

**ESTUDIO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORTOXILENO EN LA
U1500 DE LA PLANTA AROMÁTICOS DE LA GERENCIA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA ST1504 UTILIZANDO
ASPEN HYSYS V8.4**

MIGUEL ANGEL AGUIRRE REINA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORTOXILENO EN LA
U1500 DE LA PLANTA AROMÁTICOS DE LA GERENCIA REFINERÍA
BARRANCABERMEJA MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA ST1504 UTILIZANDO
ASPEN HYSYS V8.4**

MIGUEL ANGEL AGUIRRE REINA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Química

Dirigido por:

Carlos Jesús Muvdi Nova

Ing. Químico, M.Sc, Ph.D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios

Por permitirme compartir este logro con mi familia y brindarme la salud para disfrutarlo junto a ellos, este logro es gracias a Él.

A la memoria de mi amada madre Blanca Lilia,

Ejemplo de dedicación, valores y fortaleza y sobre todo por su inmenso amor, este logro es por ti.

A mi adorada esposa Sandra,

Por ser mi soporte en este camino y brindarme su amor y compañía, este logro es para disfrutarlo contigo.

A mis dos hermosas hijas, Ana Sofía y Alejandra,

Por ser el motor de mi vida y con el deseo de ser el mejor ejemplo para ellas, este logro es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme tanto en mi vida personal como profesional y académica.

A mis padres, por ser mi ejemplo de amor, dedicación, esfuerzo y sacrificio.

A mi esposa y mis hijas, por apoyarme en este esfuerzo y ser mi motivación día a día.

A mi director de tesis el Ingeniero Carlos Muvdi, por orientarme hacia la excelencia académica

A mis maestros de la Universidad Industrial de Santander, por compartirme sus conocimientos y experiencias en este innovador programa.

A la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL, por su apoyo económico en este proceso y el convencimiento en la necesidad del desarrollo profesional de los trabajadores.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PROBLEMATICA Y JUSTIFICACIÓN	20
2. OBJETIVOS.....	24
3. MARCO CONCEPTUAL	25
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	28
3.2. SIMULACIÓN EN HYSYS	33
3.3. MODELOS TERMODINÁMICOS.....	35
4. METODOLOGÍA.....	39
4.1. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE LA ST1504 EN ASPEN HYSYS	39
4.1.1. Selección de casos de operación.	39
4.1.2. Selección de modelos termodinámicos.....	39
4.1.3. Datos de operación.....	40
4.1.4. Simulación y validación en estado estacionario.....	40
4.1.5. Análisis en estado estacionario en la torre ST1504.	41
4.2. SIMULACIÓN EN ESTADO DINÁMICO DE LA ST1504 EN HYSYS	42
4.2.1. Simulación en estado dinámico.	42
4.2.2. Análisis en estado dinámico de la ST1504 con las estrategias de control actuales.	43

4.2.3. Análisis en estado dinámico de la ST1504 con la estrategia de control propuesta.....	43
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
5.1. MODELOS DE OPERACIÓN Y RECOPIACIÓN DE DATOS.....	45
5.1.1. Criterios de corrección de flujos volumétricos.....	47
5.2. DISEÑO DEL SIMULADOR DE LA ST1504 EN ESTADO ESTACIONARIO UTILIZANDO ASPEN HYSYS ®.....	52
5.2.1. Verificación del simulador de la ST1504 en estado estacionario utilizando Aspen HYSYS ®.....	57
5.3. ESTUDIO DE LA RESPUESTA ANTE PERTURBACIONES EN ESTADO ESTACIONARIO DE LA ST1504.....	61
6. SIMULACIÓN DE LA ST1504 EN ESTADO DINÁMICO.....	75
6.1. DISEÑO DE SIMULACIÓN EN ESTADO DINÁMICO UTILIZANDO ASPEN HYSYS ®.....	75
6.2. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ST1504.....	80
6.2.1. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación en la temperatura en el fondo de la ST1504.....	80
6.2.2. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación del reflujo en la ST1504.....	90
6.2.3. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación de la temperatura de fondo con control de la temperatura de cima, mediante manipulación del reflujo en la ST1504.....	99
7. CONCLUSIONES.....	108
8. RECOMENDACIONES.....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
BIBLIOGRAFÍA.....	114

ANEXOS.....115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vista superior de Planta de Aromáticos dentro de la Refinería Barrancabermeja.	25
Figura 2. Gráfica de equilibrio: a) p-Xileno y Tolueno; b) p- Xileno y Ortóxileno...27	27
Figura 3. Esquemático U1500 Fraccionamiento, Planta de Aromáticos.	30
Figura 4. Esquemático de las torres ST1504 y ST1505 de la Unidad U1500.	31
Figura 5. Lazos de control comúnmente utilizados para controlar una torre de destilación.....	32
Figura 6. Perspectiva global de la metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos.	35
Figura 7. Metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos para Sistema Polar sin electrolitos.....	36
Figura 8. Metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos para sistema en fase vapor.....	37
Figura 9. Metodología para selección modelo termodinámico.	38
Figura 10. Metodología para selección modelo termodinámico para sistema No Polar.	38
Figura 11. Metodología para selección modelo termodinámico para sistema Polar.	38
Figura 12. Composición de la carga a U1500 (%p/p) y desviación estándar de cada componente para los tres casos definidos.	54
Figura 13. Diseño final en el simulador en estado estable de la ST1504.....	57
Figura 14. Composición del destilado (%p/p) para el caso 1, real y obtenida por simulación utilizando los tres paquetes termodinámicos.	58

Figura 15. Composición del producto de fondo (% p/p) para el Caso 1 y el resultado de los simuladores con los tres paquetes termodinámicos.	59
Figura 16. Temperaturas de cima y fondo para el Caso 1 y el resultado de los simuladores con los tres paquetes termodinámicos.	60
Figura 17. Variación en las composiciones de producto de cima (contenido de ortoxileno) y fondo (contenido de Xilenos) de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD. Caso 1.	63
Figura 18. Variación en las composiciones de producto de cima y fondo de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.	64
Figura 19. Variación en las composiciones de producto de cima y fondo de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.	65
Figura 20. Variación de las pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de xilenos (para y meta) en ortoxileno producto, Caso 1 por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.	66
Figura 21. Variación de las pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de xilenos (para y meta) en ortoxileno producto, Caso 2, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.	67
Figura 22. Variación de pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de PMxilenos en Ortoxileno producto, Caso 3, por efecto de variación de temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.	67
Figura 23. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo de 360°F fija. Caso 1.	71
Figura 24. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 358°F fija. Caso 2.	71
Figura 25. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 363°F fija. Caso 3.	72
Figura 26. Simulación en estado dinámico de ST1504.	78

Figura 27. Respuesta de las variables controladas ante un incremento de 3°F en el <i>Set Point</i> de la temperatura de fondo de la ST1504, a) Temperatura en el fondo TIC1528. b) Nivel en el condensador LIC1517.	82
Figura 28. Respuesta de la cascada de control de nivel ante un incremento de 3°F en el <i>Set Point</i> de la temperatura de fondo de la ST1504 a) Nivel en el rehervidor LIC1513 (con zoom los 10 primeros minutos. b) Flujo de fondo de salida FIC1512.	85
Figura 29. Respuesta de las variables ante un incremento de 3°F en el <i>Set Point</i> de la temperatura de fondo de la ST1504 a) Flujo de salida de destilado (BPD) b) Contenido ortoxileno en destilado de ST1504 (%p/p) c) Calor en el rehervidor (BTU/h).	88
Figura 30. Respuesta de las variables ante un incremento de reflujo a 5400 BPD hacia ST1504 a) Respuesta FIC1514, control de reflujo. B) Temperatura en el fondo TIC1528. C) Respuesta nivel en el condensador LIC1517.	92
Figura 31. Respuesta de la cascada de control de nivel ante un incremento de reflujo de la ST1504 a) Nivel en el rehervidor (con zoom los 10 primeros minutos. B) Flujo de salida del fondo de la ST1504.	94
Figura 32. Respuesta de las variables ante un incremento a 4500 BPD de reflujo hacia ST1504. A) Contenido de ortoxileno en destilado de ST1504 (Fracción). B) Calor en el rehervidor (BTU/h).	96
Figura 33. Diseño simulación dinámica ST1504 con nuevo controlador.	101
Figura 34. Prueba escalón para determinar ganancia de controlador de cima a) Variación de flujo FIC1514, control de reflujo. b) Variación en temperatura de cima ST1504.	102
Figura 35. Incremento de temperatura de fondo TIC1528: a) Respuesta minuto 950 a 1450, b) Respuesta minuto 950 a 1050.	104
Figura 36. Respuesta del controlador de temperatura de cima ante el incremento de la temperatura de fondo de ST1504.	106

Figura 37. Respuesta de las variables ante el incremento de la temperatura de fondo, con control automático de la temperatura de cima. a) Flujo de reflujo hacia ST1504 (BPD). b) Pérdidas (Contenido de ortoxileno en destilado, ppm). 107

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composiciones de los productos.....	26
Tabla 2. Composición típica (%p/p y en BPD) de las corrientes de la ST1504.	29
Tabla 3. Composiciones de carga en los tres casos estudiados.	46
Tabla 4. Valores de desviación en medición de flujos volumétricos.	48
Tabla 5. Datos promedio Ortóxileno producto mayo 2015 a febrero 2016.	49
Tabla 6. Condiciones de carga a unidad U1500.....	50
Tabla 7. Cromatógrafos en línea.	51
Tabla 8. Variables en las torres ST1504 y ST1505.	51
Tabla 9. Parámetros de calidad Ortóxileno.	52
Tabla 10. Composición de carga a ST1504 (%p/p) para los tres casos definidos analizados en el periodo entre el 12 de mayo de 2015 y 13 de febrero del 2016. .	54
Tabla 11. Condiciones de diseño ST1504 programas en el simulador.....	55
Tabla 12. Valores promedio de las principales variables de operación de la ST1504 en los tres casos determinados.....	56
Tabla 13. Comparación de variables de proceso y resultados de las simulaciones en estado estable para el caso 1.	62
Tabla 14. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortóxileno, Caso 1.	69
Tabla 15. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortóxileno, caso 2.....	69
Tabla 16. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortóxileno, Caso 3.	70
Tabla 17. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortóxileno. Caso 1.	73

Tabla 18. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortoxileno. Caso 2.	73
Tabla 19. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortoxileno. Caso 3.	74
Tabla 20. Variables de proceso de la simulación de la ST1504, en estado estacionario.....	75
Tabla 21. Variables de proceso de la simulación de la ST1504 bajo las nuevas condiciones de presión en el rehervidor.	76
Tabla 22. Parámetros de sintonización de los controladores de la T1504.	77
Tabla 23. Cambio en las variables ante incremento en el Set Point de la temperatura de fondo de la ST1504.	90
Tabla 24. Valores de ajuste controladores ST1504 a) Controlando 4100 BPD de reflujo. B) Controlando 4500 BPD de reflujo.	98
Tabla 25. Parámetros de sintonización del controlador de temperatura de cima (TIC-CIMA).....	103

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Casos de operación.....	115
Anexo B. Condiciones simulación estado estable ST1504.....	117
Anexo C. Condiciones típicas de operación ST1504	118
Anexo D. Curvas de operación para los tres casos	119

RESUMEN

TITULO:

“ESTUDIO PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORTOXILENO EN LA U1500 DE LA PLANTA AROMÁTICOS DE LA GERENCIA REFINERÍA BARRANCABERMEJA MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA ST1504 UTILIZANDO ASPEN HYSYS V8.4**”

AUTORES: AGUIRRE REINA, Miguel Ángel**

PALABRAS CLAVE: AROMATICOS, BTX, DESTILACION, HYSYS, ORTOXILENO

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se evaluó una columna separadora de xileno de la planta de Aromáticos de la refinería de Barrancabermeja, al igual que su estrategia de control actual. Para desarrollar esta evaluación, y como se determinó en la metodología, se contempló inicialmente el diseño del simulador en estado estacionario con tres modelos termodinámicos recomendados por la revisión bibliográfica y para tres casos de operación de la torre ST1504. Posteriormente se adaptó el simulador con el paquete termodinámico más exacto, a condiciones de estado transitorio con el fin de estudiar la respuesta del sistema en lazo cerrado y poder recomendar una nueva estrategia de control, al igual que las condiciones más apropiadas para mejorar la operatividad de la columna.

Resaltan por su alto grado de aproximación al caso real, los tres paquetes termodinámicos, la adecuada evaluación que se puede realizar de los tres casos de operación de la torre con el simulador en estado estacionario, validando la necesidad de manejar altos flujos de reflujo para lograr la mayor recuperación de ortoxileno en la torre y logrando establecer los valores de temperatura óptimos a controlar en el fondo de la ST1504 según la composición de carga a la ST1504. Como parte final, se realizaron pruebas en las estrategias de control en lazo cerrado y se planteó una nueva estrategia de control de temperatura de cima, para optimizar el rendimiento de la torre ST1504.

* Trabajo de grado de Maestría.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Ingeniero Químico, PhD.

ABSTRACT

TITLE:

“STUDY TO IMPROVE THE ORTHOXILENE RECOVERY IN THE U1500 OF AROMATICS PLANT OF THE GERENCIA REFINERIA BARRANCABERMEJA, STUDING THE ST1504 USING ASPEN HYSYS V8.4*”.

AUTHORS:

AGUIRRE REINA, Miguel Ángel.**

KEY WORDS: AROMATICS, BTX, DISTILLATION, HYSYS, ORTHO-XYLENE.

DESCRIPTION:

A Xylene separation column in the aromatics plant at the Barrancabermeja Refinery was evaluated in this document, as well as the actual control strategy. In order to develop this examination, it was chosen as the initial design of the simulator three thermodynamic stationary models, all of them recommended by suitable books about this topic and also the three of them fitted to real operating scenarios of the ST1504 tower. Subsequently, the simulator was adapted to transient state using an “adjusted to reality thermodynamic package”. On this condition, the objective was to study the closed loop behavior, to find a proper strategy to get the desired response and to improve the operating conditions of the process column.

The simulation using the three thermodynamic packages and the right evaluation on stationary state get a special mention due to their high accuracy in comparison to the real scenario. This consideration allowed to conclude that it gets necessary to run high reflux values within the ST1504 tower with the aim of maximize the orthoxylene recovery. Correspondingly, the bottom of the tower must have the right temperature values taking into account the charge composition. As a final point, some control strategies were tested and one of them was selected as the most appropriate strategy to control de upper zone temperature, therefore it will increase the efficiency of the tower ST1504.

* Master Thesis.

** Physicochemical Engineering Department. Chemical Engineering School. Master's Degree in Chemical Engineering. Advisor: Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

Parte fundamental del trabajo de un ingeniero, en el actual mundo globalizado, es mantenerse al tanto de los avances, herramientas e innovaciones en el campo que se desarrolle profesionalmente. Como parte de este proceso de formación profesional formal, la maestría en profundización, tal como lo establece la UIS, busca el *“desarrollo avanzado de competencias que permitan la solución de problemas o el análisis de situaciones particulares de carácter disciplinar, interdisciplinario o profesional, por medio de la asimilación o apropiación de saberes, metodologías y, según el caso, desarrollos científicos, tecnológicos o artísticos”* [1].

Para nuestro caso particular, el objetivo primario de la Maestría en Ingeniería Química, es lograr desarrollar los conocimientos profundos y las competencias requeridas para dar soluciones permanentes, sostenibles, integrales, integradas e innovadoras a problemáticas actuales dentro del campo de la refinación del petróleo, específicamente en la Refinería de Barrancabermeja.

Este trabajo establece una propuesta que permita al proceso de la Unidad U1500 de la planta de Aromáticos, una mejora en calidad, rendimientos de ortoxileno y de igual manera, servir de soporte al operador de tablero por medio de la mejora en el nivel de control y estabilidad de la unidad, permitiéndole tener el dominio del proceso en forma más fácil y segura, brindándole herramientas y oportunidad para un análisis integral del proceso; todo esto mediante una propuesta de control en la torre de destilación ST1504, en la que se aumenta la recuperación de ortoxileno producto.

1. PROBLEMATICA Y JUSTIFICACIÓN

La unidad U1500 (Fraccionamiento de Productos Aromáticos) tiene como objetivo la separación por destilación del Extracto Aromático¹. Este proceso de fraccionamiento se lleva a cabo en cuatro torres en serie, que permiten mediante destilación, la recuperación de productos de alta pureza y alto valor comercial, benceno, tolueno, xilenos (paraxileno y metaxileno), ortoxileno y una corriente aromática final más pesada (mezcla de cumenos y aromáticos C9+ pesados).

La separación del paraxileno (p-xileno) y metaxileno (m-xileno) (producto de cima) y del ortoxileno más cumenos (producto de fondo) se lleva a cabo en la ST1504, la torre más alta de esta unidad (y de la refinería). Actualmente, un 10% (o más) del ortoxileno, que se carga a la unidad U1500, se retira junto con el p-xileno y m-xileno por la cima de la ST1504. Este ortoxileno presente en dicha corriente de cima, se considera como pérdida, ya que si bien es vendido como xileno producto, el hecho de que no se recupere con la corriente de ortoxileno (fondo ST1504) representa una diferencia económica de 33,2 US\$/barril aproximadamente (históricamente, el precio del barril del ortoxileno es superior al precio del barril de p-m xileno) .

En el año 2013, la Unidad U1500 cargó un acumulado total de 1.025.003 barriles, de los cuales 78.722 barriles correspondían a ortoxileno. La producción en este mismo año de ortoxileno fue de 49.662 barriles. En otras palabras, el 7,7% de la carga a la Unidad U1500 fue ortoxileno, recuperándose tan solo el 4,8% de esta

¹Corriente de Hidrocarburos aromáticos (menos de 1500 ppm de No Aromáticos), proveniente de la Unidad U1400 (extracción líquido líquido de la misma planta)

carga, lo que equivale a una recuperación del 62% del ortoxileno total cargado (frente a una expectativa de recuperación mayor al 80% del ortoxileno total cargado a la planta).

El mercado de los productos Aromáticos a nivel mundial presenta un rápido crecimiento. Se espera que la demanda de benceno crezca 4,1% por año entre 2000 y 2020, mientras el incremento en el mercado de xilenos será aproximadamente el doble para el año 2020 [2]. Los productos aromáticos que comercializa ECOPETROL, garantizan la materia prima de decenas de empresas a nivel nacional, las cuales a su vez son generadoras de empleo y desarrollo. En el caso del ortoxileno, se tienen dos principales clientes, Carboquímica SAS y Anhídridos y Derivados de Colombia SA, los cuales tienen una demanda de 10 KB mes, mientras ECOPETROL suministra 4,8 a 5,2 KB mes, por lo que el resto del producto debe ser importado.

Bajo el esquema de operación actual, el sistema de control principal de la ST1504 consiste en un lazo *feedback* que mantiene la temperatura de fondo de la torre a un *Set Point* establecido por el operador de pantalla, por medio de suministro de calor de una corriente de vapor saturado a través del rehervidor SE1509 de la ST1504. Esta estrategia de control básica, tal como está operando en la actualidad, resulta limitada e insuficiente para esta torre ya que por sus características (120 platos y productos de difícil separación), presenta una velocidad de respuesta muy lenta, al momento de buscar optimizar el rendimiento de ortoxileno.

Las otras variables que el operario ajusta son el reflujo y el nivel del tambor de cima (mediante salida de producto). Una variación en la rata de reflujo representa

un cambio en el equilibrio interno de la torre, que será detectado y ajustado por el control de temperatura de fondo en forma lenta y solo será visualizado por el operador de pantalla en la composición de producto horas después mediante cromatografías en línea o muestras de laboratorio de los productos. Debido a esta limitación en el control, esta torre ha estado asociada a incidentes por operar fuera de los valores establecidos como ventanas límites de operación y, unida a otros factores, a eventos de seguridad de procesos. Son entonces limitados los ajustes que hace el operario para lograr el control de la unidad con los requerimientos de calidad establecidos.

Si se toma como referencia el año 2013, se tiene una carga promedio a la Unidad 1500 de 2988 BD, contando con 343 días de operación y esperando una recuperación del 50% del ortoxileno en la ST1504 (del que actualmente se pierde) se tendría una oportunidad de 467.490 US\$ al año.

El control de esta unidad se realiza con *software* HONEYWELL y con lazos de control básico, consiguiendo de forma confiable productos de alta pureza (>99,8%), como el benceno y el tolueno, pero que demandan mayor dedicación y análisis por parte del operador de tablero para manejar eficientemente una torre con 120 platos y conseguir pérdidas bajas de ortoxileno, dado el rango de separación tan pequeño (ortoxileno de p- m- xileno).

Resulta necesario mejorar la capacidad de control de esta torre, y de esta manera mejorar su operatividad y desempeño, garantizando la separación del ortoxileno esperada y una mayor rentabilidad económica, logrando además beneficios de índole social y ocupacional, ya que, en este caso en particular, se brinda mayor

materia prima a las empresas nacionales y se disminuye la carga laboral al operador de consola.

Teniendo en cuenta la complejidad y el riesgo de realizar pruebas reales de capacidad máxima y de estrategias de control nuevas de la operación de la torre ST1504, resulta una opción segura y confiable la simulación de dichas pruebas. Los modelos de simulación se han utilizado ampliamente en la industria petroquímica desde la década de 1980, gracias a su bajo costo y la mejora en la confiabilidad de sus resultados [3]. Gracias al enfoque basado en modelamiento y simulación se han podido aumentar los rendimientos de producción, y el aumento de los márgenes de ganancia, enfocándose hoy en día, en la maximización de la producción económica de los activos existentes [4].

El modelamiento mediante simulación en HYSYS ha demostrado ser una opción valiosa para el estudio, evaluación de alternativas y mejoramiento de procesos en general y en particular procesos petroquímicos logrando modelos muy cercanos a la realidad, permitiendo predecir el comportamiento (dinámico) de procesos bajo diferentes estrategias de control. Adicionalmente, la simulación evita la necesidad de contar con plantas pilotos o realizar pruebas a nivel industrial, lo que puede resultar en mayores costos y riesgos [5].

Lograr recuperar este ortoxileno, con el planteamiento de una estrategia de control que complemente a la actualmente empleada, podría traducirse en beneficios económicos a la organización y representan el objetivo principal de este trabajo.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una estrategia de control para mejorar la recuperación de ortoxileno en la U1500 a través del estudio en estado transitorio de la ST1504 utilizando Aspen HYSYS® V8.4

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Simular en estado estacionario la ST1504, considerando distintos modelos termodinámicos y su evaluación para tres casos de estudio reportados por la GRB.

Analizar la influencia, en estado estacionario, de las variables de temperatura de fondo y reflujo, sobre el rendimiento de recuperación de ortoxileno.

Analizar en estado transitorio, la dinámica de respuesta de la ST1504 en lazo cerrado ante diferentes estrategias básicas de control.

.

3. MARCO CONCEPTUAL

En la Refinería de Barrancabermeja, el aumento de capacidad de carga a finales de la década de los 60, y la creciente demanda de productos petroquímicos en Colombia en la misma época, dieron lugar al proyecto de construcción de la Planta de Aromáticos, que finalmente comenzaría operaciones en el año de 1971 [6].

La Planta Aromáticos, cuya vista aérea se presenta en la Figura 1, cuenta actualmente con 5 unidades de proceso, siendo una de éstas la U1500, Fraccionamiento, donde por destilación se separan los productos finales que serán comercializados: benceno, tolueno, xilenos (p-xileno y m-xileno), ortoxileno y aromáticos pesados (cumenos, C9 y aromáticos más pesados). El objetivo de esta unidad es lograr la separación con un alto grado de pureza de los productos mezclados en la carga (denominada extracto aromático).

Figura 1. Vista superior de Planta de Aromáticos dentro de la Refinería Barrancabermeja.



Fuente: ECOPETROL.

En la Tabla 1 se presentan los criterios de calidad de los productos aromáticos. Sobresale la alta pureza que se debe asegurar en el proceso industrial de destilación, para poder cumplir los planes de calidad y así poder ser comercializados con visto bueno del Departamento de Calidad de la Refinería. En esta misma tabla se puede apreciar, como decrece la exigencia en la calidad del producto al ser más compleja la separación (caso xilenos y ortoxileno).

Tabla 1. Composiciones de los productos.

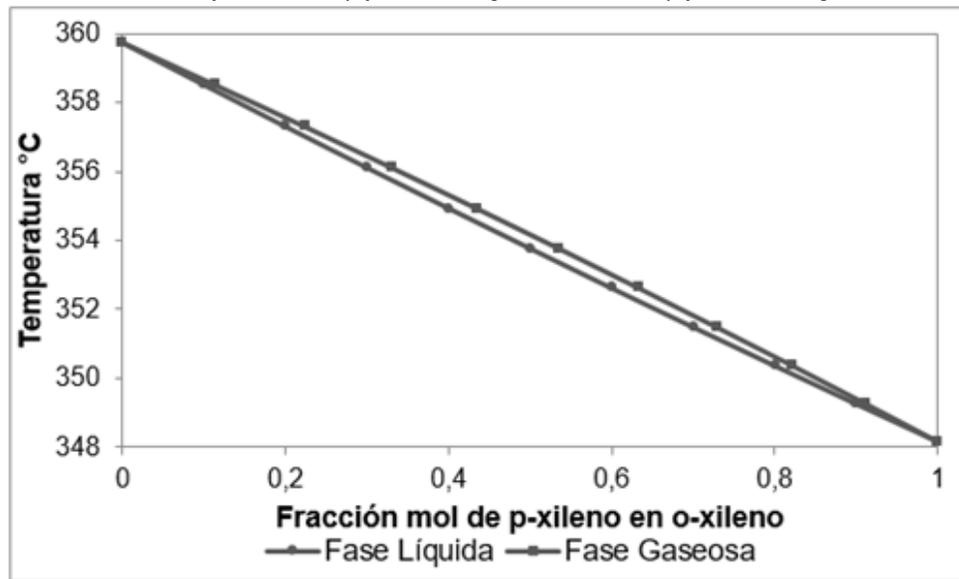
% PESO	CALIDAD DE PRODUCTOS			
	BENCENO	TOLUENO	p-m XILENOS	ORTOXILENO
BENCENO	>99,85	0,1	0	0
TOLUENO	<0,018	>99,8	0	0
p-m XILENOS	0	0,2	>94	<1,7
ORTOXILENO	0	0,2	<6	>97
C9	0	0	0	<0,3

Fuente: ECOPEPETROL.

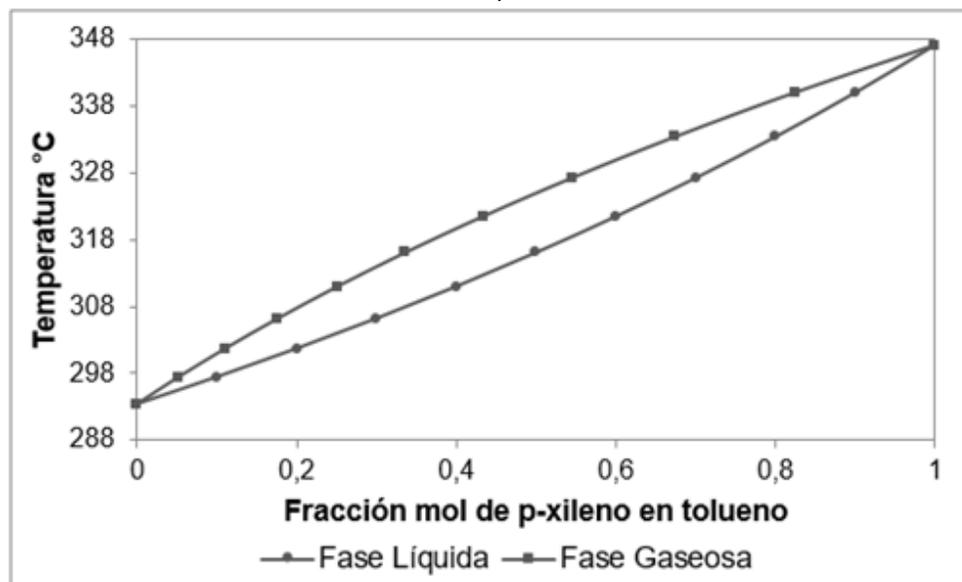
En la Figura 2 se puede apreciar lo complejo de la separación por destilación de los isómeros del xileno. El ortoxileno, m-xileno, p-xileno y etilbenceno por ser isómeros entre sí, tienen idénticos pesos moleculares, y por consiguiente cualquier proceso de separación que dependa de las diferencias de peso molecular como factor de separación no será posible o será muy complejo. Los métodos de separación por cristalización, extracción líquido-líquido y columnas de flujo dividido son empleados actualmente para la separación de estos isómeros, pero implican grandes inversiones [7]. Por el contrario, esta propuesta busca mejorar la recuperación del ortoxileno sin modificar la infraestructura instalada y con una inversión menor en control, lo que además brinda mayor flexibilidad para futuras mejoras o cambios del proceso.

La volatilidad relativa del ortoxileno con respecto al m-xileno y p-xileno es de 1,16, mientras que la volatilidad relativa del m-xileno con respecto al p-xileno es de 1,02, lo que implica que el ortoxileno es el único isómero del xileno, suficientemente diferente en volatilidad para que la separación sea posible por destilación, aunque deban emplearse razones de reflujo de 15 a 1 y 100 o más platos [8].

Figura 2. Gráfica de equilibrio: a) p-Xileno y Tolueno; b) p- Xileno y Ortóxileno.



a)



b)

Precisamente por esta compleja situación y debido a la oportunidad económica que ofrece, esta propuesta se interesa en la ST1504, cuyo objetivo es la separación del p-xileno y m-xileno del ortoxileno (producto de cima) y productos aromáticos más pesados (producto de fondo).

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La carga a la ST1504 corresponde a la corriente de fondo de la ST1503 es actualmente cargada a la torre en el plato N° 51; sin embargo, tiene la posibilidad de ingresar a la ST1504 por el plato N° 51, 61 ó 71. Los vapores que salen en la cima de la ST1504, son una mezcla de xilenos y etilbenceno (más las pérdidas de ortoxileno). Estos vapores son condensados en el lado de los tubos del Condensador de Cima de la ST1504 (E1510), intercambiando calor con el agua de enfriamiento.

El producto condensado es acumulado en el Tambor de la ST1504 (D1503). En este tambor se separan las corrientes de gases no condensables por la cima que se envían a la tea (hidrocarburos livianos, no aromáticos) y una corriente líquida que se divide en corriente de reflujo a la torre y corriente de xilenos mezclados, que se envía a almacenamiento como producto (p-m xileno). Este tambor recibe una inyección permanente de gas de blanqueo (hidrógeno o nitrógeno) para evitar alguna contaminación por contraflujo con gases del sistema de la tea.

En la Figura 3, se aprecia un diagrama de flujo esquemático de la Unidad U1500, identificándose claramente las 4 torres en serie para la destilación de los valiosos

productos aromáticos; la torre ST1504 corresponde a la tercera torre de destilación presentada en la figura (de izquierda a derecha).

La Figura 4 ilustra en detalle las corrientes de la ST1504, cuyas composiciones típicas se pueden observar en la Tabla 2. La corriente del fondo de la Separadora de Xilenos ST1504 se divide en dos, la de recirculación del fondo de la ST1504 (calentamiento), y la que sale como carga hacia la Columna Rectificadora de Ortóxileno ST1505.

Tabla 2. Composición típica (%p/p y en BPD) de las corrientes de la ST1504.

	CORRIENTES ST1504					
	% p/p			Barriles por Dia		
	Carga	Destilado	Fondo	Carga	Destilado	Fondo
No aromáticos	0,17	0,12	0,27	2,56	1,2	1,36
Benceno	0	0	0	0	0	0
Tolueno	0,17	0,25	0	2,51	2,51	0
p Xileno	15,41	23,04	0,08	231,49	231,09	0,4
m Xileno	35,25	52,61	0,36	529,47	527,68	1,79
o Xileno	15,87	8,46	30,75	238,32	84,85	153,47
Etilbenceno	10,36	15,52	0	155,67	155,67	0
C9+	22,31	0	67,16	335,11	0	335,11
Cumenos	0,44	0	1,34	6,67	0	6,67
C10	0,01	0	0,04	0,21	0	0,21
TOTAL	100	100	100	1502,01	1003	498,8

Los lazos de control comúnmente utilizados para controlar una torre de destilación son 6 y se aprecian en la Figura 5 [8]. Estos lazos de control *Feedback* permiten controlar de forma independiente diferentes variables de la torre de destilación.

Figura 3. Esquemático U1500 Fraccionamiento, Planta de Aromáticos.

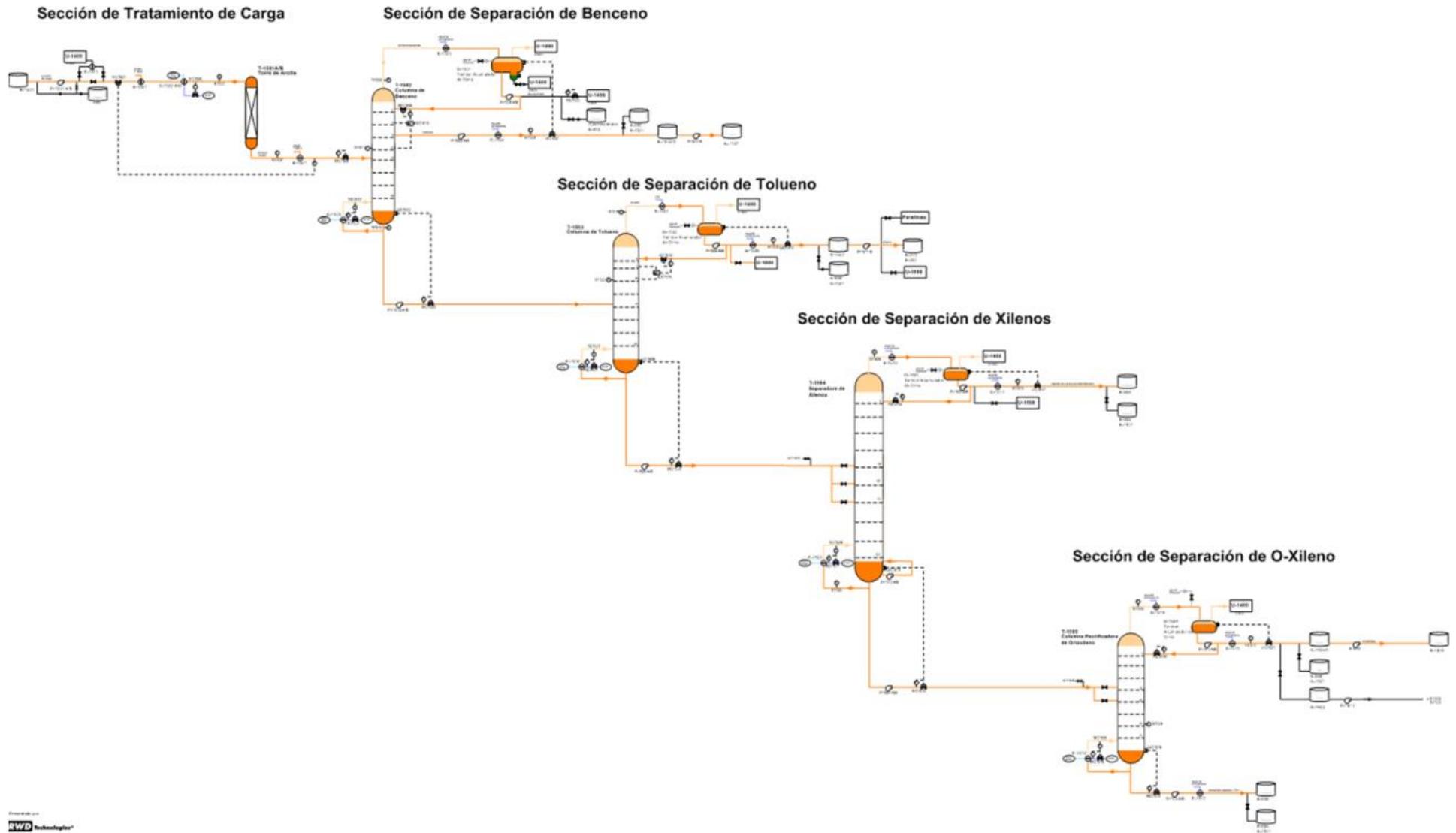
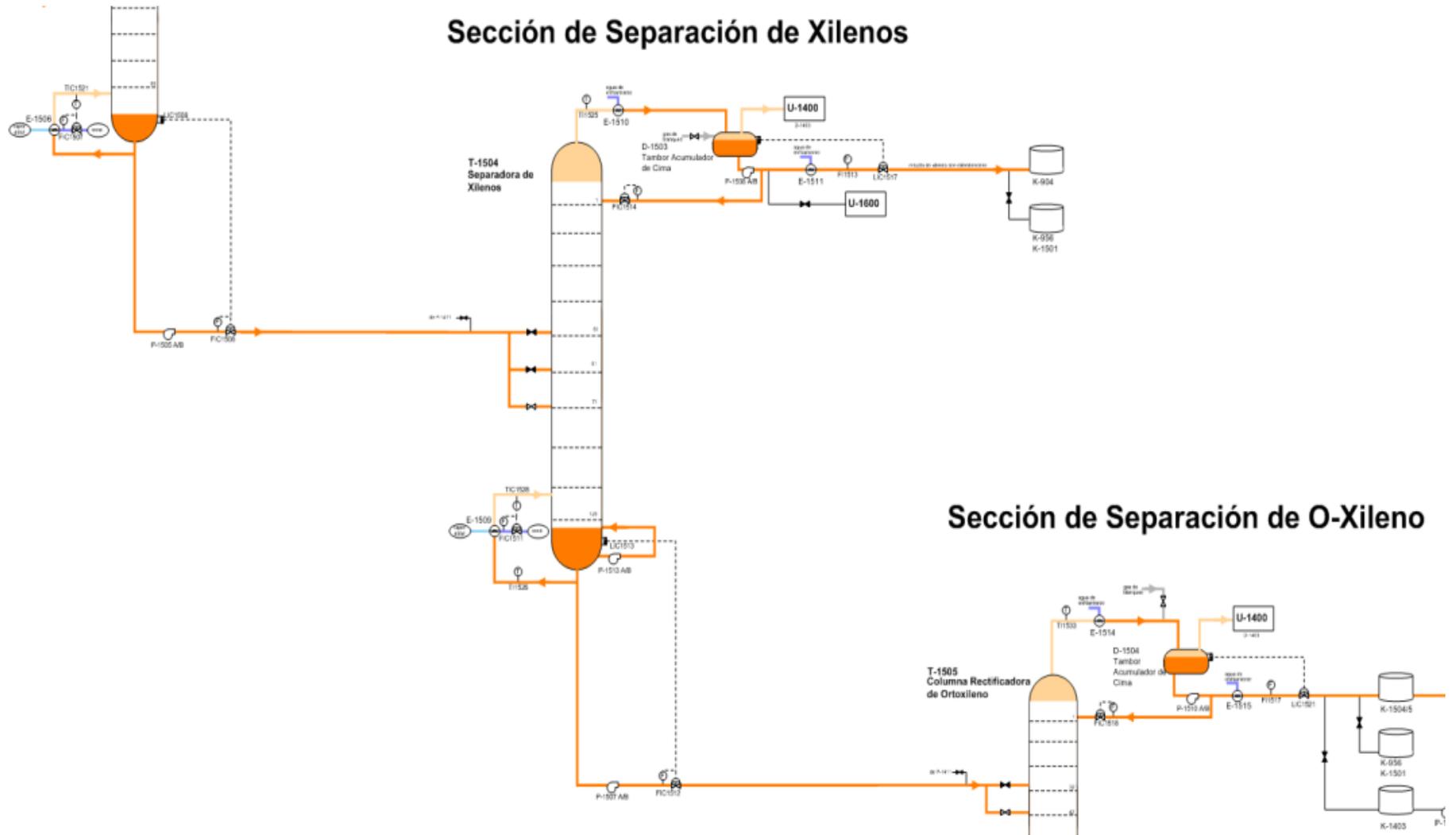
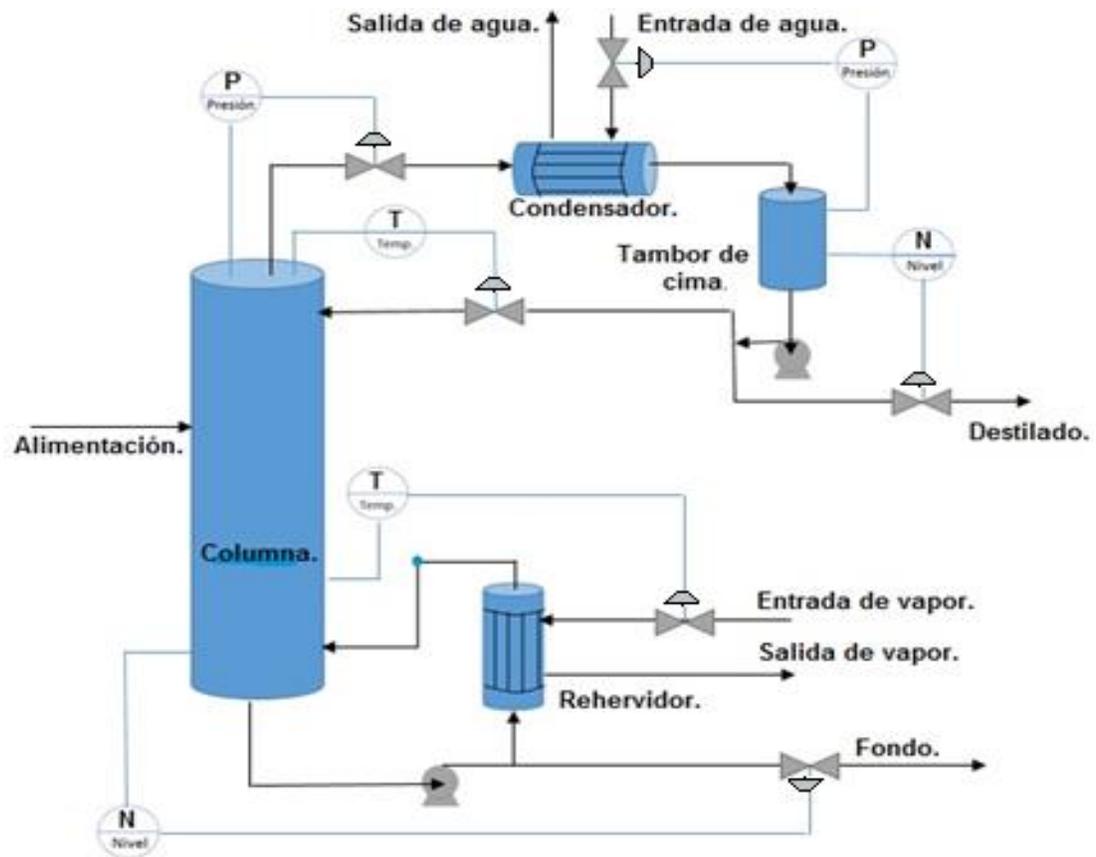


Figura 4. Esquemático de las torres ST1504 y ST1505 de la Unidad U1500.



Fuente: Manual de Operación ECOPETROL.

Figura 5. Lazos de control comúnmente utilizados para controlar una torre de destilación.



Fuente: LUYBEN, W. Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers, Second ed., Mc Graw Hill, 1996.

Se pueden apreciar 6 controles básicos: un control de nivel de la torre manipulando el flujo en la salida de fondo, un control de temperatura de fondo de la torre que regula el flujo de vapor al rehervidor, un control de temperatura de la cima que manipula la tasa de reflujo hacia la torre, un control de presión que restringe la salida de gases de la cima, un control de nivel del tambor de cima que se mantiene mediante manipulación del flujo de producto o corriente de cima, y finalmente, un control de presión en el tambor de cima que se ajusta mediante la manipulación del flujo de agua de enfriamiento en el sistema de cima.

Este ejemplo básico es un sistema estándar, pero para el sistema de la unidad U1500 se presentan restricciones debido a la no posibilidad de control de presión, ya que este sistema de destilación de productos aromáticos trabaja a presión ligeramente superior a la atmosférica y, como se mencionó anteriormente, los tambores de cima están conectados directamente al sistema de la tea sin ningún tipo de control manual ni automático.

Igualmente, es importante tener en cuenta que este planteamiento de control, y en general la destilación en sí misma, presenta mayor efectividad con valores muy altos de volatilidad relativa ($>4,5$) [11]. Para este caso, la volatilidad relativa es de apenas 1,16.

3.2. SIMULACIÓN EN HYSYS

Aspen HYSYS es un *software* utilizado para simular procesos en estado estacionario y dinámico, ya sea procesos químicos, farmacéuticos y hasta alimenticios; posee herramientas que permite estimar propiedades físicas, balance de materia y energía, equilibrios líquido-vapor, al igual que la simulación de muchos equipos de la industria química y especialmente petroquímica, contando con un potente módulo que permite calcular diversos tipos de columnas mediante etapas de equilibrio o usando etapas no ideales.

Esta herramienta ha permitido simular procesos, obteniendo errores con los datos de funcionamiento industrial inferiores a 5%, logrando modelos adecuados para la simulación. Mediante el análisis de las respuestas dinámicas de acuerdo con los cambios en el flujo de alimentación y reflujo, se analizan los efectos de las diferentes corrientes. Simulaciones similares en plantas de etileno, han permitido

obtener resultados bajo control y hallar la estrategia de control que se puede utilizar para la producción industrial en columnas de destilación [12].

Del mismo modo, la simulación de columnas de destilación, tomando como base datos reales de una refinería y utilizado en conjunto con *software* matemático, ha permitido obtener perfiles de caudal, propiedades físicas y composiciones, aportando en el diseño de columnas, así como a la investigación del efecto de los parámetros de diseño y a su funcionamiento, logrando localizar el problema en sistemas de destilación a fin de adaptar una solución óptima [13].

La simulación con HYSYS también ha logrado minimizar los costos mediante la optimización de las unidades de destilación, mediante la modificación de la ubicación de las corrientes de alimentación y corrientes secundarias impactando significativamente los costos de operación, y, por lo tanto, los costos anuales totales [14].

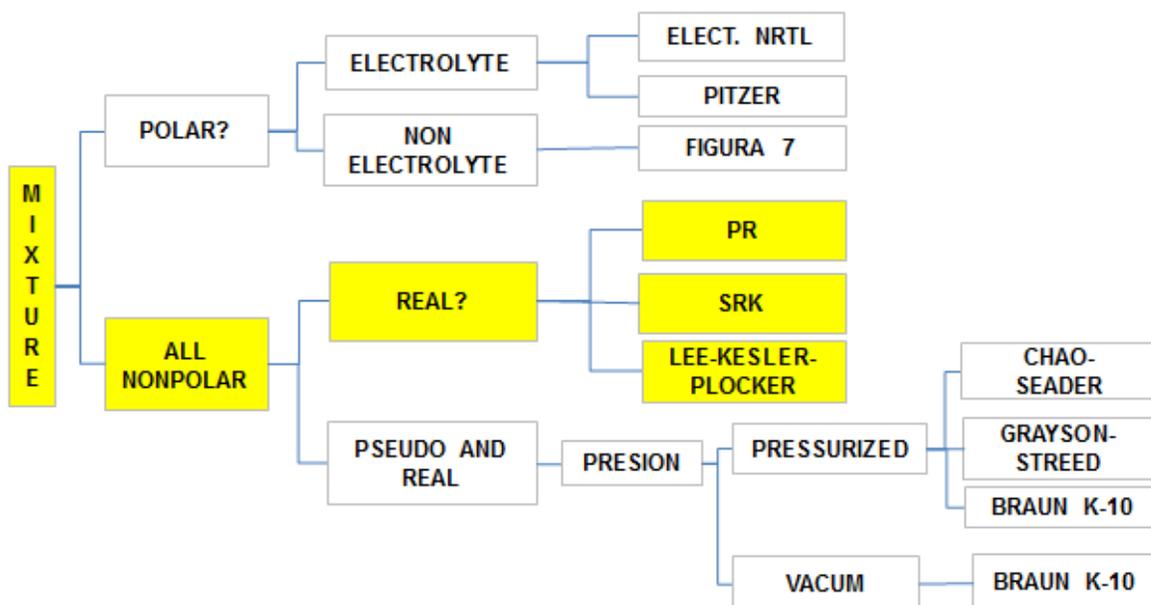
Reducciones en el costo de operación de hasta el 9,6 % se han obtenido mejorando condiciones de diseño en columnas de destilación a través de la simulación de procesos y métodos estadísticos. La mejor combinación de niveles de las variables estructurales y operacionales obtenidos en estado estable fueron analizadas en la simulación dinámica probando las condiciones obtenidas por simulación en estado estacionario de una manera más realista [15].

Para asegurar una simulación que represente con fidelidad la realidad del proceso debe asegurarse una apropiada selección del modelo termodinámico, cargar los parámetros adecuados del modelo, tener claridad de los componentes generados y asegurar consistencia de los datos de operación de la planta.

3.3. MODELOS TERMODINÁMICOS

Se presentan en esta revisión, dos de las metodologías para selección de modelo termodinámico más empleadas y generalizadas. La construida por Eric Carlson, y divulgada mediante árboles de decisión en su artículo “Don’t gamble with physical properties for simulations” y las recomendaciones del Profesor J.D. Seader de la universidad de Utah.

Figura 6. Perspectiva global de la metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos.

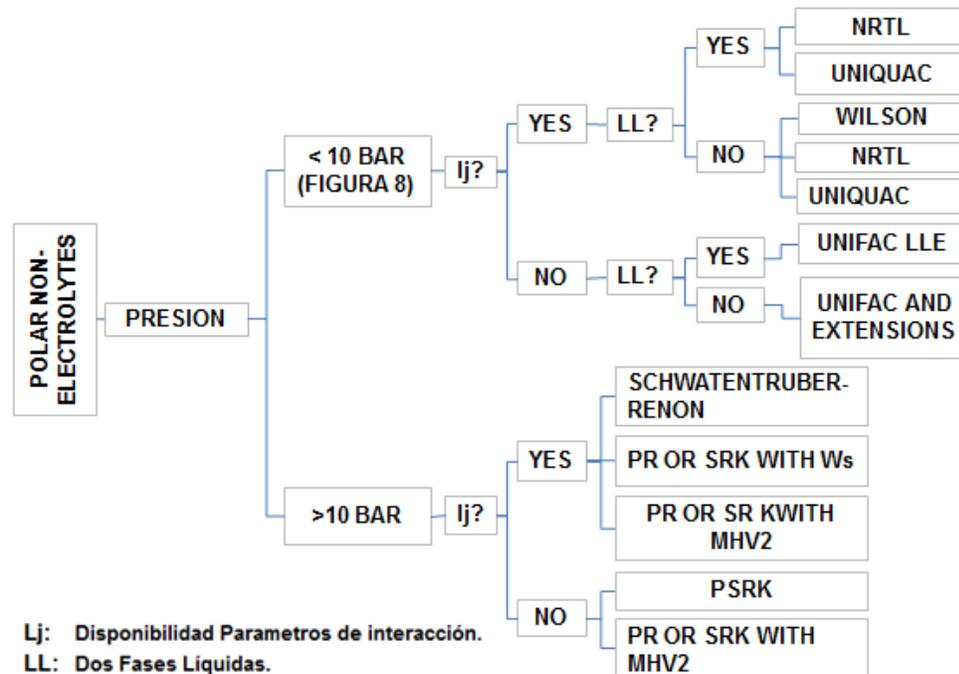


Fuente: Eric Carlson, “Don’t gamble with physical properties for simulations.”

Para la selección del modelo termodinámico de este trabajo y siguiendo la metodología Carlson, teniendo en cuenta que se tiene una mezcla de hidrocarburos no polares con composiciones conocidas, los seleccionados para la simulación serían Lee Kesler, Peng Robinson y SRK, según la perspectiva global

de la metodología Carlson que se presenta en la Figura 6. Las Figuras 7 y 8, presentan una estrategia de selección mucho más amplia para otro tipo de sustancias y se presentan en este trabajo a modo de información.

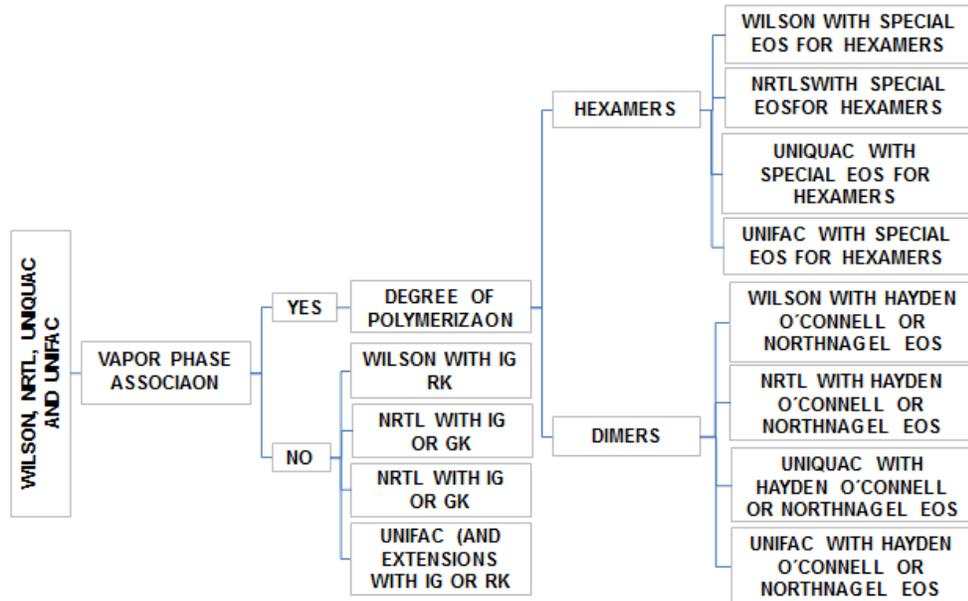
Figura 7. Metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos para Sistema Polar sin electrolitos.



Fuente: Eric Carlson, "Don't gamble with physical properties for simulations."

En la Figura 9, se presenta la perspectiva inicial del método recomendado por el profesor Seader de la Universidad de Utah. Para el caso de este trabajo está el primer árbol de selección, el cual no es suficiente para determinar el modelo termodinámico, al seleccionar un hidrocarburo, no gaseoso, no polar, remite al segundo árbol de decisión, diagramado en la Figura 10, perspectiva de compuestos no polares.

Figura 8. Metodología Carlson para la selección de los modelos termodinámicos para sistema en fase vapor.

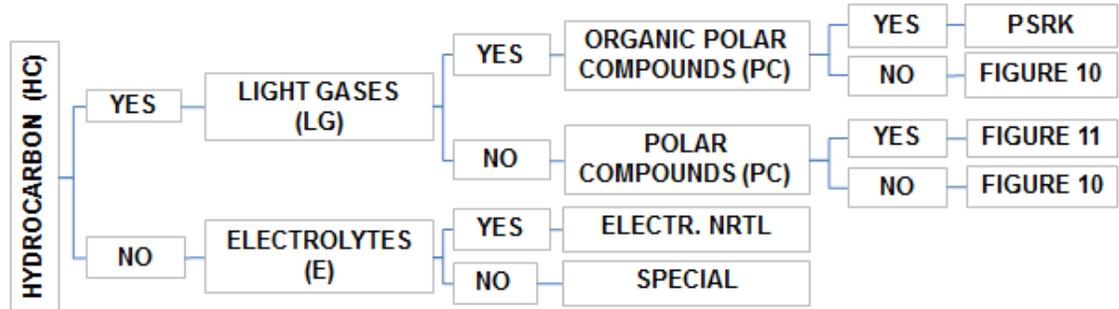


Fuente: Eric Carlson, “Don’t gamble with physical properties for simulations.”

En el Segundo árbol de decisión del profesor Seader, se debe seleccionar el paquete según el rango de temperatura y del punto de ebullición. Al ser una mezcla no criogénica, con un rango de punto de ebullición cercano, los paquetes seleccionados serían Peng Robinson y SRK. Sin embargo, al tener en cuenta que el condicional del rango del punto de ebullición es cualitativo, más no cuantitativo, el paquete Lee Kesler, también podría considerarse como apropiado, o al menos probable de ser eficiente para este trabajo.

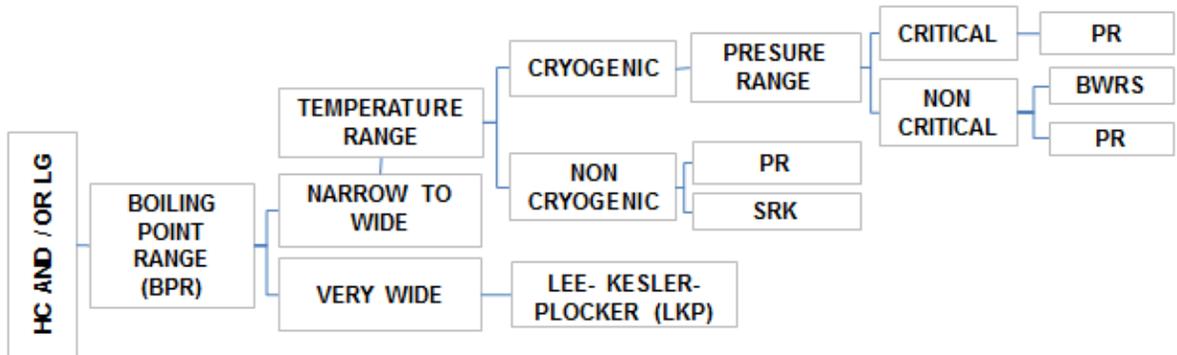
La Figura 11, contempla un rango más amplio de sustancias, particularmente polares, para la metodología del profesor Seader y se presenta a modo de información. En ambas metodologías revisadas, los modelos termodinámicos a emplear son Lee Kesler, Peng Robinson y SRK.

Figura 9. Metodología para selección modelo termodinámico.



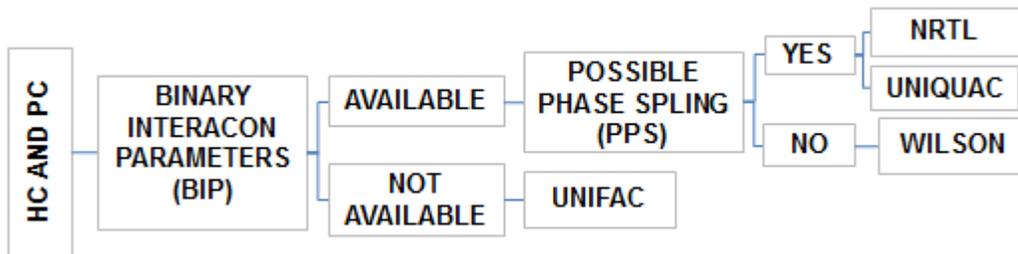
Fuente: Prof J.D. (Bob) Seader.

Figura 10. Metodología para selección modelo termodinámico para sistema No Polar.



Fuente: Prof J.D. (Bob) Seader.

Figura 11. Metodología para selección modelo termodinámico para sistema Polar.



Fuente: Prof J.D. (Bob) Seader.

4. METODOLOGÍA

La metodología planteada para el desarrollo del trabajo de aplicación es la que se describe a continuación.

4.1. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO DE LA ST1504 EN ASPEN HYSYS

Inicialmente se realizó una capacitación específica en el *software* Aspen HYSYS V8.4., al igual que una recopilación bibliográfica, enfocada en simulación de procesos de destilación en HYSYS.

4.1.1. Selección de casos de operación. Se determinaron los tres casos de operación de la torre ST1504 basados en la composición de las cargas típicas a la unidad U1500 y en los comportamientos estadísticos de la ST1504.

4.1.2. Selección de modelos termodinámicos. Teniendo en cuenta que no se encontraron casos de procesos de separación de isómeros del xileno, se debieron realizar actividades para establecer el modelo termodinámico necesario para la simulación. Siguiendo la metodología de Eric Carlson, se determinó utilizar los siguientes modelos termodinámicos:

Peng-Robinson (PR): el modelo que más mejoras ha tenido en Aspen HYSYS, con un amplio rango de aplicabilidad en términos de rangos de presión y temperatura, cuenta con tratamientos especiales para componentes claves y la mayor base de datos de interacción de parámetros.

SRK (Soave-Redlich-Kwong): Puede proporcionar resultados comparables a PR en muchos casos y en un amplio rango de presión y temperatura, pero con mucho menos mejora en Aspen HYSYS.

Lee-Kesler-Plöcker: Puede utilizarse para sustancias no polares y mezclas.²

4.1.3. Datos de operación. En la sección Modelos y comportamientos estadísticos de la ST1504, se establecieron las variables de operación y las composiciones de las corrientes de la ST1504. En el Anexo A, se encuentran las condiciones reales típicas de operación de la ST1504 para cada caso o modelo de operación.

4.1.4. Simulación y validación en estado estacionario. Se realizó la simulación de la ST1504 utilizando el *software* Aspen Hysys V8.4., ya que la Refinería cuenta actualmente con la licencia de este *software*, aprovechando el desarrollo y herramientas que actualmente posee. Se simuló, evaluando tres de los modelos termodinámicos propuestos por el *software* y que se convierten en los más reportados para aplicaciones del sector de los hidrocarburos y sistemas de destilación según la bibliografía consultada. Cada simulación fue confrontada contra el modelo real establecido para cada caso, con el fin de determinar la simulación más exacta para cada caso de operación y cuál simulación puede emplearse en forma óptima bajo cualquier condición o caso de operación. Los modelos o paquetes termodinámicos seleccionados fueron los presentados en 4.1.1.

La confiabilidad en los resultados obtenidos del modelamiento y simulación de la torre, se validó contra estos tres casos para cada modelo termodinámico. Las variables que se tuvieron en cuenta en la verificación de los resultados obtenidos corresponden a 33 variables relacionadas con la producción del ortoxileno, 7 de

² Aspen HYSYS ® Property Packages, Overview and Best Practices for Optimum Simulations, Seminario sobre ingeniería de procesos de Aspen 17 de octubre de 2006.

analizadores en línea (cromatógrafos), 4 de condiciones de carga a unidad U1500, y el resto variables de proceso de la U1500, 12 de la ST1504 y 10 de la ST1505. La presión no fue tomada como variable (ya que las torres operan directamente conectadas al cabezal de la tea mediante sus tambores de cima) y se tomó un valor fijo de operación 15, 3 psig que fue analizado y establecido.

La composición de carga es una variable importante en el manejo de la torre, para el diseño de la simulación se tomó como base la composición de los tres casos estudios señalados. Las composiciones de las corrientes de cima y fondo fueron determinadas por las correspondientes a las condiciones operativas registradas en los mismos datos históricos analizados. El diseño de los equipos en la simulación, obedeció a las facilidades y restricciones del *software*, pero basadas en todo momento en los datos y especificaciones de los equipos reales con que se cuenta en planta, los cuales también forman parte de esta propuesta. Al final de esta fase, se obtuvieron tres modelos simulados y verificados para cada uno de los tres casos de la ST1504 en Aspen HYSYS. En el Anexo B se encuentran las condiciones de diseño y condiciones de carga establecidas para la simulación en estado estable de la ST1504.

4.1.5. Análisis en estado estacionario en la torre ST1504. En esta etapa se realizó un análisis de sensibilidad del proceso de las variables de entrada al proceso, analizando la respuesta de la torre en sus variables de salida ante estos cambios. Las variables de entrada que fueron objeto de análisis de sensibilidad fueron el flujo de vapor al rehervidor (empleado como calentamiento) y el flujo de reflujo hacia la ST1504. Se evaluaron las respuestas de las variables de salida ante estas perturbaciones, especialmente el efecto sobre la composición de las corrientes de fondo y cima de la torre. Finalizada esta fase, se determinó la

temperatura de fondo que genera mayor rendimiento de ortoxileno para cada caso de operación de la torre.

4.2. SIMULACIÓN EN ESTADO DINÁMICO DE LA ST1504 EN HYSYS

4.2.1. Simulación en estado dinámico. Se analizó el comportamiento del sistema en estado dinámico con la ayuda de software Aspen HYSYS®, a partir del sistema en convergencia en estado estacionario. Basados en el análisis del capítulo anterior, se llevó a estado dinámico la simulación con el paquete termodinámico Lee Kesler, dado que se encontró que era la más cercana a la operación real de la ST1504. Inicialmente, el asistente dinámico de HYSYS® mostró advertencias respecto a las dimensiones de la torre y las presiones de operación en el condensador y el rehervidor.

El asistente proponía cambiar el diámetro de 7 a 9 ft, y aumentar la presión en el condensador hasta obtener una diferencia de presión, entre éste y el rehervidor, de 11 psi, aproximadamente. Dado que el diámetro original de la torre es de 7 ft, se decidió no aceptar la sugerencia del asistente respecto a las dimensiones de la torre. Sin embargo, la segunda sugerencia, dada la operación de la ST1504 a un sistema de tea sin control de presión, sí fue tomada en cuenta y se redujo la presión del rehervidor de 15,3 a 13,3 psig para la simulación en dinámico.

Finalmente, se instalaron todos los controladores existentes en el esquema de operación actual de la ST1504, con los parámetros reales configurados. Al final de esta fase, se obtuvo un modelo simulado en dinámico valido para cada uno de los tres casos de la ST1504 en Aspen HYSYS.

4.2.2. Análisis en estado dinámico de la ST1504 con las estrategias de control actuales. Con los controladores actualmente operativos, configurados en la simulación en estado dinámico, se analizaron las respuestas de la torre ST1504 ante la variación de la temperatura de fondo y la variación del flujo de reflujo hacia la torre, analizando el comportamiento de las variables de salida controladas y no controladas en cada uno de los casos, particularmente, sobre el rendimiento de ortoxileno en el sistema de la ST1504. Estos ajustes son los que actualmente se realizan en la operación y control del sistema. Finalizado este análisis, se determinaron las restricciones de cada estrategia de control existente y los parámetros requeridos para obtener una mayor recuperación de ortoxileno por el fondo de la torre, estableciendo cuales pueden ser alcanzados con los controladores disponibles y cuáles no.

4.2.3. Análisis en estado dinámico de la ST1504 con la estrategia de control propuesta. Analizadas las respuestas del sistema ante la variación de los controladores configurados actualmente, se concluye que no se logra alcanzar valores por debajo de 5% p/p en las pérdidas de ortoxileno con el destilado de la torre, por lo que se introduce una estrategia de control adicional de la temperatura de cima en cascada, que manipula el reflujo hacia la torre ST1504, controlando en un *Set Point* fijo dicha temperatura, obteniendo la respuesta deseada del sistema y el control suficiente para disminuir las pérdidas por debajo de 5% p/p.

En ocasiones, como sucede en este caso en particular, se acostumbra controlar la composición de los productos principales de una columna de destilación ejerciendo control sobre la temperatura de operación de algún plato seleccionado para este propósito; este esquema de control puede resultar conveniente sobre todo cuando no se dispone de analizadores de composición en línea o bien el

proceso de medición resulta demasiado demorado de tal forma que crea problemas de estabilidad y mal desempeño del esquema de control³.

La ganancia de este controlador se configuró teniendo en cuenta la respuesta de la temperatura de cima frente a la variación del reflujo hacia la torre y el *Set Point* se estableció en el valor de temperatura óptimo establecido en la simulación como el de mayor rendimiento obtenido y que resultó igual independiente del caso de operación simulado.

Se realizó un análisis de la respuesta de las variables de salida de la torre ST1504, ante un ajuste en la temperatura de fondo, pero con el control adicional propuesto en la temperatura de la cima de la torre y configurado en la simulación, logrando alcanzar el flujo máximo de reflujo que garantice el control de la temperatura de cima en el valor deseado y una mayor recuperación de ortoxileno en la corriente de fondo.

³ Antonio Flores, Universidad Iberoamericana-Santa Fe.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MODELOS DE OPERACIÓN Y RECOPIACIÓN DE DATOS

El comportamiento histórico de la ST1504 se recopiló para definir tres casos estudio o modelos de operación, establecidos con sus respectivos datos de proceso y composiciones de las corrientes en los años 2012, 2013 y 2014. Como variable diferenciadora para la selección de los casos, se consideraron las composiciones de la carga a la unidad U1500. La Tabla 3 resume las principales características de los tres casos escogidos.

El primer caso (analizado en el periodo comprendido entre el 1 de abril al 30 de abril de 2014) corresponde a una composición típica de la planta de Aromáticos, y es la composición característica del proceso de Aromatización de la nafta virgen en la unidad U1300. En este periodo de operación, la unidad U1500 solamente carga el extracto aromático recuperado en la unidad U1400 y generado mediante reformado catalítico en la unidad U1300.

El segundo caso (correspondiente al análisis del 12 de julio a 24 de julio 2013), presenta una mayor concentración de benceno debido a que la carga de la unidad U1500 es una mezcla del extracto aromático de la unidad U1400 y de la mezcla de benceno y tolueno provenientes de la operación de la unidad U1600 (cuya función es transformar tolueno en benceno).

Tabla 3. Composiciones de carga en los tres casos estudiados.

	COMPONENTE (p/p)	Caso 1	SD	Caso 2	SD	Caso 3	SD
Carga a la ST1504	Tolueno	0,17	0,003	0,52	0,011	0,24	0,004
	Ortortoxileno	15,89	0,22	17,23	1,69	15,00	0,36
	Meta-xileno	35,31	0,88	35,87	2,84	30,35	0,66
	Para-xileno	15,44	0,22	15,58	0,53	13,52	0,23
	Etil-Benceno	10,38	0,88	10,83	1,42	9,23	0,76
	N Propil-Benceno	22,35	1,21	19,13	3,82	31,08	1,62
	Cumeno	0,44	0,02	0,51	0,05	0,53	0,02
Destilado ST1504	Tolueno	0,25	0,12	0,78	0,11	0,40	0,11
	Ortortoxileno	8,47	0,11	7,03	1,23	10,01	0,33
	Meta-xileno	52,67	0,44	53,03	1,39	51,14	0,41
	Para-xileno	23,07	0,22	23,09	0,89	22,83	0,35
	Etil-Benceno	15,54	0,44	16,07	0,74	15,62	0,76
Fondo ST1504	Ortortoxileno	30,84	1,01	38,29	1,21	22,22	1,04
	Meta-xileno	0,36	0,14	0,40	0,12	0,29	0,01
	Para-xileno	0,08	0,001	0,07	0,00	0,06	0,00
	N Propil-Benceno	67,34	0,10	58,65	0,12	76,02	0,22

El tercer y último caso (analizado desde reparación de julio de 2014 hasta finales del mismo año), al igual que el caso 1, solamente opera con carga proveniente de la Unidad U1400, pero cuenta con una composición mucho más pesada (alto contenido de cumenos C9+ en general) debido a las cargas de crudos más pesados, API menor a 20 grados, con que cuenta en la actualidad la refinería. En el Anexo C, se encuentra el detalle y comparación de la composición de la carga en cada caso.

Los casos de operación establecidos, representan así los modos de operación de la Unidad, según los requerimientos del mercado, las necesidades de producción y consumo interno de productos aromáticos y la disponibilidad de crudos de carga a la refinería.

5.1.1. Criterios de corrección de flujos volumétricos. Debido a la posible descalibración o error que puedan presentar los instrumentos de medición, especialmente los de flujo volumétrico (BD), se realizó un análisis previo del porcentaje de error de los instrumentos asociados a la Unidad U1500 comparando los balances de masa diarios contra los registros de flujo en PI.

El aforo o capacidad de los tanques de almacenamiento está certificado y su medición telemétrica es de alta confiabilidad y presenta poca probabilidad de error, adicionalmente se realiza medición manual periódica para validar su calibración. Este grado de confiabilidad se requiere para asegurar transferencias internas y externas confiables y es exigido por ley “SOX”, abreviatura para *Sarbanes Oxley Act*, ley americana emitida en el 2002 y que busca monitorear a las empresas que cotizan en la bolsa de valores de Nueva York, como es el caso de ECOPETROL S.A.

Aprovechando esta alta confiabilidad, los balances finales de las plantas utilizan como primer dato de entrada, los volúmenes iniciales y finales de los tanques de almacenamiento de carga y productos de las unidades, permitiendo encontrar desviaciones en los instrumentos de medición en línea de las plantas de proceso.

Periodo analizado: Segundo semestre 2014 y 2015

El error está calculado así:

$$\text{Error} = ((\text{Real (BD)} - \text{TAG PI (BD)}) / \text{Real (BD)}) * 100$$

Este error representa, el factor de corrección del TAG PI, en otras palabras, que tanto por encima o por debajo del valor real (calculado por balance) se encuentra el valor registrado en DCS. Si el error es negativo el TAG PI indica por encima del valor real.

Dentro del proceso de mantenimiento, se realizó el respectivo ajuste en los indicadores de flujo de la unidad, sin embargo, el error registrado fue tenido en cuenta para el cálculo de balances para el desarrollo de este trabajo, ajustando los valores históricos registrados por DCS y almacenados en PI, ya que sobre estos es que se realizan los ajustes operacionales, y son los registrados en las bases de datos analizadas.

Tabla 4. Valores de desviación en medición de flujos volumétricos.

	CARGA T1502	CARGA T1503	CARGA T1504	CARGA T1505
	FIC 1501	FIC 1503	FIC 1508	FIC 1512
ERROR 2014 (%)	7,3	9,51	14,27	-6
ERROR 2015 (%)	6,62	17,56	14,3	-6,75
ERROR 2016 (%)	-1,42	6,89	15,65	-4,88

	BENCENO	TOLUENO	XILENO	o-XILENO	C9+
	FIC 1504	FIC 1509	FIC 1513	FIC 1517	FIC 1515
ERROR 2014 (%)	9,5	6,91	3,35	9,32	0,27
ERROR 2015 (%)	6,18	9,36	2,83	7,81	0,54
ERROR 2016 (%)	6,44	-16,78	-0,01	2,04	3,33

Desde el día 12 de mayo 2015 hasta el día 7 de febrero de 2016, se enviaron 250 muestras de Ortóxileno producto de la unidad U1500. La totalidad de ellas se analizan por parte del departamento de inspección de calidad, 216 de ellas con la totalidad de los datos, y 33 con al menos un dato no reportado. Los datos reportados y sin ningún tipo de filtro se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos promedio Ortóxileno producto mayo 2015 a febrero 2016.

Componente	Unidad	Control	Promedio	Moda	Desv Est
No Aromáticos	g/100g	N/A	0,53	0,42	0,22
Benceno		N/A	0,002	0	0,008
Tolueno		N/A	0,003	0	0,01
Para Xileno		N/A	0,274	0,27	0,163
Orto Xileno		> 97	97,86	98,07	0,55
m, p- Xileno		< 2	1,465	1,2	0,508
m, p- Xileno + Cumeno		N/A	1,613	1,8	0,52
C9		N/A	0,004	0	0,035
Cumeno		< 0,3	0,143	0,1	0,219
Ciclohexano		N/A	0,004	0	0,065

Se evidencia tanto en el promedio aritmético como en la moda, el cumplimiento de los parámetros de calidad estipulados para el producto final a venta, evidenciándose la mayor desviación en el componente cumenos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la mayoría de muestras se envía como parte de verificación de calidad durante ajustes, arrancadas, disturbios o patronamiento del cromatógrafo de ortóxileno, CR-1505, por lo que es lógico encontrar resultados fuera de especificaciones en el muestreo en la línea de producción de ortóxileno, los cuales a su vez, dan lugar a los ajustes requeridos, basados en la experticia

del operador de consola, para lograr llevar a control el proceso y a la calidad establecida el producto final.

De las 250 muestras enviadas, 183 cumplen todos los parámetros de calidad y 67 se encuentran fuera de especificaciones, 17 por alto contenido de paraxileno y metaxileno, 45 por alto contenido de cumenos y 5 por alto contenido de cumenos y paraxileno y metaxileno simultáneamente. Es importante aclarar, que estos resultados permiten ejecutar los ajustes que garantizan el cumplimiento del 100% de la calidad en el producto almacenado para ventas, con cero reclamos por parte de clientes en el mismo periodo de tiempo analizado. Simultáneamente, en este tiempo de muestreo, se hizo seguimiento a 33 variables relacionadas con la producción del ortoxileno, 7 de analizadores en línea (cromatógrafos), 4 de condiciones de carga a Unidad U1500, y el resto variables de proceso de la U1500, 12 de la ST1504 y 10 de la ST1505, así:

Tabla 6. Condiciones de carga a unidad U1500.

FUNCIÓN	INSTRUMENTO	TAG PI
CARGA U 1500	FIC 1501	U1500-FIC_1501
CARGA U 1500	% Ortoxileno	U1500-M-15-4ORTOXILENO
CARGA U 1500	% C9	U1500-M-15-4C+9
CARGA U 1500	% Cumeno	U1500-M-15-4CUMENO

Para cada muestreo, se registró el dato de cada una de estas variables, para un total de 8250 datos analizados. Tanto los datos de las cromatografías realizadas por el departamento de inspección de la calidad, como los datos mencionados, fueron estudiados para establecer las variables de proceso promedio y las

composiciones de las corrientes asociadas a la torre ST1504, para los tres casos establecidos.

Tabla 7. Cromatógrafos en línea.

EQUIPO	UBICACIÓN	COMPUESTO	TAG PI
CR 1504	Plato 110	p-m Xileno	U1500-CR_1504_1
CR 1502	Salida Xileno Producto	Tolueno	U1500-CR_1502_1
		Xileno	U1500-CR_1502_2
		O-Xileno	U1500-CR_1502_3
CR 1505	Salida o-Xileno Producto	Cumenos	U1500-CR_1505_1
		p-m Xileno	U1500-CR_1505_2
		o-Xileno	U1500-CR_1505_3

Tabla 8. Variables en las torres ST1504 y ST1505.

FUNCIÓN	INSTRUMENTO	TAG PI
Carga Torre	FIC 1508	U1500-FIC_1508
Nivel Torre	LIC 1513	U1500-LIC_1513
Nivel Tambor	LIC1517	U1500-LIC_1517
Salida Fondo	FIC1512	U1500-FIC_1512
Salida Xileno	FI1513	U1500-FI_1513
Reflujo	FIC1514	U1500-FIC_1514
Vapor a E1509	FIC 1511	U1500-FIC_1511
Temperatura Fondo	TIC 1528	U1500-TI_1528
Temperatura Plato 110	TI1526	U1500-TI_1526
Temperatura Plato 96	TI1527	U1500-TI_1527
Temperatura Cima	TI1525	U1500-TI_1525
Plato 110	p-m Xileno	U1500-CR_1504_1
Carga Torre	FIC 1512	U1500-FIC_1512
Nivel Torre	LIC 1518	U1500-LIC_1518
Nivel Tambor	LIC1521	U1500-LIC_1521
Salida Fondo	FIC1515	U1500-FIC_1515
Salida o-Xileno	FI1517	U1500-FI_1517
Reflujo	FIC1518	U1500-FIC_1518
Vapor a E1515	FIC 1516	U1500-FIC_1516
Temperatura Fondo	TIC 1536	U1500-TI_1536
Temperatura Plato 60	TI1526	U1500-TI_1534
Temperatura Cima	TI1533	U1500-TI_1533

La tabla 9 presenta las características de calidad del ortoxileno producto para ser comercializado por ECOPEPETROL S.A.

Tabla 9. Parámetros de calidad Ortoxileno.

PROPIEDADES / CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	
		ASTM	Mínimo	Máximo
Apariencia (1)	N/A	Visual	Pasa	
Color escala platino cobalto	N/A	D1209		20
Color al lavado con ácido	N/A	D848		2
Compuestos de azufre	N/A	D853 (2)	Pasa	
Cromatografía		D3797		
Iso-propil benceno (Cumeno)	g/100 g			0,3
Meta y para-xileno	g/100 g			1,3
Ortoxileno	g/100 g		97,0	
C9+	g/100 g			0,8
Densidad relativa a 15,6°C	N/A	D4052	Reportar	143,0
Destilación		D850		
Rango de destilación	°C			2,0
Temperatura incluida	°C			144,4

Notas:

(1) Líquido claro libre de sedimentos y opacidad entre 18,3°C y 25,6°C.

(2) Libre de H₂S y SO₂; análisis cualitativo.

Fuente: ECOPEPETROL.

5.2. DISEÑO DEL SIMULADOR DE LA ST1504 EN ESTADO ESTACIONARIO UTILIZANDO ASPEN HYSYS ®

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos en el diseño de la simulación en estado estacionario de la ST1504, bajo los tres modelos termodinámicos definidos en la metodología. Iniciando con la recopilación y análisis de los datos de operación y el muestreo en línea, que permitieron la definición de tres casos de operación de la ST1504, la comparación de los datos

obtenidos en el simulador frente a los valores reales de los tres casos de operación descritos, finalizando con el análisis de estos resultados.

En la Figura 12 se puede apreciar la composición de la carga a la unidad U1500 y la desviación estándar para cada componente en cada uno de los tres casos definidos en la metodología de este trabajo. La Tabla 9, contiene la composición (% en volumen) de la carga a ST1504 en cada uno de los tres casos, establecidos en la metodología y obtenidos por el análisis en laboratorio según muestreo realizado.

El análisis en laboratorio contempló el análisis de 482 muestras de las corrientes de carga y productos de la unidad U1500, de las cuales 252 corresponde a la corriente de ortoxileno producto, logrando definir las composiciones promedio en cada uno los tres casos ya señalados.

El Caso 1 es el estado de operación típico de la unidad U1500, con carga suministrada exclusivamente desde la unidad de extracción líquido-líquido U1400, mientras en el Caso 2, se presenta un mayor contenido de benceno por la operación de la unidad U1600 como carga adicional a la unidad U1500.

El Caso 3, es el más reciente de operación, con suministro de carga exclusivo de la unidad U1400, pero con un contenido mayor de aromáticos pesados, debido al cambio de composición de la carga a la refinería, por crudos más pesados.

Figura 12. Composición de la carga a U1500 (%p/p) y desviación estándar de cada componente para los tres casos definidos.

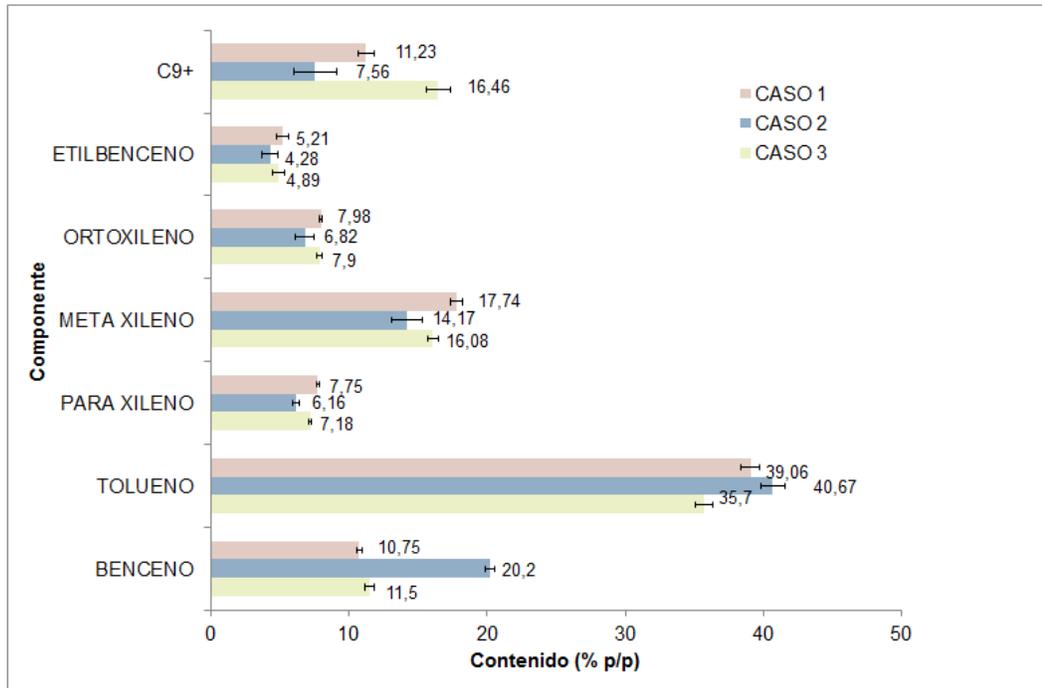


Tabla 10. Composición de carga a ST1504 (%p/p) para los tres casos definidos analizados en el periodo entre el 12 de mayo de 2015 y 13 de febrero del 2016.

Componente	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Benceno	0	0	0
Tolueno	0,16	0,52	0,24
Paraxileno	15,44	15,58	15
Metaxileno	35,32	35,87	30,35
Ortoxileno	15,9	17,23	13,52
E-Benceno	10,38	10,83	9,23
n-PropilBenceno	22,35	19,13	31,08
Cumeno	0,44	0,51	0,53
n-ButilBenceno	0,01	0,33	0,05

Fuente: Resultados de Muestreo de corrientes. ECOPETROL.

Para el desarrollo del simulador, se programaron en el *software* Aspen HYSYS® las dimensiones y condiciones reales de la ST1504, como se muestran en la Tabla 11. Este proceso se desarrolló de la misma manera para los tres estados termodinámicos seleccionados mediante el proceso descrito en la metodología, generando así nueve simulaciones, tres por cada caso operativo y tres paquetes termodinámicos evaluados.

Tabla 11. Condiciones de diseño ST1504 programadas en el simulador.

Numero de Etapas de la torre	120
Plato(s) de alimentación	51/61/71
Tipo De Condensador	Total
Descripción del Rehervidor	BJU
Heat Duty Rehervidor (M Btu / h)	15,32
Caída de presión en el rehervidor (PSI)	0,5
Presión en el rehervidor (PSIG)	21
Presión en el Condensador, (PSIG)	4
Diámetro de la torre	7' (2,1336 m)
Espaciamiento entre las etapas	1'6'' (0,4572m)
Altura de la torre	194' (59,1312 m)
Tipo De platos	Válvula

Fuente. *Data Sheet* ECOPELROL.

Para determinar el valor promedio de las principales variables de operación de la ST1504, se tomaron datos de operación de la unidad U1500, desde la herramienta de ECOPELROL PI-System, analizándose 33 variables relacionadas con la producción del ortoxileno; 7 variables, corresponden a analizadores en línea (cromatógrafos), 4 de condiciones de carga a la unidad U1500, y el resto variables de operación de la U1500, básicamente flujos y temperaturas, 12 de la ST1504 y 10 de la ST1505; esta última con el fin de evaluar impacto en la

recuperación y calidad de ortoxileno producto. Los principales valores de operación de la ST1504, para cada caso, son presentados en la Tabla 12.

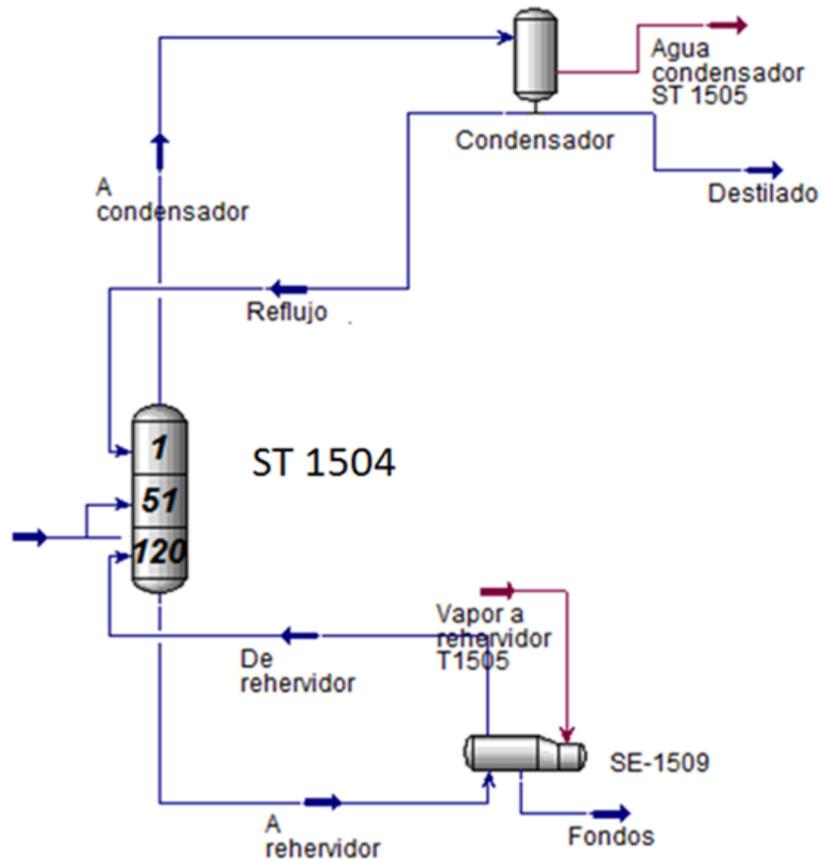
Tabla 12. Valores promedio de las principales variables de operación de la ST1504 en los tres casos determinados.

CASO 1	Denominación	Valor	Desviación estándar	Unidad
Carga		1499,43	82	BD
Temperatura de cima	U1500-TI_1525	288,67	1,3	°F
Reflujo	U1500-FIC_1514	6102,70	233	BD
Producto	U1500-FI_1513	992,05	74	BPD
Plato 110	U1500-TI_1526	363,14	5,7	°F
Temperatura fondo	U1500-TI_1528	361,08	2,1	°F
Condensado de rehervidor	U1500-FIC_1511	37,41	1,2	GPM
Relación destilado		0,66	0,04	
Relación reflujo		6,15	0,4	
CASO 2	Denominación	Valor	Desviación estándar	Unidad
Carga		1290,65	51	BD
Temperatura de cima	U1500-TI_1525	287,63	1,2	°F
Reflujo	U1500-FIC_1514	6170,40	201	BD
Producto	U1500-FI_1513	853,59	53	BPD
Plato 110	U1500-TI_1526	358,67	4,72	°F
Temperatura fondo	U1500-TI_1528	358,01	3	°F
Condensado de rehervidor	U1500-FIC_1511	37,47	1,1	GPM
Relación destilado		0,66	0,03	
Relación reflujo		7,23	0,4	
CASO 3	Denominación	Valor	Desviación estándar	Unidad
Carga		1508,00	98	
Temperatura de cima	U1500-TI_1525	286,80	1,3	°F
Reflujo	U1500-FIC_1514	5219,94	202	BD
Producto	U1500-FI_1513	938,89	54	BPD
Temperatura fondo	U1500-TI_1528	365,73	3	°F
Condensado de rehervidor	U1500-FIC_1511	34,58	1,2	GPM
Relación destilado		0,62	0,03	
Relación reflujo		5,56	0,4	

Fuente. PI-System.

En la Figura 13 se puede observar el diseño final del simulador de la ST1504 en estado estable.

Figura 13. Diseño final en el simulador en estado estable de la ST1504.

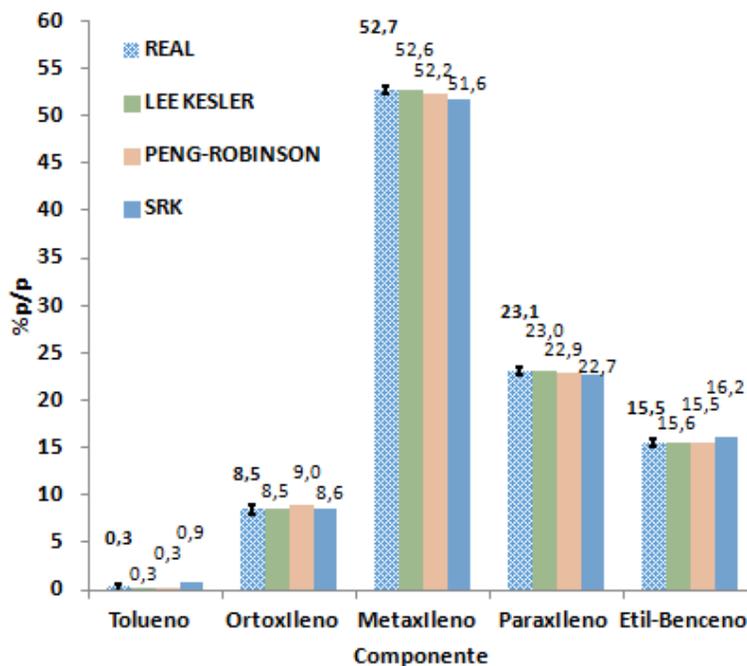


Fuente: Simulador Hysys®.

5.2.1. Verificación del simulador de la ST1504 en estado estacionario utilizando Aspen HYSYS®. La veracidad de los datos obtenidos en la simulación para el Caso 1, con los tres paquetes termodinámicos, se visualiza en las Figuras 3,4 y 5. La Figura 14, representa la composición (%p/p) del destilado y el resultado obtenido en las simulaciones; la Figura 15 representa la composición (%p/p) de cada componente del producto de fondo de la ST1504 con su respectiva

desviación estándar y el resultado obtenido en las simulaciones y en la Figura 16, se muestra los valores obtenidos en las simulaciones de las variables de temperatura de cima y temperatura de fondo de la ST1504 frente al valor de la operación real.

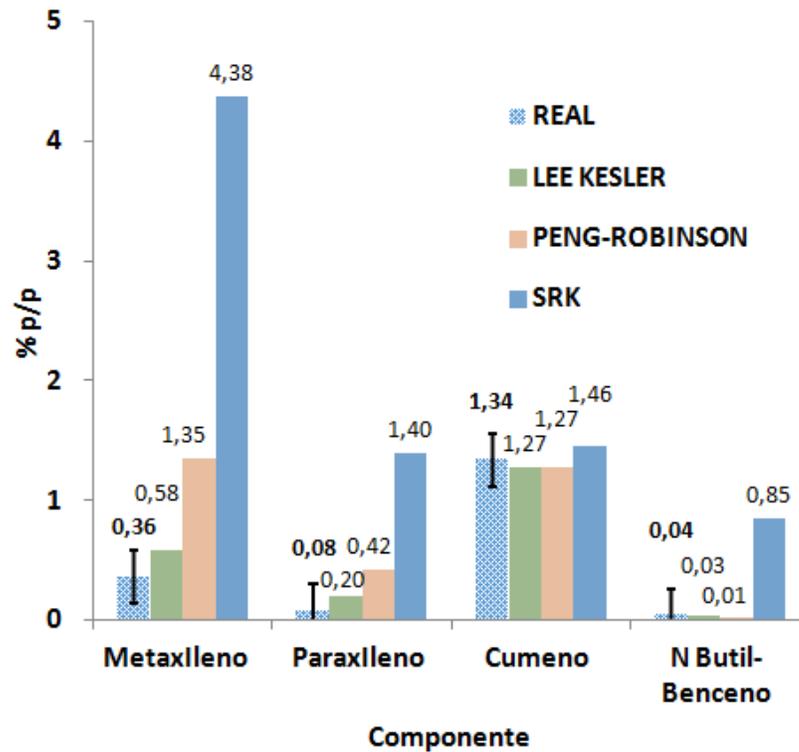
Figura 14. Composición del destilado (%p/p) para el caso 1, real y obtenida por simulación utilizando los tres paquetes termodinámicos.



Para los tres casos, analizados las simulaciones muestran un alto grado de confiabilidad con los tres paquetes termodinámicos definidos según la metodología E. C. Carlson⁴ basado en la no polaridad y conocimiento de composiciones de los productos aromáticos manejados en la simulación con unos rangos de temperatura y presión conocidos.

⁴ Don't Gamble with physical properties for simulations, Eric C. Carlson, Aspen Technology Inc.

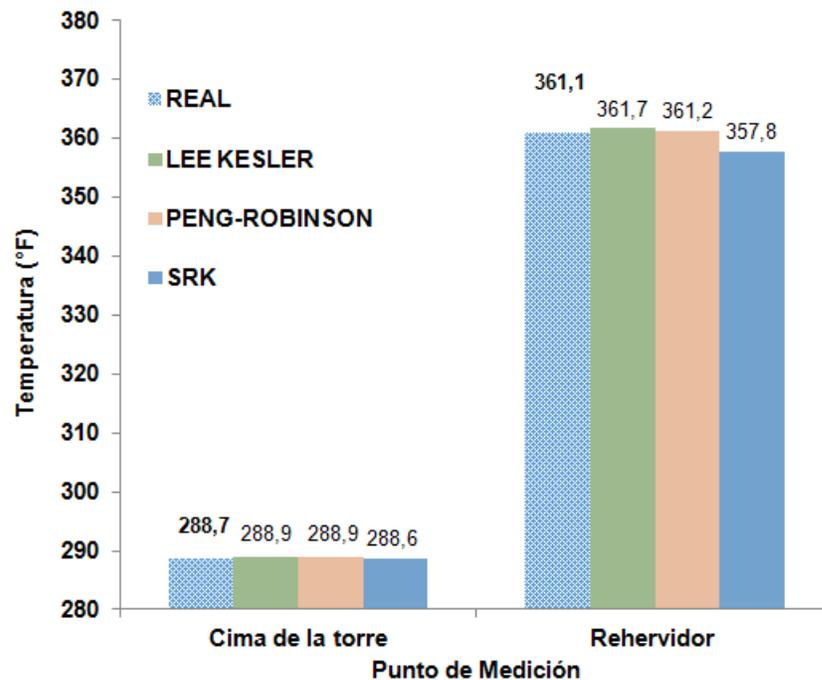
Figura 15. Composición del producto de fondo (% p/p) para el Caso 1 y el resultado de los simuladores con los tres paquetes termodinámicos.



Sobresale por su precisión, la realizada con el paquete termodinámico LEE-KESLER-PLOCKER, particularmente con los datos obtenidos en la composición del destilado de la ST1504 y en especial, el contenido de ortoxileno (pérdidas en el xileno producto), dato fundamental en el análisis objeto de este trabajo. Registrando con este paquete termodinámico, una diferencia de apenas 0,02% p/p entre el valor obtenido por balance real de la torre y el valor determinado por la simulación en el Caso 1. Para los Casos 2 y 3, la diferencia de este mismo parámetro, fue de 0,03% y 0,09%, respectivamente, entre el valor obtenido por balance real de la torre y el valor determinado por la simulación. Las temperaturas de cima y de fondo, reflejan confiabilidad en los datos obtenidos en la simulación

con los tres paquetes termodinámicos, obteniendo diferencias de menos de un grado entre el valor promedio medido en el proceso y el valor obtenido por simulación.

Figura 16. Temperaturas de cima y fondo para el Caso 1 y el resultado de los simuladores con los tres paquetes termodinámicos.



La Tabla 13 contiene las principales condiciones de diseño y valores promedio obtenidos de las principales variables de la operación de la ST1504 en el Caso 1 y su comparación frente a los valores obtenidos en cada una de las simulaciones con los tres paquetes termodinámicos definidos, Lee Kesler, Peng Robinson y SRK. De la verificación realizada en las tres simulaciones desarrolladas con los tres paquetes termodinámicos ya mencionados, la simulación construida con el paquete termodinámico LEE-KESLER-PLOCKER, brinda la mayor aproximación al comportamiento real de la operación de la torre ST1504 y un alto grado de

confiabilidad en la composición de sus corrientes, para los tres casos de operación planteados en estado estable.

5.3. ESTUDIO DE LA RESPUESTA ANTE PERTURBACIONES EN ESTADO ESTACIONARIO DE LA ST1504

Con el simulador se analizó la respuesta en estado estacionario de la ST1504 ante las variaciones de reflujo y de temperatura de fondo. Para definir el impacto en las composiciones de destilado y fondo de las ST1504, ante las perturbaciones en las variables temperatura de fondo y rata de reflujo en estado estacionario, solo se perturbó la variable a analizar, mantenido estable las demás condiciones de la torre. Igualmente se determinó el efecto de la misma sobre el rendimiento y calidad del ortoxileno producto, variables de salida que se desean optimizar.

5.3.1. Análisis en estado estacionario de la influencia en ST1504 de las variables de entrada, temperatura de fondo y reflujo para cada caso de operación. El análisis en esta sección se realizó para los tres casos de operación establecidos, cuyas composiciones de carga a la ST1504 se detallan en la Tabla 9, empleando el paquete termodinámico LEE-KESLER-PLOCKER; definido en la sección anterior como el de mayor aproximación al comportamiento real de la operación de la torre ST1504.

Tabla 13. Comparación de variables de proceso y resultados de las simulaciones en estado estable para el caso 1.

VARIABLE	REAL	LEE KESLER	DIFERENCIA	PENG-ROBINSON	DIFERENCIA	SRK	DIFERENCIA
Temperatura Carga (°F)	332,4	332,4	=	332,4	=	332,4	=
Número de Etapas de la torre	120	120	=	120	=	120	=
Plato(s) de alimentación	51/61/71	51	=	51	=	51	=
Tipo De Condensador	Total	Total	=	Total	=	Total	=
Descripción del Rehervidor	BJU	BJU	=	BJU	=	BJU	=
Heat Duty Rehervidor (M Btu / h)	15,32	12,871	2,449	12,949	2,371	13,346	1,974
Duty Condensador (Mbtu/h)	15,52	12,957	2,563	13,133	2,387	13,14	2,38
Caída de presión en el rehervidor (PSI)	0,5	0,5	=	0,5	=	0,5	=
Temperatura en la cima de la torre (°F)	288,7	288,9	-0,2	288,9	-0,2	288,6	0,1
Temperatura en el rehervidor (°F)	361,08	361,7	-0,62	361,2	-0,12	357,8	3,28
Razón de reflujo (1)	6,15	6,096	0,054	6,09	0,06	6,09	0,06
Razón de líquido destilado (liquid rate) (2)	0,66	0,66	0	0,67	-0,01	0,59	0,07
Razón de Rehervidor (3)	ND	15,37	=	15,14	ND	15,01	ND
Diámetro de la torre	7'(2,1336 m)	7'(2,1336 m)	=	7'(2,1336 m)	=	7'(2,1336 m)	=
Espaciamiento entre las etapas	1'6'' (0,4572m)	1'6'' (0,4572m)	=	1'6'' (0,4572m)	=	1'6'' (0,4572m)	=
Tipo De platos	Válvula	Válvula	=	Válvula	=	Válvula	=

(1) Reflujo / Líquido destilado

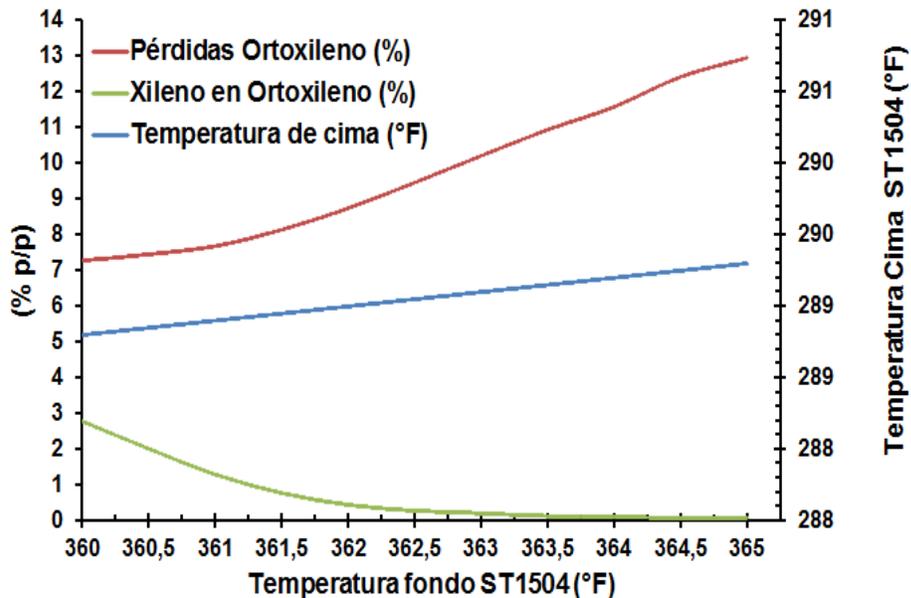
(2) Destilado (Producto Cima)/ Carga

(3) Producto a rehervidor / Producto fondo

a) Análisis en estado estacionario de la variación de temperatura de fondo con reflujo fijo a 6000 BD.

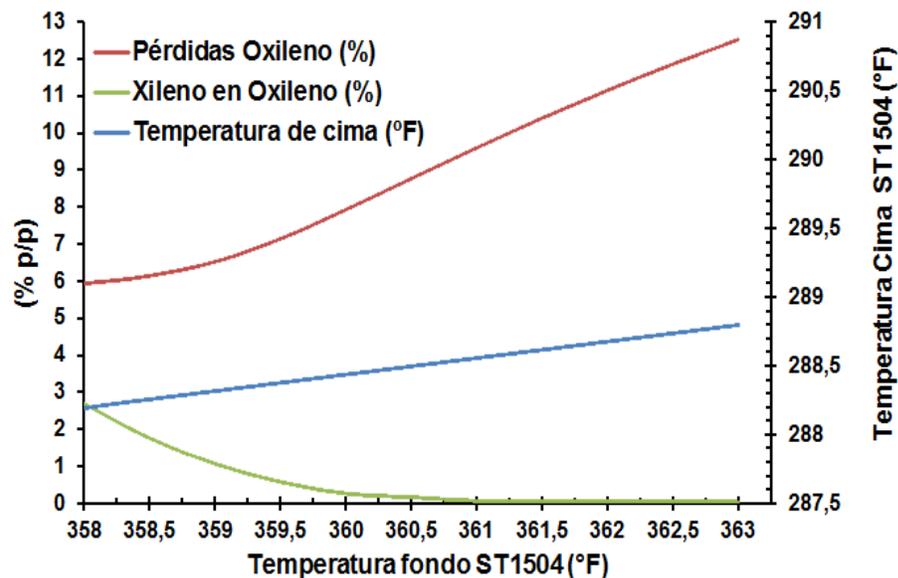
En la Figura 17, se puede observar el comportamiento de las composiciones de cima y fondo de la ST1504 en la simulación del Caso 1 al incrementarse el valor de la temperatura de fondo en la ST1504 (desde 360°F. hasta 365°F.), mientras se mantiene estable la tasa de reflujo en 6000 BD. Se detallan específicamente las pérdidas de ortoxileno con el xileno producto, el contenido de xileno en el ortoxileno producto y la temperatura de cima obtenida en la ST1504. Las pérdidas de ortoxileno, condición no deseada de la operación, corresponden al porcentaje en peso de ortoxileno que sale con la corriente de cima, y que, si bien no afectan la calidad de esta corriente, constituyen una pérdida al ser una corriente de menor valor que la corriente de fondo.

Figura 17. Variación en las composiciones de producto de cima (contenido de ortoxileno) y fondo (contenido de Xilenos) de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD. Caso 1.



El contenido de xileno en el ortoxileno, corresponde al porcentaje en peso de para y metaxilenos que salen con la corriente de fondo, y que deben controlarse para no incumplir las especificaciones del ortoxileno producto. Este mismo comportamiento para el Caso 2 y Caso 3, a la misma rata de reflujo se aprecia en las Figuras 18 y 19, respectivamente.

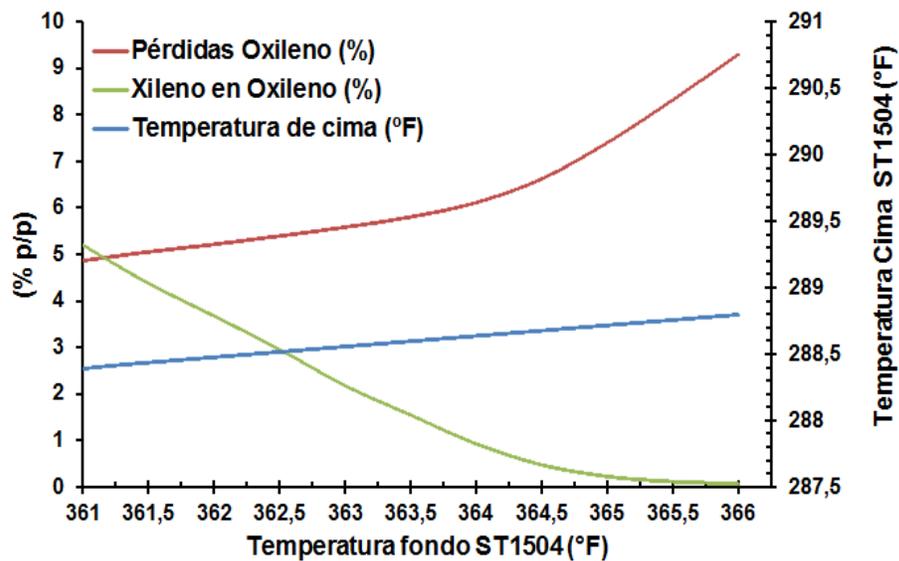
Figura 18. Variación en las composiciones de producto de cima y fondo de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.



Como se aprecia en todos los casos, al incrementar el valor de temperatura de fondo se mejora la calidad del ortoxileno, al lograr disminuir la concentración de xilenos (para y meta) en la corriente de fondo de la ST1504, establecida como control de calidad en máximo 1,7 % en volumen. El aumento de vapor al rehervidor de la ST1504, con el fin de incrementar el punto de control de la temperatura de fondo de la ST1504, genera un mayor flujo de vapores en el

sistema, con una mayor destilación de los componentes más livianos de la mezcla, en este caso, para y metaxilenos.

Figura 19. Variación en las composiciones de producto de cima y fondo de ST1504, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.

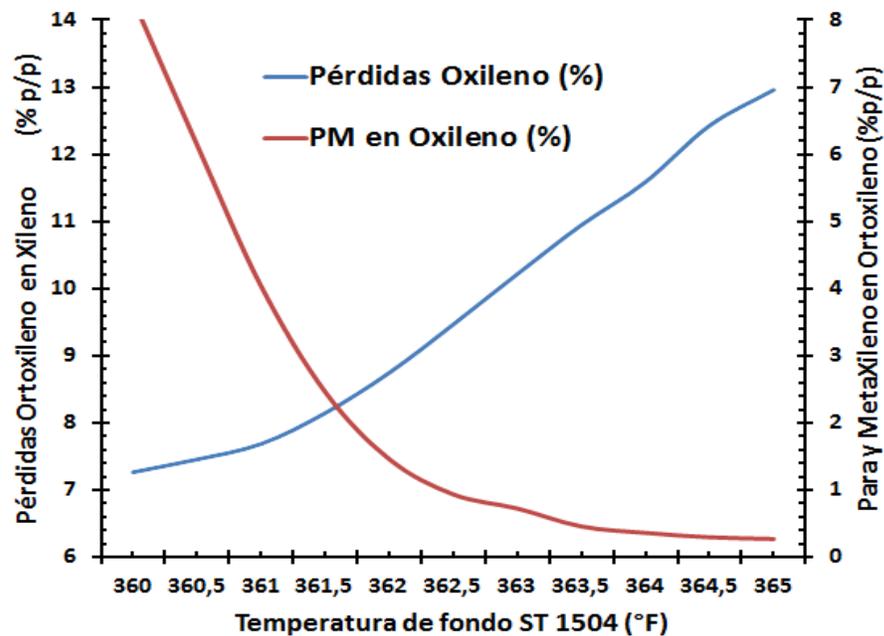


Del mismo modo en la Figura 20, se presentan las pérdidas de ortoxileno en el producto de cima y el contenido de xilenos (para y meta) en el ortoxileno producto enviado a tanque en la simulación del Caso 1, como efecto del incremento de la temperatura de fondo de la ST1504 con un valor fijo de reflujo a 6000 BD. Para el Caso 2 y Caso 3 se presentan en las Figuras 21 y 22.

En este caso, las pérdidas de ortoxileno, corresponden al porcentaje en peso de ortoxileno que sale con la corriente de cima, y no afectan la calidad de esta corriente. De otra forma, el contenido de xilenos (para y meta), es analizado ya en

la corriente de ortoxileno que se envía a almacenamiento para su venta como producto final, y corresponde a la corriente de fondo de la ST1504 y que posteriormente se destila en la siguiente torre del tren de destilación, ST1505, para retirarle componentes más pesados.

Figura 20. Variación de las pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de xilenos (para y meta) en ortoxileno producto, Caso 1 por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.



Como principio de la destilación, el 100% del contenido de para y metaxileno que no se despoja en la ST1504 y que sale con la corriente de fondo de la ST104, saldrá con el ortoxileno despojado en la ST1505, llegando incluso a afectar la calidad de dicho producto.

Figura 21. Variación de las pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de xilenos (para y meta) en ortoxileno producto, Caso 2, por efecto de la variación de la temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.

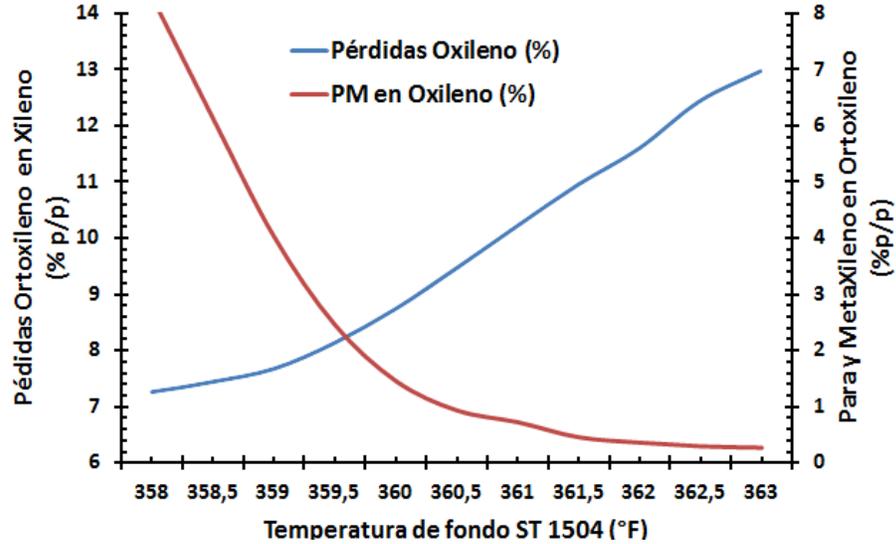
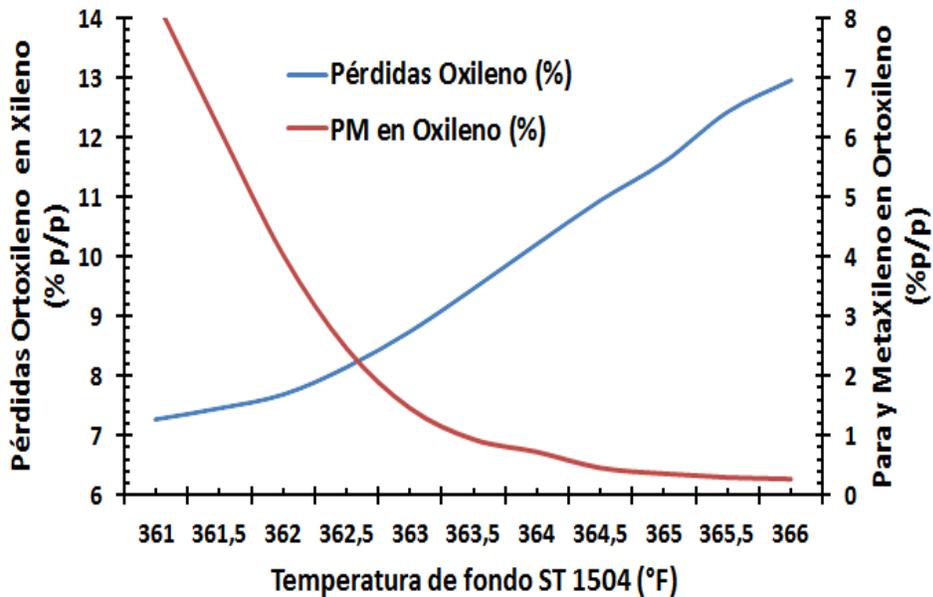


Figura 22. Variación de pérdidas de ortoxileno por cima y contenido de PMxilenos en Ortóxileno producto, Caso 3, por efecto de variación de temperatura de fondo; Reflujo fijo a 6000 BD.



En términos de calidad, el incremento de la temperatura de fondo, constituye una opción segura para mantener el contenido de para y metaxileno por debajo de 1,7% en el ortoxileno producto. No obstante, al generar mayor despojo de estos componentes en la ST1504 se presenta un detrimento en el volumen de fondo y un incremento en las pérdidas de ortoxileno por la cima de la ST1504.

En los tres casos, al incrementar la temperatura de fondo de la ST1504, se presenta un incremento de las pérdidas de ortoxileno con el producto de cima, lo que representa una disminución del rendimiento de ortoxileno, efecto no deseado en la operación de la unidad U1500. Pérdidas entre 4,89% y 7,28% se incrementan a valores entre 9,32% y 12,97% con un incremento de 5°F en la temperatura de fondo de la ST1504. Este efecto se ve con mayor detalle en las Tablas 5, 6 y 7.

La Tabla 14 presenta para el Caso 1, el efecto de la variación de la temperatura de fondo en el contenido de ortoxileno en la corriente de cima (pérdidas de ortoxileno), el rendimiento de ortoxileno representado en barriles por día (ortoxileno producto) y el contenido de para y metaxileno en la corriente de ortoxileno producto (PM en ortoxileno). Las Tablas 15 y 16 presentan la misma información para los Casos 2 y 3.

Como se aprecia en la Tabla 14, con un reflujo fijo de 6000 BD, para el Caso 1, se alcanza la calidad del ortoxileno (señalado de color verde) solo al operar la ST1504 con una temperatura superior a los 362°F, pero este incremento de temperatura aumenta las pérdidas de ortoxileno en el producto de cima por encima de 9%, con un lógico efecto negativo en el rendimiento de ortoxileno producto.

Tabla 14. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortoxileno, Caso 1.

Reflujo (BPD)	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Temperatura de fondo (°F)	360	360,5	361	361,5	362	362,5	363	363,5	364	364,5	365
Temperatura de cima (°F)	288,8	288,8	288,8	288,9	288,9	289	289,1	289,1	289,2	289,3	289,3
Pérdidas Ortoxileno (%)	7,28	7,47	7,7	8,16	8,76	9,48	10,23	10,96	11,6	12,44	12,97
Xileno en Ortoxileno (%)	2,81	2,03	1,3	0,77	0,44	0,27	0,2	0,12	0,09	0,07	0,06
Fondo T1504 (BPD)	527	519	510	502	492	483	440	465	457	448	441
Ortoxileno producto (BPD)	163,6	161,1	157,7	153,2	146,1	138	120,3	121,1	112,9	104,8	97,2
PM en Ortoxileno (%)	8,299	6,137	4,034	2,462	1,46	0,936	0,726	0,459	0,363	0,298	0,271

Tabla 15. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortoxileno, caso 2.

Reflujo (BPD)	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Temperatura de fondo (°F)	358	358,5	359	359,5	360	360,5	361	361,5	362	362,5	363
Temperatura de cima (°F)	288,2	288,2	288,2	288,3	288,4	288,5	288,5	288,6	288,7	288,8	288,8
Pérdidas Ortoxileno (%)	5,95	6,18	6,56	7,18	7,97	8,81	9,64	10,44	11,19	11,9	12,56
Xileno en Ortoxileno (%)	2,72	1,79	1,1	0,61	0,3	0,2	0,1	0,1	0,09	0,07	0,07
Fondo T1504 (BPD)	442	435	427	418	409	400	391	383	375	368	61
Ortoxileno producto (BPD)	180	173,1	166,5	158,5	149,6	140,8	132,2	122,9	116,6	107	13,49
PM en Ortoxileno (%)	6,68	4,499	2,821	1,609	0,82	0,568	0,296	0,312	0,289	0,241	0,317

Con un reflujo fijo de 6000 BD, en el Caso 2 de operación, como se muestra en la Tabla 15, la calidad del ortoxileno se alcanza con una temperatura de fondo superior a 359,5°F. Para el Caso 3 de operación, con este mismo reflujo, la calidad del ortoxileno se alcanza con una temperatura de fondo superior a 365°F, como se visualiza en la Tabla 16; en ambos casos las pérdidas de ortoxileno en el destilado están por encima de 7%.

Tabla 16. Efecto por la variación de temperatura de fondo en rendimiento y calidad ortoxileno, Caso 3.

Reflujo (BPD)	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Temperatura de fondo (°F)	361	361,5	362	362,5	363	363,5	364	364,5	365	365,5	366
Temperatura de cima (°F)	288,4	288,4	288,4	288,4	288,5	288,5	288,6	288,6	288,7	288,7	288,8
Pérdidas Ortóxileno (%)	4,89	5,07	5,23	5,41	5,6	5,82	6,13	6,64	7,42	8,34	9,32
Xileno en Ortóxileno (%)	5,22	4,4	3,7	2,98	2,2	1,57	0,95	0,5	0,25	0,14	0,09
Fondo T1504 (BPD)	681	681	671	661	652	643	634	625	615	605	595
Ortóxileno producto (BPD)	192,2	186,6	179,2	171,7	164,3	158	151,8	140,6	130,7	121,8	113,6
PM en Ortóxileno (%)	18,5	16,06	13,86	11,47	8,73	6,39	3,967	2,222	1,176	0,695	0,471

b) Análisis en estado estacionario de la variación de reflujo con temperatura de fondo fija a 360°F

En la Figura 23 se observa el efecto en la composición de cima y fondo de la ST 1504, dado el incremento del valor del reflujo sobre la ST1504 para el Caso 1 (de 60500 BD a 9500 BD, manteniendo un valor fijo de temperatura en el fondo (en este caso de 360°F).

Se presenta una disminución de las pérdidas de ortóxileno por la cima de la ST1504 y del contenido de Para y Meta Xilenos en la corriente de fondo de la St1504, con una lógica mejora en la calidad del ortóxileno producto, como consecuencia del incremento del reflujo a la ST1504. Este mismo comportamiento se aprecia en las Figura 24 para el Caso 2 con una temperatura de fondo de 358°F y en Figura 25 para el Caso 3 con una temperatura de fondo de 363°F.

Figura 23. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo de 360°F fija. Caso 1.

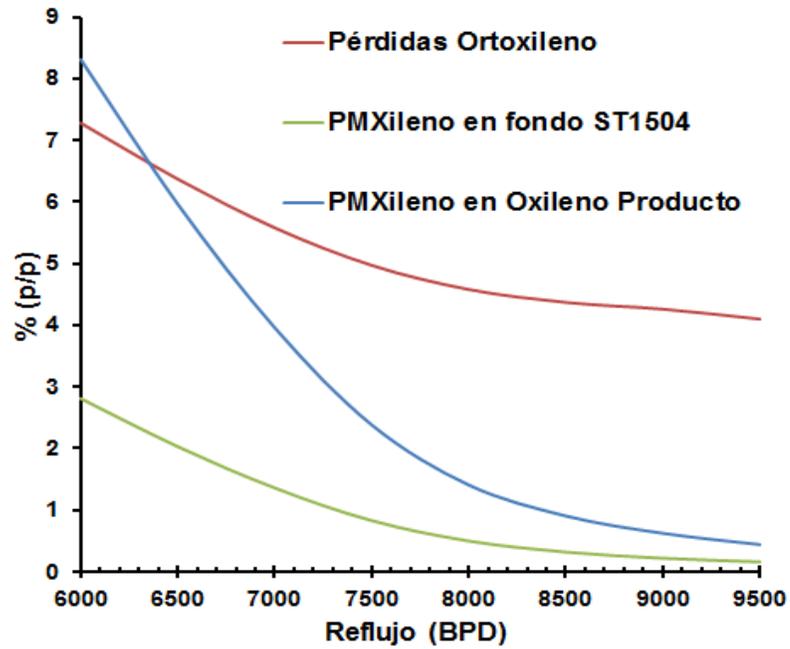


Figura 24. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 358°F fija. Caso 2.

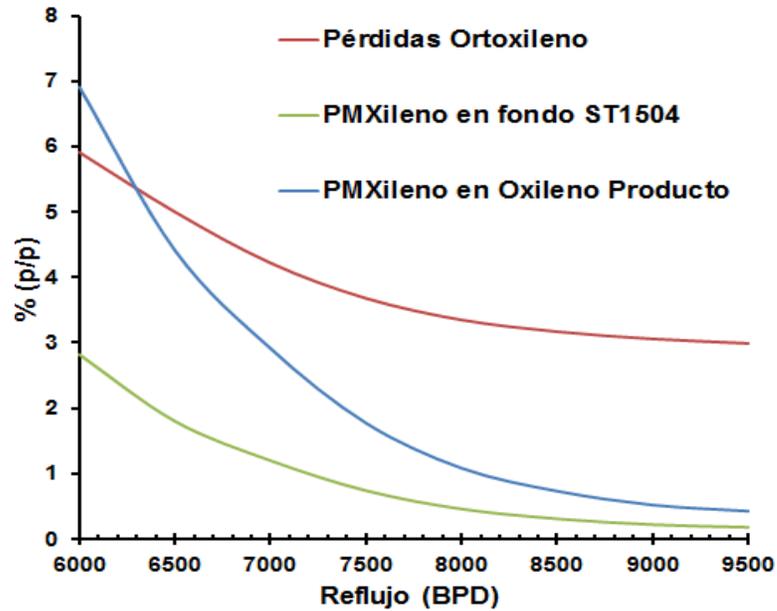
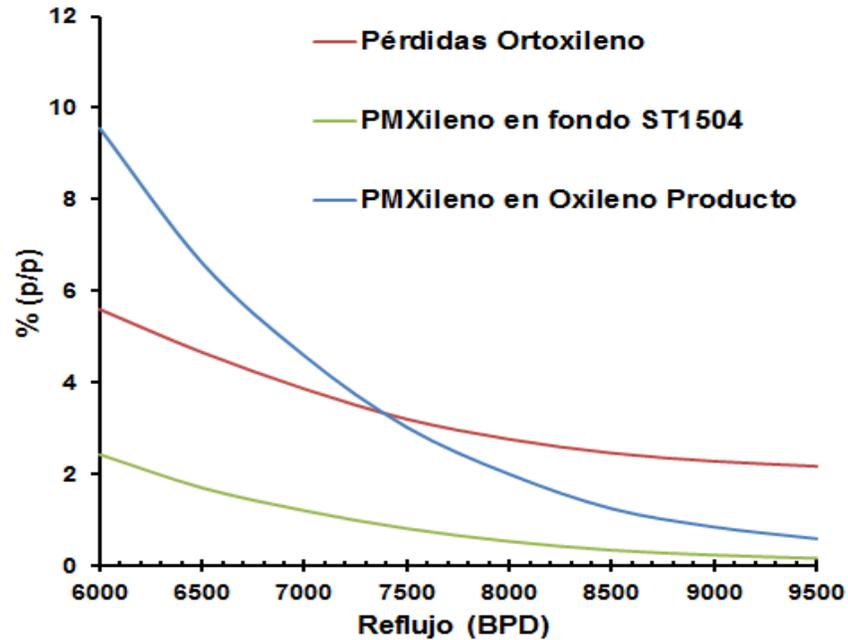


Figura 25. Efecto sobre composiciones de cima y fondo de ST1504 por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 363°F fija. Caso 3.



El incremento de la tasa de reflujo a ST1504, evidencia, en los tres casos, una disminución de contenido de para y metaxileno en el producto de fondo de la ST1504 como efecto deseado, y caso contrario al resultado anterior de donde se incrementaba la temperatura de fondo, las pérdidas de ortóxileno en el destilado también disminuyen simultáneamente con este incremento del reflujo, lo que repercute directamente en un positivo incremento de rendimiento de ortóxileno.

En la Tabla 17 puede apreciarse los datos obtenidos con diferentes valores de reflujo, al incrementar el valor de la tasa de reflujo en el Caso 1, obteniéndose la calidad deseada de ortóxileno (señalado en verde en la Tabla) y al mismo tiempo, incrementando el rendimiento del mismo, al disminuir las pérdidas de ortóxileno en el destilado de la ST1504. Los mismos datos, para los Casos 2 y 3 pueden observarse en las Tablas 18 y 19 respectivamente.

Tabla 17. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortoxileno.

Caso 1.

Temperatura de fondo (°F)	360	360	360	360	360	360	360	360
Reflujo (BPD)	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500
Temperatura de cima (°F)	288,8	288,7	288,6	288,6	288,5	288,5	288,5	288,5
Pérdidas Ortoxileno (%)	7,28	6,37	5,58	4,97	4,58	4,37	4,26	4,1
Xileno en Ortoxileno (%)	2,81	2,03	1,36	0,83	0,5	0,32	0,22	0,16
Fondo T1504 (BPD)	527	530	534	533	537	538	538	538
Ortoxileno producto (BPD)	178,18	180,36	183,48	185,64	190,64	190,02	189,48	194,54
PM en Ortoxileno (%)	8,3112	5,9653	3,9581	2,383	1,4085	0,906	0,6246	0,4425

Tabla 18. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortoxileno.

Caso 2.

Temperatura de fondo (°F)	358	358	358	358	358	358	358	358
Reflujo (BPD)	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500
Temperatura de cima (°F)	288,2	288,1	288	288	287,9	287,9	287,9	287,9
Pérdidas Ortoxileno (%)	5,91	5	4,22	3,68	3,35	3,17	3,06	2,99
Xileno en Ortoxileno (%)	2,82	1,8	1,2	0,74	0,46	0,31	0,22	0,18
Fondo T1504 (BPD)	443	446	449	451	452	453	453	453
Ortoxileno producto (BPD)	180,83	181,97	184,99	188,25	191,92	191,66	191,26	191,08
PM en Ortoxileno (%)	6,9084	4,4118	2,9126	1,7729	1,0834	0,7327	0,5211	0,4267

En el Anexo D, se pueden apreciar las curvas de operación para los tres casos, donde se describe el comportamiento de la ST1504 bajo tres temperaturas de fondo preestablecidas en la simulación, con variación de reflujo entre 6000 BD y 9500 BD. En estas graficas se aprecia lo establecido anteriormente, la temperatura de operación óptima del fondo de la ST1504 es de 360°F para el Caso1, 358°F para el caso 2 y 363°F para el caso 3.

Tabla 19. Efecto por la variación de reflujo en rendimiento y calidad ortoxileno.

Caso 3.

Temperatura de fondo (°F)	363	363	363	363	363	363	363	363
Reflujo (BPD)	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500
Temperatura de cima (°F)	288,5	288,4	288,3	288,3	288,2	288,2	288,2	288,2
Pérdidas Ortoxileno (%)	5,6	4,66	3,86	3,2	2,76	2,46	2,28	2,17
Xileno en Ortoxileno (%)	2,43	1,7	1,2	0,81	0,53	0,34	0,23	0,16
Fondo T1504 (BPD)	652	655	658	659	661	662	662	662
Ortoxileno producto (BPD)	165,8	168,34	172,4	176,68	175,36	180,99	180,26	179,8
PM en Ortoxileno (%)	9,5556	6,6148	4,5802	3,0213	1,9977	1,2436	0,8447	0,5891

Como se definió anteriormente, el incremento de reflujo hacia la ST1504 tiene un efecto positivo en los efectos deseados. Para el caso de las pérdidas de ortoxileno en el destilado, se presenta una disminución con el incremento de reflujo, al igual que se aprecia una mejora en la calidad del Ortoxileno producto al disminuirse el contenido de para y meta xileno en el mismo. Con un reflujo superior a los 7000 BPD, para el Caso 1, con el valor de temperatura de fondo mencionado en el párrafo anterior, las pérdidas de ortoxileno en el destilado de la ST1504 estarían por debajo de 5%. Para el Caso se requiere un reflujo superior a los 6500 BPD, y para el Caso 3 un reflujo superior a los 6000 BPD.

6. SIMULACIÓN DE LA ST1504 EN ESTADO DINÁMICO

6.1. DISEÑO DE SIMULACIÓN EN ESTADO DINÁMICO UTILIZANDO ASPEN HYSYS®

Para analizar el comportamiento del sistema de la ST1504 en estado dinámico, con la ayuda del *software* Aspen HYSYS®, es necesario partir de un sistema con convergencia en estado estacionario. La simulación de la ST1504 en estado estacionario fue construida con los parámetros establecidos en la Tabla 20.

Tabla 20. Variables de proceso de la simulación de la ST1504, en estado estacionario.

Variables	
Temperatura de carga (°F)	332,4
Número de platos	120
Plato de alimentación	51
Tipo de condensador	Total
Descripción del rehervidor	BJU
Duty del rehervidor (MBtu / h)	15,32
Caída de presión en el rehervidor (psi)	0,5
Presión en el condensador (psig)	1,8
Presión en el rehervidor (psig)	15,3
Temperatura de cima (°F)	288,7
Temperatura de fondo (°F)	360
Razón de reflujo (1)	6,15
Razón de líquido destilado (2)	0,662
Diámetro de la torre (ft)	7
Espaciamiento entre platos (ft)	1,5
Tipo de plato	Válvula

(1) Reflujo / Destilado; (2) Destilado / Carga

Basados en el análisis y conclusión del capítulo anterior, se determinó llevar a estado dinámico la simulación con el paquete termodinámico Lee Kesler.

Inicialmente, el asistente dinámico de Hysys® mostraba advertencias respecto a las dimensiones de la torre y las presiones de operación en el condensador y el rehervidor. El asistente proponía cambiar el diámetro de 7 a 9 ft, y aumentar la presión en el condensador hasta obtener una diferencia de presión, entre éste y el rehervidor, de 11,5 psig.

Dado que el diámetro original de la torre es de 7 ft y el análisis de capacidad del sistema es fundamental en este trabajo, no se aceptó la sugerencia del asistente respecto a modificar las dimensiones de la torre. Sin embargo, la segunda sugerencia, de establecer en 11,5 psig el delta de presión entre condensador y rehervidor sí fue tomada en cuenta, dada la operación de la ST1504 a un sistema de tea sin control de presión y la no existencia de datos históricos de este delta de operación, optando por reducirse la presión para la simulación en estado dinámico del rehervidor de 15,3 a 13,3 psig. Los resultados obtenidos con las nuevas condiciones de presión se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Variables de proceso de la simulación de la ST1504 bajo las nuevas condiciones de presión en el rehervidor.

Caída de presión en el rehervidor (psi)	0,5
Presión en el condensador (psig)	1,8
Presión en el rehervidor (psig)	13,3
Temperatura de cima (°F)	289,4
Temperatura de fondo (°F)	360,0

Para estabilizar los niveles del sistema dinámico, estipulados por defecto por Aspen HYSYS® en 50%, se instalaron controladores de nivel en la simulación del condensador y rehervidor, estos controladores existen en el diseño y en el actual esquema de operación de la torre ST1504. Del mismo modo, fueron instaladas en

la simulación las válvulas FRCV-1514 ($C_v=7,8$) para control del reflujo, y en la corriente de fondo se instaló la válvula FCRV-1512 ($C_v = 9$), para el control del flujo de salida de producto de fondo.

Finalmente, se instalaron los demás controladores existentes en el esquema de operación actual de la ST1504. En primer lugar, se terminó de configurar el controlador LIC1517 en el condensador, al igual que se agregó el lazo de control en cascada del nivel del rehervidor, que consta del controlador LIC1513 y su esclavo, el FIC1512. Igualmente, se instaló el controlador TIC1528, que regula la temperatura en el fondo de la torre. Los parámetros de sintonización de los controladores, actualmente configurados en el sistema de control DCS de la unidad U1500, se presentan en la Tabla 22 estos mismos valores fueron configurados en la simulación.

Tabla 22. Parámetros de sintonización de los controladores de la T1504.

Controlador	Tipo	Sintonización			Acción	Rango
		K ⁽¹⁾	T1 ⁽²⁾ (min)	T2 ⁽³⁾ (min)		
LIC-1517	PID	1,2	4	0	Directa	0-100 (%)
FIC-1514	PID	0,1	0,06	0	Inversa	0-9720 (BPD)
TIC-1528	PID	0,06	0,03	0	Inversa	0-400 (°F)
FIC-1512	PID	0,3	0,54	0	Inversa	0-990 (BPD)
LIC-1513	PID	2,5	3	0	Directa	0-100 (%)

(1) K \equiv Ganancia

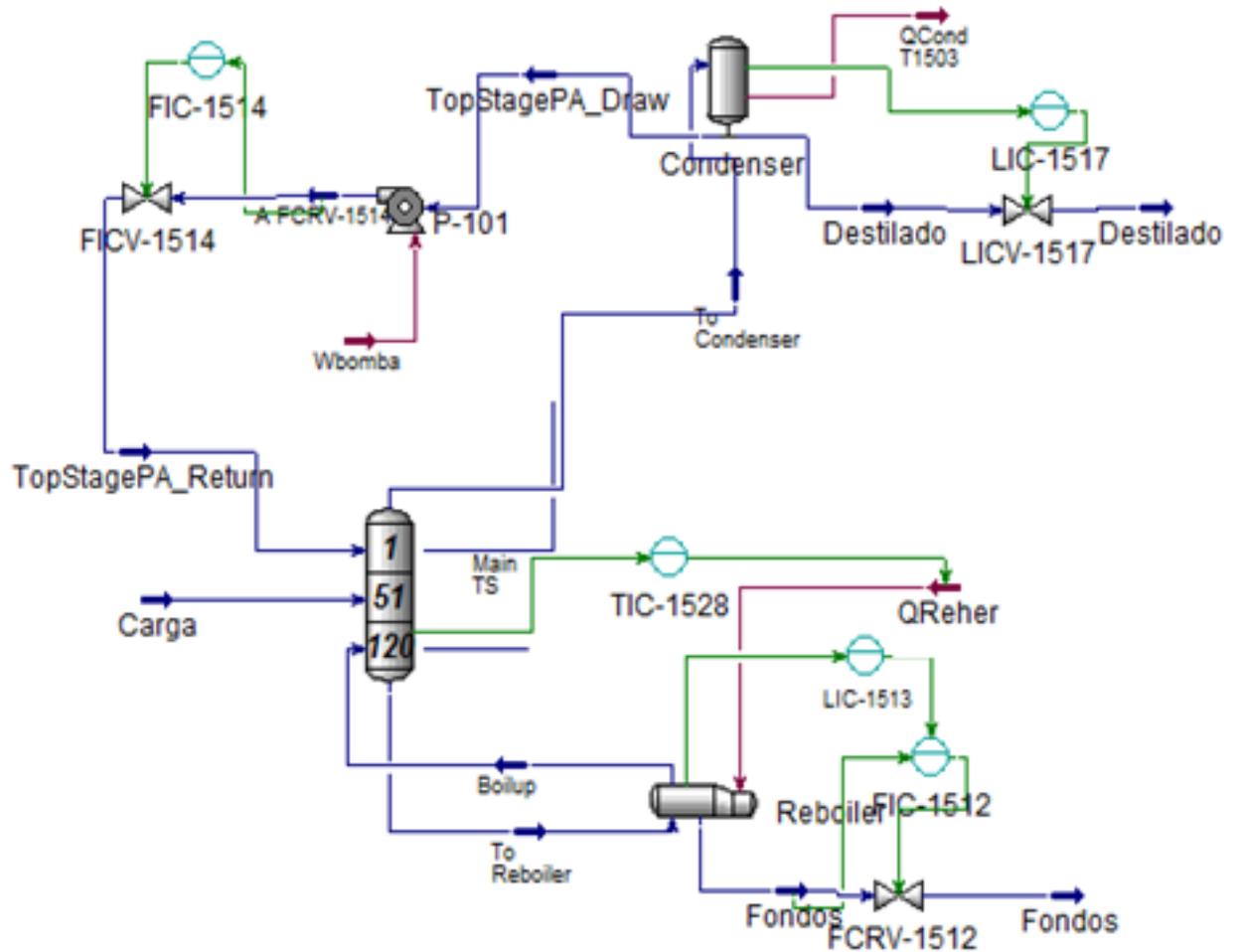
(2) T1 \equiv Tiempo integral (minutos/repetición)

(3) T2 \equiv Tiempo derivativo (minutos)

Fuente. DCS Aromáticos, ECOPEPETROL.

En la Figura 26, Simulación en estado dinámico de ST1504, se aprecian los controladores instalados en la simulación para estudio del sistema.

Figura 26. Simulación en estado dinámico de ST1504.



Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

Actualmente existen cuatro (4) ecuaciones configuradas en el DCS Honeywell y son⁵:

Ecuación A:

⁵ Honeywell PM Control Functions & Algorithms Manual.

$$CV(t) = K \times L^{-1} \left[\left(1 + \frac{1}{T_1 s} + \frac{T_2 s}{1 + \alpha T_2 s} \right) \times (PVP(s) - SPP(s)) \right]$$

La ecuación se emplea para que todos los términos del bloque PID (Proporcional, integral y derivativo) actúen sobre el error.

Ecuación B:

$$CV(t) = K \times L^{-1} \left[\left(1 + \frac{1}{T_1 s} + \frac{T_2 s}{1 + \alpha T_2 s} \right) \times PVP(s) - \left(1 + \frac{1}{T_1 s} \right) \times SPP(s) \right]$$

Esta ecuación solo causa la actuación de los términos integral y proporcional sobre el error mientras que la constante derivativa actúa sobre los cambios de la PV.

Ecuación C:

$$CV(t) = K \times L^{-1} \left[\left(1 + \frac{1}{T_1 s} + \frac{T_2 s}{1 + \alpha T_2 s} \right) \times PVP(s) - \left(\frac{1}{T_1 s} \right) \times SPP(s) \right]$$

El término integral responde al error y a los cambios de la PV. La ecuación C provee las respuesta más suave y estable con referencia a cambios de SP, sin embargo, la respuesta es la más lenta.

Ecuación D:

$$CV(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{T_1 s} \times (PVP(s) - SPP(s)) \right]$$

Esta ecuación difiere de las anteriormente mencionadas en el hecho de que únicamente emplea el término integral para producir una respuesta.

Donde:

CV: Output in%

K: Ganancia

PVP: Process variable in %

SSP: *Set Point* in percent

T1: Constante Integral

T2: Constante Derivativa

La opción más eficiente para nuestro caso y la empleada tanto para simulación como para DCS, es la ecuación B. No se incluye una constante derivativa ya que los cambios generados serían muy fuertes y generarían inestabilidad en la operación de la ST1504 y posibles contaminaciones de los productos. Esta ecuación se emplea cuando no se quieren generar picos (oscilaciones) al realizar cambios de SP. Esta ecuación además brinda la posibilidad de eliminar las constantes integral y derivativa ajustando a cero (0) los valores de las mismas, configurándose así un control proporcional.

6.2. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ST1504

En esta sección se examina la respuesta de la simulación dinámica frente a los dos principales ajustes realizados en la operación de la ST1504, bajo el esquema de operación y control actual. Inicialmente, se analiza la respuesta del sistema ante el incremento de la temperatura de fondo como ajuste para garantizar la calidad del ortoxileno, y finalmente, se analiza la respuesta ante el incremento de reflujo hacia ST1504 con el fin de maximizar la producción de ortoxileno.

6.2.1. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación en la temperatura en el fondo de la ST1504. Se analiza el comportamiento de la ST1504, así como también su respuesta dinámica, cuando se realiza un aumento 3 °F en *Set Point* de la temperatura del fondo de la torre. Se establece como condición inicial una temperatura de 376,8 °F y se perturba (tipo escalón) a un valor final de 379,8 °F. Este ajuste se realiza de forma regular en la operación

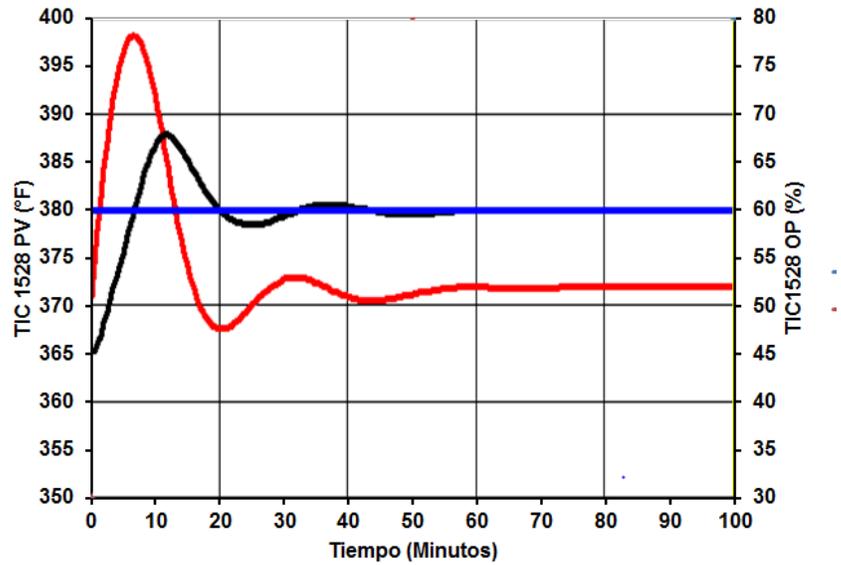
normal de la ST1504, con el fin de garantizar la calidad del ortoxileno producto y así evitar su contaminación con paraxileno y metaxileno, sin embargo, conlleva a un incremento de las pérdidas de ortoxileno por la cima de la torre con el xileno producto.

a) Respuesta de las variables controladas ante ajuste en la temperatura de fondo de la ST1504.

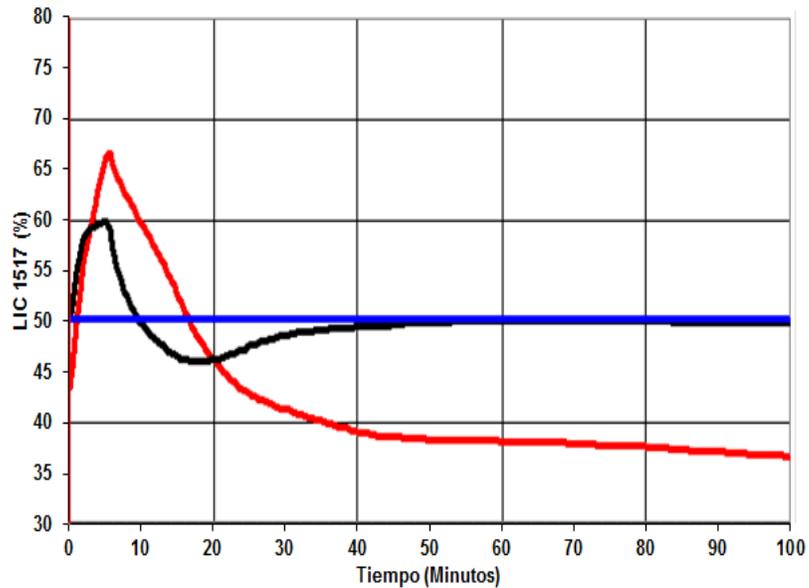
En la Figura 27 se presenta gráficamente el comportamiento de las variables controladas de la ST1504, temperatura de fondo y nivel del condensador, ante un ajuste de 3°F en el *Set Point* de control de la temperatura de fondo, TIC1528, analizando la respuesta de las mismas desde el tiempo 0 min, tiempo equivalente a la condición inicial ($T_{\text{inicial}}=376,8 \text{ } ^\circ\text{F}$). En la Figura 27(a) se presenta el comportamiento de la temperatura en el fondo de la ST 1504, TIC 1528, el tiempo que tarda en estabilizarse luego del incremento en el punto de control, ajustándose a su nuevo *Set Point* es de 43,5 min. Al utilizar el modo PI, se elimina el error en estado estacionario, presente cuando solo se utiliza modo P.

El tiempo de retardo (T_d), tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final, es de 3,6 min, mientras que el tiempo de elevación (*rise time*), conocido también como tiempo de levantamiento (T_r), tiempo requerido por la señal para pasar por primera vez sobre su nuevo estado estacionario (379,8°F), es de 6,14 min. El sobrepaso, cociente entre el valor máximo que ha alcanzado la variable y el valor del *Set Point*, es de 2,1% (8°F), valor que alcanza en 12,26 min y que se conoce como tiempo pico. La tasa de asentamiento (*decay ratio*), cociente entre alturas de dos picos consecutivos, es de 0,075. El periodo (T), tiempo requerido para completar un ciclo, es de 25 min.

Figura 27. Respuesta de las variables controladas ante un incremento de 3°F en el *Set Point* de la temperatura de fondo de la ST1504, a) Temperatura en el fondo TIC1528. b) Nivel en el condensador LIC1517.



a)



b)

— OP — PV — SP
 Apertura de válvula Valor de la Variable Set Point Variable

Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

La respuesta obtenida del controlador del TIC1528, es la esperada y requerida dada la necesidad de ajustar la variable al nuevo punto de control en forma rápida, sin tener cambios drásticos en dicho proceso, que inestabilicen la operación o generen daños de equipos por incrementos exagerados de la variable controlada.

Esta respuesta es la misma que muestra el sistema en su operación real, y busca una respuesta lo suficientemente rápida ante un cambio o ajuste solicitado por el operador, pero con una variación de la temperatura, dentro de unos rangos aceptables para la metalurgia de los equipos. Se presentan dos elementos importantes por resaltar, velocidad y control en el ajuste, en 6 minutos ya alcanza el nuevo *Set Point*, y 19 minutos después ya se ha estabilizado en este valor, sin que el sobrepaso en la oscilación sea mayor al 2% en ningún momento.

En la Figura 27(b) se presenta la respuesta del Nivel en el condensador, LIC 1517, ante un incremento de 3 °F en el *Set Point* de la temperatura de fondo de la ST1504. En ella se observa que, ante un aumento en la temperatura en el fondo de la torre, el nivel del condensador sobrepasa inicialmente su valor del *Set Point*, alcanzando un valor de 59,6%. Este comportamiento está relacionado con el aumento en el calor del rehervidor que genera mayor cantidad de vapores ascendiendo en la torre, condensándose después totalmente en la cima de la torre.

Esta variable presenta una respuesta subamortiguada y un tiempo de 52 min para lograr su estabilización con un tiempo muerto de 9,6 min, tiempo que tarda en comenzar a incrementarse el nivel del condensador, producto del aumento en el flujo de vapores como consecuencia del mayor flujo de calor suministrado en el

sistema. El sobrepaso, es de 18% (9% de nivel), valor que alcanza en 5 min y se conoce como tiempo pico. El periodo (T), tiempo requerido para completar un ciclo, es de 41 min.

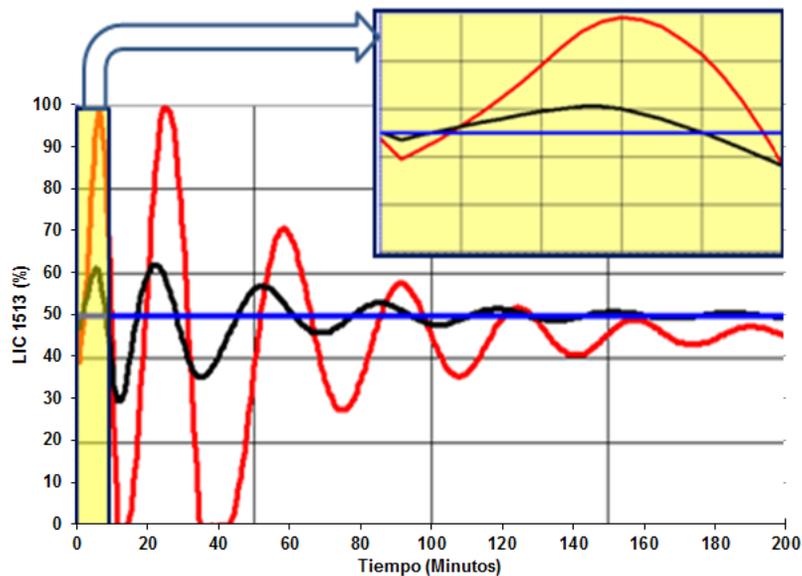
Este control de nivel, tal como está configurado, permite un mayor sobrepaso que el control de temperatura anteriormente estudiado, pero con una respuesta más rápida de la válvula buscando el control de nivel en el punto requerido sin permitir que el tambor acumulador quede sin nivel o totalmente lleno.

La configuración de este sistema de control y su respuesta en la simulación, reflejan la operación real del controlador de nivel del tambor acumulador de cima de la torre ST1504. Este tipo de respuesta, configurado por seguridad para tener una acción rápida de la válvula de control del flujo de destilado hacia almacenamiento, busca garantizar que el tambor acumulador mantenga siempre un nivel de seguridad, y consecuentemente, asegurar un suministro de flujo mínimo de reflujo hacia la torre, manteniendo en control la destilación y protegiendo el equipo rotativo (bomba) de daños por operar bajo un flujo menor al de diseño.

En la Figura 28, respuesta de la cascada de control de nivel de la ST1504 ante un incremento de 3°F en el *Set Point* de la temperatura de fondo, se grafica el comportamiento del control maestro (LIC1513, nivel en el rehervidor) y del esclavo (FIC 1512, flujo de salida de fondo). En la Figura 28(a) se presenta la respuesta del nivel en el rehervidor y se observa que, al aumentar la temperatura en el fondo de la torre, se genera inicialmente una disminución en el nivel de rehervidor LIC1513. Este comportamiento está relacionado a un aumento en la cantidad de calor del rehervidor, y por consiguiente una mayor tasa de evaporación, como

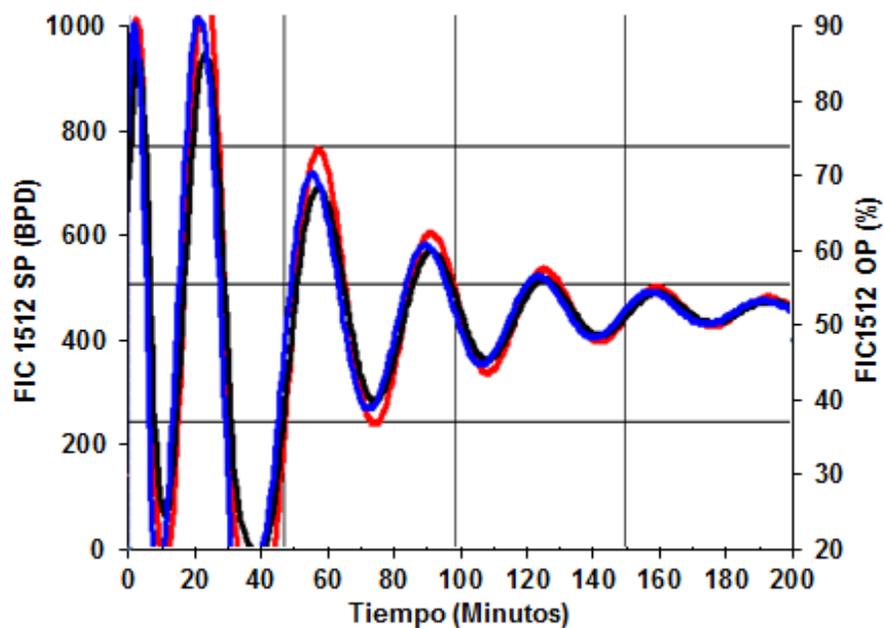
consecuencia del requerimiento generado por el TIC1528 al buscar alcanzar una mayor temperatura. Este nivel presenta una respuesta subamortiguada y un tiempo de 204 min para lograr su estabilización y no se refleja tiempo muerto, dado que el efecto del incremento de calor a la ST 1504 tiene un efecto inmediato en el nivel del rehervidor. Tiene un alto valor de sobrepaso de 46%, dados los fuertes ajustes que debe realizar el controlador para garantizar nivel en el rehervidor y evitar daño del mismo ante una operación sin nivel de hidrocarburo en la torre ni en los tubos del rehervidor; este valor pico lo alcanza en 6 min. El periodo (T), tiempo requerido para completar un ciclo, es de 31 min. Presenta una respuesta rápida con un tiempo de estabilización corto, caso contrario al control de temperatura ya estudiado, TIC1528, que tiene una respuesta lenta, pero con un periodo de estabilización y un sobrepaso pequeños.

Figura 28. Respuesta de la cascada de control de nivel ante un incremento de 3°F en el *Set Point* de la temperatura de fondo de la ST1504 a) Nivel en el rehervidor LIC1513 (con zoom los 10 primeros minutos. b) Flujo de fondo de salida FIC1512.



a)

Figura 28. (Continuación)



b)

— OP Apertura de válvula — PV Valor de la Variable — SP Set Point Variable

Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

La Figura 28 (b) respuesta del flujo de fondo de salida, se muestra el ajuste en el *Set Point* del FIC1512, flujo de fondos de la torre, dada su configuración como esclavo del control en cascada de nivel del rehervidor, LIC1513. El flujo de producto de fondo final, después de la perturbación y una vez estabilizado, es de 449 (BPD), disminuyendo 19 BPD. Esta configuración del sistema con un controlador maestro y un esclavo, garantiza como se mencionó anteriormente, mantener un nivel mínimo de seguridad en la torre ST1504, a expensas de fuertes ajustes en el flujo de salida de fondo de la torre.

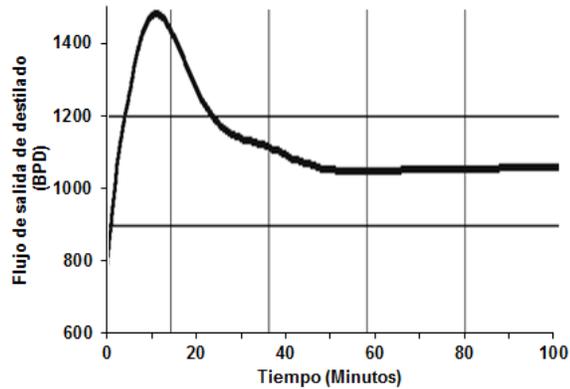
b) Respuesta de variables de salida (no controladas) ante ajuste en la temperatura de fondo.

En la Figura 29 se presenta el comportamiento de las variables de salida, flujo de destilado, contenido de ortoxileno en destilado y flujo de calor de ST1504, ante un ajuste de 3°F en el *Set Point* de control de la temperatura de fondo. El flujo de destilado luego de la perturbación, presentado en la Figura 29 (a), se estabiliza en 1049 BPD, con una condición inicial de 1030 BD, dada la configuración del controlador de nivel, LIC1517, estudiado en la Figura 29 (a), que aumenta el flujo de destilado de la torre, manteniendo en 50% el nivel del condensador, ante la llegada de más vapores de despojo en el sistema.

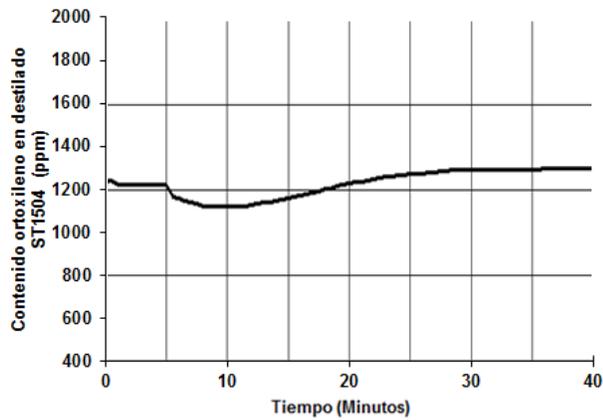
El fuerte incremento inicial corresponde al alto valor de sobrepaso del LIC1517, que como ya se mencionó en su análisis, realiza fuertes ajustes para asegurar el control de nivel, sacrificando el tiempo de estabilización, que en el caso de la salida de destilado está por encima de 60 minutos.

En la Figura 29 (b) se evidencia que el aumento realizado en la temperatura de fondo de la torre, conlleva un aumento de 0,57 g/100g en el contenido de ortoxileno en el destilado, pasando de 12,43 g/100g a 13 g/100g, lo que representa un incremento en las pérdidas del ortoxileno con esta corriente, condición no deseada de la operación, pero esperada ante el ajuste en el *Set Point* de la temperatura de fondo. La respuesta de esta variable se estabiliza transcurrido un tiempo de 35,2 min.

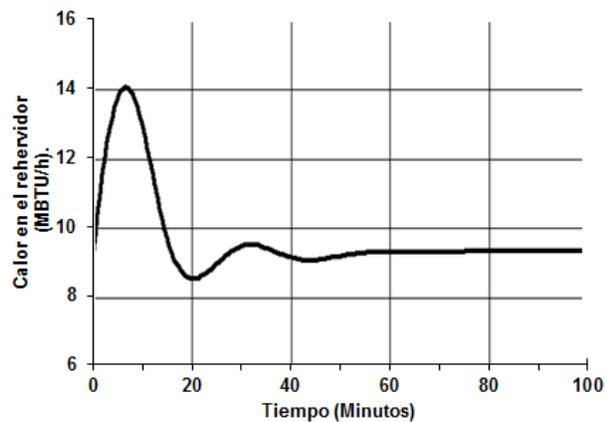
Figura 29. Respuesta de las variables ante un incremento de 3°F en el *Set Point* de la temperatura de fondo de la ST1504 a) Flujo de salida de destilado (BPD) b) Contenido ortoxileno en destilado de ST1504 (%p/p) c) Calor en el rehervidor (BTU/h).



a)



b)



c)

El valor final de estabilización del calor en el rehervidor, graficado en la Figura 29 © es de $9,3 \times 10^6$ BTU/h, trascurrido un tiempo de 52,5 min, como consecuencia del mayor requerimiento energético al incrementar el *Set Point* del control de temperatura de la torre ST1504, controlando 3°F menos en el fondo de la torre, el calor del rehervidor era de $9,1 \times 10^6$ BTU/h. Este comportamiento es reflejo del ajuste estudiado en la Figura 29 (a), temperatura de fondo de la torre TIC1528, y que, si bien refleja una respuesta más lenta que los controladores de nivel, garantiza un sobrepaso menor y un tiempo de estabilización más corto.

En la Tabla 23, se presenta el resumen de los valores iniciales y finales, en los que se logran estabilizar las variables de la ST1504 ante un aumento de 3°F en la temperatura del fondo de la ST1504, TIC 1528. Como consecuencia del mayor flujo de vapores hacia la cima, sin tener ajuste del valor de reflujo, se obtiene un mayor flujo de cima en detrimento del flujo de fondo de la torre, con una composición más pesada para ambas corrientes.

Como resumen general, el incremento de temperatura de fondo de la torre, consigue garantizar una óptima calidad del ortoxileno producto, pero con un incremento de las pérdidas de este mismo producto por la cima de la ST1504, al igual que un mayor consumo energético como se muestra en la Tabla 23 al comparar los valores antes y después del ajuste de las variables de calor en el rehervidor (BTU/h) y contenido de ortoxileno en el destilado (g/100g). El sistema en general, responde adecuadamente con el diseño de sus sistemas de control, logrando estabilizar temperatura de fondo y los niveles de la torre y del condensador de cima, sin generar trastornos fuertes en el equilibrio de la torre, realizando ajustes con instrumentos que tienen respuesta lenta y estabilización mucho más rápida como la temperatura de fondo, y controladores de niveles, que

realizan ajustes muy rápidos, pero generan mayor oscilación y un tiempo de estabilización mayor.

Tabla 23. Cambio en las variables ante incremento en el *Set Point* de la temperatura de fondo de la ST1504.

Variable	Condición inicial 376,8°F	Condición final 379,8°F
Flujo fondo de la ST1504 (BPD)	468	449
Flujo destilado de la ST1504 (BPD)	1031	1049
Contenido de ortoxileno en destilado (g/100g)	12,43	13
Temperatura cima (°F)	287	290
Calor en rehervidor (BTU/h)	9,1E+06	9,3E+06
Contenido de Xileno en producto de fondo torre (g/100g)	0,09	0,06
Contenido de Xileno en Ortoxileno producto (g/100g) (Control < 1,7 g/100g)	0,47	0,27

6.2.2. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación del reflujo en la ST1504. Se analiza el comportamiento de las principales variables (temperaturas, niveles, composición, flujo de energía) de la ST1504, así como también su respuesta dinámica, cuando se realiza un cambio (o perturbación) en la cantidad del reflujo. En este caso, la condición inicial es un reflujo de 4100 BPD y se perturba a una cantidad final de 4500 BPD. El ajuste del flujo de reflujo hacia la ST1504 es un ajuste menos realizado durante la operación normal de la torre, porque se considera, que un aumento excesivo podría afectar la calidad del ortoxileno producto al contaminarse con paraxileno y metaxileno. Al final de esta sección se aclara este concepto, evidenciando por el contrario una mejora en la destilación de los productos, con una equivalente mejora en calidad y rendimiento del ortoxileno producto.

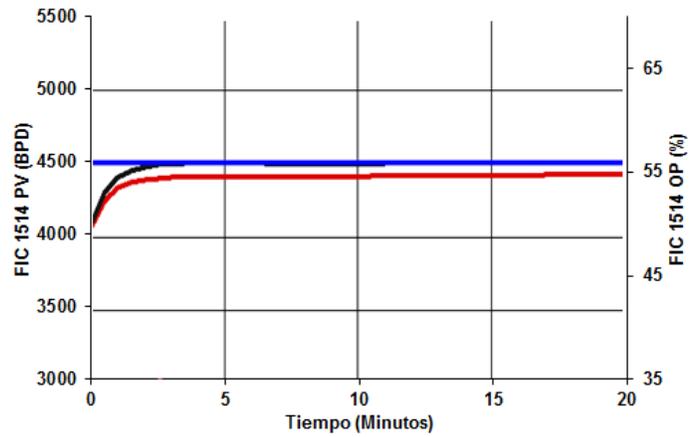
c) Respuesta de variables controladas ante ajuste en el reflujo de la ST1504.

En la Figura 30, se presentan gráficamente el comportamiento de las variables ante esta perturbación en el reflujo. Para ello, se analizó la respuesta de las variables iniciando en el tiempo de 0 min como el equivalente a la condición inicial (Reflujo inicial=4100 BPD). En la Figura 30 (a), se muestra que el tiempo que tarda para estabilizarse el reflujo a su condición final (Reflujo final=4500 BPD), luego de ajustar su *Set Point*, es de 3,0 min. El controlador garantiza una respuesta rápida para alcanzar el valor requerido, y logra hacerlo, dada su configuración, sin oscilaciones que afecten el flujo hacia la torre ST1504. El tiempo de retardo (T_d), tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final, es menor a 1 minuto y no presenta sobrepaso, ya que presenta una respuesta monótona de tipo sobreamortiguado.

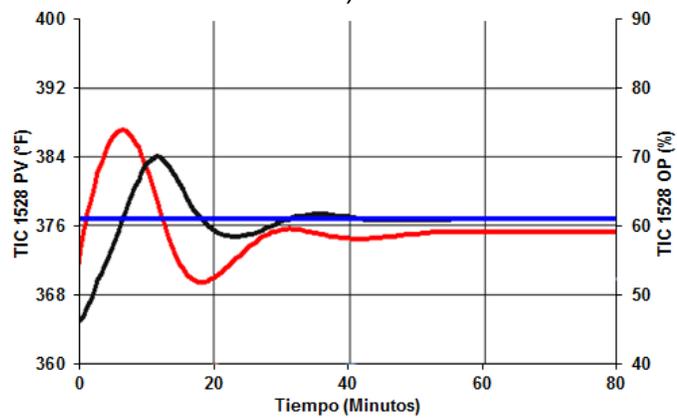
En la Figura 30(b) se presenta el comportamiento de la temperatura de fondo TIC1528. La respuesta del controlador es la esperada ante la lógica disminución de la temperatura de fondo, producto del incremento del reflujo, es de tipo subamortiguada, lo que genera oscilación, pero a su vez mayor rapidez para lograr su nuevo punto de estabilización (tiempo de estabilización de 58 min). El sobrepaso es de 1,8% (7,1 °F), que corresponde a la diferencia entre el valor máximo que ha alcanzado la variable y el valor del *Set Point*, lo que garantiza que no se afecten los equipos por un incremento desproporcionado o más allá de las ventanas de operación de la unidad.

El tiempo de retardo, tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final, es de 3,9 min, mientras que el tiempo de elevación (*rise time*), o tiempo requerido por la señal para pasar por primera vez sobre su nuevo estado estacionario, es de 6,7 min.

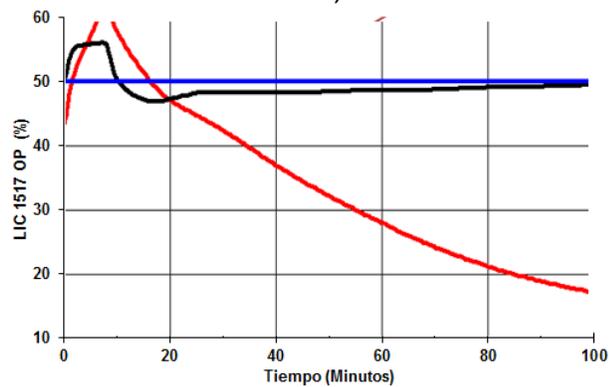
Figura 30. Respuesta de las variables ante un incremento de reflujo a 5400 BPD hacia ST1504 a) Respuesta FIC1514, control de reflujo. B) Temperatura en el fondo TIC1528. C) Respuesta nivel en el condensador LIC1517.



a)



b)



c)

— OP — PV — SP
 Apertura de válvula Valor de la Variable Set Point Variable

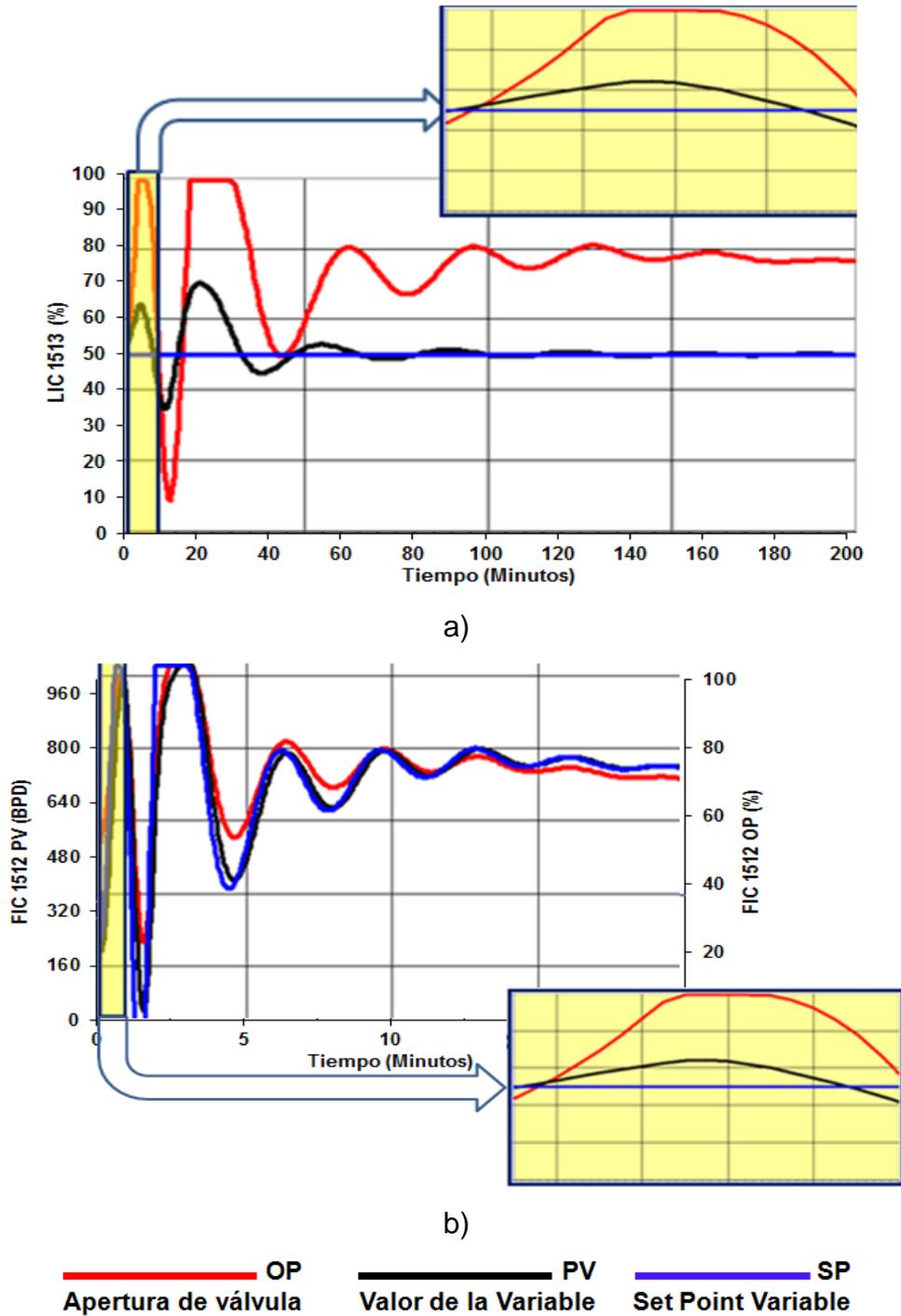
Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

La respuesta del controlador de temperatura de fondo es la esperada y representa con fidelidad el comportamiento del controlador ante una perturbación, en este caso ocasionada por una disminución de la temperatura, al incrementarse el volumen de carga, consecuencia del incremento de reflujo al sistema. Una respuesta oscilatoria, rápida y siempre muy ajustada al valor requerido para no impactar la operación ni los equipos.

En la Figura 30 © se presenta el comportamiento del controlador de nivel, LIC 1517. En ella se observa que, ante un aumento en la cantidad del reflujo, y teniendo en cuenta que esta corriente procede de la salida del condensador, se presenta inicialmente una disminución en el nivel de éste, que es ajustada rápidamente por el control que debe garantizar en todo momento nivel de succión a la bomba. El tiempo que dura en estabilizarse nuevamente el nivel mediante la acción automática del controlador (LIC-1517) es de 130 min, mostrando en este caso una respuesta de tipo subamortiguada. El controlador ajusta la apertura de la válvula a un nivel lo suficientemente bajo, que garantice nivel en el tambor acumulador de cima, y consecuentemente, asegure un flujo de reflujo constante.

La Figura 31 presenta la respuesta del control en cascada para el control de nivel ante un incremento del reflujo de la ST1504; se grafica el comportamiento del control maestro (LIC 1513 nivel en el rehervidor) y del esclavo (FIC 1512 flujo de fondo de salida). En la Figura 31(a) se presenta la respuesta del nivel en el rehervidor y se observa que al aumentar la cantidad del reflujo y con ello la cantidad de líquido en el sistema de la ST1504, se produce inicialmente un incremento en el nivel del rehervidor. Además, se evidencia que debido al tamaño de la torre (120 platos) se produce un tiempo muerto (igual a lo evidenciado con la temperatura de fondo) en la respuesta de esta variable.

Figura 31. Respuesta de la cascada de control de nivel ante un incremento de reflujo de la ST1504 a) Nivel en el rehervidor (con zoom los 10 primeros minutos. B) Flujo de salida del fondo de la ST1504.



Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

Por otra parte, el tiempo que dura en estabilizarse el nivel del rehervidor después de la perturbación realizada en el reflujo es de 165 min, presentando un tipo de respuesta subamortiguada, que garantiza que siempre habrá un nivel en el rehervidor y evita así su daño por exposición a altas temperaturas sin líquido enfriante. En la Figura 31(b), se observa que, mediante la configuración del control en cascada, la salida del controlador LIC1513 va ajustando el SP del FIC1512, que manipula el flujo de salida de fondo, con el fin de regular y asegurar el nivel en el rehervidor. El flujo de fondo final después de la perturbación es de 718 [BPD].

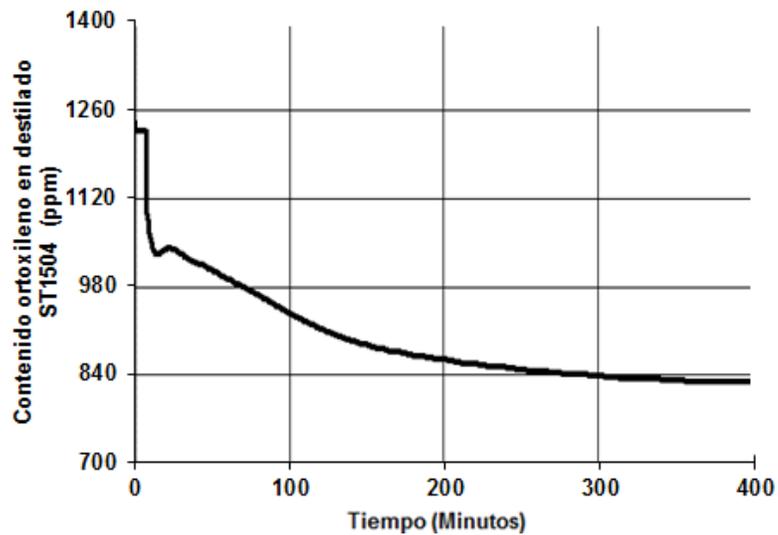
Como se comentó en la sección anterior esta configuración de control de nivel, corresponde a la que presenta el sistema en su operación real y su respuesta es típica de este tipo de sistemas configurado por seguridad, para garantizar siempre un nivel mínimo del rehervidor, que evite daño a sus tubos por sobrecalentamiento, y proteja el equipo rotativo (bomba) de daños por operar bajo un flujo menor al de diseño, en este caso específico incluso llegando incluso a operar la válvula totalmente abierta o con valores de apertura por debajo de 10%, generando un flujo de salida de producto oscilatorio pero asegurando una operación de la torre con nivel en 50% (+/- 15%). En otras palabras, la operación al 100% de la válvula no corresponde a una falta de capacidad de la misma, sino a una rápida respuesta del controlador para asegurar el control del nivel.

d) Respuesta de variables de salida (no controladas) ante ajuste en el reflujo hacia ST1504.

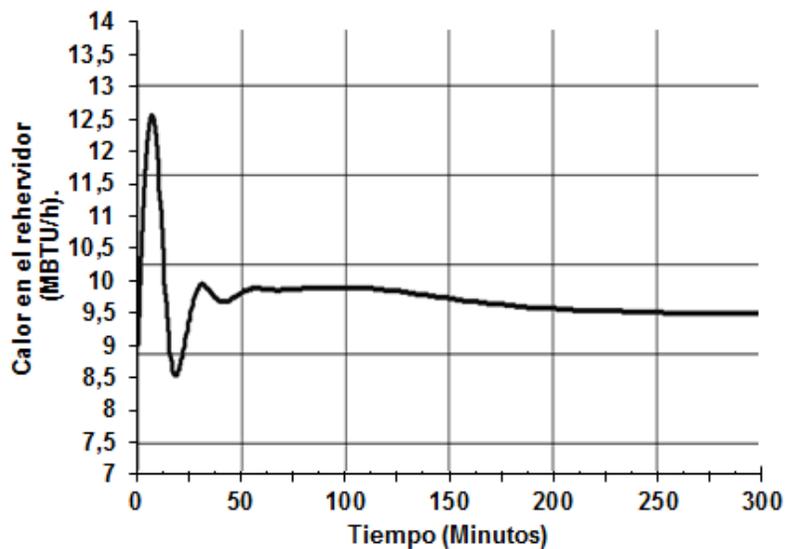
En la Figura 32 se presenta el comportamiento de las variables de salida, contenido de ortoxileno en esta misma corriente y flujo de calor hacia ST1504, ante una variación de reflujo de 4100 BPD a 4500 BPD. El aumento realizado en el flujo de reflujo hacia la torre conlleva una importante disminución en las pérdidas de ortoxileno, fracción másica del ortoxileno en el destilado, representado

en la Figura 32(a), después de estabilizarse la respuesta fue de 8,26 g/100g, inicialmente las pérdidas estaban en 12,43 g/100g.

Figura 32. Respuesta de las variables ante un incremento a 4500 BPD de reflujo hacia ST1504. A) Contenido de ortoxileno en destilado de ST1504 (Fracción). B) Calor en el rehervidor (BTU/h).



a)



b)

Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

En la Figura 32(b), se puede observar que, ante el aumento en la corriente de reflujo, se genera mayor flujo total circulante en la torre a una menor temperatura, generando una disminución inicial del perfil de temperatura de la torre, ocasionado en el fondo un descenso de la temperatura y un incremento del nivel. El controlador de temperatura de fondo ajusta un flujo de calor mayor en el rehervidor que genera una mayor cantidad de vapor, controlando la temperatura y evitando así, una posible inundación en el proceso. El valor final de estabilización del calor en el rehervidor es de $9,7 \times 10^6$ BTU/h, trascurrido un tiempo de 225 min.

En la Tabla 24, se presentan los valores de ajuste que manejan los controladores de la ST1504, operando con un valor de reflujo de 4100 BPD (a) y los valores finales en los que se estabiliza su operación, luego de incrementarse a 4500 BPD el reflujo hacia la torre (b). Los controladores de nivel, tanto del condensador de cima como del rehervidor de fondo, mantienen su valor de variable (PV) en 50%, ya que se encuentran en modo automático y su *Set Point* está configurado para mantener dicho porcentaje de nivel.

Para poder mantener en control estos niveles una vez modificado el reflujo, las aperturas de válvula (OP) deben ajustarse, para el caso de la cima, el control de nivel del destilado (LIC1517), la válvula cierra de 43,41% a 10,97%, disminuyendo el flujo de destilado y asegurando el mayor reflujo hacia la torre requerido; mientras que para el producto de fondo (LIC1513) el controlador debe ajustar la apertura de la válvula, abriendo de 47,27% a 72,51% incrementando el flujo de fondo (FIC1512) de 467BPD a 717,89 BPD, mejorando significativamente el rendimiento de ortoxileno.

Tabla 24. Valores de ajuste controladores ST1504 a) Controlando 4100 BPD de reflujo. B) Controlando 4500 BPD de reflujo.

Name	Ctrl Mode	Hysys Mode	Sp Mode	Sp	Pv	Op
1: LIC-1517	Auto	Internal	Sp Local	50,01	50,02	43,41
2: FIC-1512	Auto	Internal	Sp Remote	467,96	467,98	49,25
3: FIC-1514	Auto	Internal	Sp Local	4100,00	4100,00	50,03
4: LIC-1513	Auto	Internal	Sp Local	49,98	49,98	47,27
5: TIC-1528	Auto	Internal	Sp Local	376,84	376,84	50,54

a)

Name	Ctrl Mode	Hysys Mode	Sp Mode	Sp	Pv	Op
1: LIC-1517	Auto	Internal	Sp Local	50,01	50,01	10,97
2: FIC-1512	Auto	Internal	Sp Remote	717,89	717,93	60,98
3: FIC-1514	Auto	Internal	Sp Local	4500,00	4499,99	56,00
4: LIC-1513	Auto	Internal	Sp Local	49,98	49,98	72,51
5: TIC-1528	Auto	Internal	Sp Local	376,84	376,84	53,55

b)

Fuente: HYSYS®.

Como consecuencia del mayor flujo de reflujo desde la cima, teniendo ajuste de temperatura de fondo, mediante manipulación automática del flujo de vapor de calentamiento al rehervidor, se obtiene un mayor flujo de la corriente de fondo en detrimento del flujo de cima de la torre, con una composición más liviana para ambas corrientes, lo que representa una disminución importante de las pérdidas de ortoxileno en la corriente de cima.

Como resumen general, este ajuste, al igual que el incremento de temperatura en el fondo de la torre, incrementa el consumo energético (Figura 32 (b)), pero caso contrario a este ajuste estudiado anteriormente, el incremento del reflujo consigue disminuir las pérdidas de ortoxileno con el producto de cima de la ST1504 (Figura 32 (a)). El sistema de control responde adecuadamente, logrando estabilizar temperatura de fondo y niveles al incrementarse el flujo de reflujo, sin

generar trastornos fuertes en el equilibrio de la torre, realizando ajustes con instrumentos que tienen respuesta lenta como la temperatura de fondo, pero estabilización mucho más rápida y controladores de niveles, que realizan ajustes muy rápidos, pero generan mayor oscilación y un tiempo de estabilización mayor.

6.2.3. Análisis de la respuesta en estado dinámico por variación de la temperatura de fondo con control de la temperatura de cima, mediante manipulación del reflujo en la ST1504. Según lo concluido de los análisis de sensibilidad realizados en las simulaciones con las estrategias de control actuales, la ST1504 alcanza un óptimo rendimiento, entendido este como el menor contenido de ortoxileno en la corriente de cima y un contenido de para y meta xilenos cumpliendo el parámetro de calidad en la corriente de fondo, cuando se reúnen tres elementos principales, el primero, una temperatura de fondo ajustada a la composición de la carga, una rata de reflujo lo más alta posible, y una temperatura de cima de 288°F.

La temperatura de fondo requerida, si bien varía según la composición de la carga a la torre, ya fue determinada en el capítulo anterior y debe ser establecida como *Set Point* según dicha composición, ya sea en forma manual por el operador de tablero basado en la muestra diaria o en forma automática según sensor en línea (no existente). La variación de la muestra, por cambio de composición, puede llegar a ser significativa luego de más de 48 h, por lo que el ajuste manual del punto de control de la temperatura del fondo de la torre, TIC1528, basado en una muestra cada 24 h se considera suficientemente confiable.

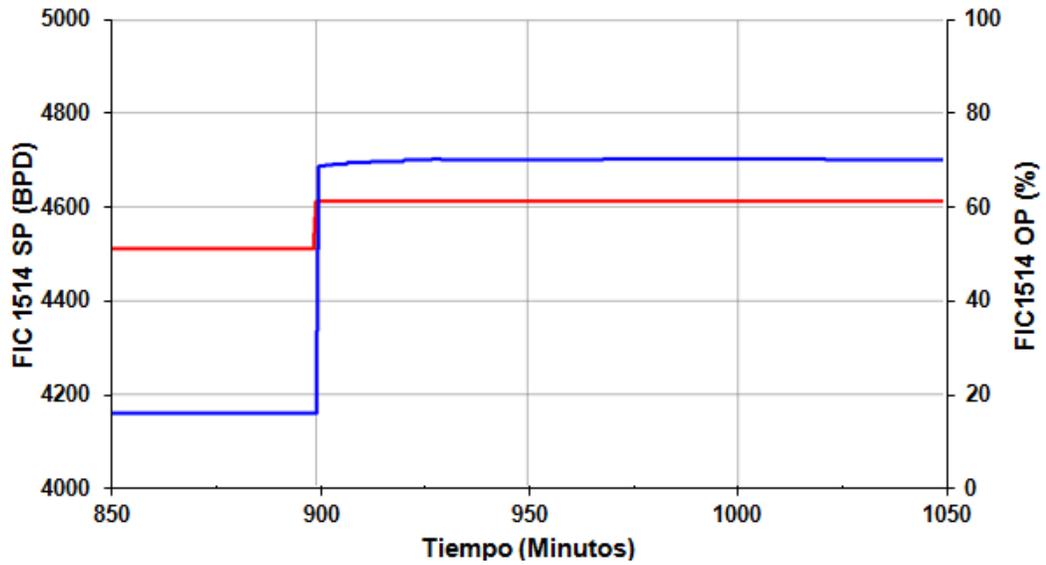
La rata de reflujo, FIC1514, por definición simple, debe ser el máximo posible para obtener la máxima rectificación y por ende la menor cantidad de pérdidas de

ortoxileno con el producto de cima. Aunque este valor también se calculó en el capítulo anterior, puede variar según la carga a la torre ST1504 y su capacidad, por lo que no puede establecerse como un parámetro fijo como se puede hacer con la temperatura de fondo. La temperatura de cima en 288°F, medida en el TI1525, fue definida como la óptima, al encontrarse el mismo valor en todos los casos y todas las simulaciones cuando se optimizaba temperatura de fondo y reflujo.

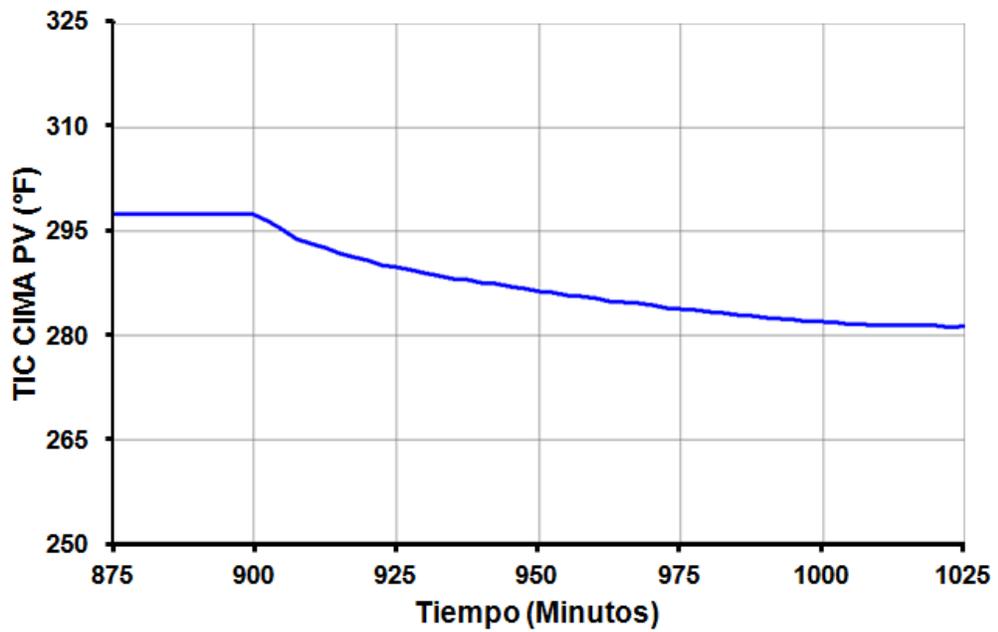
En ninguna de las estrategias anteriores, basadas en los actuales controladores, se consiguen estas tres condiciones que permiten optimizar en forma automática el rendimiento de la ST1504. Para lograr obtener estos parámetros, se determina como la solución más eficiente, el configurar el TIC1525 (indicador de la temperatura de cima de la ST1504) como un controlador maestro, que a su vez controlaría el FIC1514 (reflujo a la ST1504). De este modo, mediante manipulación del reflujo a la torre, se conseguiría alcanzar y mantener la temperatura de cima deseada de 288°F en TIC 1525, con el máximo valor de reflujo que permite la torre según su capacidad de diseño (fija) y el flujo de carga del momento (variable). Esta configuración se puede observar en la Figura 33, simulación dinámica ST1504, con nuevo controlador de temperatura de cima en cascada mediante manipulación del reflujo.

Inicialmente, se definieron las características del nuevo controlador (el tipo, parámetros de sintonización, la acción). Para poder determinar los valores de configuración del nuevo controlador de cima, se realizó una prueba en la simulación en dinámico, mediante una prueba escalón, como se aprecia en la Figura 34, aumentando el reflujo en 440 BPD (de 4160 BPD (51,1 % OP) a 4600 BPD (56,1%)), generando una disminución de la temperatura de 13°F (296°F a

Figura 34. Prueba escalón para determinar ganancia de controlador de cima a) Variación de flujo FIC1514, control de reflujo. b) Variación en temperatura de cima ST1504.



a)



b)

— OP — PV
 Apertura de válvula Valor de la Variable

Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

Teniendo en cuenta la regla anterior y la función de transferencia de un controlador PI, en donde el tiempo integral aparece como un retardo, se establece un valor de T1 de 2 min (basado en los valores de controladores de temperatura similares de la unidad U1500), superior al tiempo integral del controlador de reflujo FIC 1514 (0,06 min). De esta forma se garantiza una dinámica más lenta por parte del controlador de temperatura de cima, pero de mayor estabilidad.

Así mismo, al tener en cuenta la influencia que tiene el reflujo sobre la temperatura de cima, se determinó que la acción del controlador es directa. Por ejemplo, si al controlador entra una señal de aumento en la temperatura de cima con respecto a su *Set Point*, éste debe enviar como señal de salida, un aumento en el *Set Point* de la corriente de reflujo. Con esta decisión del controlador TIC-CIMA hará disminuir nuevamente el valor de temperatura en la cima de la ST1504 hasta su valor configurado. En la Tabla 25, se presentan los parámetros definidos del controlador de temperatura de cima.

Tabla 25. Parámetros de sintonización del controlador de temperatura de cima (TIC-CIMA).

Controlador	Tipo	Sintonización			Acción	Rango
		K ⁽¹⁾	T1 ⁽²⁾	T2 ⁽³⁾		
			(min)	(min)		
TIC-CIMA	PID	0,03	2	0	Directa	0-350 °F)

(4) K \equiv Ganancia

(5) P \equiv Tiempo integral

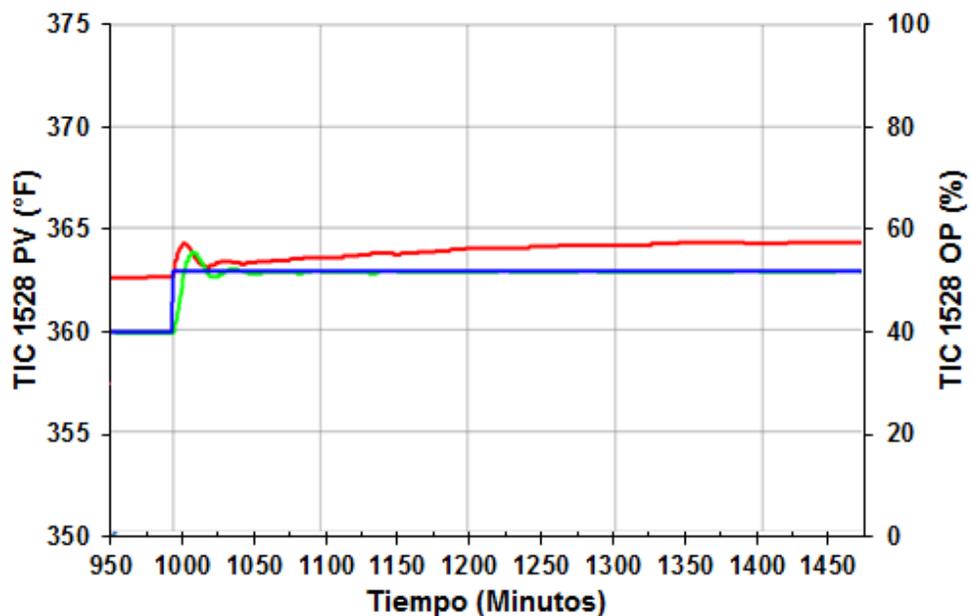
(6) D \equiv Tiempo derivativo

Una vez configurados los parámetros del nuevo controlador propuesto en la simulación, se realizó una variación al *Set Point* de temperatura de fondo. Un aumento de 3°F en el *Set Point* (minuto 1000), visualizado en la Figura 35, genera

una respuesta de tipo subamortiguada, con un tiempo de retardo de 4,95 min, tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final, y un tiempo de elevación (*rise time*), o tiempo requerido por la señal para pasar por primera vez sobre su nuevo estado estacionario, de 7,73 min.

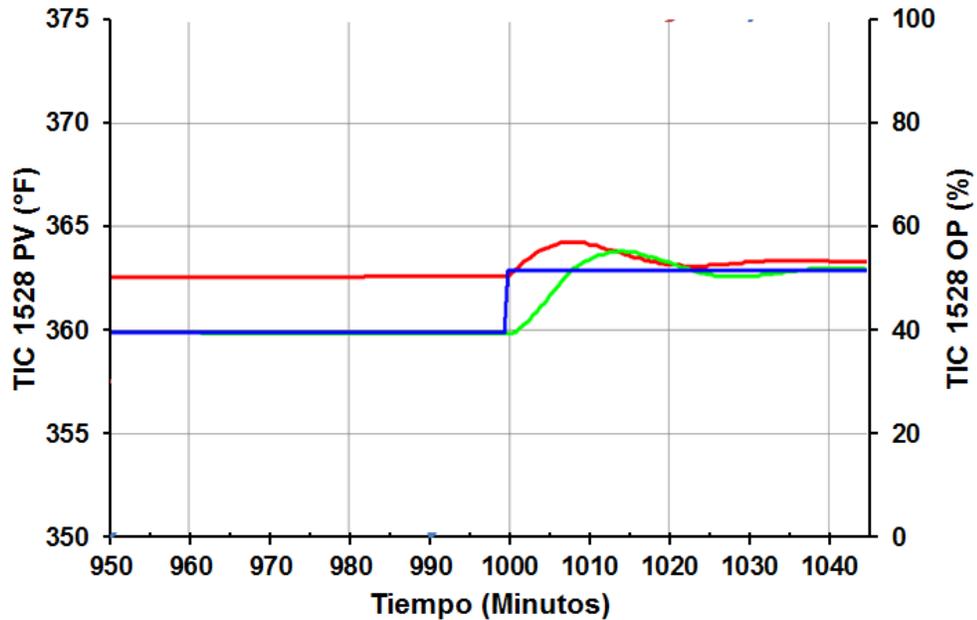
El tiempo, en el que el valor máximo de la variable es alcanzado es de 14,4 min y se conoce como tiempo pico. A los 45 min ya se encuentra estabilizado en el valor requerido con un 3% de apertura adicional de OP. Sin embargo, dado el incremento de reflujo, con la nueva estrategia de control, la variable adquiere una respuesta monótona con incremento progresivo en alrededor de un 15% de su valor inicial.

Figura 35. Incremento de temperatura de fondo TIC1528: a) Respuesta minuto 950 a 1450, b) Respuesta minuto 950 a 1050.



a)

Figura 35. (Continuación)



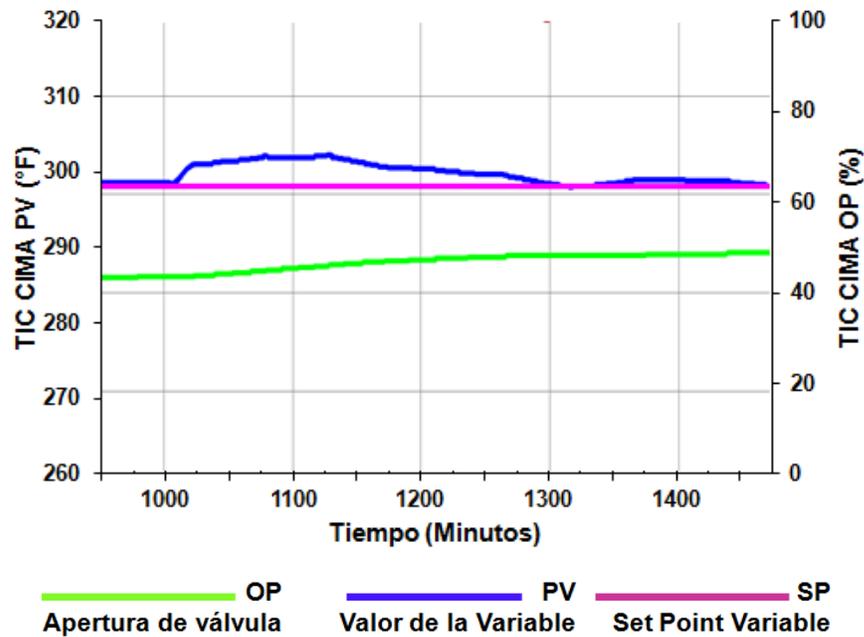
b)

— **OP** — **PV** — **SP**
Apertura de válvula **Valor de la Variable** **Set Point Variable**

Fuente. Gráfica simulación HYSYS®.

La Figura 36, muestra la respuesta del controlador propuesto ante el ajuste en la temperatura de fondo. El ajuste en la temperatura de fondo, tiene repercusión directa en la temperatura de cima, con un tiempo de retardo de 9 min. El incremento de la temperatura de fondo, genera un incremento de la temperatura de cima, obligando al controlador a realizar un incremento progresivo de la salida, hasta estabilizarse 300 min después en 47% de OP, 5% más del valor inicial, previo al incremento de temperatura de fondo. La salida del controlador de cima aumentada en 5%, ocasionando un aumento en el valor del reflujo de 460BPD, el cual pasa de 4180 BPD a 4640 BPD, con un aumento de la apertura de la válvula de control de 51% a 60%. La salida del controlador de cima aumentada en 5%, ocasiona un aumento en el valor del reflujo de 460BPD, pasando de 4180 BPD a 4640 BPD, con un aumento de la apertura de la válvula de control de 51% a 60%.

Figura 36. Respuesta del controlador de temperatura de cima ante el incremento de la temperatura de fondo de ST1504.



Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

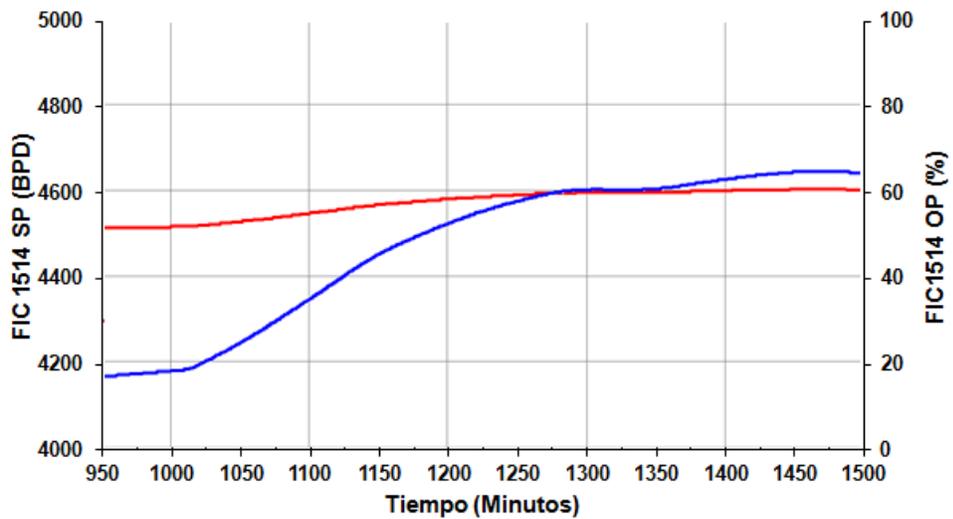
En la Figura 37, ante el incremento de la temperatura de fondo, contando con un control automático de la temperatura de cima, se observa la respuesta de las variables refluo hacia ST1504 (BPD) y pérdidas de ortoxileno (Contenido de ortoxileno en destilado, ppm).

Con el incremento del refluo, producto del ajuste del controlador de la temperatura de cima, las pérdidas de ortoxileno en la corriente de cima disminuyen de 12,8% a 3,8%, demostrándose así, la mejora generada por medio de la estrategia de control la propuesta en esta sección.

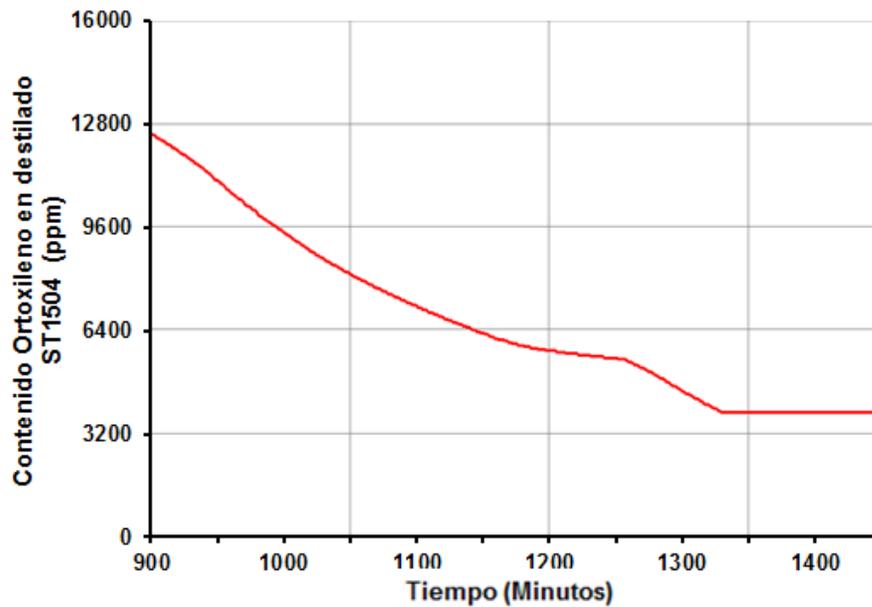
Definir un *Set Point* de la temperatura de fondo según la composición de la carga, controlada mediante la manipulación del flujo de vapor al rehervidor y en forma paralela, mantener un control de temperatura de la cima, con un *Set Point*

establecido en 288°F, ajustada mediante la manipulación del reflujo, aseguran el mayor rendimiento de ortoxileno en la ST1504.

Figura 37. Respuesta de las variables ante el incremento de la temperatura de fondo, con control automático de la temperatura de cima. a) Flujo de reflujo hacia ST1504 (BPD). b) Pérdidas (Contenido de ortoxileno en destilado, ppm).



a)



b)

Fuente: Gráfica simulación HYSYS®.

7. CONCLUSIONES

1. El sistema de la ST1504 se simuló para tres casos de operación de la torre separadora de xileno ST1504, bajo tres modelos termodinámicos *Peng-Robinson (PR)*, *SRK (Soave- Redlich- Kwong)* y *Lee-Kesler-Plöcker*, seleccionados según las condiciones del producto manejado. Las simulaciones obtenidas muestran que las temperaturas de cima y fondo no se alejan más de 1°F del valor de operación real y el resultado de la composición del destilado (%p/p) se ajusta a la desviación estándar del modelo real. Sin embargo, el modelo termodinámico *Lee-Kesler-Plöcker* fue el único que mantuvo dentro de la desviación estándar el resultado de la composición (%p/p) del producto de fondo al compararlo con el caso real base, mostrando la mayor confiabilidad en los resultados obtenidos de la simulación.

2. Se analizó la influencia en estado estacionario de las variables de temperatura de fondo y reflujo sobre la recuperación de ortoxileno en la ST1504. El control de temperatura de fondo garantiza la calidad del ortoxileno (contenido de para y meta xileno menor a 1,7% p/p), pero conlleva una disminución del rendimiento de ortoxileno. En el caso del análisis de la influencia del reflujo, se evidencia en los tres casos, que al incrementar la rata de reflujo, se obtiene una disminución del contenido de para y meta xileno en el producto de fondo de la ST1504, al igual que disminuyen las pérdidas de ortoxileno en el destilado logrando valores menores a 5% p/p, lo que repercute directamente en un incremento del rendimiento de ortoxileno.

3. El máximo rendimiento de la torre ST1504, es alcanzado cuando se reúnen tres elementos principales, la menor temperatura de fondo que garantice la calidad del producto de fondo, ajustada según la composición de la carga; una rata de reflujo

lo más alta posible, y una temperatura de cima de 288°F. Cumpliendo estos parámetros dentro de la simulación, se obtuvieron las temperaturas de fondo y los valores de reflujo recomendados para lograr el máximo rendimiento de ortoxileno, cumpliendo todos los parámetros de calidad en el destilado y en producto de fondo. Temperaturas de fondo menores a las determinadas, no garantizan la calidad del ortoxileno, mientras que temperaturas de fondo mayores o valores de reflujo menores a los señalados, incrementan las pérdidas de ortoxileno. Valores mayores de reflujo a los señalados en el Capítulo 5, representan un gasto energético innecesario al no lograr disminuir las pérdidas de ortoxileno por debajo de 4,1% p/p.⁶

4. Se analizaron las estrategias de control actuales dentro de la simulación en estado transitorio, encontrando un comportamiento ajustado al desempeño real de los equipos y controladores, que garantizan el control de las variables actualmente configuradas pero que no son suficientes para maximizar el rendimiento de la ST1504. La temperatura de fondo requerida debe ser establecida como *Set Point* según la composición de la carga, mientras el reflujo hacia ST1504 debe aumentarse para obtener la máxima rectificación y lograr disminuir las pérdidas de ortoxileno con el producto de cima. El límite máximo de la rata de reflujo está directamente relacionado con el valor de la temperatura de cima, variable que en la actualidad solamente se monitorea, pero sobre la cual, no existe control automático ni está establecida una acción manual para ajustarla. Valores de reflujo superiores a los necesarios para conseguir los 288°F en la cima, temperatura calculada como la óptima de operación, no generan aumento en el rendimiento y se constituyen en un gasto energético innecesario.

⁶ Para el Caso 1 de operación de ST1504. Para el Caso 2 y Caso 3, las pérdidas mínimas obtenidas fueron de 3%p/p y 2,2% p/p respectivamente.

5. En ninguna de las estrategias analizadas, basadas en los actuales controladores, se consiguen las tres condiciones que permiten optimizar en forma automática el rendimiento de la ST1504. Para alcanzar estos parámetros, se determinó como la mejor solución, el configurar el TIC1525 (indicador de la temperatura de cima de la ST1504) como un controlador maestro, que a su vez controla el FIC1514 (reflujo a la ST1504). De este modo, mediante manipulación del reflujo a la torre, se consigue alcanzar y mantener la temperatura de cima deseada de 288°F en TIC 1525, alcanzando el máximo valor de reflujo que permite la torre, teniendo en cuenta su capacidad de diseño (fija) y el flujo de carga de la operación (variable). El ajuste de las condiciones de la ST1504 con esta estrategia de control, permitiría disminuir las pérdidas típicas de ortoxileno de más 12% a valores por debajo de 5%, logrando alcanzar las condiciones de operación deseadas sin inestabilizar el sistema con un aumento gradual del calor al rehervidor y del reflujo. El tiempo de respuesta obtenido bajo esta estrategia permite disminuir las pérdidas y estabilizar la torre en un tiempo menor a tres horas; actualmente los ajustes realizados con este fin pueden superar las ocho horas e incluir la necesidad de realizar muestreo por laboratorio.

6. La simulación en estado estacionario y transitorio de la ST1504 y su uso para realizar el análisis de sensibilidad de sus sistemas de control, brindó la posibilidad de tener un conocimiento más profundo y técnico de este sistema, permitiendo su aplicación en la búsqueda de mayores márgenes de refinación de la unidad. Replicar este trabajo y este tipo de análisis, empleando herramientas de simulación, permitirá plantear soluciones concretas a problemas de operación, sin tener que exponer los equipos y procesos a un mayor número de pruebas experimentales que pueden llegar a ser costosas y de mayor riesgo.

8. RECOMENDACIONES

En caso de ser un proyecto viable económicamente para la refinería la instalación de nuevos cromatógrafos en línea, en las corrientes de carga a la unidad U1500 y/o en la línea de carga a ST1504, se podría emplear esta simulación para establecer una estrategia de control mucho más precisa y anticipativa. Por estar este trabajo enfocado en la mejora del sistema de control empleando los sensores actuales, no se evaluó este aspecto dentro de esta propuesta entregada, pero quedan sentadas las bases para ampliar el análisis de estrategias adicionales de control.

Replicar este análisis en las demás torres de la unidad U1500 y entrenar a los operadores de consola con el uso de este simulador, permitiría alcanzar un nivel de conocimiento más profundo del sistema al poner en prueba sus conceptos y conocimientos previos, permitiéndoles además a futuro, determinar los valores de operación óptimos para alcanzar el mayor rendimiento, ante un cambio de condiciones que pudiera presentarse en la carga a la unidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UIS, Reglamento General de Posgrado: Acuerdo 075 de 2013, Bucaramanga: Vicerrectoría Académica, 2013, p. 22.
- [2] J. Gentry, «Refining/Petrochemical Integration - A New Paradigm,» Houston.
- [3] L. E. Villegas, «Simulación en HYSYS,» 2007.
- [4] «Simulation Models Provide Asset - Wide Production Optimization,» World Oil, [En línea]. Disponible en: <http://www.worldoil.com/magazine/2008/april-2008/features/simulation-models-provide-asset-wide-production-optimization>. [Último acceso: 30 Enero 2015].
- [5] N. Scenna, Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos, 1999.
- [6] M. Zhou, F. Qian y Z. C. Ye, «Dynamic simulation and control of gasoline fractionator system in ethylene plant,» 2012.
- [7] Y. Rodríguez y C. Valdés, «Análisis de la dinámica de respuesta en las torres T1503 y T1505 de la Gerencia Refinería de Ecopetrol,» Bucaramanga, 2015.
- [8] B. Slade, B. Stober y D. Simpson, «Dividing wall column revamp optimises mixed xylenes production,» 2006.
- [9] C. Judson, Procesos de separación, México: Reverté, 2003, pp. 237-286.
- [10] W. Luyben, Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers, Second ed., Mc Graw Hill, 1996.
- [11] J. Stichlmair, «Conceptual design of the control configurations of distillation columns,» *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 34, nº 2, pp. 61-69, 1995.
- [12] N. Outili, N. Chegga, K. Elbahi y A. Meniai, «Effect of Downcomers Sizes on Tray Column Performance,» *Chemical Engineering Transactions*, vol. 32, pp. 1981-1986, 2013.

- [13] G. P. Rangaiah, J. Yue Chan Tsun y K. Hidajat, «Optimization of complex distillation columns,» *Chemical Engineering*, vol. 113, nº 9, pp. 60-64, 2006.
- [14] S. Florindo, I. João y J. Silva, «Study of Energy Efficient Distillation Columns Usage for Multicomponent Separations through Process Simulation and Statistical Methods,» *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 145-150, 2014.
- [15] ECOPETROL, Manual de Descripción del Proceso de la Unidad U1500, Barrancabermeja: RWD, 2009, pp. 1-5.

BIBLIOGRAFÍA

ECOPETROL, Manual de Descripción del Proceso de la Unidad U1500, Barrancabermeja: RWD, 2009, p. 1-5.

FLORINDO, Sandra, JOÃO, Isabel y SILVA, Joao. Study of energy efficient distillation columns usage for multicomponent separations through process simulation and statistical methods. *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 33, p. 145-150, 2014.

RANGAIAH, G, YUE CHAN TSUN, Jonnhy y HIDAJAT, K. Optimization of complex distillation columns. *Chemical Engineering*, vol. 113, nro 9, p. 60-64, 2006.

RODRIGUEZ, Yeison y VALDES, Camilo. Análisis de la dinámica de respuesta en las torres T1503 y T1505 de la Gerencia Refinería de Ecopetrol. Trabajo de grado Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015.

SCENNA, Nicolás. Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos, 1999.

STICHLMAIR, J. Conceptual design of the control configurations of distillation columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 34, nro 2, p. 61-69, 1995.

VILLEGAS, Luis. Simulación en HYSYS. 2007.

ANEXOS

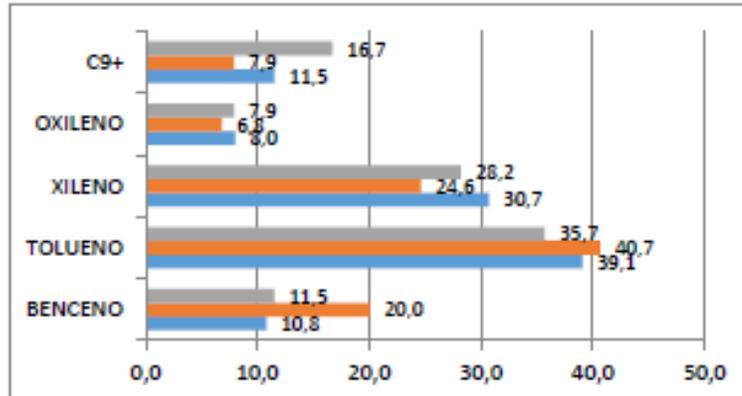
Anexo A. Casos de operación

Los casos de operación fueron definidos según las diferentes composiciones de carga a la unidad según las formas de operación de la unidad U1500 y detallados en la Tabla 1. Para el Caso 1, se consideró la operación típica de la unidad U1500, la carga es la corriente proveniente de la unidad U1400 exclusivamente, la unidad U1600 no opera. Para el Caso 2, la carga a la unidad U1500 es una mezcla de las corrientes provenientes de las unidades U1400 y U1600, lo que incrementa el contenido de benceno en la carga a la unidad. Para el Caso 3, la composición de la carga presenta un alto contenido de aromáticos pesados, producto de una operación con hidrocarburos más pesados en la refinería.

Tabla A1. Composiciones de la carga a la unidad U1500 para cada caso.

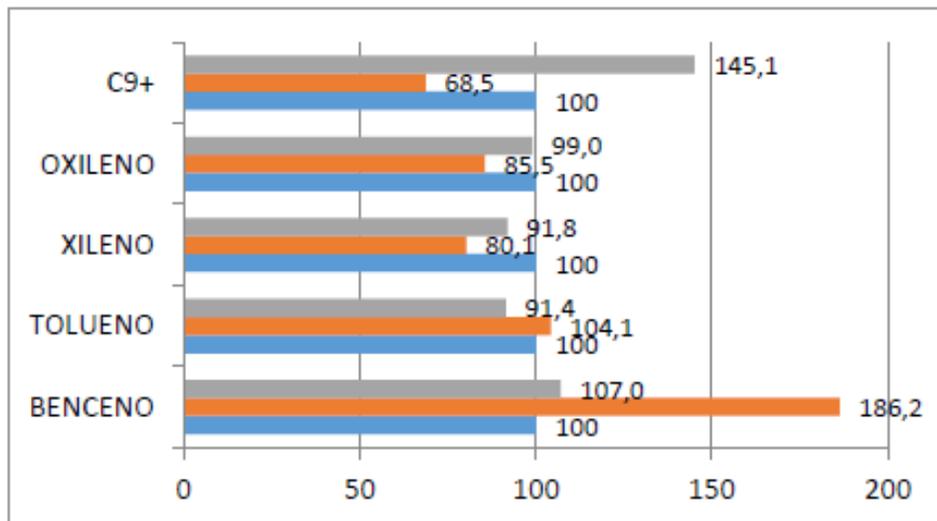
	COMPOSICION % VOLUMEN		
	CASO 1	CASO 2	CASO 3
BENCENO	10,75	20,02	11,5
TOLUENO	39,05	40,66	35,7
P XILENO	7,76	6,16	7,18
M XILENO	17,74	14,17	16,08
OXILENO	7,98	6,82	7,9
ETILBENCENO	5,21	4,28	4,89
C9+	11,23	7,56	16,46
CUMENOS	0,22	0,2	0,27
C10	0,06	0,13	0,02

Figura A1. Comparativo Casos de operación.



Al tomar el Caso 1 como Caso base, y compararlo con los otros dos Casos, se aprecia como el Caso 3 presenta un contenido 45% mayor de C9 con respecto al Caso 1 y casi el doble del Caso 2. Para El caso 2 se aprecia un 80% más de contenido de Benceno que los otros dos Casos de operación. Este comparativo gráficamente se aprecia en la Figura B2.

Figura A2. Comparativo Casos de operación, con Caso 1 como caso base.



Anexo B. Condiciones simulación estado estable ST1504.

Sustancias involucradas en el proceso		Benceno; Tolueno; p-m-o Xileno; Etil Benceno; N-Propil Benceno; Cumeno; N- Butil Benceno.		
Paquete de fluidos		Peng- Robinson; Lee-Kesler-Plocker; SRK		
		CASO 1	CASO 2	CASO 3
Temperatura Carga (°F)		332,4	329	338
Numero de Etapas de la torre		120	120	120
Plato(s) de alimentación		51/61/71	51/61/71	51/61/71
Tipo De Condensador		Total	Total	Total
Descripción del Rehervidor		BJU	BJU	BJU
Heat Duty Rehervidor (M Btu / h)		15,32	15,32	15,32
Caída de presión en el rehervidor (PSI) (Pressure Drop/Shell)		0,5	0,5	0,5
Presión en el rehervidor (PSIG)		21	21	21
Presión en el Condensador, PSIG (diseño)		4	4	4
Temperatura en la cima de la torre (°F)		288,7	287	286
Razón de reflujo (1)		6,15	7,11	5,56
Razón de líquido destilado (liquid rate) (2)		0,661617445	0,66	0,62
Diámetro de la torre		7' (2,1336 m)	7' (2,1336 m)	7' (2,1336 m)
Espaciamiento entre las etapas		1'6'' (0,4572mts)	1'6'' (0,4572mts)	1'6'' (0,4572mts)
Altura de la torre		194' (59,1312 m)	194' (59,1312 m)	194' (59,1312 m)
Tipo De platos		Válvula	Válvula	Válvula
CARGA	Benceno	0	0	0
	Tolueno	0,16745	0,52	0,24
	Ortoxileno	15,894	17,23	15
	Metaxileno	35,3111	35,87	30,35
	Paraxileno	15,4384	15,58	13,52
	Etil-Benceno	10,3816	10,83	9,23
	N Propil-Benceno	22,3491	19,13	31,08
	Cumeno	0,44462	0,51	0,53
	N Butil-Benceno	0,01373	0,33	0,05
PRODUCTO	Benceno	0	0	0
	Tolueno	0,2503	0,7811	0,4
	Ortoxileno	8,47016	7,03	10,01
	Metaxileno	52,67321	53,0296	51,14
	Paraxileno	23,06768	23,085	22,83
	Etil-Benceno	15,53865	16,0743	15,62
	N Propil-Benceno	0	0	0
	Cumeno	0	0	0
	N Butil-Benceno	0	0	0
FONDO	Benceno	0	0	0
	Tolueno	0,00063	0,000765	0,0004
	Ortoxileno	30,8388	38,2936	22,22
	Metaxileno	0,35959	0,40127	0,29
	Paraxileno	0,07984	0,0721	0,058
	Etil-Benceno	0	0	0
	N Propil-Benceno	67,3401	58,6481	76,0216
	Cumeno	1,33968	1,561125	1,28
	N Butil-Benceno	0,04136	1,02304	0,13

(1) Reflujo / Líquido destilado

(2) Destilado(Producto Cima)/ Carga

Anexo C. Condiciones típicas de operación ST1504

BOMBA DE CARGA (presión)	P 1505	82	PSIG
VALVULA DE CARGA (Caída Presión)	FIC 1508	24	PSIG
REHERVIDOR (Presión)	E 1509	21	PSIG
DIMENSIONES Rehervidor (inch*feet)	33*20		
CONDENSADOR (Presión)	E 1510	4	PSIG
DIMENSIONES Condensador (inch*feet)	21*16		
CASO 1	TAG	VALOR	UNIDAD
CARGA		1499,43	BD
T CIMA	U1500-TI_1525	288,67	°F
REFLUJO	U1500-FIC_1514	6102,70	BD
PDTO	U1500-FI_1513	992,05	BPD
PLATO 96	U1500-TI_1527		°F
PLATO 110	U1500-TI_1526	363,14	°F
T FONDO	U1500-TI_1528	361,08	°F
CONDENSADO DE REHERVIDOR	U1500-FIC_1511	37,41	GPM
RELACION DESTILADO	Producto cima / Carga	0,66	
RELACION REFLUJO	Reflujo/Producto cima	6,15	
CASO 2	TAG	VALOR	UNIDAD
CARGA		1290,65	BD
T CIMA	U1500-TI_1525	287,63	°F
REFLUJO	U1500-FIC_1514	6170,40	BD
PDTO	U1500-FI_1513	853,59	BPD
PLATO 96	U1500-TI_1527		°F
PLATO 110	U1500-TI_1526	358,67	°F
T FONDO	U1500-TI_1528	358,01	°F
CONDENSADO DE REHERVIDOR	U1500-FIC_1511	37,47	GPM
RELACION DESTILADO	Producto cima / Carga	0,66	
RELACION REFLUJO	Reflujo/Producto cima	7,23	
CASO 3	TAG	VALOR	UNIDAD
CARGA		1508,00	
T CIMA	U1500-TI_1525	286,80	°F
REFLUJO	U1500-FIC_1514	5219,94	BD
PDTO	U1500-FI_1513	938,89	BPD
PLATO 96	U1500-TI_1527		°F
PLATO 110	U1500-TI_1526		°F
T FONDO	U1500-TI_1528	365,73	°F
CONDENSADO DE REHERVIDOR	U1500-FIC_1511	34,58	GPM
RELACION DESTILADO	Producto cima / Carga	0,62	
RELACION REFLUJO	Reflujo/Producto cima	5,56	

Anexo D. Curvas de operación para los tres casos

Figura D1. Efecto sobre pérdidas de Ortoxileno en destilado y contenido de Para y Meta Xilenos en ortoxileno producto por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 360°F, 361°F y 362°F. Caso 1.

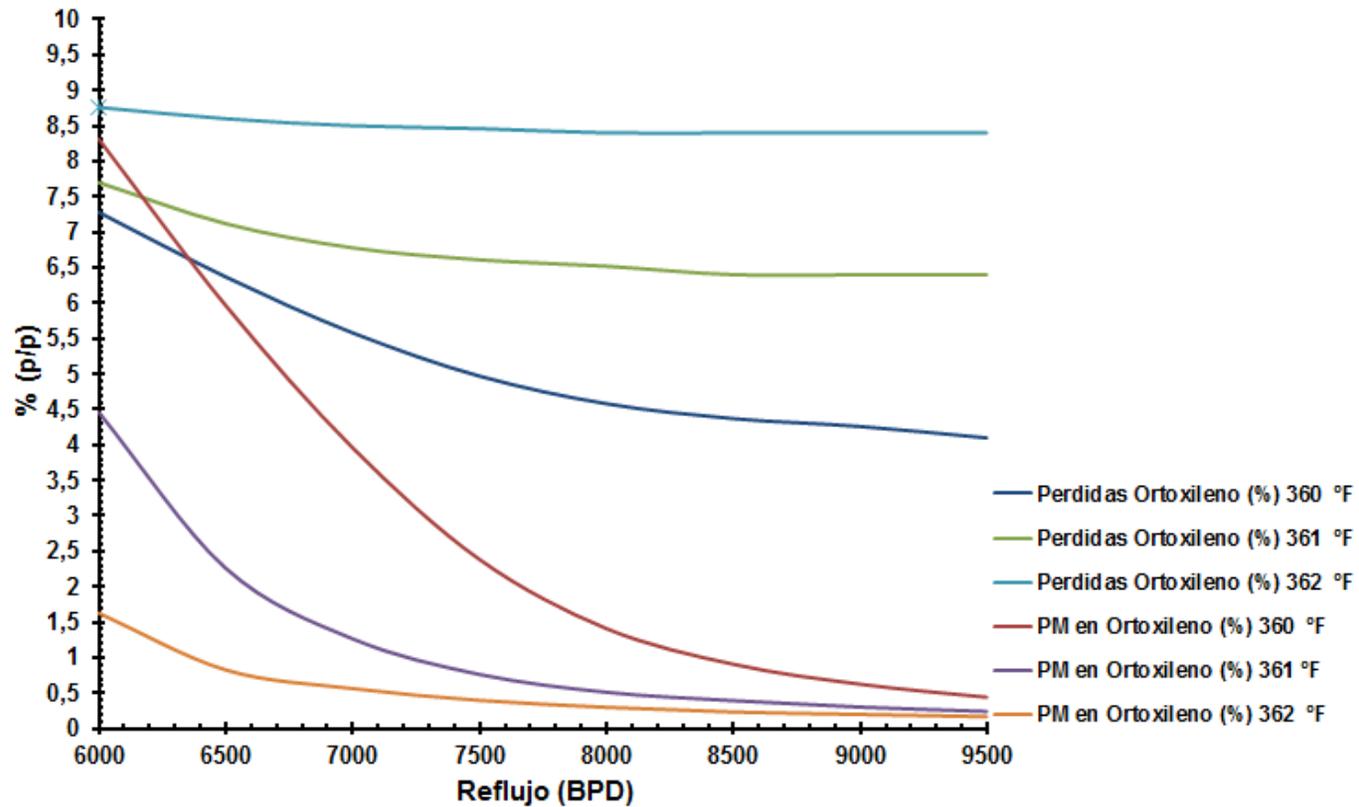


Figura D2. Efecto sobre pérdidas de Ortoxileno en destilado y contenido de PM Xilenos en ortoxileno producto por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 358°F, 359°F y 360°F.

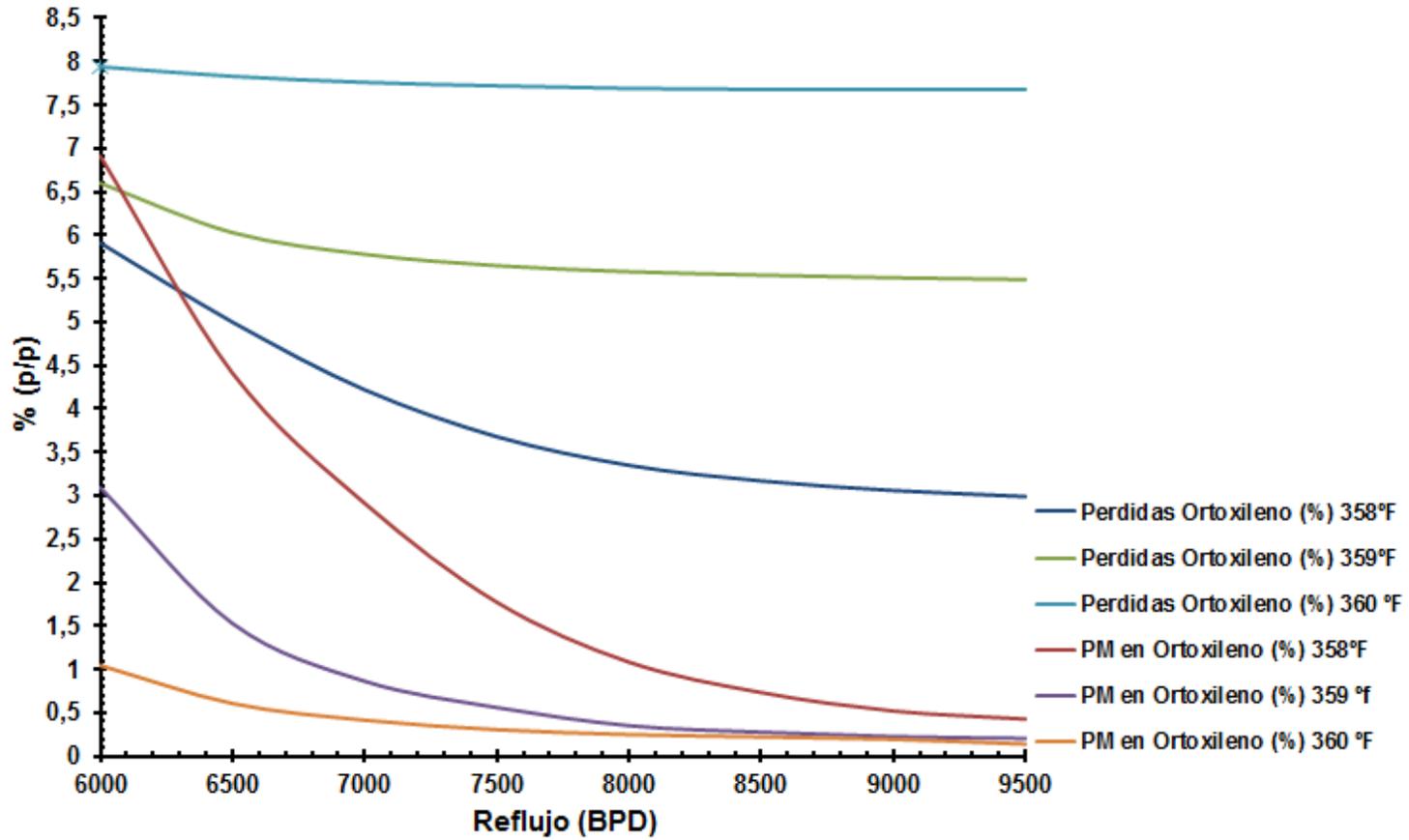


Figura D3. Efecto sobre pérdidas de Ortóxileno en destilado y contenido de PM Xilenos en ortóxileno producto por variación de reflujo; Temperatura de fondo a 363°F, 364°F y 365°F.

