambiador de Calor 10-E-010

Finalmente, en la **Tabla 4.43** se encuentran los resultados del cálculo de verificación y validación del factor de ensuciamiento de acuerdo al diseño del intercambiador 10-E-010, y en la **Tabla 4.44** se observan los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones operacionales actuales y el factor de ensuciamiento actual de este equipo de transferencia de calor, obtenidos de los cálculos realizados y de la simulación con PRO II.

INTERCAMBIADOR 10-E-010					
LADO CORAZA (Crudo Diluido)			LADO TUBO (Destilado Liviano)		
Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal	Flujo Vol.	T. Ent.	T. Sal
(MBPSD)	(°F)	(°F)	(MBPSD)	(°F)	(°F)
274,65	285	307	97,30	415	350
Evaluación Térmica y Factor de Ensuciamiento					
Q	Uc	Ud	Rd Diseño	Rd Calc.	
(MMBTU/Hr)	(BTU/pie ² .h.°F)	(BTU/pie ² .h.°F)	(pie ² .h.°F/BTU)	(pie ² .h.°F/BTU)	
40,29	79,87	50,19	0,007	0,00740	

Tabla 4.43 Resultados de los cálculos de las condiciones de diseño para el Intercambiador 10-E-010.

INTERCAMBIADOR 10-E-010							
FECHA	CALCULADO				SIMULADOR PRO II 7.0		
	Q Calc.	Uc Calc.	Ud Calc.	Rd Calc.	Q Sim.	Ud Sim.	Rd Sim.
	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)	(MMBTU /Hr)	(Btu /pie ² .hr.°F)	(pie ² .hr.°F /Btu)
Mar-10	40,95	48,22	43,07	0,00248	40,37	45,05	0,00222
Abr-10	40,98	49,40	43,53	0,00273	39,28	44,28	0,00302
Jun-10	41,26	49,47	43,35	0,00285	36,17	41,18	0,00427
Sep-10	30,61	40,59	32,80	0,00585	29,93	36,00	0,00623
Oct-10	31,09	41,28	32,37	0,00667	30,17	34,28	0,00699
Ene-11	30,76	40,15	30,42	0,00797	29,68	32,25	0,00843

Tabla 4.44 Resultados de la simulación y los cálculos de las condiciones de operación actuales del Intercambiador 10-E-010.



4.3 ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO Y LA EFICIENCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR TOMANDO COMO BASE SUS CONDICIONES DE DISEÑO.

Los resultados de la evaluación de verificación de los intercambiadores de calor del Tren de Precalentamiento en Frío en base a sus condiciones operacionales de diseño, demostraron la representatividad y confiabilidad de los valores obtenidos a través del procedimiento de cálculo y a través del simulador PRO II, debido a que estos resultados presentaron diferencias muy pequeñas, y hasta despreciables, con respecto a los valores de calor, coeficiente total y factor de ensuciamiento considerados en el diseño de los equipos. Por esta razón, se estima que la evaluación térmica realizada de las condiciones actuales de estos intercambiadores fue representativa de la condición real de la operación de estos equipos.

4.3.1 Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C

Estos intercambiadores de calor dispuestos en serie, fueron evaluados como una sola unidad de transferencia de calor, es decir, como un intercambiador de tres (3) pasos por el lado coraza y de seis (6) pasos por el lado tubo, el cual intercambia calor entre la nafta diluyente (42-40 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.

Como se puede observar en la **Figura 4.2**, el calor transferido a través de los intercambiadores en serie 10-E-001 A/B/C, ha ido disminuyendo de forma gradual, sin embargo, esta disminución no es tan pronunciada, ya que sus valores no se han alejado demasiado del calor transferido que se espera tenga por diseño, el cual es de 23,3 MMBTU/hr.



De igual forma, se puede observar que en la **Figura 4.3** el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido gradualmente desde el año 2.010, pero en este caso ha tenido una tendencia de disminución pronunciada al inicio del año pasado y este año se ha estabilizado, pero actualmente se encuentra entre 22 y 24 $\text{Btu}/\text{pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$, muy por debajo del coeficiente total por diseño, el cual es 53,09 $\text{Btu}/\text{pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$.

Finalmente, en la **Figura 4.4**, se puede observar el incremento progresivo que presenta el factor de ensuciamiento en estos intercambiadores de calor, el cual se encuentra actualmente en un valor aproximado de 0,025 $\text{pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$, muy por encima del ensuciamiento esperado por diseño, el cual es 0,005 $\text{pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$.

Además de esto, en la **Tabla 4.28**, se observa que la caída de presión para el lado tubo de estos intercambiadores se encuentra en 16 psig, cuyo valor se acerca a la caída de presión máxima permitida por los equipos para el lado tubo según su diseño, la cual es de 20 psig.

Por estas razones se recomienda realizarle el mantenimiento preventivo a los intercambiadores de calor 10-E-001 A/B/C este mismo año 2.011, antes de que el ensuciamiento, el cual se ha incrementado considerablemente desde el 2.010, logre a afectar el proceso de transferencia de calor disminuyendo la cantidad de calor transferido por estos equipos.

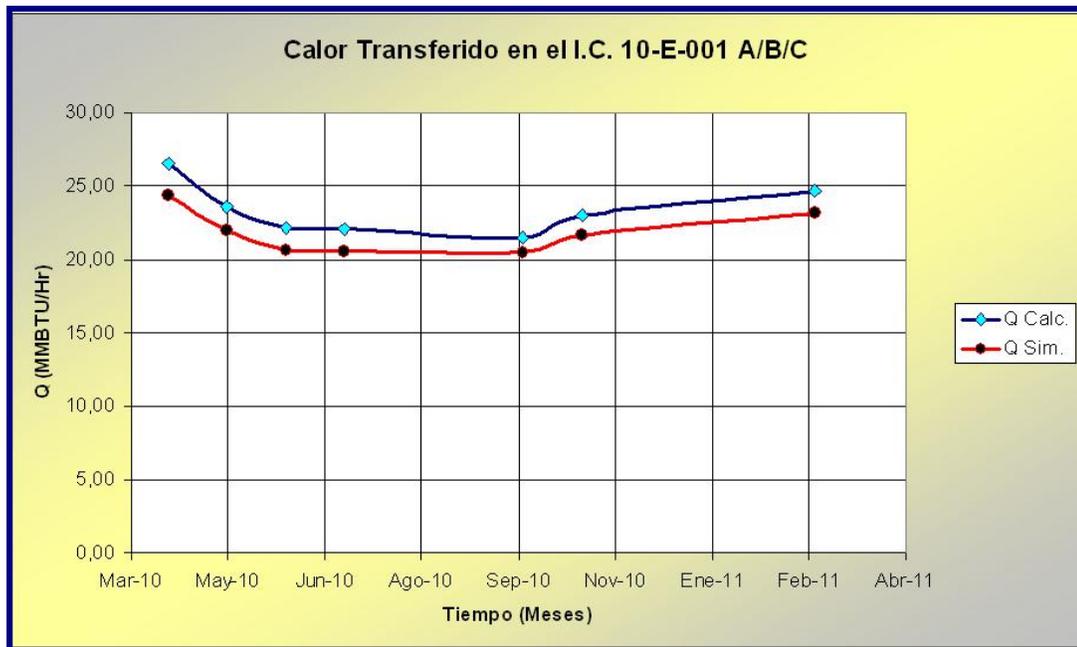


Figura 4.2 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C.



Figura 4.3 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C.

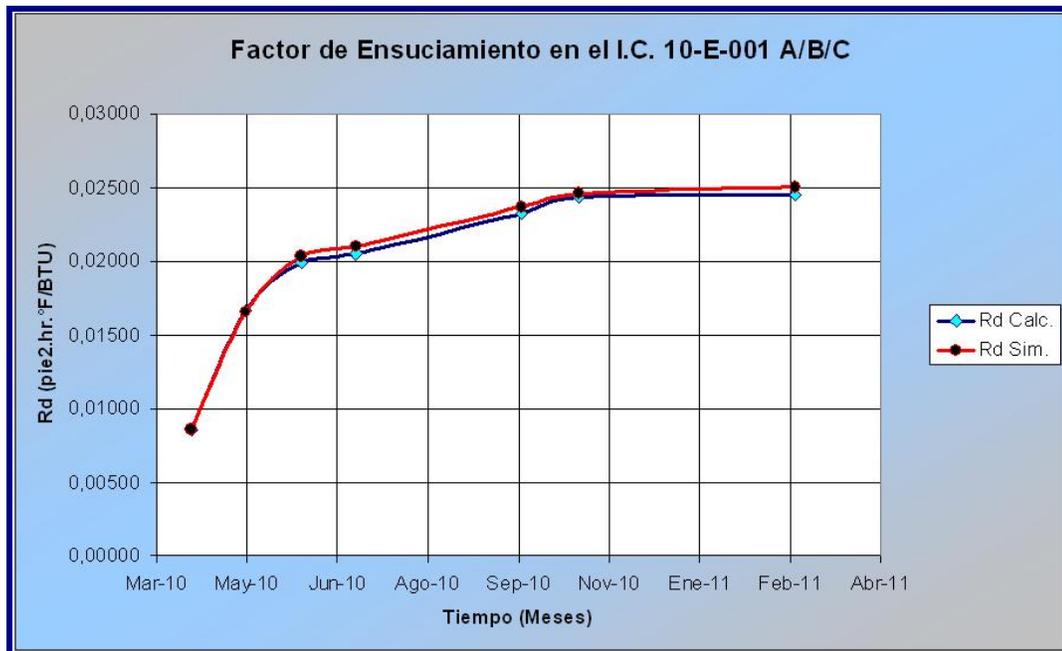


Figura 4.4 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-001 A/B/C.

4.3.2 Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C

Estos intercambiadores de calor están dispuestos en serie y fueron evaluados como una sola unidad de transferencia de calor, es decir, como un intercambiador de tres (3) pasos por el lado coraza y de veinticuatro (24) pasos por el lado tubo, el cual intercambia calor entre el producto MVGO (19-16 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.

En la **Figura 4.5** puede observarse que el calor transferido a través de los intercambiadores en serie 10-E-004 A/B/C, ha ido disminuyendo progresivamente de forma más acentuada, debido a que los valores de calor transferido se encuentran actualmente alrededor de los 7,5 MMBTU/hr, el cual está por muy por debajo de calor que se espera por diseño para estos equipos, el cual es de 9,77 MMBTU/hr.



También se puede observar en la **Figura 4.6** que el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido lentamente desde el año 2.010, con una tendencia de disminución poco pronunciada; sin embargo, actualmente se encuentra en $17,14 \text{ Btu/pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$, mucho menor al coeficiente total esperado por diseño, el cual es $23,21 \text{ Btu/pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$.

En la **Figura 4.7** es posible observar la tendencia de incremento pronunciado que se presenta en el factor de ensuciamiento en estos intercambiadores de calor, el cual se encuentra actualmente en un valor aproximado de $0,023 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$, muy por encima del ensuciamiento esperado por diseño, el cual es $0,007 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$. Esto posiblemente se debe a que los fluidos que intercambian calor en este equipo son hidrocarburos pesados, con gran cantidad de impurezas y sólidos en suspensión.

Luego se observa en la **Tabla 4.28** que la caída de presión para el lado tubo de estos intercambiadores se encuentra en 63 psig, y este valor se acerca mucho a la caída de presión máxima permitida por los equipos para el lado tubo según su diseño, la cual es de 71 psig. Por tanto, se recomienda llevar el mantenimiento preventivo a los intercambiadores de calor 10-E-004 A/B/C en el tercer trimestre del año 2.011, a fin de corregir la pérdida de transferencia de calor que actualmente ocurre en estos equipos.

4.3.3 Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-005

Este es un intercambiador de calor de flujo dividido en la coraza, y de haz de tubos en “U”, por lo tanto fue evaluado tomando en consideración que el flujo a través de la coraza es solamente la mitad del flujo total que llega a este equipo, el cual intercambia calor entre la nafta diluyente (42-40 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.

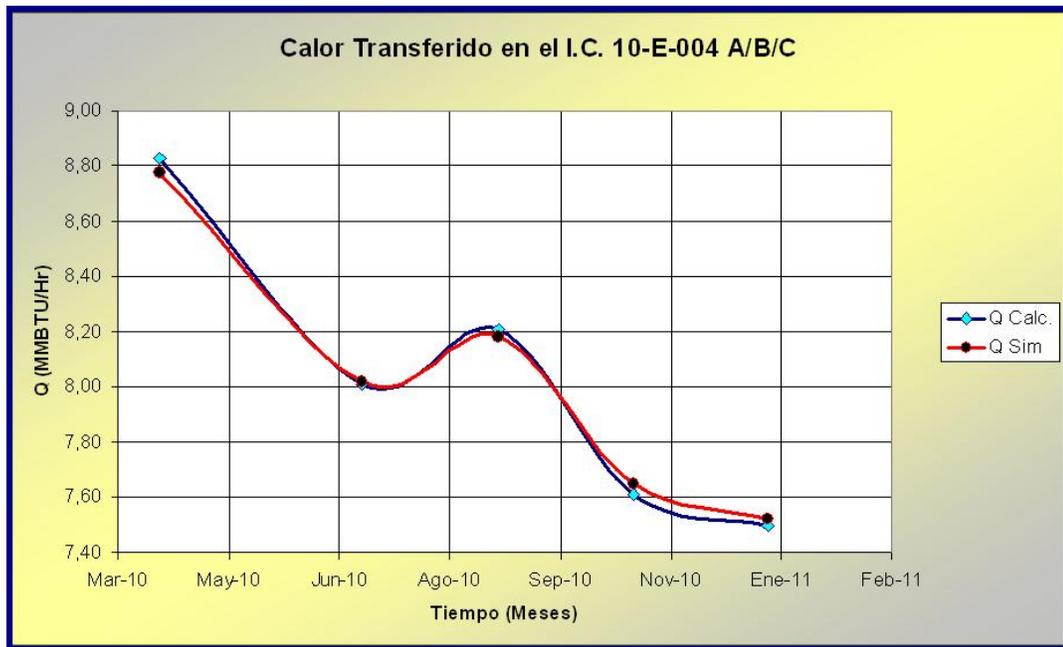


Figura 4.5 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C.

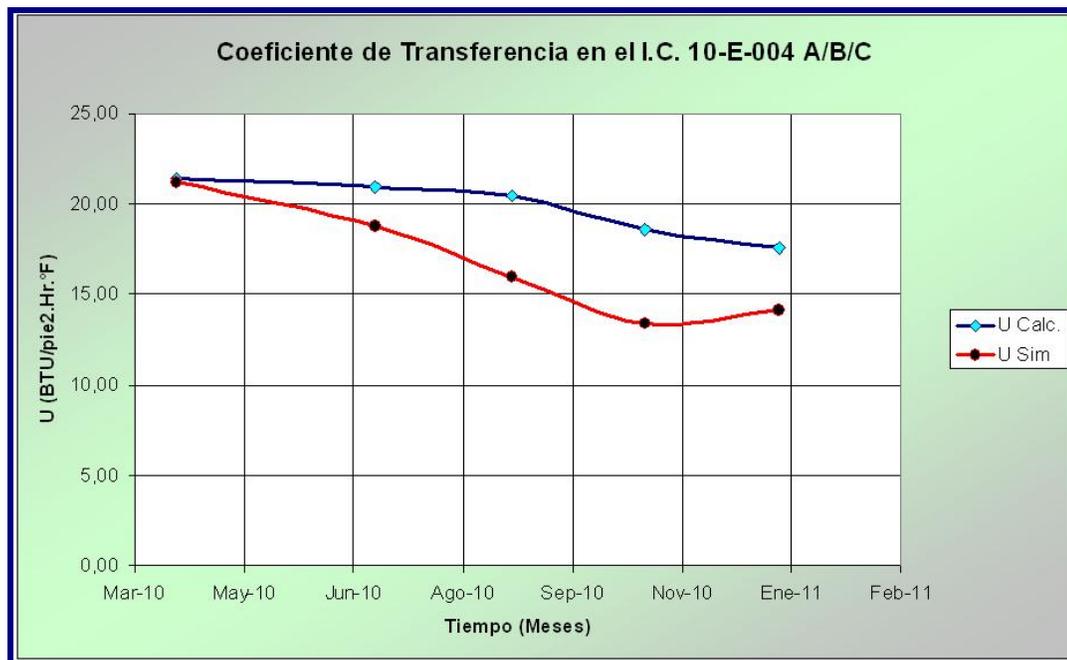


Figura 4.6 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C.

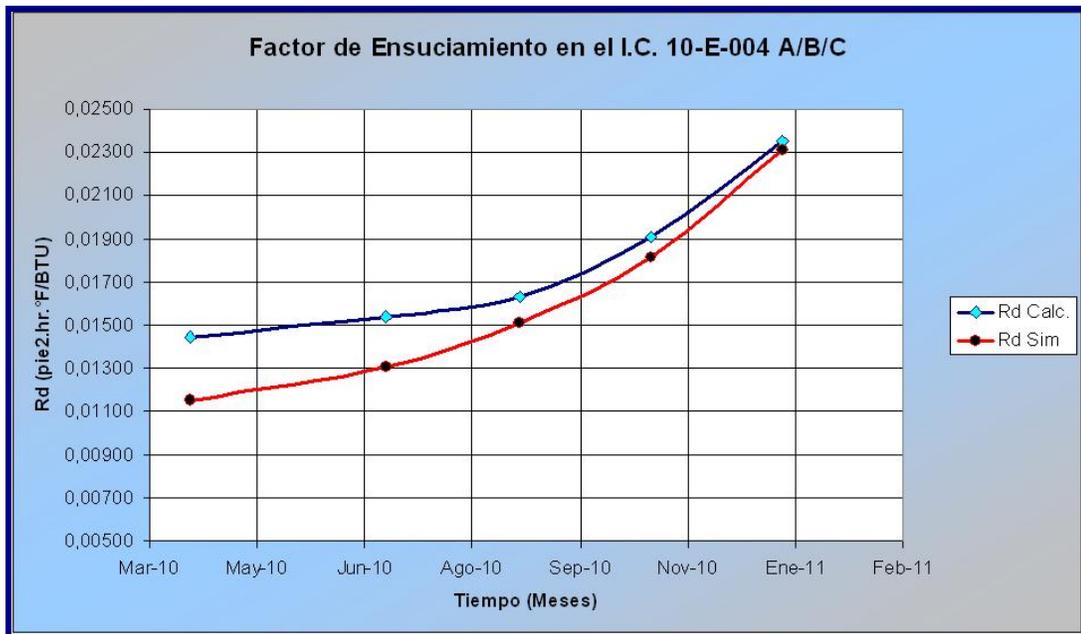


Figura 4.7 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-004 A/B/C.

En la **Figura 4.8** se observa que el calor transferido a través del intercambiador 10-E-005, ha ido disminuyendo gradualmente de forma leve, sin embargo, esta disminución no es muy significativa debido a que sus valores de calor transferido en la actualidad se encuentran alrededor de los 16,5 MMBTU/hr, los cuales están por encima del calor transferido que se espera tenga por diseño, el cual es de 8,81 MMBTU/hr, por lo que la eficiencia de este equipo es actualmente mayor a la esperada por las condiciones de diseño.

Igualmente, en la **Figura 4.9** se puede observar que el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido poco a poco desde el año 2010, pero a pesar de esto ha sido una disminución poco pronunciada, presentando actualmente valores que se encuentran alrededor de los 53,29 Btu/pie².hr.°F, sólo un poco menor al coeficiente total esperado por diseño, el cual es 67,19 Btu/pie².hr.°F.



En la **Figura 4.10** se observa que el incremento del factor de ensuciamiento en este intercambiador de calor ha sido progresivo y poco acentuado, debido a que según los cálculos realizados el factor de ensuciamiento se encuentra actualmente en un valor aproximado de $0,0077 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$ y según el simulador PRO II el factor de ensuciamiento se encuentra actualmente en un valor aproximado de $0,0082 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$, los cuales son solamente un poco superior al factor de ensuciamiento esperado por diseño, el cual es $0,004 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$.

Adicionalmente, en la **Tabla 4.28**, se observa que la caída de presión para el lado tubo de este intercambiador se encuentra en 4,5 psig, cuyo valor es bastante aceptable y aún no se acerca a la caída de presión máxima permitida por el equipo para el lado tubo según su diseño, la cual es de 10 psig. Por lo tanto, se recomienda mantener el monitoreo progresivo de las condiciones de operación y de la eficiencia del intercambiador de calor 10-E-005, a fin de planificar su debido mantenimiento, que actualmente no necesita ser realizado.



Figura 4.8 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-005.

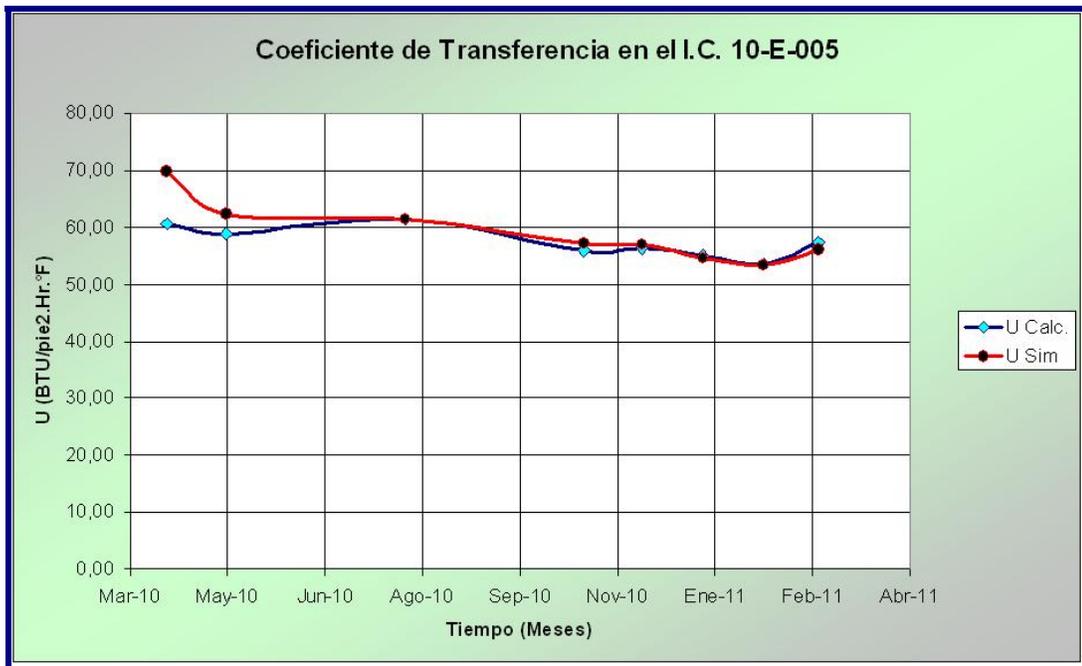


Figura 4.9 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-005.

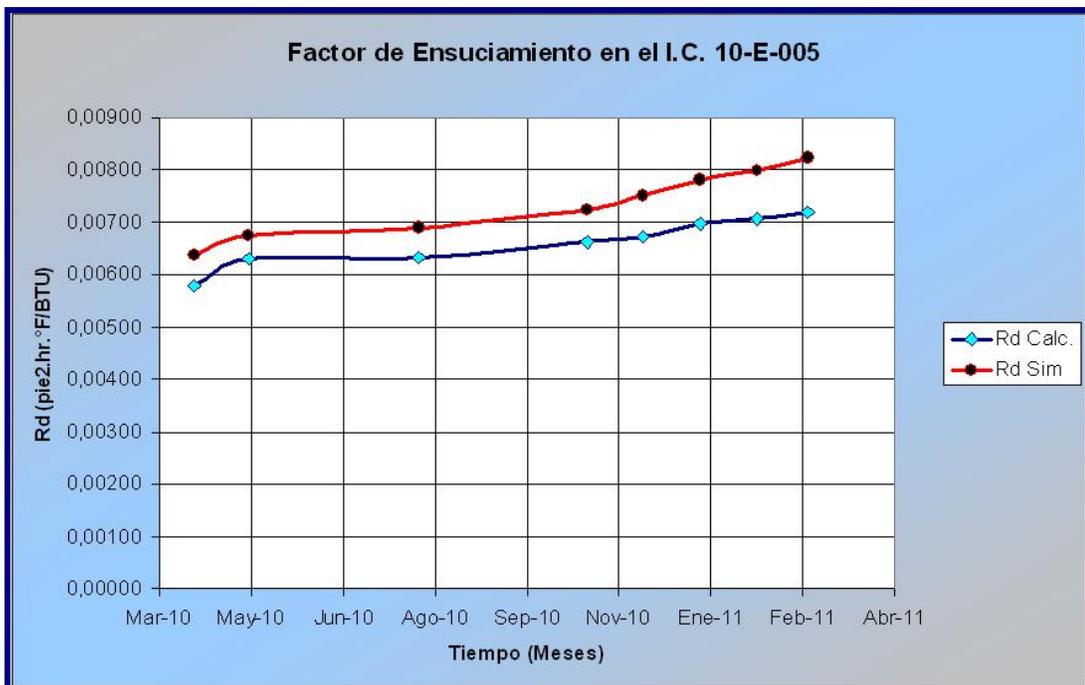


Figura 4.10 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-005.



4.3.4 Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-006 A-D

Estos intercambiadores de calor están dispuestos dos (2) pares de intercambiadores en serie colocados en paralelo y fueron evaluados como una sola unidad de transferencia de calor, es decir, como una unidad de dos intercambiadores de dos (2) pasos por el lado coraza y de ocho (8) pasos por el lado tubo colocados en paralelo, el cual intercambia calor entre el destilado liviano (25 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.

En la **Figura 4.11** se observa que el calor transferido a través de los intercambiadores 10-E-006 A-D, ha disminuido de forma progresiva, los valores de calor transferido se encuentran actualmente alrededor de los 7,3 MMBTU/hr según los cálculos realizados y alrededor de los 6,57 MMBTU/hr según los resultados del simulador PRO II, de igual manera ambos resultados son muy cercanos, además ambos valores demuestran que el calor transferido actualmente por estos equipos está por muy por debajo de calor que se espera por diseño, el cual es de 26,67 MMBTU/hr.

Al analizar la **Figura 4.12** se observó que el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido continuamente desde el año 2.010, mostrando en la actualidad valores de 19,5 Btu/pie².hr.°F para los cálculos y de 25,19 Btu/pie².hr.°F para la simulación con PRO II, los cuales están muy por debajo del coeficiente total esperado por diseño, el cual 46,05 Btu/pie².hr.°F.

En la **Figura 4.13** se observa que la tendencia de incremento que se presenta en el factor de ensuciamiento en estos intercambiadores de calor, el cual se encuentra actualmente en valores de 0,01178 pie².hr.°F/BTU según los cálculos realizados y de 0,01306 pie².hr.°F/BTU según la simulación, los cuales son mayores que el factor de ensuciamiento esperado por diseño, el cual es 0,007 pie².hr.°F/BTU.



Al observar la **Tabla 4.28**, encontramos que la caída de presión para el lado tubo de estos intercambiadores se encuentra en 16 psig, y este valor se acerca a la caída de presión máxima permitida por los equipos para el lado tubo según su diseño, la cual es de 20 psig. Por tanto, se recomienda llevar el mantenimiento preventivo a los intercambiadores de calor 10-E-006 A-D en el segundo semestre del año 2.011 con el objetivo de aumentar el calor transferido por estos equipos.

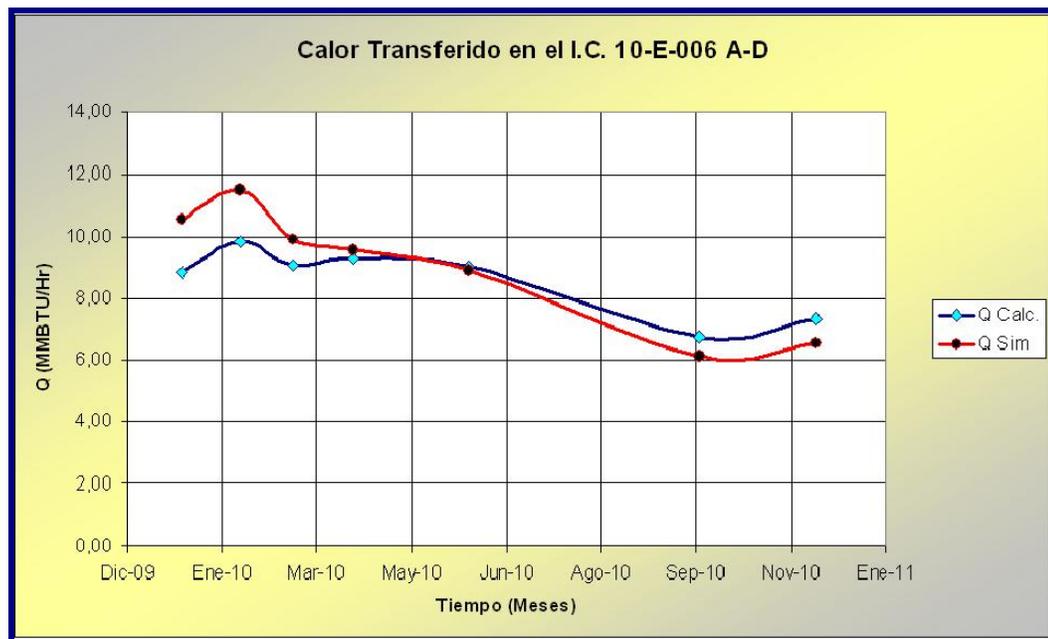


Figura 4.11 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-006 A-D.

4.3.5 Análisis de los Resultados de los Intercambiadores 10-E-007 A-D

Estos intercambiadores de calor están dispuestos dos (2) pares de intercambiadores en serie colocados en paralelo y fueron evaluados como una sola unidad de transferencia de calor, es decir, como una unidad de dos intercambiadores de dos (2) pasos por el lado coraza y de dieciséis (16) pasos por el lado tubo colocados en paralelo, el cual intercambia calor entre el MVGO (19-16 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.

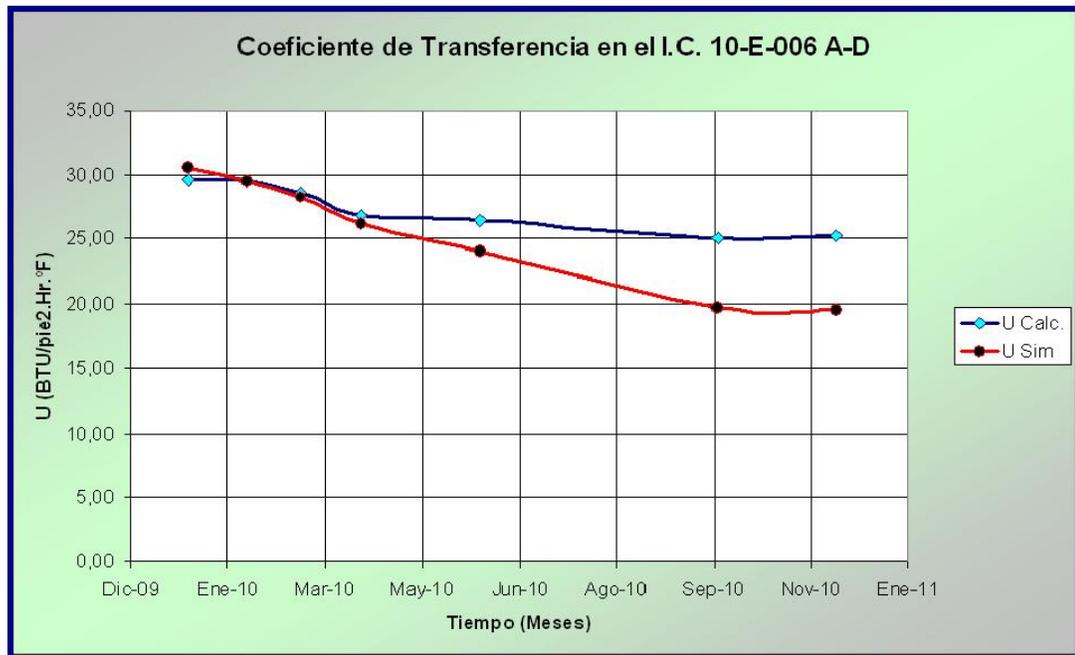


Figura 4.12 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-006 A-D.

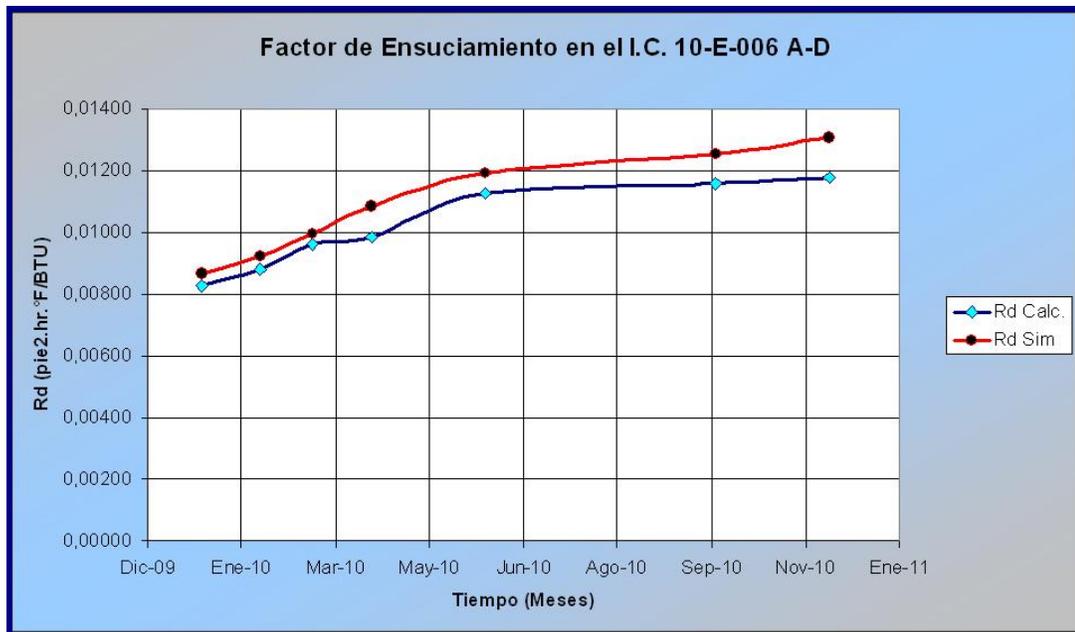


Figura 4.13 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-006 A-D.



Como se observa en la **Figura 4.14**, el calor transferido a través de los intercambiadores 10-E-007 A-D, ha disminuido acentuadamente desde el año 2.010, resultando que el calor transferido presenta actualmente valores de 9,26 MMBTU/hr según los cálculos realizados y alrededor de los 7,55 MMBTU/hr según los resultados del simulador PRO II, siendo estos resultados un poco diferentes, de igual forma reflejan que en la actualidad el calor transferido por estos equipos esta siendo mermado, y se encuentra por muy por debajo del valor de calor que se espera que transfieran por diseño, el cual es de 15,3 MMBTU/hr.

Como se puede observar en la **Figura 4.15**, el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido continua y progresivamente desde el año 2.010, presentando actualmente valores de 22,18 Btu/pie².hr.°F para los cálculos realizados y de 18,8 Btu/pie².hr.°F para la simulación con PRO II. Estos valores además de ser cercanos, nos demuestran que se alejan en gran medida del coeficiente total esperado por diseño, el cual 28,49 Btu/pie².hr.°F.

Finalmente, en la **Figura 4.16** es posible observar que la tendencia que presenta el factor de ensuciamiento en estos intercambiadores de calor, es de incrementarse progresivamente, presentando en la actualidad valores de 0,01468 pie².hr.°F/BTU según los cálculos realizados y de 0,01878 pie².hr.°F/BTU según la simulación con PRO II, estos valores son realmente mayores que el factor de ensuciamiento esperado por el diseño de los equipos, el cual es 0,009 pie².hr.°F/BTU.

Luego se observa la **Tabla 4.28** y encontramos que la caída de presión para el lado tubo de estos intercambiadores se encuentra en 15 psig, y este valor se acerca demasiado a la caída de presión máxima permitida por los equipos para el lado tubo según su diseño, la cual es de 16 psig. Por tanto, se recomienda llevar el mantenimiento preventivo y de limpieza a todos los intercambiadores de calor de la unidad 10-E-007 A-D en el segundo semestre del año 2.011 con el objetivo de aumentar el calor transferido por estos equipos y su eficiencia.



Figura 4.14 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-007 A-D.

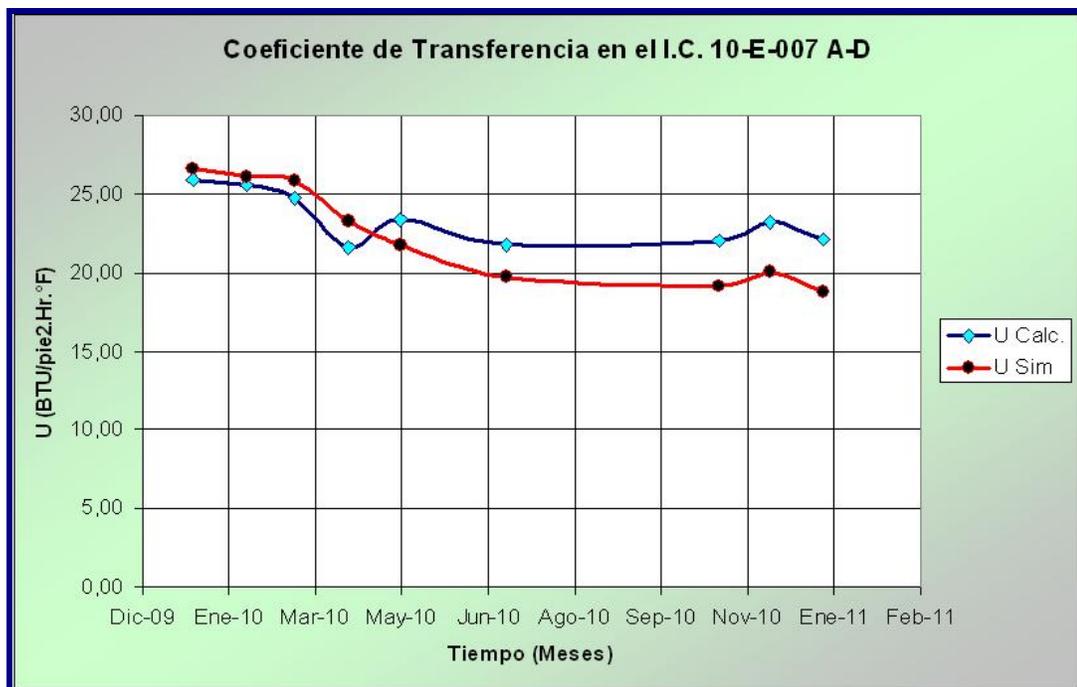


Figura 4.15 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-007 A-D.



Figura 4.16 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para los Intercambiadores 10-E-007 A-D.

4.3.6 Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-008

Este es un intercambiador de calor de flujo dividido en la coraza, y de cuatro (4) pasos por el lado de los tubos, por lo tanto fue evaluado tomando en cuenta que el flujo a través de la coraza es solamente la mitad del flujo total que llega a este equipo, el cual intercambia calor entre el destilado combinado (28-27 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza. Cuando se observa la **Figura 4.17** se encuentra que el calor transferido a en el intercambiador 10-E-008, ha ido disminuyendo gradualmente de forma leve, sin embargo, esta disminución no es significativa debido a que los valores de calor transferido para este equipo en la actualidad se encuentran alrededor de los 16,18 MMBTU/hr según los cálculos realizados, los cuales están por encima del calor transferido que se espera tenga este intercambiador por diseño, el cual es de 15,87 MMBTU/hr, por lo que la eficiencia de este equipo en la actualidad es mayor a la esperada según las condiciones de diseño.



También es posible observar en la **Figura 4.18**, que el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido lentamente desde el año 2.010, pero a pesar de esto, la declinación del coeficiente total es poco pronunciada, y presenta actualmente valores de 46,5 Btu/pie².hr.°F según los cálculos realizados y de 48,57 Btu/pie².hr.°F según la simulación con PRO II, ambos valores son muy cercanos y son solamente un poco menores al coeficiente total esperado por diseño, el cual es 51,96 Btu/pie².hr.°F. En la **Figura 4.19** se puede observar el incremento que presenta el factor de ensuciamiento en este intercambiador de calor, que ha sido progresivo y muy poco pronunciado, debido a que según los cálculos realizados el factor de ensuciamiento se encuentra actualmente en un valor aproximado de 0,00261 pie².hr.°F/BTU y según el simulador PRO II el factor de ensuciamiento se encuentra actualmente en un valor aproximado de 0,00292 pie².hr.°F/BTU, los cuales son menores que el factor de ensuciamiento por diseño se espera que tenga el equipo, el cual es 0,007 pie².hr.°F/BTU.

Para finalizar, en la **Tabla 4.28**, se observa que la caída de presión para el lado tubo de este intercambiador se encuentra en 5,5 psig, cuyo valor es bastante aceptable y aún no se acerca a la caída de presión máxima permitida por el equipo para el lado tubo según su diseño, la cual es de 10 psig. Por lo tanto, se recomienda mantener el monitoreo constante de las condiciones de operación y de la eficiencia del intercambiador de calor 10-E-008, a fin de planificar su debido mantenimiento, ya que actualmente no necesita ser realizado.

4.3.7 Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-009

Este es un intercambiador de calor de flujo dividido en la coraza, y de diez (10) pasos por el lado de los tubos, por lo tanto fue evaluado tomando en cuenta que el flujo a través de la coraza es solamente la mitad del flujo total que llega a este equipo, el cual intercambia calor entre HVGGO (14-12 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza.



Figura 4.17 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-008.

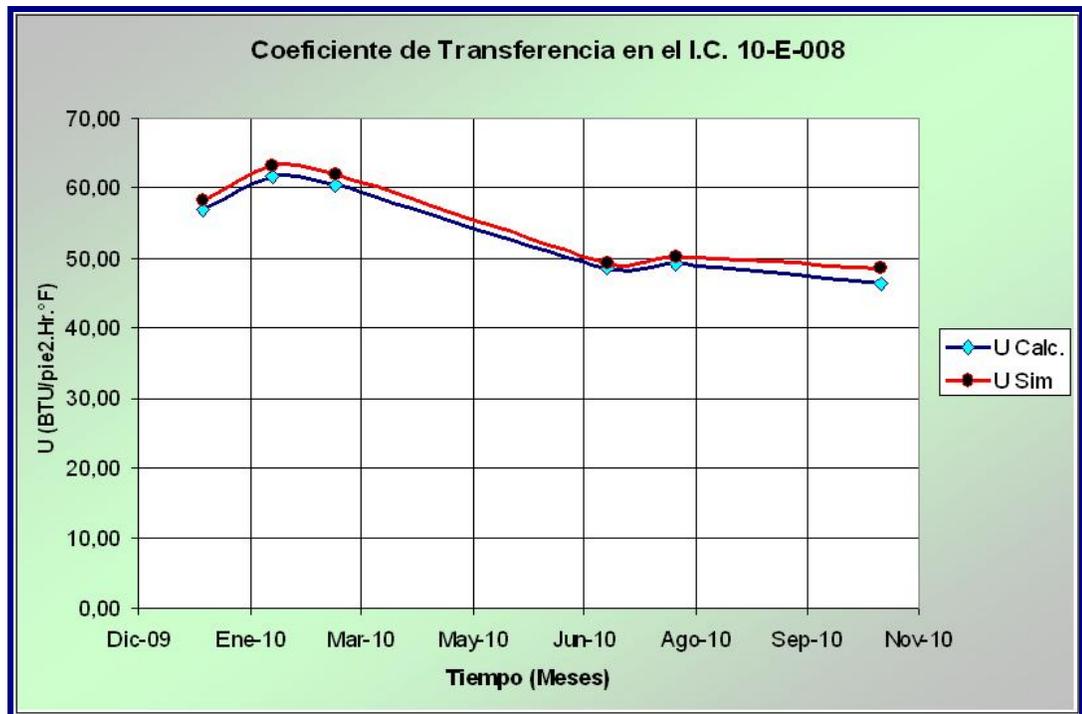


Figura 4.18 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-008.

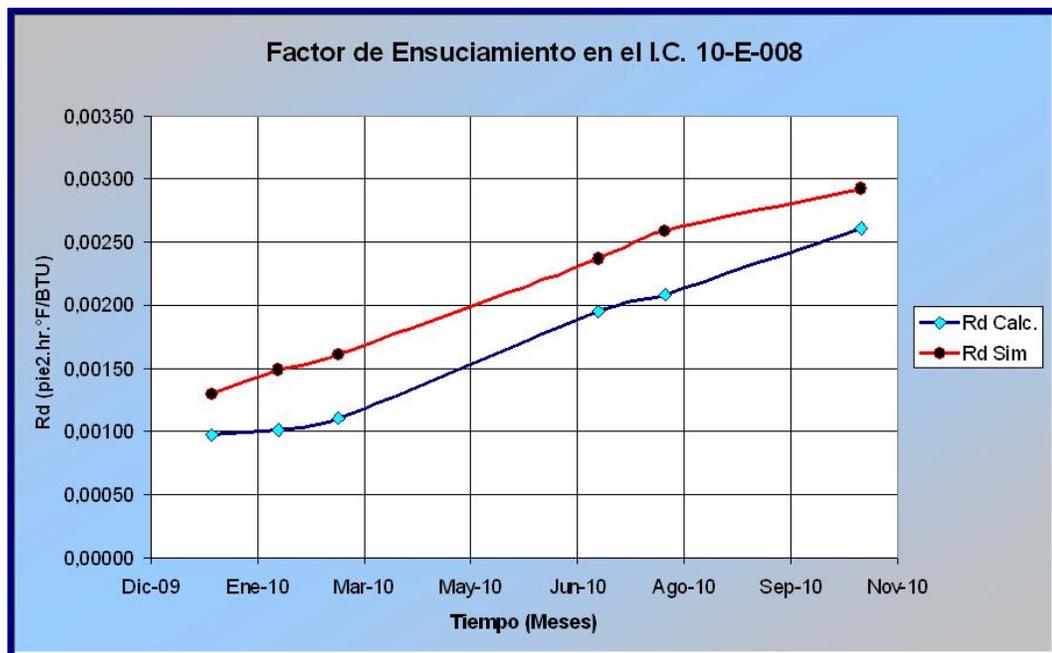


Figura 4.19 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-008.

En la **Figura 4.20** se encuentra que el calor transferido a través del intercambiador 10-E-009, ha disminuido continuamente de forma definitiva, debido a que ha disminuido significativamente y los valores de calor transferido en este equipo en la actualidad son de 5,52 MMBTU/hr según los cálculos realizados y de 5,61 MMBTU/hr según la simulación con PRO II, los cuales son demasiado bajos en comparación con el calor transferido que se espera tenga por diseño, el cual es de 23,06 MMBTU/hr, por lo que la eficiencia de este equipo esta seriamente afectada.

En la **Figura 4.21** se observa que el coeficiente total de transferencia de calor también ha disminuido de forma consistente desde el año 2.010, con una disminución pronunciada, y presenta valores en la actualidad de 16,27 Btu/pie².hr.°F según los cálculos realizados y de 16,34 Btu/pie².hr.°F según la simulación con PRO II, los cuales son casi iguales y ambos son mucho menores al coeficiente total esperado por diseño, el cual es 35,64 Btu/pie².hr.°F.



En la **Figura 4.22** se encuentra que el factor de ensuciamiento en este intercambiador de calor ha incrementado progresiva y continuamente de forma consistente, mostrando valores de ensuciamiento en la actualidad según los cálculos realizados de $0,03423 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$ y según el simulador PRO II de $0,03509 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$, los cuales están muy por encima del factor de ensuciamiento esperado por diseño para este equipo, el cual es $0,009 \text{ pie}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}/\text{BTU}$.

Finalmente, en la **Tabla 4.28**, se observa que la caída de presión para el lado tubo de este intercambiador de calor se encuentra en 23 psig, cuyo valor se acerca muchísimo a la caída de presión máxima permitida por el equipo para el lado tubo según su diseño, la cual es de 25 psig. Por lo tanto, se recomienda llevar el mantenimiento preventivo y de limpieza al intercambiador de calor 10-E-009 en el segundo semestre del año 2.011 con el objetivo de aumentar el calor transferido por estos equipos y su eficiencia que actualmente es demasiado baja.

4.3.8 Análisis de los Resultados del Intercambiador 10-E-010

Este es un intercambiador de calor de flujo dividido en la coraza, y de cuatro (4) pasos por el lado de los tubos, por lo tanto fue evaluado considerando que el flujo a través de la coraza es solamente la mitad del flujo total que llega a este equipo, el cual intercambia calor entre el destilado liviano (25 API) que fluye por los tubos y el crudo diluido (16-15 API) que fluye por la coraza. En la **Figura 4.23** se encuentra que el calor transferido a través del intercambiador 10-E-010, ha ido disminuyendo gradual y levemente, sin embargo, esta disminución no es tan acentuada y los valores de calor transferido en la actualidad son de $30,76 \text{ MMBTU/hr}$ según los cálculos realizados y de $29,68 \text{ MMBTU/hr}$ según la simulación con PRO II, los cuales están un poco por debajo del calor transferido que se espera tenga por diseño, el cual es de $40,29 \text{ MMBTU/hr}$.



Figura 4.20 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-009.

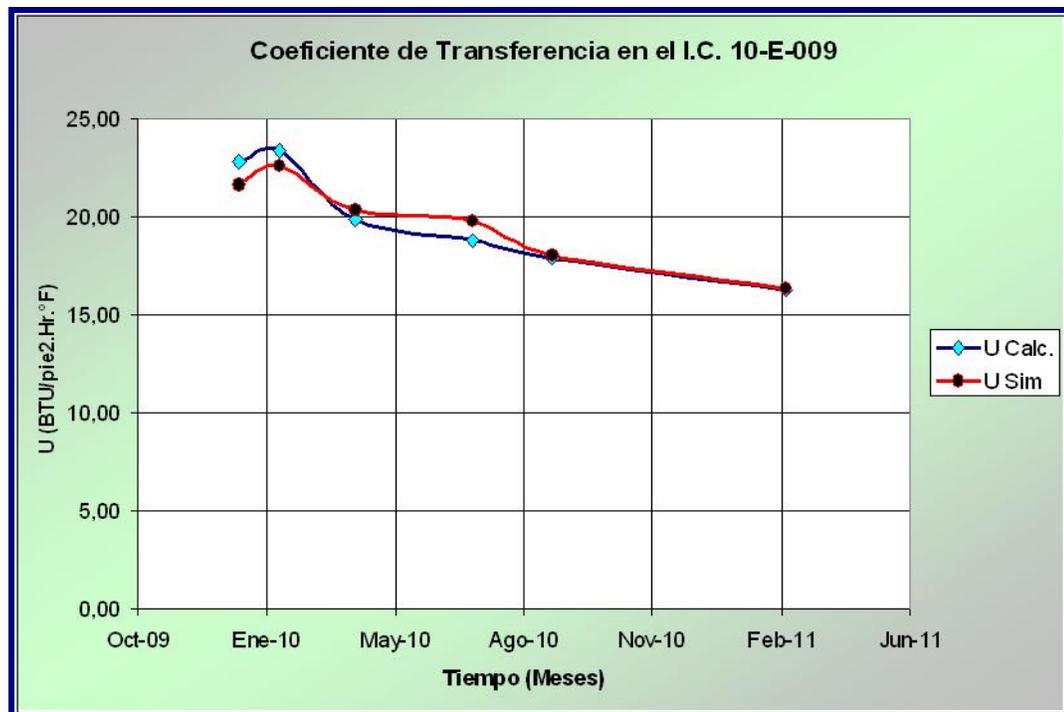


Figura 4.21 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-009.

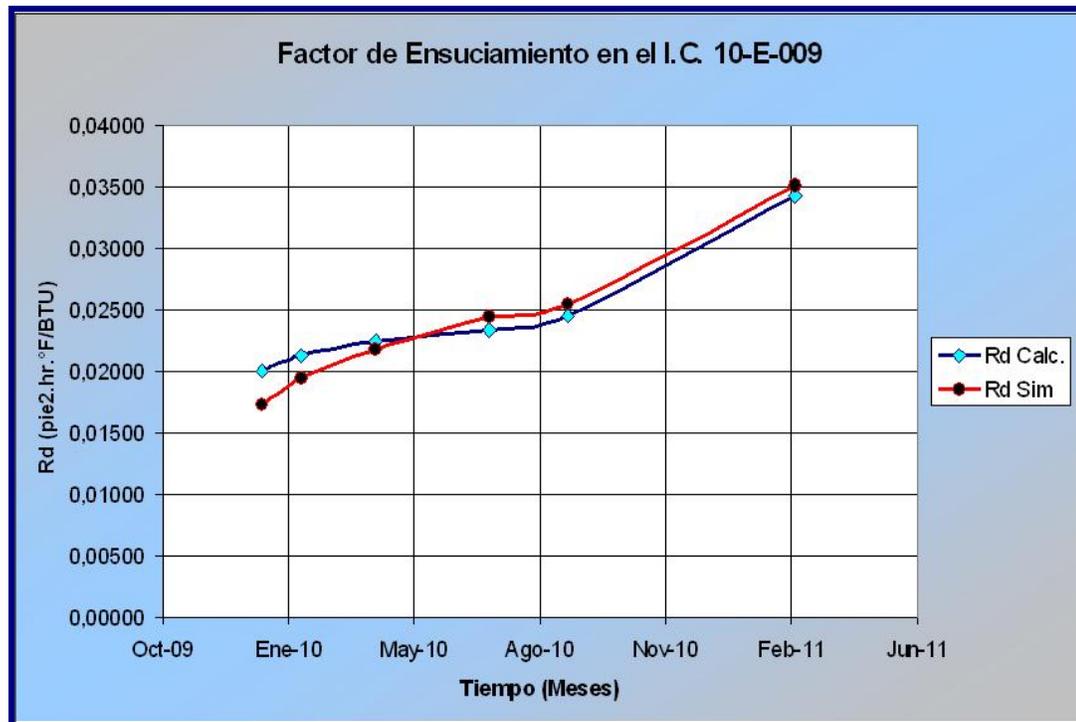


Figura 4.22 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-009.

De igual forma, en la **Figura 4.24** se observa que el coeficiente total de transferencia de calor para el intercambiador 10-E-010 también ha disminuido paulatinamente desde el año 2010; sin embargo ha sido de disminución poco pronunciada, que presenta actualmente de 30,42 Btu/pie².hr.°F según los cálculos realizados y de 32,45 Btu/pie².hr.°F según la simulación con PRO II, ambos menores al coeficiente total esperado por diseño, el cual es 50,19 Btu/pie².hr.°F. Y en la **Figura 4.25** se observa que el factor de ensuciamiento en este intercambiador de calor se ha incrementado de manera progresiva y poco acentuada, debido a que según los cálculos realizados el factor de ensuciamiento es actualmente de 0,00797 pie².hr.°F/BTU y según el simulador PRO II es de 0,00843 pie².hr.°F/BTU, los cuales son muy aproximados entre sí, y son solamente un poco superiores al factor de ensuciamiento esperado por diseño, el cual es 0,007 pie².hr.°F/BTU.



Para finalizar, en la **Tabla 4.28**, se observa que la caída de presión para el lado tubo del intercambiador 10-E-010 se encuentra en 7,5 psig, cuyo valor es bastante aceptable y aún no se aproxima tanto a la caída de presión máxima permitida por el equipo para el lado tubo según su diseño, la cual es de 10 psig. Por tales motivos, se recomienda mantener el monitoreo progresivo de las condiciones operacionales y de la eficiencia del intercambiador de calor 10-E-010, a fin de planificar su debido mantenimiento, ya que actualmente no necesita ser realizado.



Figura 4.23 Resultados del Calor Transferido obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-010.



Figura 4.24 Resultados del Coeficiente Total obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-010.

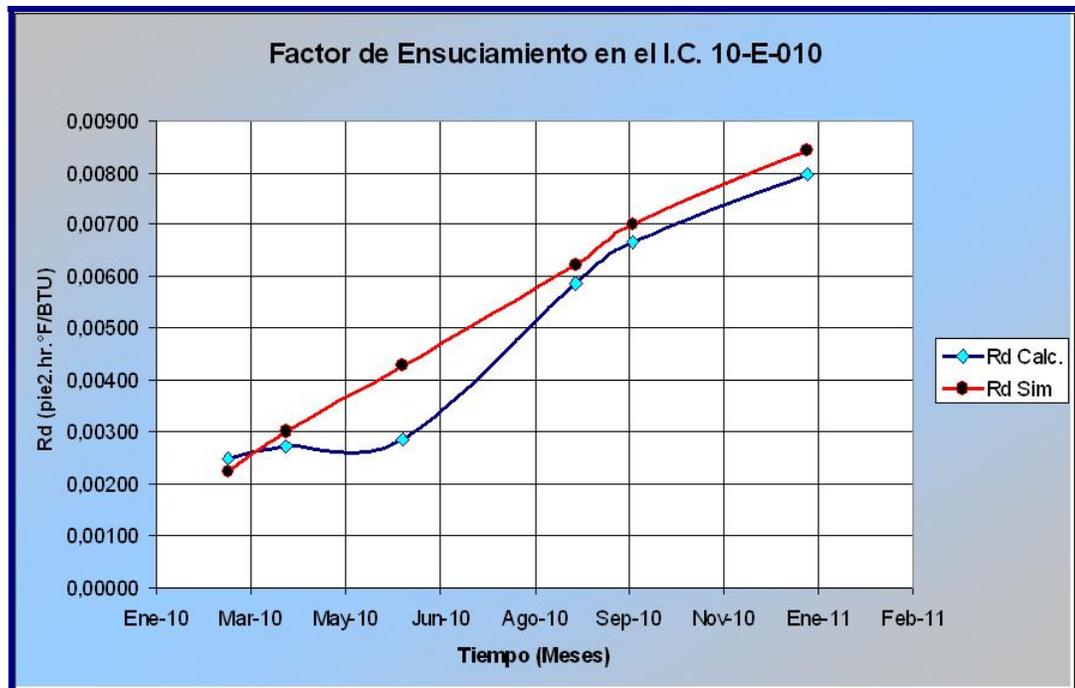


Figura 4.25 Resultados del Factor de Ensuciamiento obtenidos a través del simulador PRO II y de los cálculos para el Intercambiador 10-E-010.

**NOTA:**

Los resultados para la evaluación térmica de calor transferido, coeficiente total y factor de ensuciamiento actual para todos los intercambiadores de calor, obtenidos mediante los cálculos realizados presentan diferencias significativas con respecto a los obtenidos con el simulador PRO II versión 7.0, debido a que en el procedimiento de cálculo se emplearon correlaciones específicas para determinar las propiedades y características de los fluidos que intercambian calor en estos equipos (crudo y fracciones de petróleo), mientras que el simulador PRO II emplea ecuaciones de estado que determinan las propiedades de los fluidos de forma general y los resultados obtenidos mediante este medio solamente dan una aproximación de la realidad de los equipos, pero los resultados más exactos son aquellos obtenidos mediante el procedimiento de cálculo.

**4.4 PROPONER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA
PREVENTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE ACUERDO
A LAS PROYECCIONES DE SUS COMPORTAMIENTOS HIDRÁULICOS Y
TÉRMICOS DURANTE SU TIEMPO EN OPERACIÓN.**

Debido a la complejidad que representa la predicción del comportamiento del calor transferido y del factor de ensuciamiento en los intercambiadores de calor, se propone que se mantenga un monitoreo permanente de las condiciones de proceso y de las características composicionales de los fluidos en estos intercambiadores de calor, con el propósito de diagnosticar, a través de las hojas de cálculo realizadas o a través del simulador PRO II, las condiciones del factor de ensuciamiento y del calor transferido en los equipos mensualmente, y lograr así detectar de forma preventiva las pérdidas de transferencia de calor debidas al ensuciamiento, o debidas a otros problemas que se pueden presentar en estos intercambiadores y que a través de el monitoreo



continuo pueden ser detectados, tales como: erosión, corrosión, derrame interno de fluidos por fugas, desprendimiento de piezas, entre otros.

En la **Tabla 4.45** se observa el programa de mantenimiento y limpieza preventiva propuesto para los intercambiadores de calor pertenecientes al Tren de Precalentamiento en Frío, tomando como premisa aquellos equipos que actualmente presentan deficiencias en la transferencia de calor y los más elevados factores de ensuciamiento de acuerdo a sus características de diseño.

Los intercambiadores 10-E-009 y 10-E-006 A-D son los que presentan la mayor urgencia de mantenimiento y limpieza preventivo, el cual debe ser preferiblemente realizado en el tercer trimestre del año 2011, debido a que actualmente presentan deficiencia en el calor transferido de 76% y 74% con respecto a su diseño respectivamente, debido al elevado ensuciamiento que poseen actualmente estos equipos, el 10-E-009 de casi 400% y los 10-E-006 A-D de aproximadamente 70% por encima del factor de ensuciamiento esperado por el diseño de los mismos.

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA		
INTERCAMBIADOR	Tiempo Estimado para Mantenimiento	Observaciones
10-E-009	3er trimestre de 2011	Intercambiadores con mayor pérdida de calor y elevado ensuciamiento.
10-E-006 A-D	3er trimestre de 2011	
10-E-007 A-D	Oct 2011- Mar 2012	Intercambiadores con pérdida de calor moderada y elevado ensuciamiento.
10-E-004 A/B/C	Oct 2011- Mar 2012	
10-E-001 A/B/C	-----	Intercambiadores que deben continuar siendo evaluados para detectar futuras deficiencias y establecer fecha de mantenimiento.
10-E-010	-----	
10-E-005	-----	
10-E-008	-----	

Tabla 4.45 Programa de Mantenimiento y Limpieza Preventivo del Tren de Precalentamiento en Frío.



Seguidos por los intercambiadores 10-E-007 A-D y 10-E-004 A/B/C, que presentan deficiencias de calor transferido de 45% y 23% respectivamente con respecto a sus diseños, y altos ensuciamientos, de aproximadamente 80% y 230% por encima del factor de ensuciamiento esperado para el diseño de estos equipos, por lo que cuyos mantenimientos deben realizarse entre el último trimestre del año 2.011 o más tardar en el primer trimestre del año 2.012.

Los intercambiadores de calor 10-E-001 A/B/C no presentan deficiencia de calor transferido de acuerdo a su capacidad por diseño, sin embargo su ensuciamiento actual está 400% por encima del ensuciamiento esperado por el diseño de estos equipos, y el intercambiador 10-E-010 no presenta un factor de ensuciamiento muy diferente al de su diseño, con apenas una diferencia del 15% por encima; sin embargo, el calor que transfiere actualmente se encuentra 25% por debajo de lo esperado por diseño, por esta razón se recomienda mantener un monitoreo minucioso de las condiciones de estos intercambiadores de calor con el propósito de detectar posibles problemas operacionales y establecer la necesidad de la realización del mantenimiento y limpieza preventivo para estos equipos.

Finalmente, los intercambiadores 10-E-005 y 10-E-008 se encuentran en la actualidad transfiriendo más calor que lo que se espera de estos equipos de acuerdo a sus condiciones de diseño, el primero con un ensuciamiento levemente superior al esperado según su diseño y el segundo presenta un ensuciamiento menor al esperado según su diseño. Por estas razones se recomienda mantener también un seguimiento de estos equipos, debido a que estos están sobrepasando su capacidad de diseño para compensar las pérdidas de calor de los otros equipos del Tren de Precalentamiento en Frío, además se debe monitorear su comportamiento térmico y su ensuciamiento a futuro para establecer cuando la necesidad de la realización de un mantenimiento y limpieza preventivo en estos equipos.



CONCLUSIONES

- ☞ Las variables operacionales requeridas para la evaluación de los intercambiadores de calor son: temperatura de entrada, temperatura de salida, presión de entrada, presión de salida y flujo, tanto para el Lado Tubo como para el Lado Coraza, y las características composicionales de los fluidos involucrados.
- ☞ El incremento del ensuciamiento en los intercambiadores de calor esta sujeto a diversas causas, sin embargo la mayoría de ellas se deben a variaciones de las características composicionales de los fluidos, así como la cantidad de sales y contaminantes presentes en los mismos.
- ☞ Los resultados obtenidos de la evaluación de las condiciones de diseño de los intercambiadores de calor, demostraron la representatividad de los valores obtenidos en la evaluación de las condiciones actuales con respecto a la realidad de estos equipos.
- ☞ El Tren de Pre calentamiento en Frío está conformado por ocho (8) unidades de intercambiadores de calor, de los cuales las unidades de intercambiadores 10-E-009, 10-E-006 A-D, 10-E-007 A-D y 10-E-004 A/B/C, son los que presentan mayores pérdidas de calor transferido causado por elevados ensuciamientos.
- ☞ Los intercambiadores de calor de las unidades 10-E-001 A/B/C, 10-E-010, 10-E-005 y 10-E-008 necesitan mantenerse bajo monitoreo para continuar analizando su comportamiento térmico e hidráulico, en base al calor transferido, el factor de ensuciamiento y la caída de presión en el Lado Tubo.



RECOMENDACIONES

- ☞ Mantener un monitoreo constante y continuo de las condiciones de proceso y de las variaciones composicionales de los fluidos de los intercambiadores de calor del Tren de Pre calentamiento en Frío.
- ☞ Evaluar mensualmente el calor transferido y el factor de ensuciamiento de los intercambiadores de calor para detectar variaciones en su eficiencia y lograr detectar así la necesidad de mantenimiento y limpieza preventivo, y otros posibles problemas operacionales que se presenten en los equipos en el futuro.
- ☞ Al realizar el mantenimiento y limpieza de los intercambiadores de calor, llevar a cabo un muestreo de los sólidos depositados o incrustados en los mismos, con la finalidad de analizar y detectar las posibles fuentes del ensuciamiento y poder así tomar acciones correctivas.
- ☞ Colocar los manómetros con sus respectivas conexiones de forma permanente o sistematizar con transmisores de presión, en la entrada y la salida del Lado Tubo de los intercambiadores de calor del Tren de Pre calentamiento en Frío, a fin de facilitar la constante evaluación de estos equipos.
- ☞ Realizar una evaluación contante de los intercambiadores de calor pertenecientes a los Trenes de Pre calentamiento en Caliente y de Torre de Vacío de la Unidad de Crudo, así como en el resto de los intercambiadores de calor en las otras unidades del Mejorador de PDVSA Petropiar.



BIBLIOGRAFÍA

- 1) GÓMEZ M., **“Evaluación Térmica e Hidráulica del Tren de Pre calentamiento de Crudo y de la Vida Remanente de los Tubos del Horno de Crudo de la Refinería San Roque PDVSA, Edo. Anzoátegui.”**, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui - Venezuela (2001).
- 2) RODRÍGUEZ A. Y RAFAEL O., **“Evaluación de los intercambiadores de calor pertenecientes al tren de procesos A, de la planta de extracción San Joaquín, Edo. Anzoátegui.”**, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui - Venezuela (2006).
- 3) CEDEÑO A., **“Evaluación del Tren de Pre calentamiento de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de la Refinería Puerto la Cruz a Diferentes Condiciones de Operación”**, Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui - Venezuela (2004).
- 4) ALFONSO Y ASOCIADOS., **“Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven. Volumen I: Descripción General Plantas de Procesos.”**, PETROLERA AMERIVEN (Actual Pdvsa Petropiar), Caracas – Venezuela. (2004).
- 5) PETROLERA AMERIVEN C.A., **“Descripción del Sistema de Procesos de la Unidad de Crudo (Unidad 10)”**, Manual de Procesos, Proyecto de Mejoramiento de Crudo, Grupo Alvica, Caracas – Venezuela (2001).
- 6) D.Q. KERN Y ASOCIADOS., **“Procesos de Transferencia de Calor”**, Trigésima Primera Edición. MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., México (1999).
- 7) PERRY R. **“Manual del Ingeniero Químico”**, Octava Edición. MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC., México (2008).



- 8) TEMA INC., “**Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association**”, Eighth Edition, Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc., Broadway, New York-United States of America (1999).
- 9) KAKAÇ, S. & LIU, H., “**Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design**”. Department of Mechanical Engineering, University of Miami. CRC Press. Miami - United States of America (1995).
- 10) SCENA N., “**Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos**”, Editorial Prentice Hall Hispanoamérica S.A., México (1999).
- 11) PRO II. “**Guía del Usuario 7.0**”, SIMSCI, Simulation Sciences Inc., United States of America (1998).
- 12) WAUQUIER JEAN-PIERRE., “**El Refino del Petróleo**”, Ediciones Díaz de Santos, Versión Española, Doña Juana de Castilla, Madrid- España (2004).
- 13) AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, “**Technical Data Book – Petroleum Refining**”, Sixth Edition, American Petroleum Institute Publishing Services, Washington D.C. - EE.UU. (1997).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADOS, TESIS Y ASENSO:

TÍTULO	EVALUACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR PERTENECIENTES AL TREN DE PRECALENTAMIENTO EN FRÍO DE LA UNIDAD DE CRUDO DEL MEJORADOR PETROPIAR EN EL COMPLEJO JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Navarro J., Juan Pablo J.,	CVLAC: 18.940.007 E MAIL: nauj14navarro@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Transferencia de Calor, Factor de Ensuciamiento, Simulador de Procesos, Mejorador Petropiar, Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza, Tren de Precalentamiento.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADOS, TESIS Y ASENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas.	
	Ingeniería de Petróleo.

RESUMEN (ABSTRACT):

El siguiente trabajo contempla la evaluación de los intercambiadores de calor pertenecientes al Tren de Precalentamiento en Frío de la Unidad de Crudo del Mejorador de PDVSA Petropiar, para lo cual se creó un modelo de simulación con el software Pro II versión 7.0 y una hoja de cálculo con un procedimiento. Inicialmente se validaron los resultados de factor de ensuciamiento y de calor transferido en la evaluación de los datos de diseño de los equipos. Posteriormente, se introdujeron los datos operacionales en los modelos de simulación y en las hojas de cálculo con el fin de obtener los valores de calor transferido y del factor de ensuciamiento de cada intercambiador desde el año 2.010 hasta la actualidad. Así mismo, se tomaron mediciones de las presiones de entrada y de salida de ambos lados para todos los equipos para verificar el comportamiento de estas unidades. Esto permitió conocer que los intercambiadores de calor 10-E-009, 10-E-006 A-D, 10-E-007 A-D y 10-E-004 A/B/C, tienen un bajo rendimiento en el proceso de transferencia de calor debido al elevado factor de ensuciamiento que presentan, los cuales sobrepasan aproximadamente en 400%, 70%, 80% y 230% respectivamente los valores de ensuciamiento esperados por el diseño de estos equipos, y los valores de calor transferido actualmente presentan deficiencias de 76%, 72%, 45% y 23% respectivamente para cada uno de estos equipos con respecto al calor que se espera transfieran por diseño. Por lo cual se recomendó realizar el mantenimiento preventivo inmediato de los intercambiadores de calor mencionados.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADOS, TESIS Y ASENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Noel Guape	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
	CVLAC:	13.547.875			
	E_MAIL	noel.guape@gmail.com			
	E_MAIL				
Rayda Patiño	ROL	CA (X)	AS	TU	JU
	CVLAC:	11.833.699			
	E_MAIL	raydapatino@gmail.com			
	E_MAIL				
Rafael Barrueta	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
	CVLAC:	6.961.032			
	E_MAIL	rafaelbarrueta@cantv.net			
	E_MAIL				
Gabriel Guzmán	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
	CVLAC:	8.290.101			
	E_MAIL	rondonje@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	06	23
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADOS, TESIS Y ASENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Evaluación de los intercambiadores .doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I
J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero de Petróleo.

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado.

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Petróleo.

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente / Núcleo Anzoátegui.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADOS, TESIS Y ASENSO:

DERECHOS

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario”.

Juan Pablo J. Navarro J.

AUTOR

Ing. Rayda Patiño
ASESOR
ACADEMICO

Ing. Rafael Barrueta
JURADO

Ing. Gabriel Guzmán
JURADO

Ing. Rayda Patiño

POR LA SUBCOMISION DE TESIS