

**SIMULACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA T-250  
UTILIZANDO HYSYS: IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA  
Y ANÁLISIS EN LAZO CERRADO**

**OSCAR PABUENA TORRES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**SIMULACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA T-250  
UTILIZANDO HYSYS: IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA  
Y ANÁLISIS EN LAZO CERRADO**

**OSCAR PABUENA TORRES**

**Trabajo de aplicación presentado como requisito parcial para optar al título  
de Magister en ingeniería Química – Modalidad profundización.  
Convenio UIS - Ecopetrol S.A.**

**Director:**

**GIOVANNI MORALES, I.Q., Dr.**

**Co-director:**

**CARLOS MUVDI, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Dios, por darme la fuerza, la salud y la perseverancia para sacar adelante este proyecto, a pesar de todas las dificultades.

A mi esposa Tatiana y a mis hijas Katia y Sara, por el apoyo permanente, por la comprensión y por darme motivos cada día para superarme y salir adelante.

A mi director, profesor Giovanni Morales, por su profesionalismo, motivación, dedicación, asesoría y apoyo durante todas las etapas de desarrollo del proyecto.

Al ingeniero Luis Andrés Carrillo, por su asesoría especializada y enseñanza en los temas relacionados con el control de procesos.

A Ecopetrol S.A. especialmente al gerente de la GRB, ingeniero Orlando Díaz, por su empeño en la formación de personas integra y altamente calificadas.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS.....	17
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REVISIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE .....	18
2.1. REFINACIÓN DEL PETRÓLEO .....	18
2.2. TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA T-250 .....	19
2.3. CONTROL PREDICTIVO DE LA T-250.....	24
2.4. ESTADO DEL ARTE EN LA RE-IDENTIFICACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE CRUDO .....	24
2.5. SIMULACIÓN DE PROCESOS CON HYSYS .....	26
3. METODOLOGÍA .....	27
3.1. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS .....	27
3.2. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO .....	27
3.3. SIMULACIÓN MODO DINÁMICO EN LAZO ABIERTO.....	28
3.3.1. Pruebas en lazo abierto. ....	28
3.3.2. Pruebas tipo escalón en los reflujos. ....	29
3.3.3. Identificación de funciones de transferencia. ....	29
3.4. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO CERRADO .....	29
4. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO .....	31
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA DIETA DE CRUDO.....	31

4.2. CODIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO.....	32
4.3. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DE PLANTA .....	33
4.4. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN ESTADO ESTACIONARIO.....	42
5. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO ABIERTO .....	49
5.1. INTERNOS DE LA TORRE.....	50
5.2. TRANSICIÓN AL ESTADO DINÁMICO.....	53
5.3 PRUEBAS CON LA SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO ABIERTO .....	55
5.3.1 Respuesta ante variaciones en el flujo de crudo.....	59
5.4 IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	69
6. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO CERADO.....	81
6.1 PRUEBAS EN LOS CONTROLADORES DE REFLUJO .....	81
6.2 CAMBIOS EN EL FLUJO DE CARGA .....	85
6.3 CAMBIO A DIETA PESADA .....	87
6.4 CAMBIO A DIETA LIVIANA .....	89
7. EFECTOS DEL DESARROLLO DEL TRABAJO DE APLICACIÓN.....	93
8. CONCLUSIONES .....	95
9. RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIA BIBLIOGRAFÍA.....	98
BIBLIOGRAFIA.....	100

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Productos atmosféricos y sus especificaciones. ....	20
Tabla 2. Dieta de crudo carga a torre atmosférica. ....	31
Tabla 3. Destilación de productos torre atmosférica. ....	42
Tabla 4. Rendimiento de productos laterales, escenarios 1 y 2. ....	47
Tabla 5. Cuadro comparativo de los escenarios simulados en <i>hysys</i> , con datos reales de planta. ....	48
Tabla 6. Especificaciones internos torre atmosférica según diseño actual. ....	52
Tabla 7. Especificaciones de los internos torres despojadoras según diseño actual. ....	53
Tabla 8. Especificaciones de válvulas de control en las corrientes de crudo. ....	55
Tabla 9. Valores estables resultantes de una perturbación de 10% en la carga de crudo. ....	62
Tabla 10. Valores estables resultantes de un cambio a dieta pesada 1. ....	64
Tabla 11. Variables de proceso estabilizadas con dieta pesada 2. ....	67
Tabla 12. Principales variables de proceso estabilizadas con dieta más liviana. ..	69
Tabla 13. Funciones de transferencia ajustadas con <i>Ident de Matlab®</i> . ....	70
Tabla 14. Ganancia y constantes de tiempo de las funciones de transferencia. ...	80
Tabla 15. Valores de sintonía para los controladores de flujo, sugeridos por <i>hysys</i> . ....	81
Tabla 16. Datos de sintonía reales de planta. ....	83
Tabla 17. Variables estabilizadas con una disminución de 10% en la carga, en lazo cerrado. ....	87
Tabla 18. Principales variables estabilizadas con dieta pesada, en lazo cerrado. ..	89
Tabla 19. Principales variables estabilizadas con dieta liviana. ....	91

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama general de flujo torre de destilación atmosférica. ....	21
Figura 2. Sistemas de reflujos y torres despojadoras de productos laterales. ....	23
Figura 3. Convergencia en estado estacionario torre atmosférica. ....	33
Figura 4. Datos históricos carga de crudo año 2015. El eje X corresponde a los datos históricos tomados cada dos horas a partir del 1° de Enero de 2015. ....	34
Figura 5. Producción de nafta exceso escenarios 1 y 2.....	35
Figura 6. Flujo volumétrico de los productos en el escenario 1 .....	36
Figura 7. Flujo de los productos en el escenario 2.....	36
Figura 8. Presión de cima y zona flash en los escenarios 1 y 2 .....	37
Figura 9. Reflujos laterales escenarios 1 y 2. ....	38
Figura 10. Variaciones en temperatura y reflujo de cima para el escenario 1. ....	39
Figura 11. Variaciones en temperatura y reflujo de cima en el escenario 2.....	40
Figura 12. Temperatura de salida productos laterales, escenarios 1 y 2.....	41
Figura 13. Flujo de vapor despojador al fondo de la columna principal, escenarios 1 y 2.....	42
Figura 14. Perfiles de temperatura obtenidos de la simulación.....	43
Figura 15. Perfiles de presión obtenidos de la simulación. ....	44
Figura 16. Perfil simulado de relación líquido-vapor a traves de la columna. ....	45
Figura 17. Curva de destilación Jet, escenario 1. ....	46
Figura 18. Curva destilación Diesel, escenario 1. ....	46
Figura 19. Curva destilación Gasóleo, escenario 1.....	47
Figura 20. Diagrama de flujo simulación dinámica torre atmosférica en <i>Hysys</i> . ....	50
Figura 21. Dimensionamiento de platos y zonas empacadas. ....	51
Figura 22. Instalación de válvulas de control a la entrada de las corrientes de crudo.....	54
Figura 23. Carga inicial de crudo caliente.....	55

Figura 24. Flujo de producción inicial de Jet y Diesel. ....	56
Figura 25. Flujo de producción inicial de Nafta y Gasóleo. ....	56
Figura 26. Producción de Jet y Diesel con los ajustes en el perfil de presión.....	57
Figura 27. Flujo de carga con los ajustes en el perfil de presión. ....	58
Figura 28. Producciones de Nafta y Gasóleo con ajustes en el perfil de presión. .	58
Figura 29. Controladores de carga de crudo instalados. ....	59
Figura 30. Aumento de 10% en la carga de crudo.....	60
Figura 31. Flujo de crudo reducido con un incremento de 10% en la carga. ....	61
Figura 32. Producciones de Jet y Diesel con un incremento de 10% en la carga de crudo. ....	61
Figura 33. Producciones de Nafta y Gasóleo con incremento de 10% en la carga de crudo. ....	62
Figura 34. Producciones de Jet y Diesel con cambio a dieta pesada 1. ....	63
Figura 35. Producciones de Nafta y Gasóleo con cambio a dieta pesada 1. ....	64
Figura 36. Producciones de Jet y Diesel con cambio a dieta pesada 2. ....	65
Figura 37. Producciones de Nafta y Gasóleo con cambio a dieta pesada 2. ....	66
Figura 38. Rendimiento de crudo reducido con cambio a dieta pesada 2. ....	66
Figura 39. Producciones de Jet y Diesel con dieta más liviana. ....	68
Figura 40. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta más liviana ....	68
Figura 41. Respuesta dinámica del flujo de diesel ante cambios en el reflujo inferior. ....	71
Figura 42. Comportamiento del flujo de Jet ante cambios en el reflujo inferior. ....	72
Figura 43. Cambio en el gasóleo ante perturbaciones en el reflujo inferior. ....	73
Figura 44. Polos y ceros de la función de transferencia GOA-Reflujo inferior. ....	73
Figura 45. Cambios en el flujo de crudo reducido ante perturbaciones en el reflujo inferior. ....	74
Figura 46. Cambio en la temperatura de retorno con variación en el reflujo inferior. ....	75
Figura 47. Polos y ceros función de transferencia $G5s$ . ....	76

Figura 48. Cambio en la producción de Diesel ante perturbaciones en el flujo de reflujo medio. ....	76
Figura 49. Cambios en la producción de Jet ante variaciones en el reflujo medio.	77
Figura 50. Ubicación de polos y ceros función de transferencia $G7s$ . ....	78
Figura 51. Variación en la temperatura de retorno reflujo medio ante cambios en el flujo de reflujo medio. ....	79
Figura 52. Ubicación de polos y ceros función de transferencia $G8s$ . ....	79
Figura 53. Respuesta controlador de reflujo medio con sintonía sugerida por <i>hysys</i> . ....	82
Figura 54. Respuesta controlador reflujo inferior con sintonía sugerida por <i>hysys</i> . ....	82
Figura 55. Respuesta del controlador de reflujo medio ante perturbaciones tipo escalón, con datos de sintonía reales de la planta. ....	84
Figura 56. Respuesta del controlador de reflujo inferior ante perturbaciones tipo escalón, con datos de sintonía reales de planta. ....	84
Figura 57. Disminución de 10% en la carga de crudo en lazo cerrado. ....	85
Figura 58. Producciones de Diesel y Jet con disminución de 10% en la carga, lazo cerrado. ....	86
Figura 59. Producciones de Nafta y Gasóleo con disminución de 10% en la carga, lazo cerrado. ....	86
Figura 60. Producciones de Jet y Diesel ante un cambio en la composición de la carga (dieta más pesada), en lazo cerrado. ....	88
Figura 61. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta pesada, lazo cerrado. ....	88
Figura 62. Producciones de Jet y Diesel con dieta liviana, en lazo cerrado. ....	90
Figura 63. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta liviana, en lazo cerrado. ...	91

## RESUMEN

TITULO: SIMULACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA T-250 UTILIZANDO HYSYS: IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA Y ANÁLISIS EN LAZO CERRADO\*

AUTOR: OSCAR MANUEL PABUENA TORRES\*\*

PALABRAS CLAVES: MPC, DMC, LIVIANOS, PESADOS, REFLUJOS, SIMULACIÓN, DINÁMICA, ASSAY

### DESCRIPCIÓN

En el presente trabajo, se realizan diferentes escenarios de simulación en estado estacionario y dinámico, de una columna de destilación atmosférica de la refinería de Barrancabermeja, con el objetivo de obtener información importante que permita guiar la actualización de los modelos del controlador tipo DMC, sin generar perturbaciones en la operación de la planta. La metodología utilizada se llevó a cabo en varias fases:

Inicialmente se realizó un estudio de la operación actual de la torre de destilación atmosférica, mediante el análisis de los datos históricos de las principales variables. Para ello fueron seleccionados dos periodos en los cuales la planta presento estabilidad durante el año 2015. Basado en el análisis realizado, se determinaron las condiciones iniciales de operación y la dieta de crudo para alimentar la simulación.

La siguiente etapa consistió en la configuración de dos escenarios de simulación en estado estacionario, los cuales fueron comparados con igual número de escenarios de la operación real de la planta. Este ejercicio permitió validar que la simulación configurada en hysys, representa la realidad de la planta y puede ser utilizada como punto de partida para configurar la simulación dinámica.

En la última fase, se configuró la simulación dinámica de la torre atmosférica y se realizaron pruebas con diferentes dietas de crudo, variación de la carga y reflujos. Con los datos de la simulación fueron calculadas las funciones de transferencia que representan el comportamiento de los productos (Jet, Diesel y Gasóleo), ante perturbaciones de los reflujos laterales. El análisis de los resultados obtenidos constituye información de gran valor, que puede ser utilizada en la actualización del controlador DMC de la planta, con los beneficios económicos que esto representa.

---

\* Trabajo De Grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Ingeniería Química. Maestría En Ingeniería Química. Director. Giovanni Morales, Co-directo. CARLOS MUVDI,

## SUMMARY

TITLE: SIMULATION OF THE T-250 ATMOSPHERIC DISTILLATION TOWER USING HYSYS: IDENTIFICATION OF TRANSFER FUNCTIONS AND ANALYSIS IN CLOSED LOOP<sup>\*</sup>

AUTHOR: OSCAR MANUEL PABUENA TORRES<sup>\*\*</sup>

KEYWORDS: MPC, DMC, LIGHT, HEAVY, REFLAWS, SIMULATION, DYNAMICS, ASSAY

### DESCRIPTION

In the present summary, different simulation scenarios are performed in steady and dynamic state of an atmospheric distillation column of the Barrancabermeja refinery, with the objective of obtaining important information that allows guiding the updating of the models of the controller type DMC, without generating disturbances in the operation of the plant. The methodology used was carried out in several phases:

Initially a study of the current operation of the atmospheric distillation tower was carried out, analyzing the historical data of the main operating variables of the plant. For that, two periods were selected in which the plant presented stability during the year 2015. Based on the analysis performed, the initial conditions of operation and crude diet are determined to feed the simulation.

The next phase consisted in the configuration of two simulation scenarios in steady state which were compared with the same number of scenarios of the plant's real operation. This practice allows validate that the simulation configured in hysys, represents the reality of the plant and can be used as a starting point to configure the dynamic simulation.

In the last phase, the dynamic simulation of the atmospheric tower was configured and tests were performed with different crude diets, load variation and reflaws. With the data of the simulation the transfer functions were calculated which represent the behavior of the products (Jet, Diesel and Diesel Fuel) to the perturbations of the tower's lateral reflaws. The analysis of the transfer functions and the simulation results offer valuable information that can be used in the updating of the plant's DMC controller with the economic benefits that this represents.

---

<sup>\*</sup> Degree Work

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. School Of Chemical Engineering. Master's Degree in Chemical Engineering. Director. Giovanni Morales, Co-direct. CARLOS MUVDI

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de la refinación del petróleo está atravesando por una época de transición, en donde la demanda mundial de refinados está determinada por tres factores importantes: (1) cambios en la normatividad ambiental y exigencia de combustibles con requerimientos de calidad más estrictos, en especial en cuanto al contenido de azufre, benceno, olefinas y aromáticos; (2) evolución tecnológica en la industria automotriz, con el desarrollo de vehículos eléctricos; (3) escases de crudos livianos y disponibilidad de crudos pesados en el mercado. Como respuesta a estos cambios, la industria mundial de refinación tiene dentro de sus prioridades llevar a cabo inversiones para ajustarse a las exigencias del mercado con la producción de combustibles de excelente calidad. Para lograr este objetivo, se requiere modernizar las refinerías para el cargue de crudos pesados y optimizar los sistemas de control del proceso para asegurar la confiabilidad de la infraestructura, productos de calidad y mínimos costos de operación.

La refinería de Barrancabermeja no es ajena a este proceso, y desde hace varios años viene desarrollando proyectos como la construcción de un planta de hidrotratamiento de combustibles, e implementando cambios y mejoras en las unidades de proceso para adaptarlas a las nuevas dietas de crudo disponibles. En este proceso juega un papel fundamental el control adecuado de los distintos procesos de refinación, que para el caso de las plantas de la GRB corresponde al control predictivo de procesos tipo DMC (Matrix Dynamic Control). Las desviaciones en las predicciones operacionales con los parámetros del DMC son inevitables en los casos en donde los equipos, como las torres de destilación del petróleo, son sometidos a proyectos de modernización y ampliación conocidos como *revamping*. En la GRB, la unidad de destilación primaria U-250, fue

sometida en el año 2012 a un proceso de *revamping* dentro del cual no fue incluido el sistema de control DMC. Con lo anterior, los modelos que identificaban la operación de la torre de destilación atmosférica T-250 de la U-250 quedaron desactualizados y prácticamente ineficientes para el sistema de control DMC de la unidad.

La operación de una torre de destilación con un sistema de control que presenta desviaciones en sus predicciones, impacta negativamente en la calidad de los productos, con lo cual la actualización de los parámetros del modelo (re-identificación) se hace necesaria para garantizar un beneficio económico en el negocio de la refinación del petróleo; sin embargo, la re-identificación experimental es un ejercicio que puede ocasionar grandes traumatismos en la operación normal de la planta. Una de las alternativas para analizar el desempeño de los controladores y prever los cambios requeridos en los mismos, corresponde al uso de los simuladores de procesos comerciales. Los simuladores comerciales se basan en módulos de simulación independientes que siguen aproximadamente la misma filosofía de las operaciones unitarias; es decir, cada equipo (bomba, intercambiador, tambor, torre, etc.) es representado por un gráfico con ecuaciones específicas, conectados por flechas cuyo sentido de información coincide con el “flujo físico” de materia y energía en la planta representada [1].

El presente trabajo de profundización presenta los resultados de una metodología para realizar la re-identificación de las funciones de transferencia para la torre de destilación atmosférica T-250 de la GRB utilizando la simulación en el programa HYSYS. La metodología considera la codificación y validación de una simulación para la T-250 operando en estado estacionario. Posteriormente, la simulación en estado estacionario es utilizada para desarrollar una simulación en lazo abierto, con la cual se generaron los datos adecuados para obtener las funciones de transferencia que identifican la operación de la torre. Finalmente, los lazos de control para los *pumparound* de la torre fueron especificados y su desempeño

validado en una simulación en lazo cerrado considerando diferentes perturbaciones.

Es importante destacar que la simulación presentada en este trabajo de aplicación corresponde a la primera realizada después de los cambios ocurridos con el *revamping* de la unidad y considerando las nuevas dietas de crudo con que se cuenta en la actualidad. Los resultados de este trabajo de aplicación serán soporte para la planeación, ejecución y validación de los nuevos modelos del sistema de control DMC de la planta.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar la simulación dinámica de la torre de destilación atmosférica T-250 de la GRB, analizar el desempeño de la misma en lazo cerrado e identificación de las funciones de transferencia para las principales interrelaciones entre las variables de operación.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el desempeño actual de la torre de destilación T-250, mediante el análisis de los datos históricos.
- Desarrollar la simulación en estado estacionario de la torre de destilación atmosférica T-250 y evaluar su desempeño en diferentes escenarios.
- Evaluar el desempeño de la simulación en estado estacionario y dinámico ante cambios en el flujo de carga y dieta de crudo.
- Identificar funciones de transferencia representativas del comportamiento de la T-250.

## 2. REVISIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

El *assay* del crudo es un documento en el que se presenta una caracterización física y composicional de un crudo, con lo cual provee información útil para determinar el potencial de refinación del crudo respectivo [2]. Algunas de las propiedades que puede contener un *assay* de crudos son: densidad, contenido de azufre y los rendimientos de destilación; esta última propiedad proporcionan un estimado de la cantidad de productos contenidos en el crudo. La información contenida en un *assay* de crudo es tan importante que puede ser utilizada en el diseño de plantas de refinación de petróleo o proyectos sobre plantas existentes [3]. Una vez el petróleo crudo se encuentra en los tanques de almacenamiento de las refinerías, se inicia el proceso de transformación fisicoquímica para obtener los diferentes tipos de combustibles y la gran variedad de productos petroquímicos. La primera fase de este proceso se conoce como destilación primaria del crudo [4], la cual, a su vez, se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- Preparación del crudo: En esta etapa se realiza la mezcla de los diferentes tipos de crudo que llegan a la refinería y se obtiene una dieta con las especificaciones definidas, el crudo preparado es bombeado como carga a las unidades de destilación primaria.
- Desalado: El crudo a ciertas condiciones de presión y temperatura es sometido a un proceso de retiro de sales por medio de inyección de agua de lavado y un proceso electrolítico para la precipitación de las mismas. Las sales son retiradas con el agua efluente y el crudo desalado continúa con el proceso de calentamiento.

- Precalentamiento y calentamiento del crudo: Por medio de intercambiadores de calor, se aprovecha la energía de los productos y reflujos de la columna de destilación atmosférica y vacío, para ceder calor al crudo antes de entrar al horno atmosférico, en donde finalmente el crudo obtiene la temperatura deseada para entrar como carga a la torre de destilación.
- Destilación atmosférica: El crudo es separado y se obtienen directamente combustibles como la nafta o gasolina, Turbosina Jet, Diesel y gasóleos, el residuo que sale por el fondo de la columna es cargado a la unidad de vacío.
- Destilación al vacío: El crudo reducido proveniente del fondo de la torre atmosférica, contiene hidrocarburos pesados cuyas temperaturas de ebullición son superiores a las del craqueo térmico, razón por la cual se hace necesario la disminución de la presión para lograr el fraccionamiento evitando el craqueo térmico. El vacío se obtiene por medio del efecto combinado de eyectores, que funcionan con vapor como medio motriz, y condensadores de superficie.

## **2.2. TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA T-250**

La unidad de destilación atmosférica U-250 de la GRB tiene por objeto fraccionar el petróleo crudo en las fracciones Nafta, Jet, ACPM y Gasóleo Atmosférico, tiene una capacidad máxima de procesamiento de crudo de 42000 bpd. En la actualidad las dietas de crudo cargadas a la unidad, están constituidas aproximadamente por 60% de crudo mezclado y 40% de crudo ácido, con un API promedio entre 20 y 23°. Sin embargo son muy frecuentes los cambios de las dietas de crudo. La lista de productos y sus principales especificaciones de destilación se pueden observar en la tabla 1.

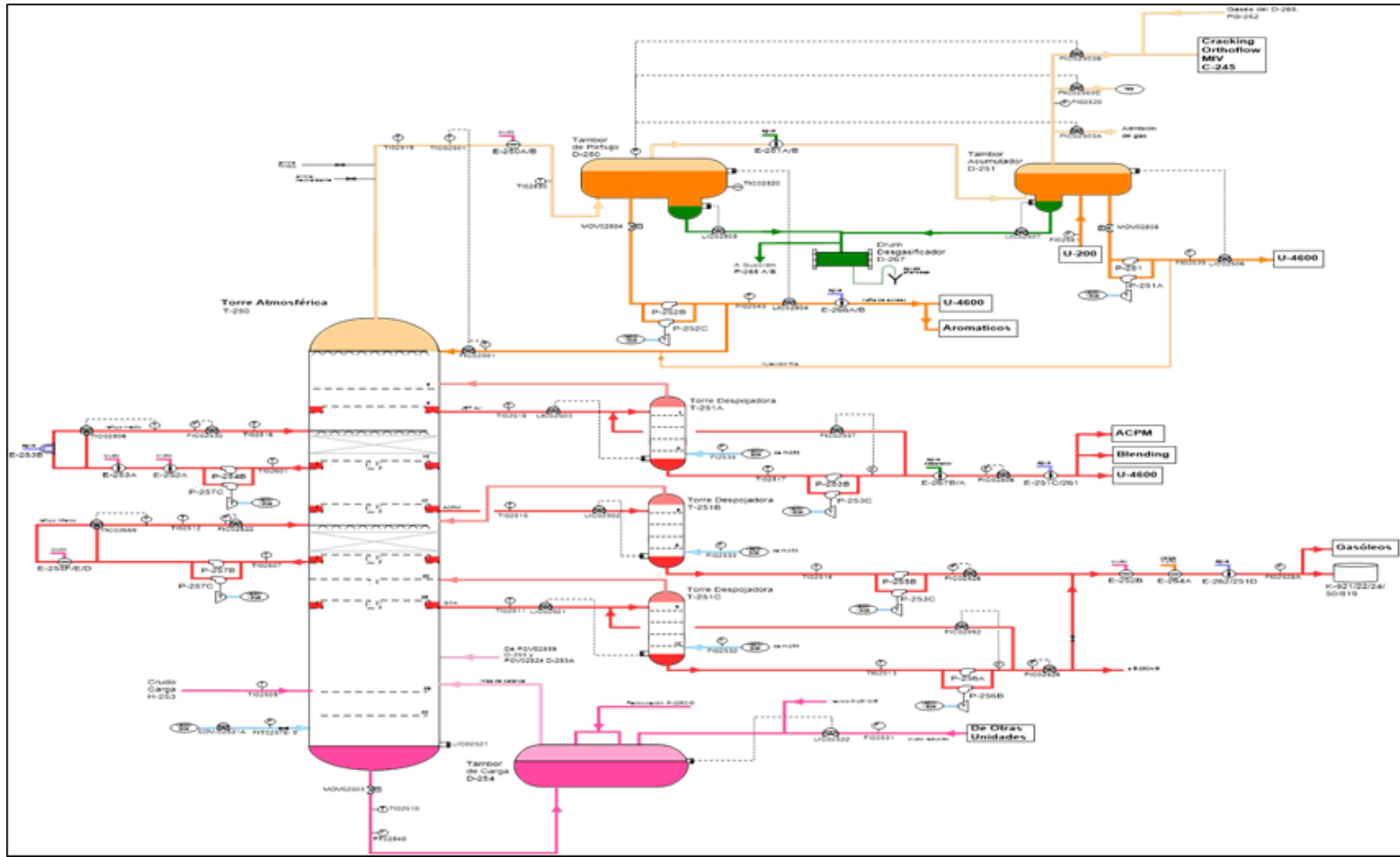
**Tabla 1. Productos atmosféricos y sus especificaciones.**

<b>Producto</b>	<b>Destino</b>	<b>Especificación</b>
Nafta Pesada	Blending de gasolinas	ASTM D86 90% - 295 °F ASTM D86 FBP – 401 °F máximo
Jet	Blending de productos	Flash – 100.4 °F mínimo ASTM D86 10% - 401 °F máximo ASTM D86 FBP – 572 °F máximo
Diesel	Blending de productos	ASTM D86 95% - 680 °F máximo ASTM D86 FBP – 734 °F máximo
GOA	Alimentación FCCU	ASTM D1160 95% - 1075 °F

Fuente: Ecopetrol S.A.

La destilación comienza cuando el crudo parcialmente vaporizado ingresa por la zona flash de la columna T-250, zona desde donde el flujo de vapor comienza su ascenso, mientras entra en contacto con el líquido que desciende desde la cima de la torre (reflujo de cima) a través de los platos y las zonas empacadas. La destilación establece un intercambio de masa y energía entre el líquido y el vapor; el contacto de las dos fases da lugar a un intercambio de energía y de componentes, donde los más volátiles enriquecen la fase vapor y se retiran por la parte superior, mientras que los más pesados pasan a la fase líquida y se extraen como productos laterales y por el fondo de la columna.

Figura 1. Diagrama general de flujo torre de destilación atmosférica.



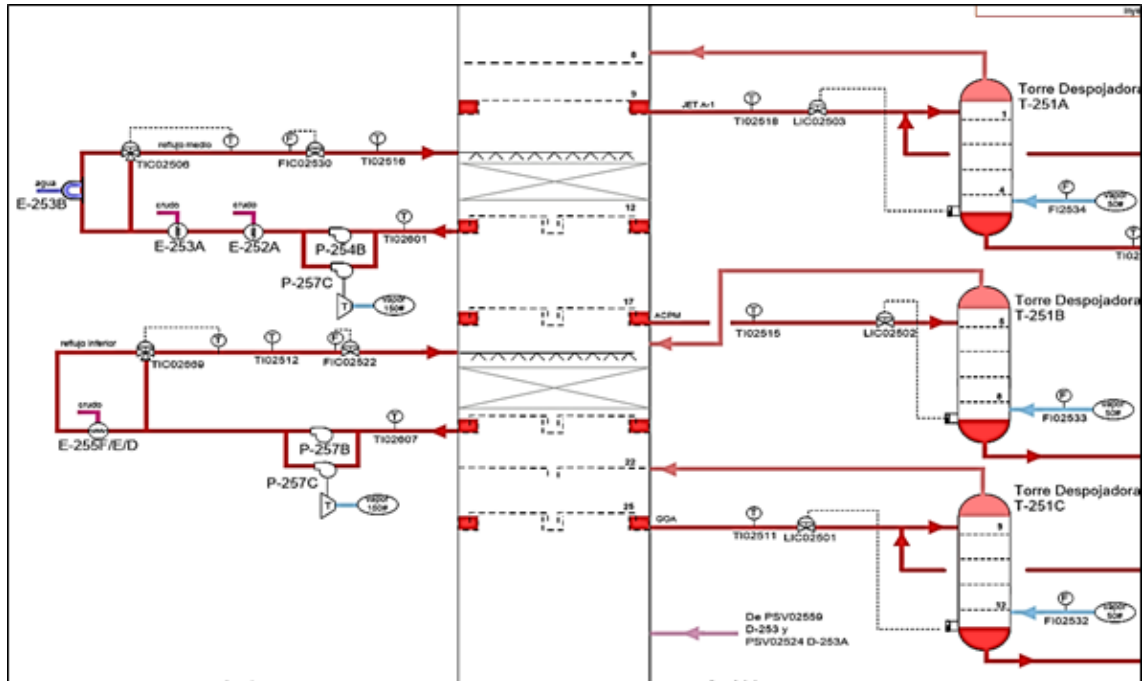
Fuente: Ecopetrol S.A

En la figura 1, está representado el diagrama general de flujo de la unidad de destilación atmosférica con los principales equipos asociados. Por la parte de cima de la torre, los vapores de salida de la columna se enfrían y condensan mediante intercambio de calor con el crudo de carga a la unidad. Este enfriamiento produce la condensación de la nafta pesada; parte de la nafta se utiliza como reflujo de cima hacia la torre de destilación, mientras ca. 1000 BPDO son recuperados como producto de cima. Los vapores remanentes de esta primera etapa (condensador parcial) se enfrían para condensar la nafta liviana y el agua presente; los gases livianos son enviados para recuperación de otros productos valiosos en las unidades de ruptura catalítica [5].

La condensación de los vapores de hidrocarburo ocurre a medida que la temperatura en la torre disminuye y ascienden hacia la cima. Para mantener el perfil adecuado de temperaturas a lo largo de esta sección de la columna, se retira calor mediante los *pumparounds* medio e inferior, además de realizar la extracción lateral de productos, que se recuperan en los platos colectores de salida de la torre. En la torre de destilación atmosférica se cuenta con tres reflujo circulantes, dos de ellos son regulados por un FIC y el de cima con un TIC, el aumento en la cantidad de circulación aumenta la remoción de calor y el reflujo interno en la zona de la torre inmediatamente inferior a ese punto. Para la condensación de las tres corrientes laterales, es necesario utilizar dos sistemas de reflujo externo (medio e inferior), que permite precalentar el crudo y reducir la carga térmica del horno. El reflujo medio se extrae del plato 12 de la T-250 y retorna bajo el plato 9 sobre la zona empacada superior. El líquido fluye a la succión de las bombas de reflujo e intercambia calor con el crudo en dos intercambiadores, y luego en un enfriador con agua, que mediante la válvula de tres vías controla su temperatura de retorno a la torre atmosférica. El caudal del Reflujo Medio se regula con el FICV-02530, figura 2. El reflujo inferior se extrae del plato 21 y retorna bajo el plato 17, sobre la zona empacada inferior de la torre. El líquido fluye a la succión de las bombas de

reflujo inferior e intercambia calor con el crudo para luego retornar a la torre. El reflujo se regula con el FIC-2522.

**Figura 2. Sistemas de reflujo y torres despojadoras de productos laterales.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

El líquido acumulado en los platos colectores de Jet, ACPM y Gasóleo, fluye por diferencia de presión hacia las torres despojadoras, en donde el nivel de líquido es controlado con una válvula de control que regula el flujo de líquido hacia cada despojadora, figura 2.

Se utiliza vapor sobrecalentado para despojar los combustibles producto y el residuo del fondo de la columna de destilación de crudo de los componentes más livianos, cumpliendo con las especificaciones del punto de chispa y para llevar los compuestos livianos a los cortes superiores más valiosos. Este efecto se logra dado que el vapor al no mezclarse con la fase líquida que desciende por la columna permanece en la fase vapor disminuyendo la presión parcial de los

hidrocarburos, lo cual promueve la vaporización de los livianos atrapados en la fase líquida [5].

### **2.3. CONTROL PREDICTIVO DE LA T-250**

La torre de destilación atmosférica T-250, opera con sistema DCS\* integrado al software de control DMC de Aspen plus® desde comienzos del año 2008. La implementación del DMC permitió optimizar la operación de la columna mejorando la eficiencia y obteniendo una mayor recuperación de productos valiosos como JET y ACPM. Con el objeto de cargar crudos pesados, la T-250 fue sometida a una serie de cambios estructurales y de tecnología de proceso. Desafortunadamente, este *revamping*\* no incluyó mejoras ni actualizaciones en el sistema de control DMC, razón por la cual este quedó inaplicable a la nueva torre; por esta razón, el control de la T-250 y de toda la U-250 se aplica de manera tradicional mediante la manipulación manual y aislada de los diferentes lazos de control. Desde luego, este modo de operación sin optimización afecta el desempeño de la unidad y la economía del proceso.

### **2.4. ESTADO DEL ARTE EN LA RE-IDENTIFICACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE CRUDO**

Gabriele Pannocchia, *et al.* [6], en su trabajo *RIGOROUS SIMULATION AND MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A CRUDE DISTILLATION UNIT*, 2006, demuestran como la simulación dinámica con Aspen Hysys puede ser ampliamente utilizada en la identificación de modelos, re-identificación y etapas de diseño y comisionamiento de controladores avanzados de procesos para unidades

---

\* Distributed Control System

\* Proyectos de transformación o modernización de las plantas de proceso, puede incluir cambios estructurales y de tecnología.

de destilación atmosférica. Asimismo, resalta la disminución de los costos en cada una de las aplicaciones mencionadas.

Raja Kumar More, *et al.* [7], en su trabajo denominado *Optimization of crude distillation system using aspen plus: Effect of binary feed selection on grass-root design*. Presenta la utilización de Aspen Plus, mediante la simulación de una columna de destilación atmosférica. El resultado de la simulación permite obtener información útil para la optimización de la torre de destilación mediante la selección de las mejores dietas de crudo y estimación de funciones de transferencia y parámetros de control para cada caso.

Badwe S. Abhijit, *et al.* [8], en su trabajo, *Detection of model-plant mismatch in MPC applications*, demuestra mediante la realización de dos escenarios de simulación de una columna atmosférica, que es posible la re-identificación de los modelos de un control avanzado de procesos con la metodología desarrollada. Su trabajo concluye en los beneficios económicos que representa para las compañías refinadoras, la utilización de metodologías de simulación para la actualización de los controladores APC, evitando las perturbaciones con planta en operación.

K. Anitha, *et al.* [9], realizaron la simulación en estado estacionario de una columna de destilación atmosférica utilizando Aspen Plus. El objetivo de su trabajo fue realizar una simulación usando dos mezclas de crudo, Dubai-Basara (crudo 1) y Dubai-Bomby High (crudo 2). Los resultados de la simulación fueron comparados con datos reales y permitió identificar que el crudo 2 ofrecía mayor porcentaje de rendimiento que el crudo 1.

## 2.5. SIMULACIÓN DE PROCESOS CON HYSYS

El software comercial *Aspen Hysys*®, el cual se ha establecido como un simulador de procesos intuitivo y fácil de usar en la industria de petróleo y gas. Ofrece una base termodinámica completa para el cálculo preciso de las propiedades físicas, propiedades de transporte y el comportamiento de fase para el petróleo y las industrias del gas y la refinación [10]. Este software permite simulaciones tanto estáticas como dinámicas. Sus operaciones y propiedades permiten modelar una amplia gama de procesos con confianza, tiene una gran base termodinámica y sus paquetes de propiedades llevan a la presentación de un modelo más realista [10].

El paquete termodinámico seleccionado fue *Peng Robinson (PR)*, considerando que junto con la ecuación de *Soave-Redlich-Kwong (SRK)*, son dentro del grupo de las ecuaciones cúbicas de estado, las más usadas y que mejor predicen el comportamiento de las mezclas líquido-gaseosas; ambas fueron desarrolladas de forma explícita para cálculos de equilibrio vapor/líquido, pero, particularmente *PR*, representa adecuadamente el proceso de destilación atmosférica de crudo [10].

### **3. METODOLOGÍA**

Para cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo de aplicación, se diseñó y desarrollo la metodología relacionada a continuación:

#### **3.1. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS**

La información técnica de diseño y operación de los equipos relacionados con la columna atmosférica materia de estudio, tales como *datasheets* de columnas e intercambiadores, diagramas de flujo, datos de variables de operación, *Assays* de crudos, manuales de operación, etc., fueron proporcionados por Ecopetrol S.A. bajo acuerdo de confidencialidad. Adicionalmente, se consiguieron los datos históricos del año 2015 de las principales variables de operación de la columna de destilación atmosférica, a los cuales se les realizó un análisis previo para identificar los periodos de mayor estabilidad en la operación de la planta y utilizar estos datos como referente para validar el desempeño de la simulación en estado estacionario y posteriormente en modo dinámico.

#### **3.2. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO**

Se realizó la codificación de los *Assays* de crudo para posteriormente cargarlos en Hysys, seguidamente se realizó el dimensionamiento de los equipos de acuerdo al diseño de la planta; para el caso de la columnas de destilación y despojadoras de productos laterales, se definieron y especificaron los internos, como tipo y número de platos, tipo y ubicación de zonas empacadas, entrada y salida de productos,

etc. Se especificaron cada una de las corrientes de proceso de acuerdo a información de los datos históricos de la planta; finalmente, se realizó el diagrama de proceso, se verificaron los grados de libertad y se dio inicio a la simulación en modo estacionario. Como parte del procedimiento, fue necesario ajustar algunas variables de proceso como la variación de los reflujos de cima y laterales, flujos de productos y temperatura de retorno de los reflujos, hasta lograr la convergencia del modelo y obtener datos acordes a la realidad de la planta.

Para analizar el desempeño de la simulación en estado estacionario, se realizaron y corrieron dos escenarios, los cuales fueron analizados y comparados con datos reales de planta. La similitud del comportamiento de las variables con los datos de planta, permitió realizar la validación de la simulación.

### **3.3. SIMULACIÓN MODO DINÁMICO EN LAZO ABIERTO**

Teniendo como punto de partida la convergencia en el estado estacionario, se realizó una nueva revisión en detalle de las especificaciones de los internos de la torre atmosférica y despojadoras, se ajustaron los perfiles de presión para asegurar el flujo entre torre principal y despojadoras para luego configurar controladores de flujo para las corrientes de entrada de crudo y reflujos laterales. Se realizan algunos ajustes finales sugeridos por el asistente dinámico de Hysys para asegurar el equilibrio termodinámico y la convergencia de los datos; finalmente se corre la simulación hasta lograr la estabilidad en las variables principales.

**3.3.1. Pruebas en lazo abierto.** Se realizaron cambios en el flujo de carga a la planta y variaciones en la dieta de crudo. El análisis de los diferentes escenarios, permitió identificar interrelaciones entre el tipo de carga a la unidad y el rendimiento de productos de alto valor comercial como nafta, Jet y Diesel;

adicionalmente las pruebas realizadas permitieron identificar con qué tipo de dietas pesadas, la columna atmosférica presenta un mejor desempeño. Las perturbaciones se ejecutaron en modo manual esperando el tiempo necesario hasta que se estabilizara el proceso.

**3.3.2. Pruebas tipo escalón en los reflujos.** Se realizaron perturbaciones tipo escalón en los reflujos medio e inferior de la torre atmosférica. Los datos históricos de las principales variables de operación fueron registrados para su análisis y posterior identificación de las funciones de transferencia.

**3.3.3. Identificación de funciones de transferencia.** Se recopilaron los datos históricos de las principales variables de proceso durante las perturbaciones realizadas en los reflujos medio e inferior de la columna atmosférica, para determinar la interrelación entre las mismas mediante la identificación de las funciones de transferencia. Para hallar las funciones de transferencia fue utilizado el *toolbox ident*, de Matlab®.

#### **3.4. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO CERRADO**

Inicialmente, se mantiene la sintonía inicial de los controladores de reflujo medio e inferior, luego se realiza la sintonía utilizando la opción *Autotuning* de Hysys, observando la respuesta para cada caso. Luego se establecieron los parámetros de sintonía actuales de los controladores de la planta y se realizaron pruebas para evaluar la respuesta de los mismos. Finalmente, se definen los parámetros de sintonía con los que se obtiene mejor respuesta a las perturbaciones presentadas en el proceso.

Los controladores de flujo de carga y reflujos de la torre, fueron operados en modo automático, posteriormente se realizaron perturbaciones mediante cambios en el

set-point para evaluar la respuesta del proceso. Se realizaron perturbaciones en los flujos de carga de crudo y reflujo medio e inferior, para cada caso se graficaron las tendencias históricas de las principales variables de proceso. Los valores de las variables estabilizadas fueron tabulados para análisis de resultados.

## 4. SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA DIETA DE CRUDO

Conociendo la caracterización de los distintos tipos de crudo que llegan a la refinería, se programan y preparan mezclas o dietas de crudos que cumplan los requerimientos de las diferentes unidades de destilación atmosférica y vacío.

Para el presente trabajo, se ha definido una dieta de crudo cargado a la torre de destilación atmosférica, la cual se detalla en la tabla 2; en esta tabla, CSB: crudo casabe, GAL: crudo galán, RUB: crudo rubiales, PRO: crudo provincia, PAY: crudo payoa, CAN: crudo candelilla, CAS: crudo castilla, SFD: crudo san Fernando, CNT: crudo castilla norte, NUT: crudo nutria, NAF: nafta diluyente. El flujo de alimentación total corresponde a 42 kbpd; en planta estos flujos conforman la línea LCT (CAS, CNT, RUB, SFD, CAN, NAF) y la línea Payoa (NUT, PAY, NAFT). La corriente NAF no es considerada un tipo de crudo, constituye nafta que es utilizada como diluyente para facilitar el transporte de los crudos más viscosos o pesados a través de los oleoductos.

**Tabla 2. Dieta de crudo carga a torre atmosférica.**

Crudo	CSB	GAL	RUB	PRO	PAY	CAN	CAS	SFD	CNT	NUT	NAF
kbpd	20,53	4,67	4,53	3,73	2,9	1,29	1,06	1,06	0,96	0,71	0,56
Densidad	0,9249	0,9286	0,9795	0,8985	0,8911	0,8188	0,9802	1,0186	0,9946	0,8919	0,7017
°API	21,49	20,88	12,96	25,985	27,29	41,31	12,858	7,4162	10,77	27,15	-

Fuente: Departamento de planeación GRB.

Los assays de los crudos que conforman la dieta a la unidad fueron codificados en la herramienta *Petroleum assays* de HYSYS, para su posterior uso en el análisis de la simulación de la T-250 en estado estacionario y dinámico.

#### **4.2. CODIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO**

La torre atmosférica codificada en *Hysys*, consta de los siguientes componentes:

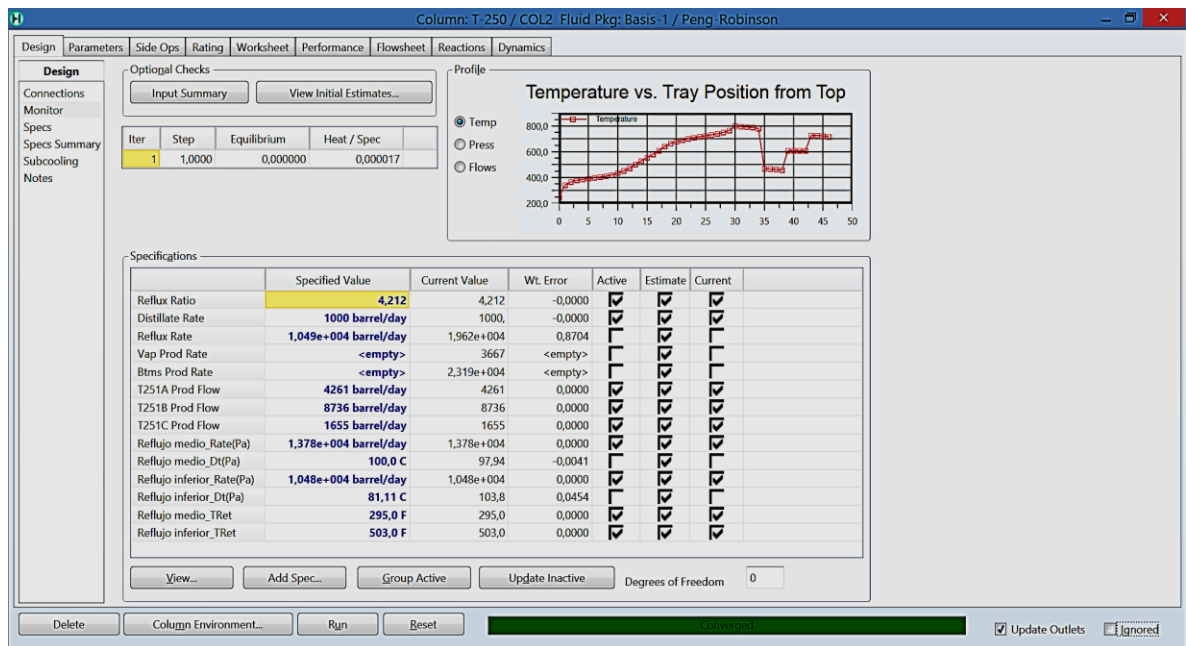
- Columna principal: Constituida por 34 platos de burbujeo, dentro de los cuales se incluyen dos zonas empacadas. El contacto líquido-vapor a través de toda la columna es llevado a cabo por tres sistemas de reflujo, uno de cima y dos reflujos laterales con retiro externo de calor a través de enfriadores. La parte inferior de la torre recibe una inyección de vapor sobrecalentado para disminuir la presión parcial de los distintos componentes y facilitar el respectivo despojo.
- Torres despojadoras laterales: Tres torres despojadoras fueron especificadas en HYSYS, una para cada producto lateral (Jet, Diesel, Gasóleo). Cada torre despojadora recibe inyección de vapor sobrecalentado a 50 psig, para rectificar las propiedades del correspondiente producto; los componentes livianos retirados junto con el vapor de agua, retornan a la columna principal.
- Condensador de cima: Su función es condensar los vapores que salen por la parte superior de la columna; una gran proporción del líquido acumulado retorna como reflujo de cima, mientras otra parte corresponde a la nafta producto (destilado).

De otro lado, en la simulación no se considera el posible craqueo térmico ocurrido en el horno atmosférico. Este hecho haría más complejo el ejercicio de simulación, razón por la cual solo se considera el proceso de separación de los

componentes debido a la diferencia en los puntos de ebullición de los productos destilados en la columna atmosférica. Asimismo, la simulación establece una temperatura de 705.9 °F para el crudo a la entrada de la torre atmosférica.

En la figura 3, se presenta el resultado de la simulación en estado estacionario, donde se observa el perfil de temperatura de la columna principal y la convergencia de las distintas variables de operación.

**Figura 3. Convergencia en estado estacionario torre atmosférica.**

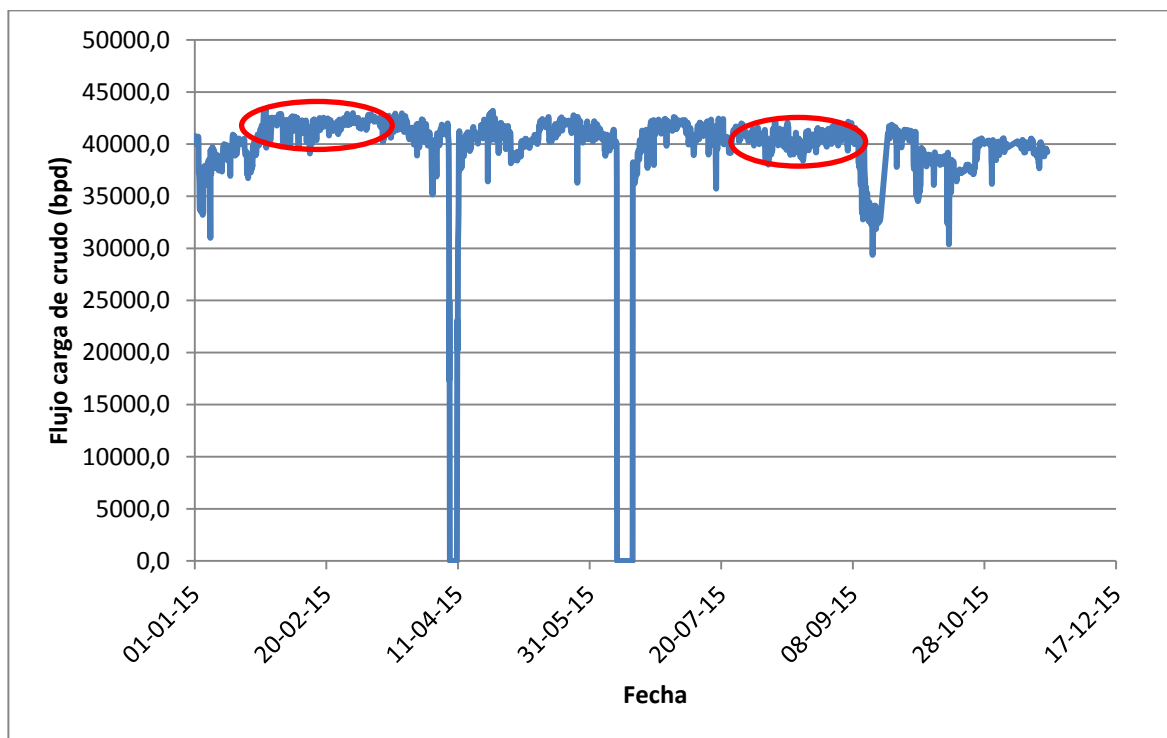


### 4.3. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DE PLANTA

La comparación se realiza con los datos históricos del año 2015. El flujo de carga a la unidad fue graficada y se representa en la figura 4. El eje x corresponde a los datos históricos tomados cada dos horas a partir del 1° de enero del 2015. En esta figura se señalan en rojo las fechas para las cuales es posible considerar que la planta opero en estado estacionario; la primer fecha corresponde del 25 de enero al 25 de marzo (escenario 1) y la segunda corresponde desde el 22 de junio al 08

de septiembre (escenario 2). En los escenarios, los promedios de alimentación de las cargas fueron de  $41977 \pm 250$  bpd y  $40903 \pm 1800$  bpd (95% de confianza), respectivamente, lo que representa una variación del 1% y 4% de la carga total, respectivamente, soportando el supuesto de estabilidad en la operación.

**Figura 4. Datos históricos carga de crudo año 2015. El eje X corresponde a los datos históricos tomados cada dos horas a partir del 1° de Enero de 2015.**

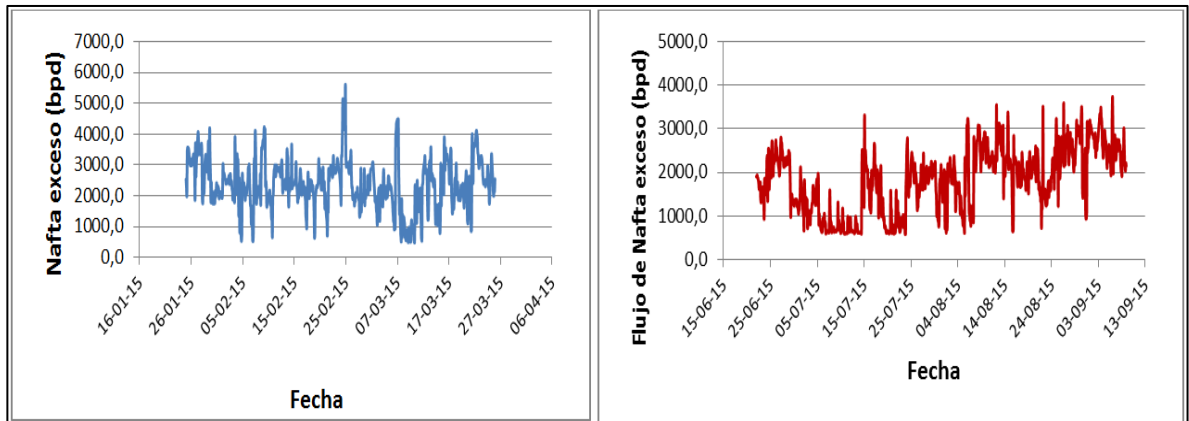


Fuente: Ecopetrol S.A.

La producción de nafta exceso (destilado) para los escenarios está representada en la figura 5. Para el escenario 1, a pesar de que la carga de crudo se mantiene estable, se observa gran variabilidad en la producción de destilado; esta inestabilidad puede deberse a la variación en la cantidad de gasolina diluyente para el transporte de crudo pesado constituyente de la carga a la unidad. En el escenario 2, la tendencia en la fluctuación del flujo de destilado es mantenida;

según lo anterior, el comportamiento de esta variable está fuertemente influenciado por la composición de la carga de crudo. Sin embargo, estas variaciones en la composición no generan inestabilidad en la operación, lo cual se puede evidenciar en la tendencia de la temperatura de cima.

**Figura 5. Producción de nafta exceso escenarios 1 y 2.**

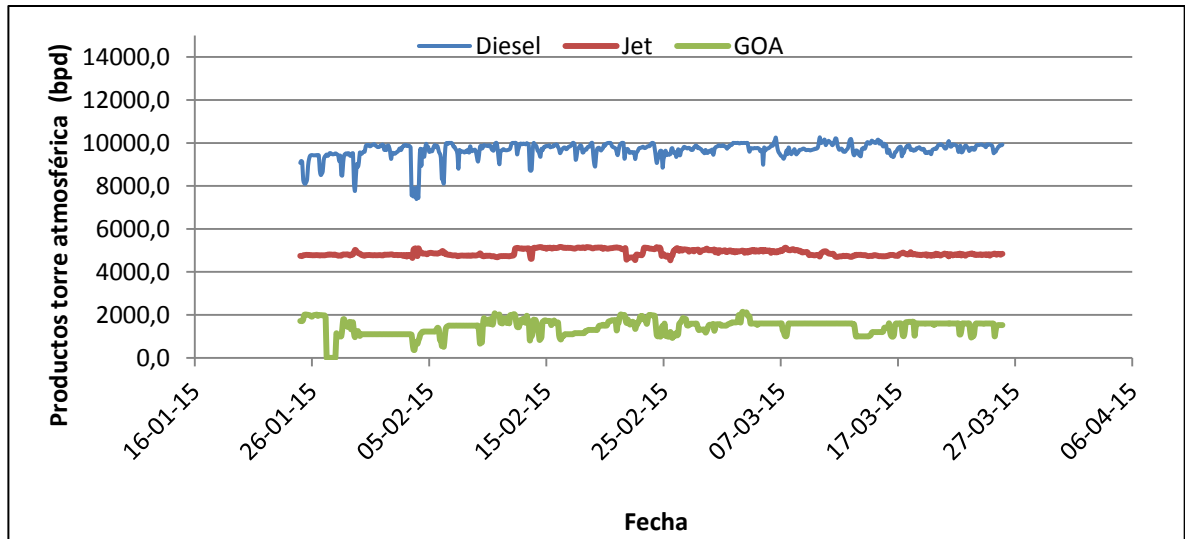


Fuente: Ecopetrol S.A.

Los datos de producción de nafta exceso fueron reducidos mediante la estrategia univariada de los cuartiles para obtener un conjunto de puntos con una desviación estándar menor. Para los dos escenarios el dato promedio sin valores por fuera del rango reporta un valor de 1370 bpd, con una desviación estándar de aproximadamente 500 bpd. La incertidumbre en los datos de la nafta exceso también es debida a la inyección de nafta fría al reflujo de cima; esta nafta fría proveniente de la segunda etapa de condensación y de otras unidades de crudo.

Por otra parte, en el escenario 1, la producción de jet fue  $4262 \pm 70$  bpd, la de Diesel  $8736 \pm 190$  bpd y la de gasóleo  $1655 \pm 165$  bpd; la mayor variación presentada en la producción de gasóleo, se debe a que este flujo es secundario y por lo tanto es manipulado con el objetivo de sacar mayor provecho de los productos livianos como Diesel y Jet (figura 6).

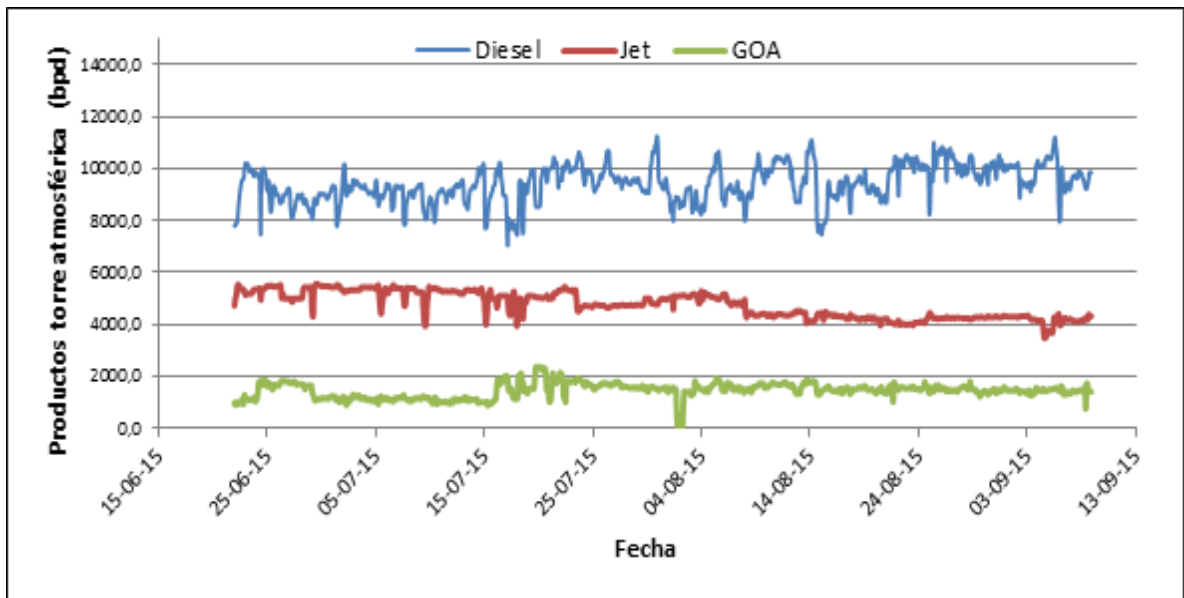
**Figura 6. Flujo volumétrico de los productos en el escenario 1**



Fuente: Ecopetrol S.A.

Dentro del escenario 2 (figura 7), la producción de jet fue de  $4755 \pm 492$  bpd, la producción de Diesel de  $9427 \pm 709$  bpd y la producción de gasóleo atmosférico fue de  $1460 \pm 288$  bpd; estas fluctuaciones en la producción reflejados por los intervalos de confianza, se presentan debido a diversos factores operacionales como restricción en la salida de gases de cima, mantenimientos preventivos de intercambiadores de calor, calibración de sensores y variaciones puntuales en la composición de la carga de crudo ocurridos en la ventana operativa considerada.

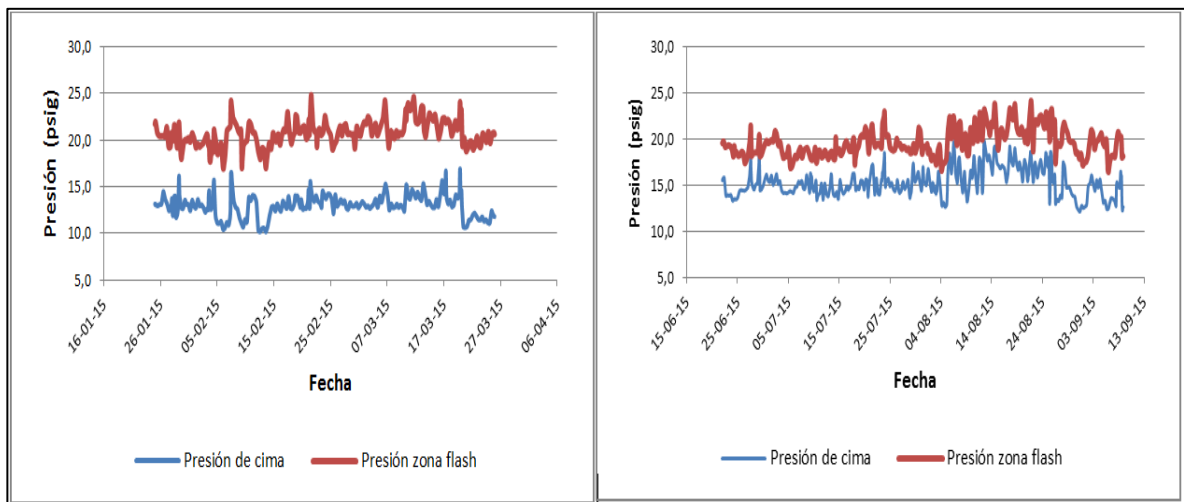
**Figura 7. Flujo de los productos en el escenario 2.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

La presión de la zona flash está directamente relacionada con la presión de cima de la columna, un incremento de la diferencial entre estas dos variables es indicación que se presenta una condición anormal de operación como un alto nivel de líquido en el fondo de la torre o que la zona se encuentra congestionada por la presencia de componentes livianos, por tanto es de vital importancia el control estricto de esta diferencial para garantizar la estabilidad en la operación y calidad de los refinados. Los altos y bajos en la presión de cima ilustrados en la Figura 8, son originados principalmente por restricciones para el recibo de gases de cima en las unidades de craqueo catalítico; estas variaciones en la presión de cima afectan el perfil de presión de la torre.

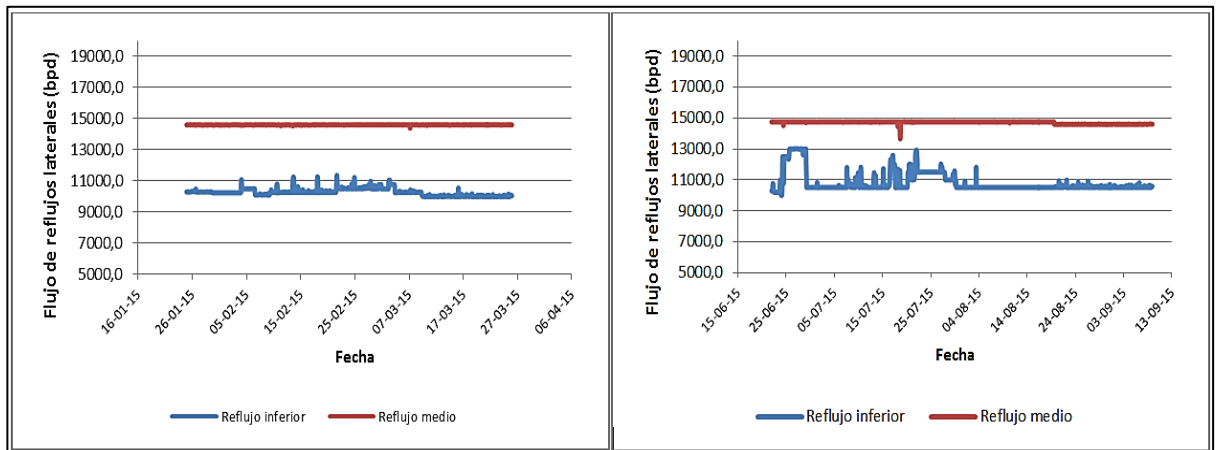
**Figura 8. Presión de cima y zona flash en los escenarios 1 y 2**



Fuente: Ecopetrol S.A.

En la figura 9, están representados los reflujos laterales de la columna para los escenarios 1 y 2. Para estos reflujos se observa un comportamiento estático más acentuado en el reflujo de la zona media; esta condición ofrece estabilidad a la operación de bombas e intercambiadores de calor, pero puede representar pérdidas económicas, ya que la operación de los reflujos laterales de una columna atmosférica está directamente relacionada con la extracción de productos valiosos como Jet y Diesel. Por tanto, una operación estacionaria en estos sistemas con fluctuaciones importantes en la composición de la carga no es conveniente en términos económicos. La tendencia observada en los reflujos laterales se debe principalmente a que el modelo de control DMC se encuentra inactivo para la T-250.

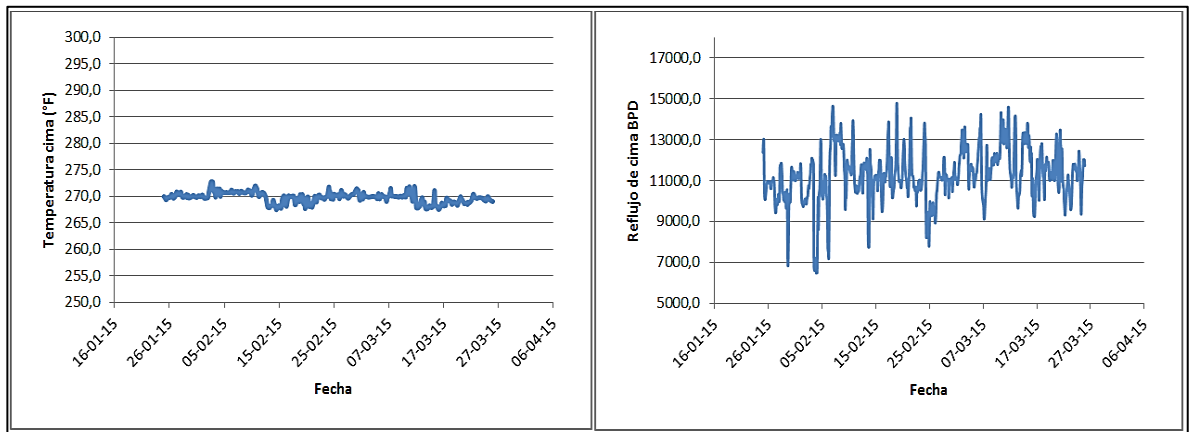
**Figura 9. Reflujos laterales escenarios 1 y 2.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

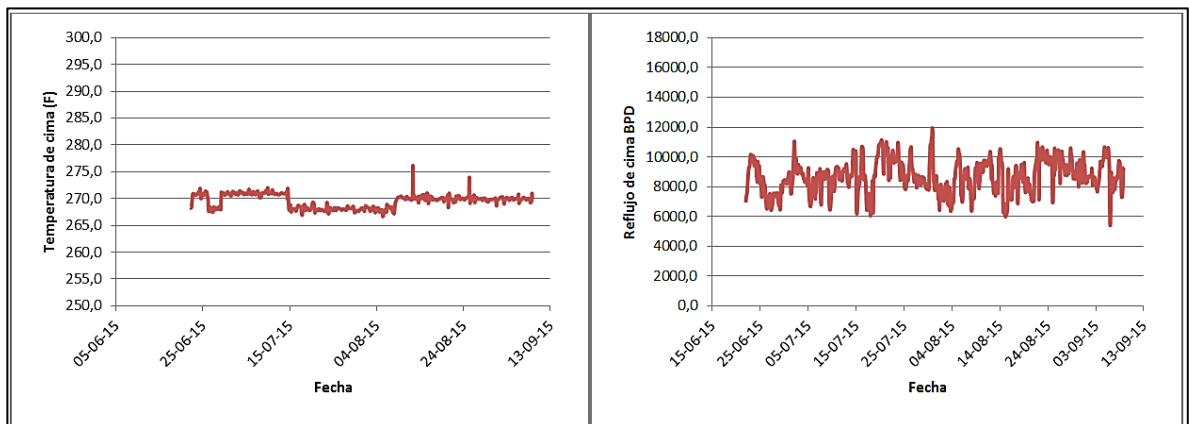
El control de la temperatura de cima, es una de las variables más importantes porque de ella depende el equilibrio y las especificaciones de calidad de los productos de cima y laterales. En las figuras 10 y 11 es posible observar las tendencias en el reflujo de cima y en la temperatura de cima para los escenarios 1 y 2, respectivamente. Las tendencias de las variables anteriores demuestran que las fluctuaciones en el reflujo de cima son efectuadas con el objetivo de mantener estable la temperatura de cima; en efecto, la temperatura de cima debe mantenerse estable para facilitar una estabilidad en el rendimiento y la calidad de los productos laterales. Generalmente, la T-250 opera con valores de temperatura de cima de 270°F.

**Figura 10. Variaciones en temperatura y reflujo de cima para el escenario 1.**



Fuente: Ecopetrol S.A

**Figura 11. Variaciones en temperatura y reflujo de cima en el escenario 2.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

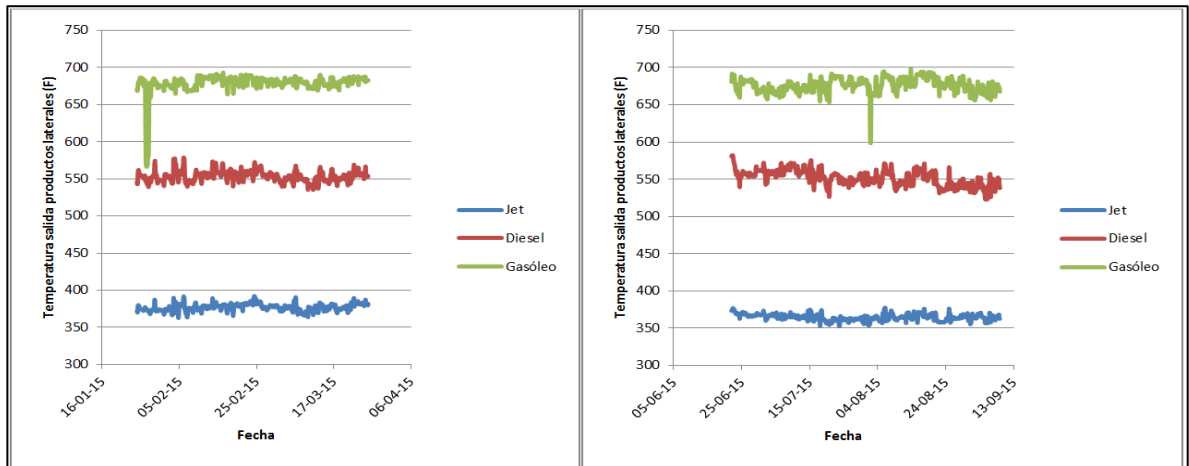
La temperatura de salida de los productos laterales (Jet, ACPM y gasóleo), determina las especificaciones de composición de los mismos como el IBP<sup>1</sup> y el FBP<sup>2</sup>. En el escenario 1, las temperatura de salida de Jet y ACPM fueron  $377\pm 5^{\circ}\text{F}$  y  $554\pm 7^{\circ}\text{F}$ , respectivamente, para el escenario 2, las mismas temperaturas fueron  $365\pm 4^{\circ}\text{F}$  y  $552\pm 10^{\circ}\text{F}$ . Los intervalos de confianza que presenta cada variable son considerados como normales debido al mismo dinamismo del proceso y a la incertidumbre en los instrumentos de medición. La temperatura de salida del

<sup>1</sup> IBP: Initial Boiling Point.

<sup>2</sup> FBP: Final Boiling Point.

gasóleo aunque es un parámetro de control, tiene menor relevancia por ser éste un producto intermedio.

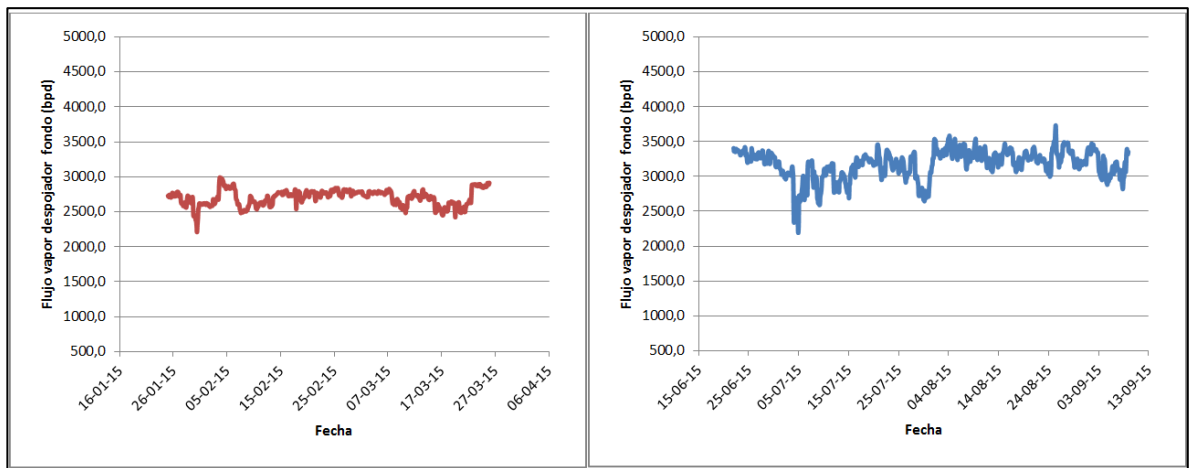
**Figura 12. Temperatura de salida productos laterales, escenarios 1 y 2.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

De otro lado, el flujo de vapor de despojo del fondo de la torre principal impacta en la vaporización de las fracciones de fondo y en el rendimiento de productos laterales. Para los escenarios 1 y 2 este flujo corresponde a  $2702 \pm 114$  lb/h y  $3178 \pm 207$  lb/h, respectivamente; de la Figura 13 es posible inferir el flujo de vapor despojador al fondo de la torre presentó un mayor valor que para el escenario 1, debido probablemente a que el sistema de inyección de vapor no está automatizado; este sistema de control consta de una válvula de globo manual, con lo cual, el flujo puede cambiar con la variación de presión de los cabezales de vapor de la refinería.

**Figura 13. Flujo de vapor despojador al fondo de la columna principal, escenarios 1 y 2.**



Fuente: Ecopetrol S.A.

#### 4.4. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN ESTADO ESTACIONARIO

Para representar los dos escenarios evaluados con los datos históricos de planta, se codificaron dos escenarios de simulación en *Hysys*®, manteniendo para ambos casos la misma dieta de crudo, una carga de 42 KBPD y los cortes de productos con sus rangos típicos de destilación relacionados en la Tabla 3

**Tabla 3. Destilación de productos torre atmosférica.**

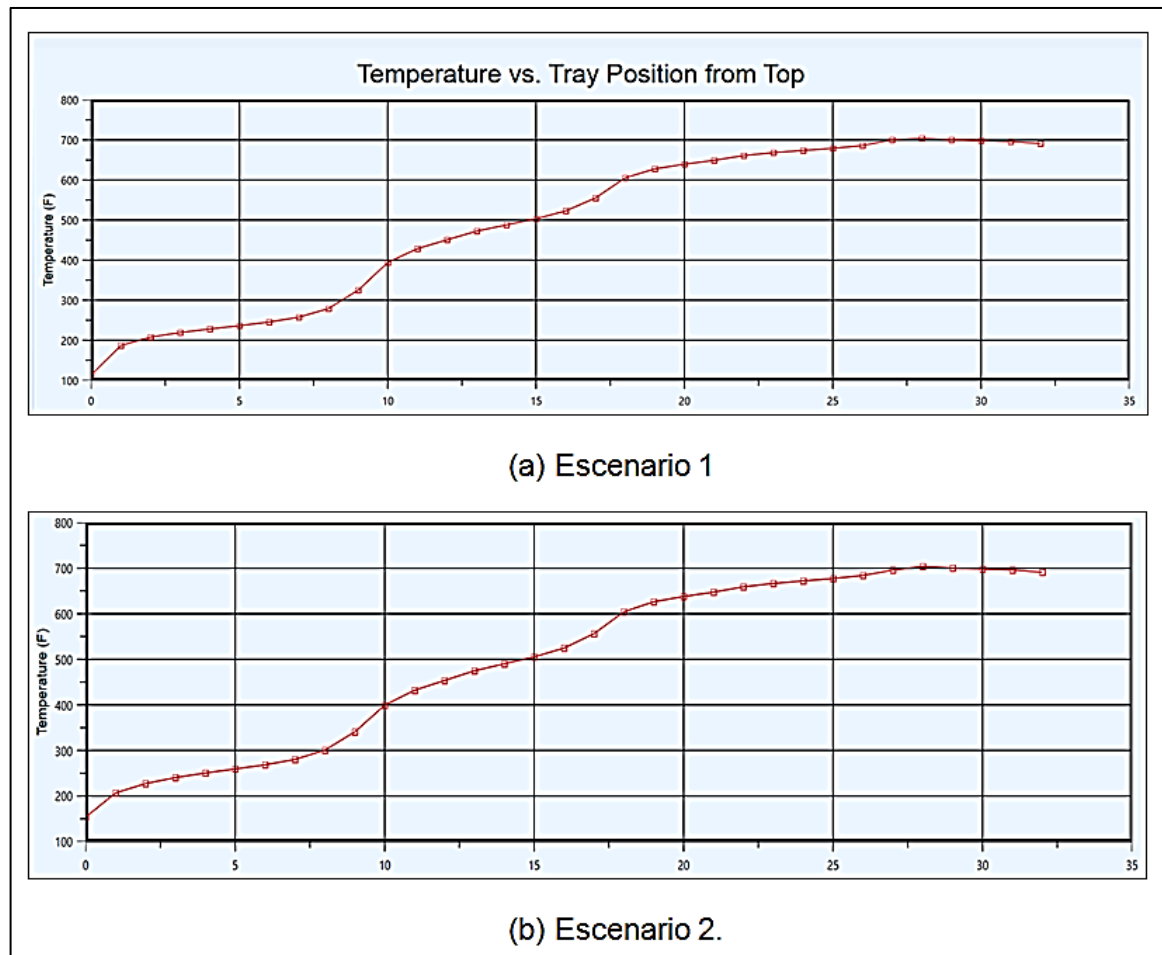
ASTM D86	Nafta Liviana	Nafta Pesada	Jet A1	Diesel	Gasóleo
PIE (F)	70	130	310	480	700
PFE (F)	300	375	510	760	1000

Fuente: Ecopetrol S.A.

Los perfiles de temperatura obtenidos para los escenarios de simulación (figura 14) representan el comportamiento típico de una torre de destilación atmosférica.

En los puntos de corte de los productos se observa el efecto de retiro de calor de los reflujos laterales. A partir del plato 28, un leve descenso en la temperatura se presenta producto de la vaporización instantánea del líquido caliente cuando ingresa a la zona flash de la torre (por efecto de la disminución en la presión).

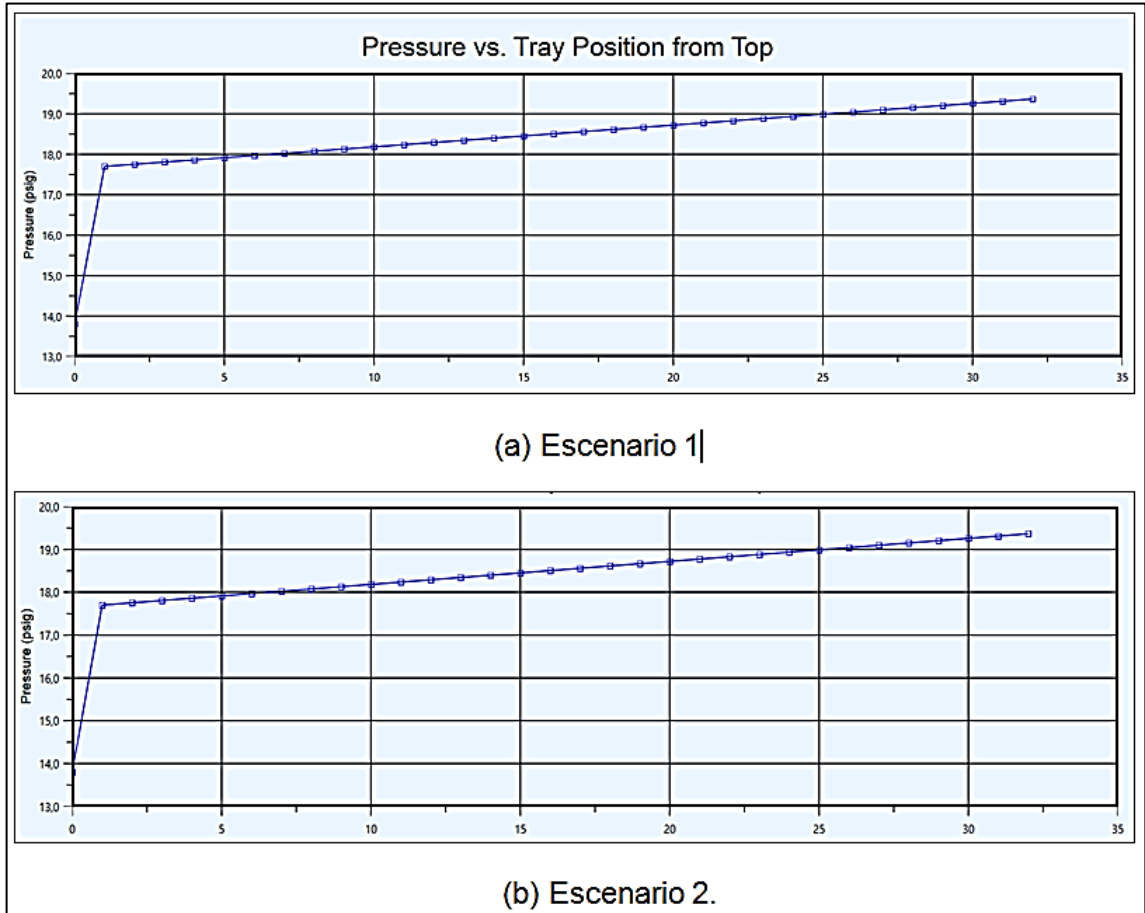
**Figura 14. Perfiles de temperatura obtenidos de la simulación.**



Los perfiles de presión para los escenarios simulados, representados en la figura 15, obtenidos en convergencia tienen un comportamiento típico para la operación industrial. Se observa una presión mayor en la alimentación de crudo parcialmente vaporizado a la zona flash de la torre y una disminución gradual a medida que se

asciende en la columna. La mayor caída de presión se presenta en el condensador o etapa 0 de la torre.

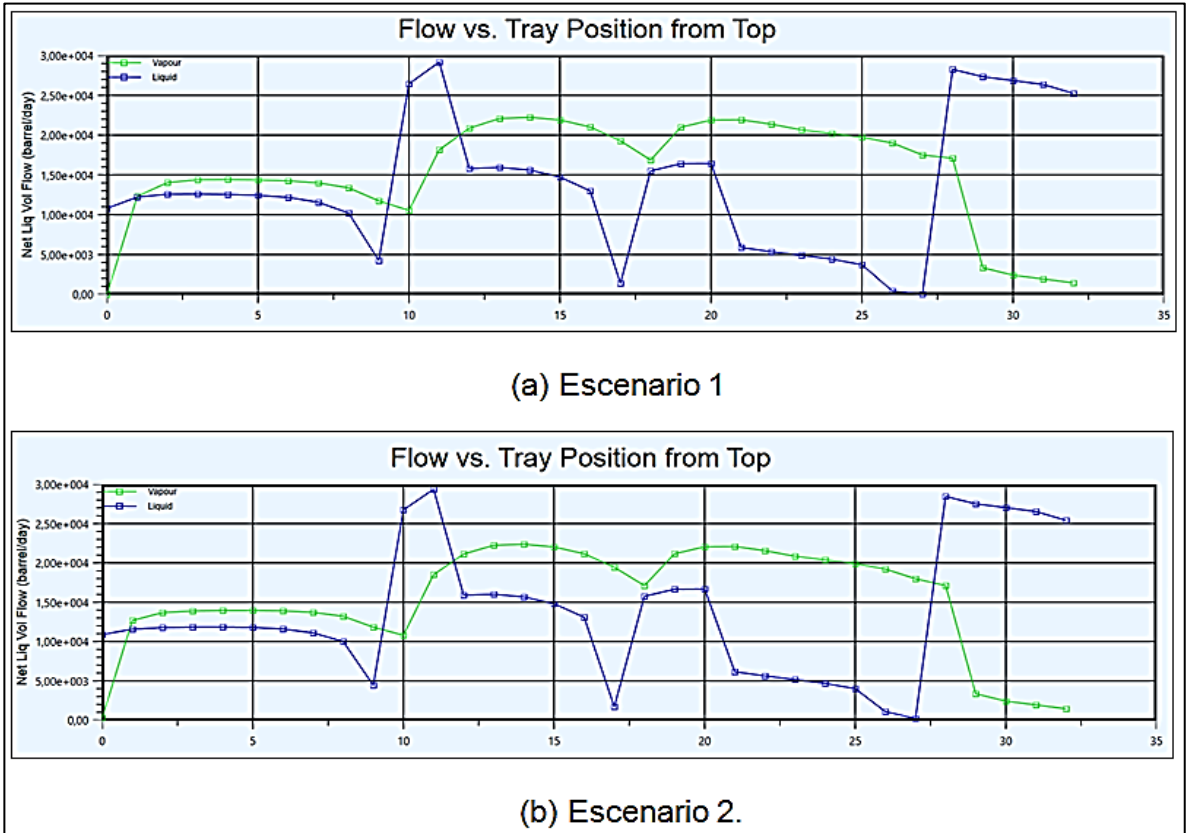
**Figura 15. Perfiles de presión obtenidos de la simulación.**



En el diagrama de composición líquido-vapor a lo largo de la columna (figura 16), se observa la vaporización instantánea de una cantidad apreciable del alimento caliente que ingresa por la zona flash de la torre (plato 28). En los platos superiores el flujo de vapor presenta una disminución debido a la transferencia de compuestos pesados al líquido –disminución marcada en los platos 1, 10 y 18 en donde ingresan los reciclos laterales (*pumparound*)–. De otro lado, el flujo de líquido presenta disminuciones importantes en los platos desde donde salen los

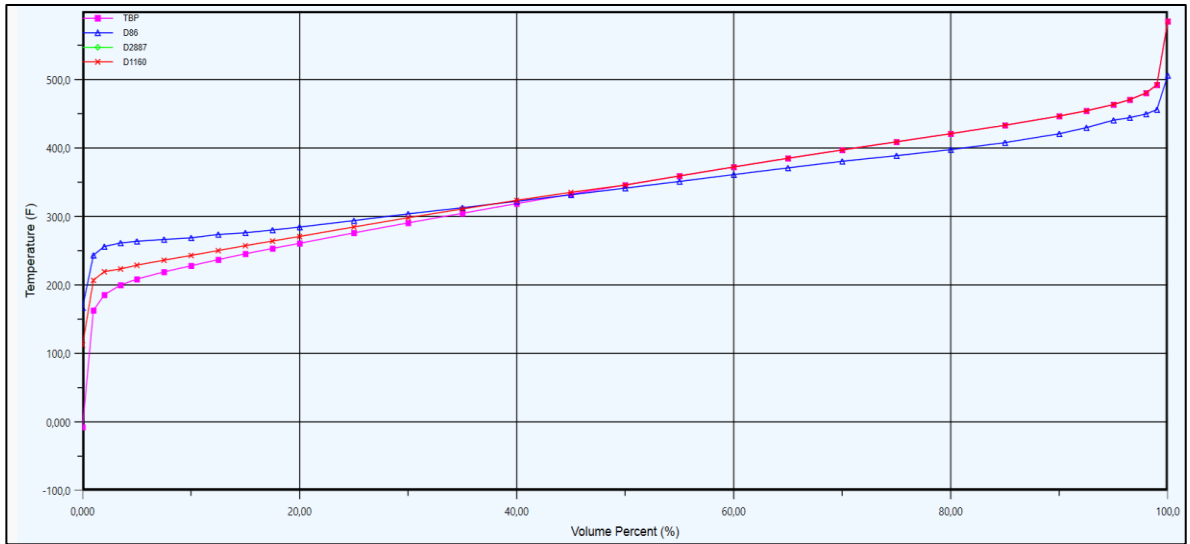
*pumparound* y los flujos hacia las despojadoras laterales, así como aumentos en los platos en los cuales ingresan los *pumparound* y el flujo de alimentación.

**Figura 16. Perfil simulado de relación líquido-vapor a través de la columna.**

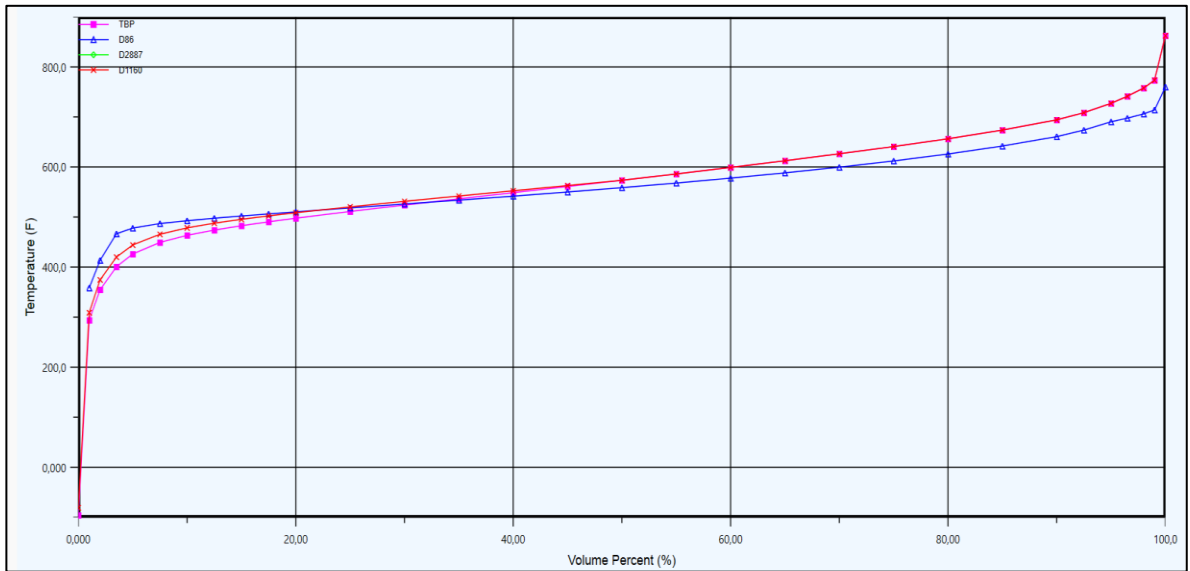


Las curvas de temperatura de ebullición versus rendimiento acumulado –según las diferentes normas TBP, D86, D2887 y D1160– para los productos laterales Jet, Diesel y gasóleo, son presentadas en las figuras 17, 18 y 19, respectivamente (el escenario 2 mostró las mismas tendencias para los correspondientes productos); estas figuras muestran que existe traslapeo principalmente entre el Jet y el Diésel. Este comportamiento mostrado en la simulación coincide con los análisis de laboratorio; los traslapos o solapamientos entre los productos de destilación son necesarios para la consecución de los parámetros de calidad requeridos por reglamentación comercial.

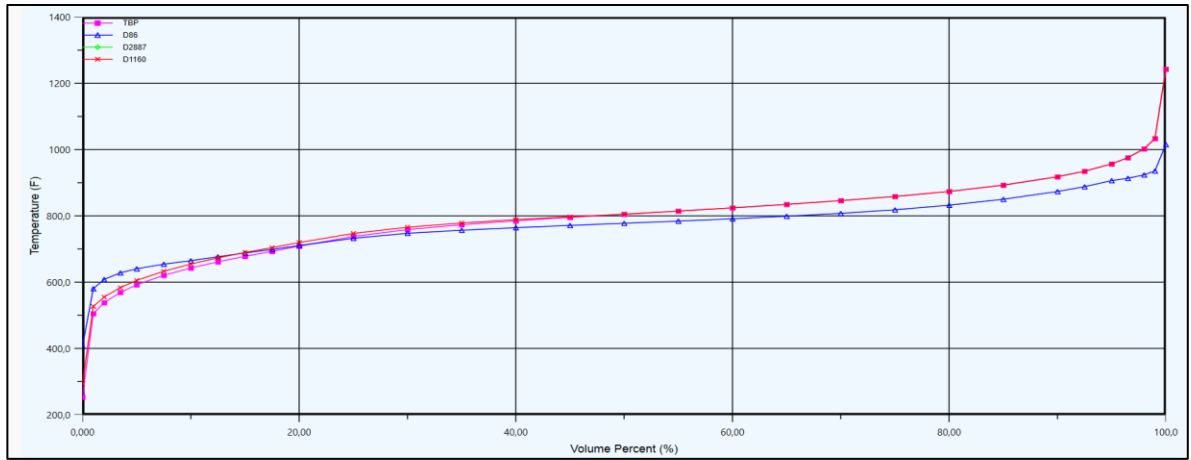
**Figura 17. Curva de destilación Jet, escenario 1.**



**Figura 18. Curva destilación Diesel, escenario 1.**



**Figura 19. Curva destilación Gasóleo, escenario 1.**



La Tabla 4 resume el rendimiento de los productos laterales medios (Jet, ACPM, GOA) para los respectivos escenarios obtenidos para las simulaciones en convergencia. Para el escenario 1, el rendimiento de medios fue de 32,7% respecto a la carga de crudo, mientras el escenario 2 presenta un rendimiento menor en 1%. Estos valores están sustentados en una mayor temperatura de salida del horno atmosférico en el escenario 1. La menor temperatura de salida del horno atmosférico en el escenario 2, está relacionada con ensuciamiento en los intercambiadores del tren de precalentamiento a la entrada del horno.

**Tabla 4. Rendimiento de productos laterales, escenarios 1 y 2.**

	JET (bpd)	ACPM (bpd)	GOA (bpd)	Rendimiento de medios %	Temp Salida horno (F)	Carga de crudo (bpd)
<b>Escenario 1</b>	4529	9208	1600	32,70%	705,8	42000
<b>Escenario 2</b>	4257	9042	1510	31,70%	700	42000

En la tabla 5, se realiza una comparación entre los dos escenarios analizados con datos reales de planta y los dos escenarios simulados en *hysys*. Como se puede observar, se presenta diferencia en las producciones de nafta y gasóleo, por las razones expuestas anteriormente, sin embargo, los rendimientos de destilados

medios guardan proporción con respecto a la carga de crudo de alimentación a la torre atmosférica, lo cual es de mucha relevancia para validar el desempeño de la simulación en estado estacionario.

**Tabla 5. Cuadro comparativo de los escenarios simulados en *hysys*, con datos reales de planta.**

Escenario	Carga (bpd)	Productos (bpd)				Rendimiento destilados medios (%)	Temperatura horno atmosférico (°F)
		Nafta	Jet	Diesel	Gasóleo		
<b>Caso 1 real</b>	41874	1300	4650	9060	1463	32,74%	705,8
<b>Caso 1 simulación</b>	42000	1150	4529	9208	1600	32,71%	705,8
<b>Caso 2 real</b>	40903	1250	4263	8718	1460	31,74%	700
<b>Caso 2 simulación</b>	42000	1100	4257	9042	1510	31,66%	700

Para finalizar el presente capítulo, la discusión presentada en los párrafos anteriores soportan los resultados de la simulación en la representación adecuada de las tendencias y los valores de desempeño de la operación de la torre industrial T-250. Asimismo, los resultados de este capítulo hacen de la simulación codificada en HYSYS® una fuente adecuada de datos para el análisis del comportamiento de la T-250 en estado dinámico, lo cual será presentado en los capítulos siguientes.

## 5. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO ABIERTO

Este capítulo analiza el comportamiento de la columna de destilación atmosférica T-250 ante perturbaciones en las variables caudal de carga, reflujo medio e inferior, y composición de la carga. En la definición de la simulación dinámica, la temperatura de entrada a la torre atmosférica se considera constante, ya que el calentamiento del crudo es un proceso complejo, por lo cual debe ser analizado y estudiado en forma independiente; por esta razón se establece un valor para la temperatura del crudo de alimento de 705.9°F. El punto de partida para la simulación dinámica corresponde al estado estacionario descrito en el capítulo anterior. En la Figura 20, se detalla el diagrama de la torre codificada en *Hysys*, en donde se presentan los siguientes lazos de control:

- IC-2530 Controlador de flujo para el reflujo medio. Se extrae del plato 12 y retorna al plato 9 por encima de la zona empacada superior luego de intercambiar calor con el crudo carga, el flujo es controlado por la válvula FV-2530.
- IC-2522 Controlador de flujo para el reflujo inferior. Se extrae del plato 19 y retorna por debajo del plato 17 luego de intercambiar calor con el crudo carga a la torre.

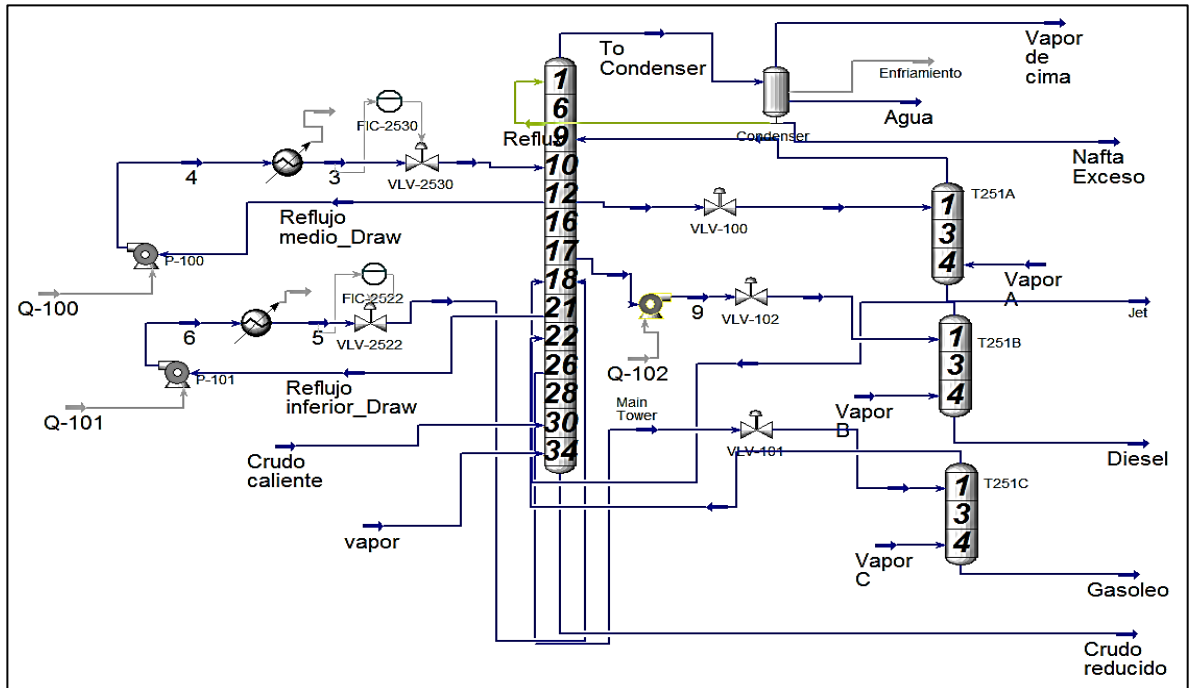
Los controladores de nivel de la torre T-250 y despojadoras no fueron considerados ya que estos operan de forma independiente mediante controladores de nivel PI\*, y el DMC los considera como variables *Feedforward*; asimismo, el controlador de reflujo de cima fue omitido debido a que el rango de operación de la temperatura de cima es muy limitado con el objetivo de evitar la condensación de

---

\* Proporcional-Integral.

agua en los intercambiadores con crudo de la primera etapa y minimizar de esta manera los efectos de la corrosión, por esta razón esta temperatura normalmente se mantiene en 270°F.

**Figura 20. Diagrama de flujo simulación dinámica torre atmosférica en Hysys.**



## 5.1. INTERNOS DE LA TORRE

Los internos de la torre principal fueron representados por 10 secciones, 8 de platos y 2 empacadas, utilizando la herramienta *Tray Sizing* de *Hysys* (Figura 21). Los platos y las zonas empacadas fueron definidos según las hojas de especificaciones del *revamping* de la torre; los empaques que posee la T-250 corresponden al tipo *Flexipack 2X*. Las especificaciones de las secciones de la T-250 se encuentran detalladas en la Tabla 6.

**Figura 21. Dimensionamiento de platos y zonas empacadas.**

The screenshot shows the 'Tray Sizing: Tray Sizing-Main Tower@COL2' window. The 'Design' tab is active, showing a table of section configurations. The table has columns for Section\_2 through Section\_10 and rows for various parameters.

	Section_2	Section_3	Section_4	Section_5	Section_6	Section_7	Section_8	Section_9	Section_10
Start	10_Main Tower	12_Main Tower	13_Main Tower	18_Main Tower	21_Main Tower	22_Main Tower	27_Main Tower	31_Main Tower	33_Main To
End	11_Main Tower	12_Main Tower	17_Main Tower	20_Main Tower	21_Main Tower	26_Main Tower	29_Main Tower	32_Main Tower	34_Main To
Internals	Packed	Valve	Valve	Packed	Valve	Valve	Valve	Valve	Valve
Mode	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating	Rating
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Status	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calculating	Needs Calcula
Design Limit	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diameter	Specd Diam
Limiting Stage	2_Main Tower	<empty>	<empty>	3_Main Tower	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>	<emp
Include vapor head	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Respecto a las despojadoras laterales (Jet, ACPM, GASÓLEO), los internos fueron especificados con cuatro platos tipo válvula para cada torre según lo consignado en las hojas de especificaciones del *revamping*; algunos parámetros geométricos e hidráulicos de los platos son presentados en la Tabla 7. Según la herramienta *Tray Sizing*, la torre T-251C debería estar diseñada con un diámetro menor a 1 ft y sus internos corresponder a secciones empacadas. Esta torre que regula las propiedades del gasóleo atmosférico fue sometida a una reingeniería para obtener en ella un producto más liviano para mezclarlo con la corriente de diésel; este cambio no condujo a los resultados esperados y las características del producto continúan siendo las de un gasóleo, ya que las limitaciones se encuentran más en la composición del crudo alimentado que en los parámetros geométricos de esta despojadora. Con lo anterior, la recomendación de la herramienta *Tray Sizing* fue omitida y los internos de la T-251C especificados según el diseño actual en planta.

**Tabla 6. Especificaciones internos torre atmosférica según diseño actual.**

Section Name	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7	Section 8	Section 9	Section 10
Start Tray	Plato 1	Plato 10	Plato 12	Plato 13	Plato 18	Plato 21	Plato 22	Plato 27	Plato 31	Plato 33
End Tray	Plato 9	Plato 11	Plato 12	Plato 17	Plato 20	Plato 21	Plato 26	Plato 29	Plato 32	Plato 34
Internals	Valve	Packed	Valve	Valve	Packed	Valve	Valve	Valve	Valve	Valve
Valve Material Density [kg/m3]	8125	*	8125	8125	*	8125	8220	8220	8220	8220
Valve Material Thickness [mm]	3,175	*	3,175	3,175	*	3,175	3,175	3,175	3,175	3,175
Hole Area (% of AA)	10	*	10	10	*	10	10	10	10	10
Valve Orifice Type	Straight	*	Straight	Straight	*	Straight	Straight	Straight	Straight	Straight
Sieve/Valve Tray Flood Method	Glitsch	*	Glitsch	Glitsch	*	Glitsch	Glitsch	Glitsch	Glitsch	Glitsch
Side Weir Type	Straight	*	Straight		*	Straight	Straight	Straight	Straight	Straight
Weir Height [mm]	51,054	*	51,054	38,10	*	38,10	38,10	38,10	63,50	57,15
Max Weir Loading [m3/h-m]	35	*	35	34,50	*	35,00	22,13	11,03	75,11	64,38
Downcomer Type	Vertical	*	Vertical	Vertical	*	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Downcomer Clearance [mm]	38,1	*	38,1	38,1	*	38,1	38,1	38,1	50,8	44,45
Maximum DC Backup [%]	50	*	60	60	*	60	60	50	50	50
Side DC Top Width [mm]	229,108	*	229,108	229,108	*	229,1	229,108	229,108	304,8	304,8
Centre DC Top Width [mm]	178,054	*	178,054	178,054	*	178,1	178,054	178,054	254	254
O.C. DC Top Width [mm]	0	*	0	0	*	0	0	0	0	0

Fuente: Ecopetrol S.A.

**Tabla 7. Especificaciones de los internos torres despojadoras según diseño actual.**

Descriptor	T-251A	T-251B	T-251C
Start Tray	1	1	1
End Tray	4	4	4
Internals	Valve	Valve	Valve
<b>Common Specifications</b>			
Mode	Rating	Rating	Rating
Section Diameter [m]	1,0668	1,0668	1,0668
Foaming Factor	1	1	1
Max Delta P (ht of liq) [mm]	304	200	304
Max Flooding [%]	90	80	80
<b>Tray Specifications</b>			
Sieve/Valve Tray Flood Method	Fair	Glitsch	Glitsch
Number of Flow Paths	1	1	1
Tray Spacing [m]	0,6858	0,6858	0,6858
Tray Thickness [mm]	3,175	3,175	3,175
<b>Column Geometry</b>			
Section Diameter [m]	1,0668	1,0668	1,0668
X-Sectional Area [m <sup>2</sup> ]	0,8938	0,8938	0,8938
Hole Area [m <sup>2</sup> ]	0,0807	0,0656	0,0656
Active Area [m <sup>2</sup> ]	0,8072	0,6565	0,6565
DC Area [m <sup>2</sup> ]	0,0433	0,1187	0,1187
Tray Spacing [m]	0,6858	0,6858	0,6858
Section Height [m]	2,7432	2,7432	2,7432
<b>Hydraulic Results</b>			
Max Flooding [%]	30,4038	38,4913	8,1187
Max DC Backup [%]	32,1451	34,5220	20,8195
Max DP/Tray [kPa]	0,5421	0,6375	0,4139
Section DeltaP [kPa]	2,1564	2,4788	1,6474
Max Weir Load [m <sup>3</sup> /h-m]	60,2415	91,6423	11,7355
<b>Tray Details</b>			
Total Weir Length [mm]	626,3045	837,8151	837,8151
Weir Height [mm]	50,8000	50,8000	63,5000
DC Clearance [mm]	38,1000	63,5000	38,1000
Side Weir Length [m]	0,6263	0,8378	0,8378
Estimated # of Holes/Valves	104,7939	85,3187	85,3187

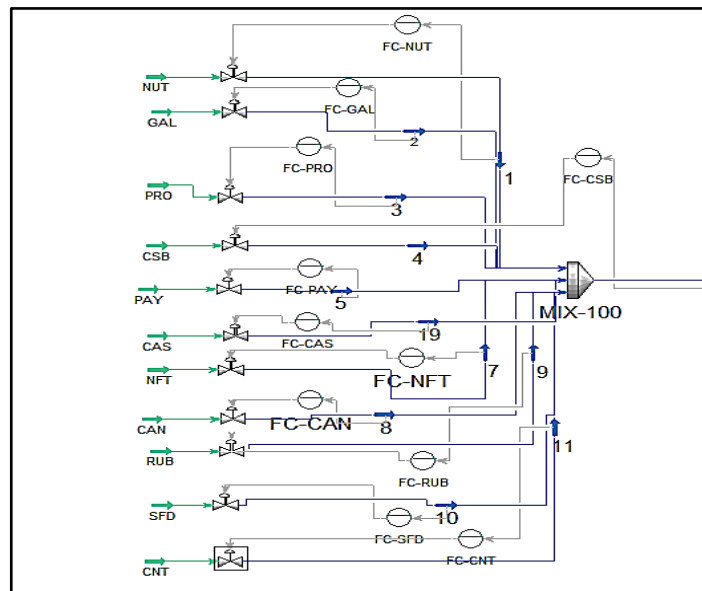
Fuente: Ecopetrol S.A.

## 5.2. TRANSICIÓN AL ESTADO DINÁMICO

La simulación dinámica es iniciada considerando el modelo de convergencia de la torre obtenido con la simulación en estado estacionario –capítulo anterior–. Durante la transición del estado estacionario al estado dinámico, el programa solicita la instalación de válvulas en las corrientes de entrada; las válvulas de control mostradas en la Figura 22, fueron conectadas en cada corriente de crudo de alimentación, según recomendación del asistente dinámico de *HYSYS*. Algunas

especificaciones de las válvulas codificadas en la simulación son mostradas en la Tabla 8.

**Figura 22. Instalación de válvulas de control a la entrada de las corrientes de crudo.**



Debido a la dinámica del proceso en la columna de destilación, se desactiva en HYSYS la opción de flujo constante y se activa el modo de presión constante. Por recomendación del asistente dinámico, los perfiles de presión en la columna principal y en las despojadoras laterales fueron modificados a 13.0, 13.67, 14.42, 14.75 psig, respectivamente. De esta forma, el simulador resuelve los balances de materia y energía en la columna con la pérdida de carga introducida y suponiendo un perfil de temperatura lineal entre los valores introducidos como estimaciones en la torre principal y despojadoras [11].

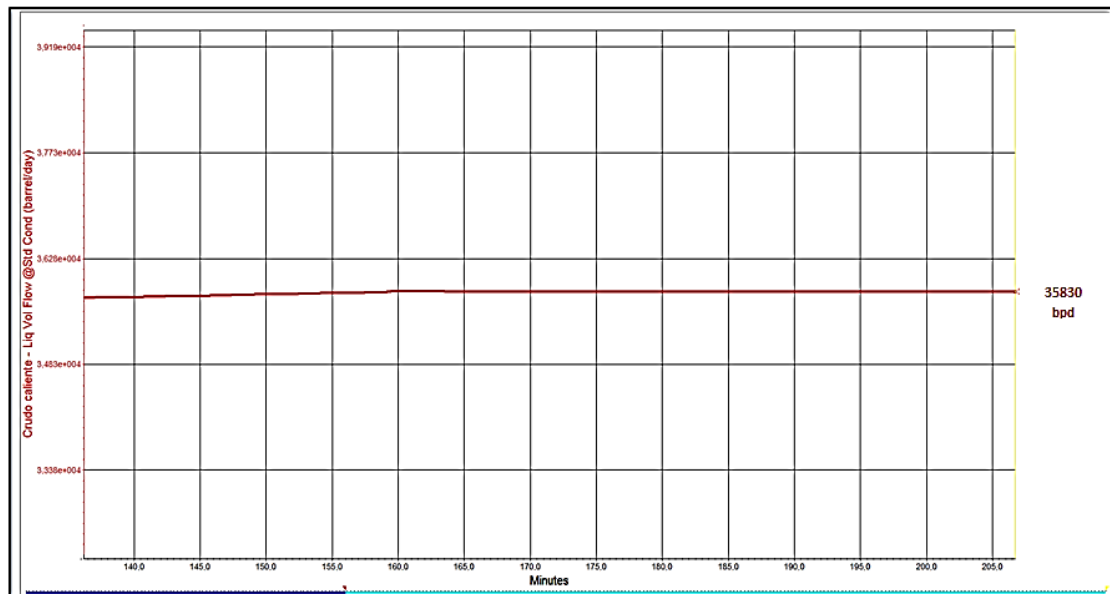
**Tabla 8. Especificaciones de válvulas de control en las corrientes de crudo.**

	VLV-NUT	VLV-GAL	VLV-PRO	VLV-CSB	VLV-PAY	VLV-CAS	VLV-NFT	VLV-CAN	VLV-RUB	VLV-SFD	VLV-CNT
Inlet Pressure [psig]	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42	23,42
Molecular Weight	271,37	328,22	288,08	317,024	264,21	305,22	84,92	171,95	388,40	489,43	373,92
Delta P [kPa]	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62	27,62
Valve operating characteristics	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Valve vapor flow model	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher	Fisher
Sizing methods	Cv	Cv	Cv	Cv	Cv	Cv	Cg	Cv	Cv	Cv	Cv
C1	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Km	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Cv [USGPM(60F,1psi)]	129,77	632,3	636,1	2912	541,2	541,2	150,6	289,4	108,5	38,03	77,6
Cg	3244,1	15807,0	15902,3	72800,8	13530,0	13530	3764,0	7234,7	2712,4	950,7	1939,9

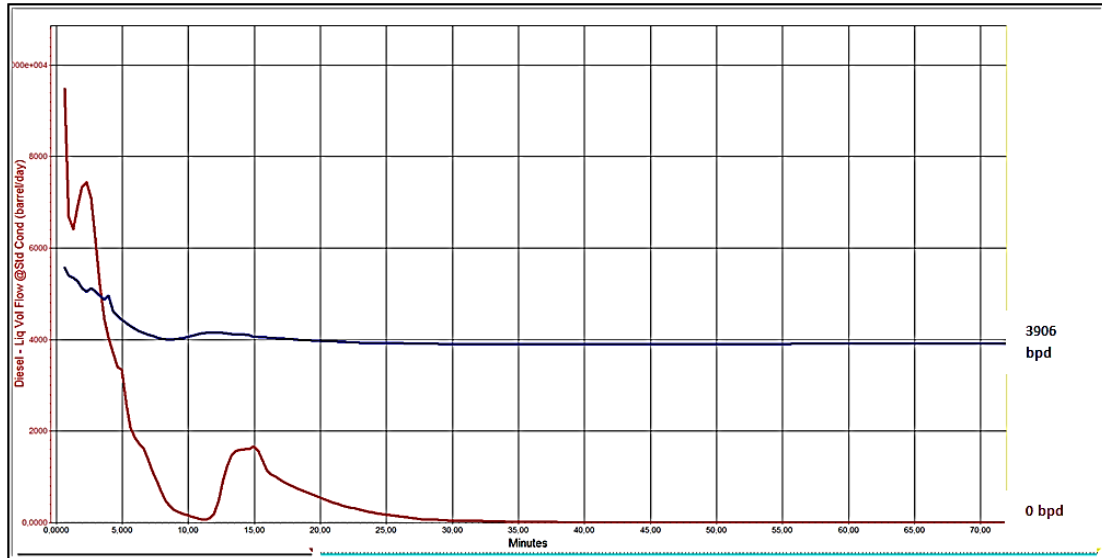
### 5.3 PRUEBAS CON LA SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO ABIERTO

Las simulaciones son definidas ajustando un paso a 0.025s, según recomendación de *Hysys*. La simulación dinámica con los valores de partida del estado estacionario reportó estabilización después de 60 minutos (tiempo de simulación). Los perfiles para la carga y los productos de destilación en esta etapa inicial pueden ser analizados en las figuras 23, 24 y 25

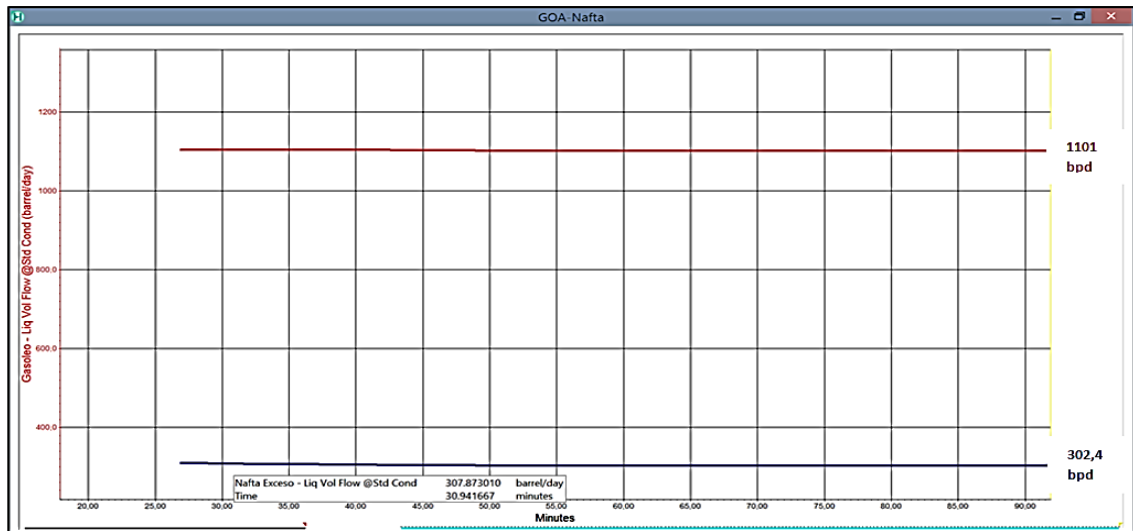
**Figura 23. Carga inicial de crudo caliente.**



**Figura 24. Flujo de producción inicial de Jet y Diesel.**



**Figura 25. Flujo de producción inicial de Nafta y Gasóleo.**



Según las figuras 23 a 25, el comportamiento final de estabilización, difiere del comportamiento de planta, ya que a pesar de que las producciones de nafta y gasóleo reportan un flujo normal para la carga de crudo a la torre (35830 bpd), de igual forma, la producción de diésel reporta 0 bpd y la producción de Jet se encuentra por debajo del promedio esperado.

Una revisión de los perfiles de presión en la columna de destilación principal y sus despojadoras, muestra que el diferencial de presión entre la torre despojadora de diésel T-251B y el plato 18 de retorno a la T-250 es positivo, lo cual evita el retorno de vapores. Este diferencial positivo limita el flujo de líquido desde el plato colector de diésel (17) en la torre principal hacia la torre despojadora, razón por la cual el flujo de este producto se estabiliza en 0 bpd en la simulación dinámica. Para contrarrestar esta limitación de flujo, un equipo de bombeo fue acoplado entre la destiladora principal y la torre despojadora. Adicionalmente, las caídas de presión de las válvulas de alimentación de crudo fueron reducidas de 10 psi a 8 psi, con el objetivo de proporcionar un menor rango de oscilación para la consecución de la estabilidad en la simulación de la columna. Según las anteriores modificaciones, la simulación reporta estabilidad en un tiempo de 30 minutos, con flujos de alimento y productos acordes a los datos históricos de operación de la planta, Figuras 26-28.

**Figura 26. Producción de Jet y Diesel con los ajustes en el perfil de presión.**

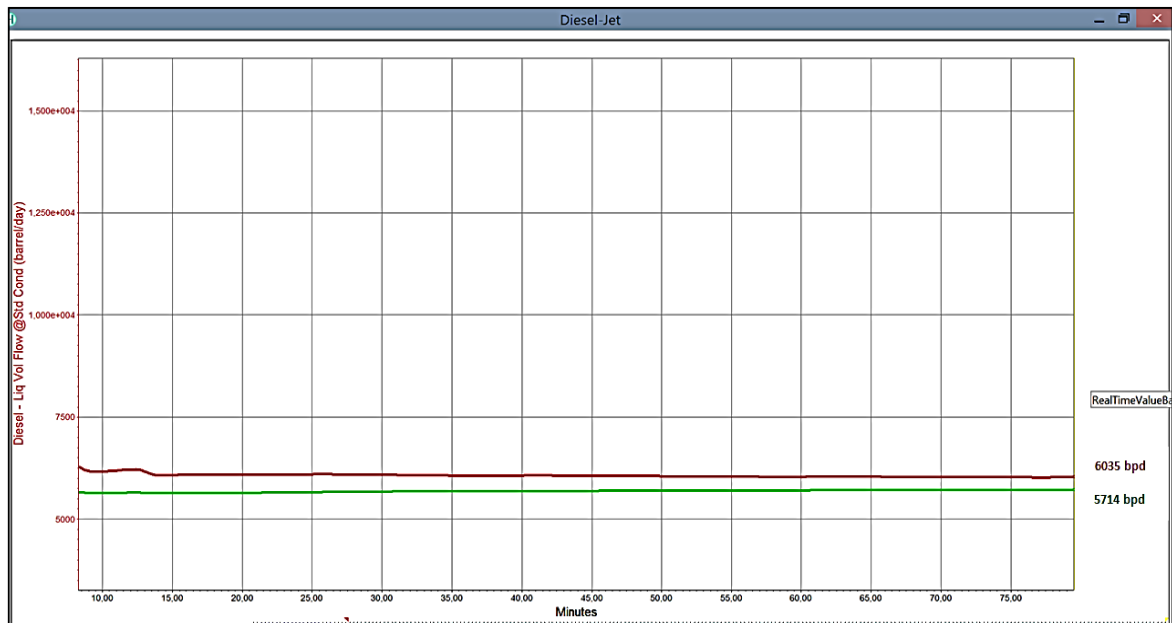


Figura 27. Flujo de carga con los ajustes en el perfil de presión.

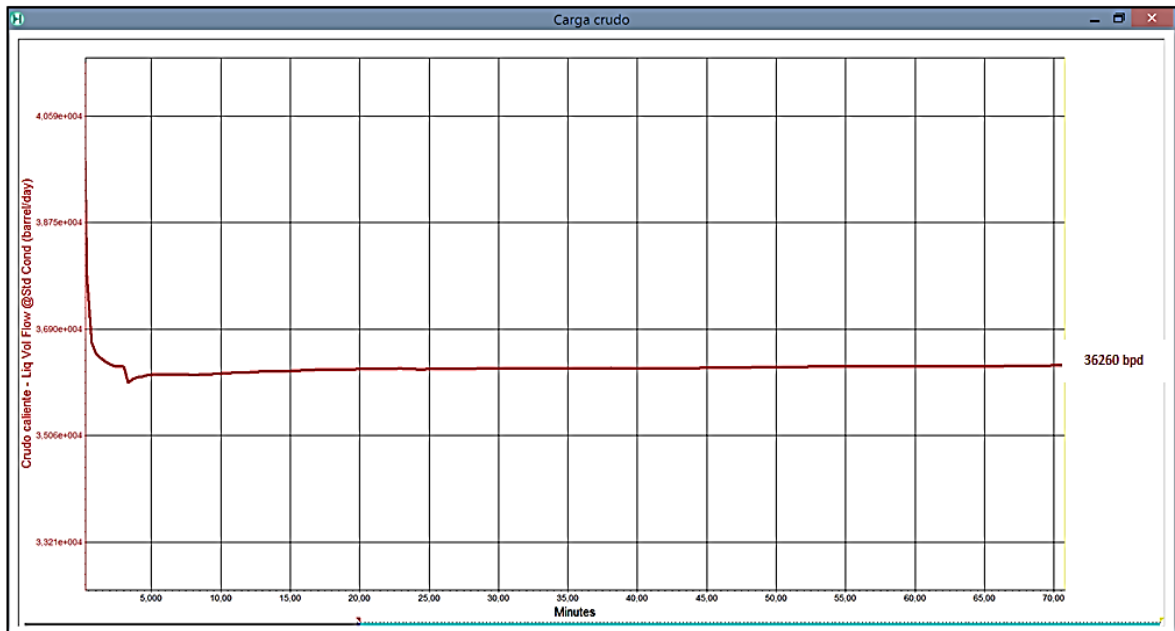
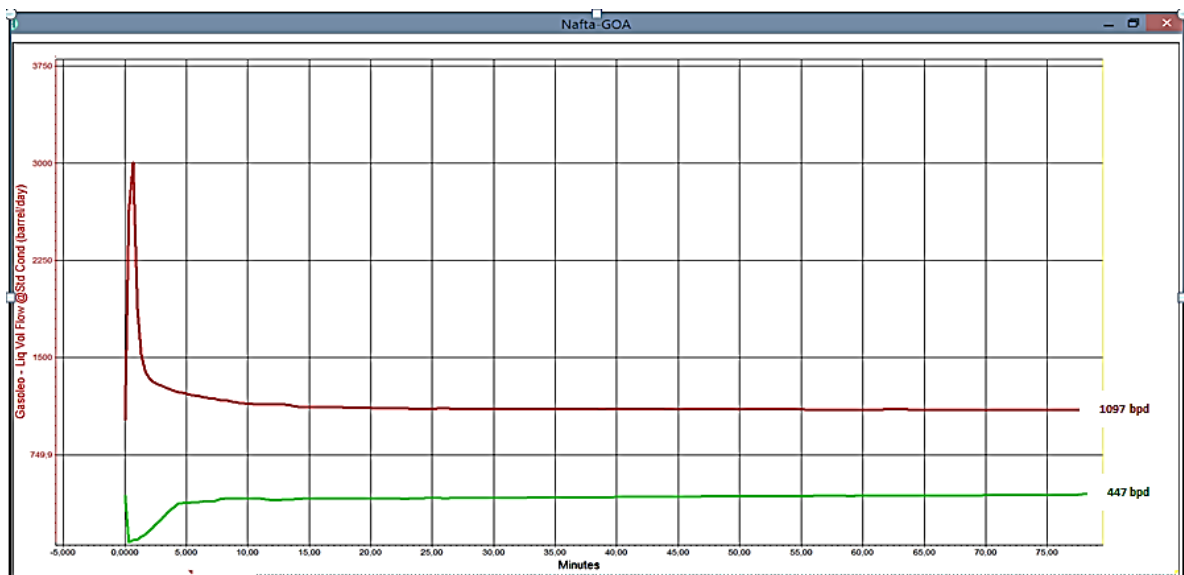
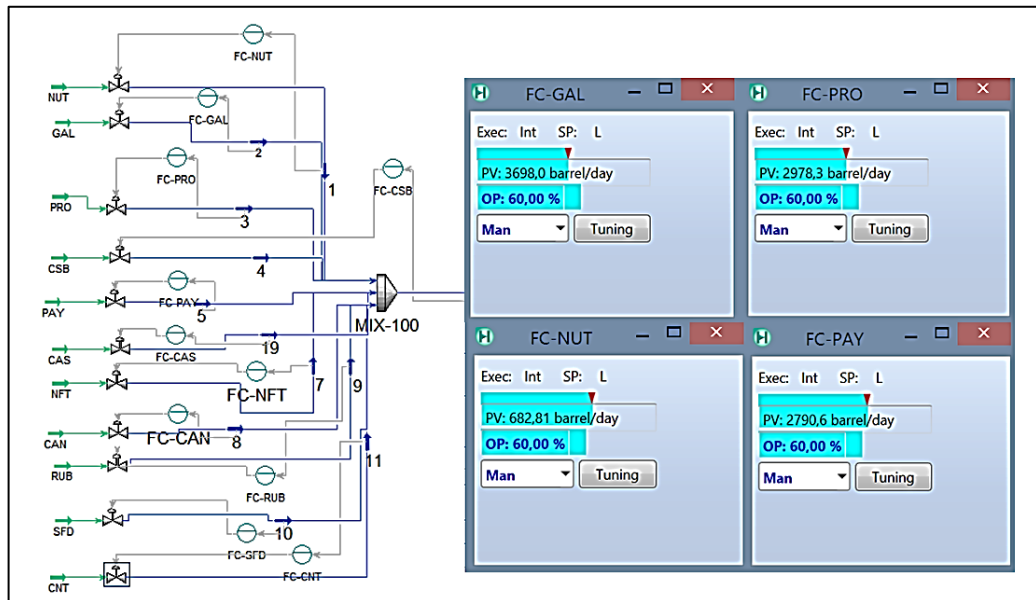


Figura 28. Producciones de Nafta y Gasóleo con ajustes en el perfil de presión.



**5.3.1 Respuesta ante variaciones en el flujo de crudo.** El flujo de alimentación fue modificado por medio de los controladores de carga de crudo en modo manual, con una apertura de válvulas inicial de 60% (figura 29).

**Figura 29. Controladores de carga de crudo instalados.**

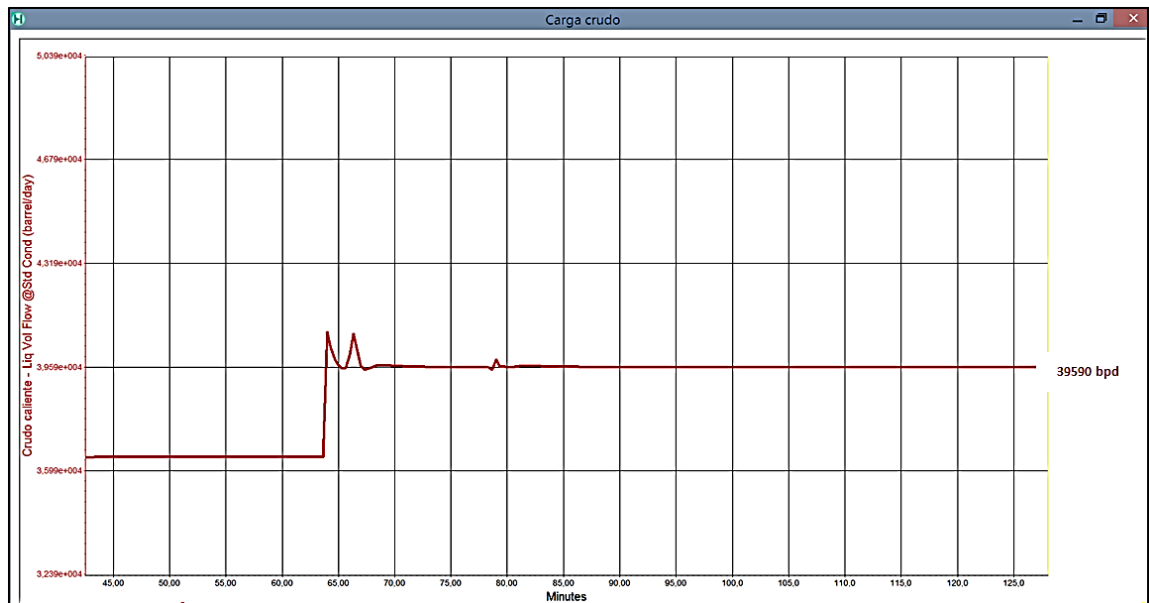


A continuación se presentan los escenarios de cambio en el flujo de alimentación analizados con la simulación dinámica.

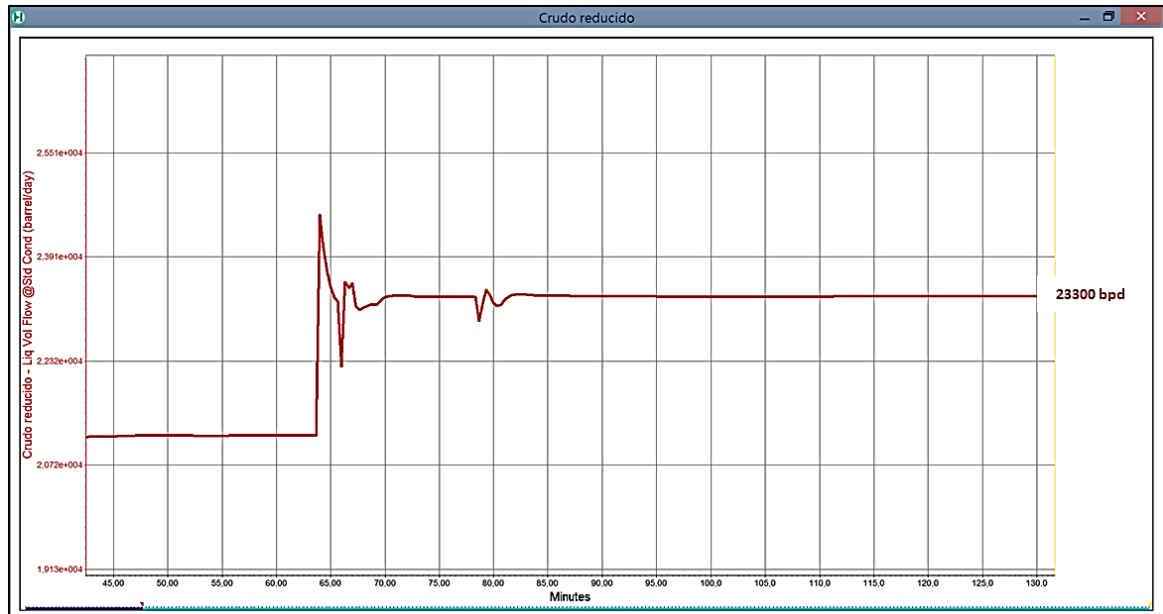
- **Aumento de 10% en el flujo total.** Las aperturas de las válvulas fueron modificadas para obtener un incremento de 3329 bpd en el alimento a la torre; la relación entre los diferentes crudos fue mantenida constante. Las figuras 30 a 33 presentan las respuestas de algunas variables de proceso ante el incremento en el flujo de entrada. Según estas figuras, las condiciones de operación de la columna principal (reflujos laterales, temperaturas de retorno de reflujos y presión) y los productos de las despojadoras alcanzan un nuevo estado estacionario; en este nuevo estado, el producto de cima y el gasóleo reportan un incremento en su producción, mientras los destilados medios (Jet + diésel) disminuyen en 1.4% respecto al estado inicial (Tabla 9). El comportamiento observado con el incremento de carga sin modificar las

condiciones de operación de la torre, es similar al comportamiento real de la planta cuando se realizan este tipo de movimientos. Un incremento en la carga de crudo manteniendo constantes las variables operacionales, representa un incremento en la producción de residuo de fondo o crudo reducido, por el contrario, los productos valiosos como Jet y Diesel presentan una disminución en su rendimiento con respecto a la carga de crudo. En este escenario, el crudo reducido presenta un contenido alto de productos livianos que más adelante serán retirados como gasóleo en la sección de vacío, sin embargo, esta no es una operación rentable para la compañía debido al precio de este producto.

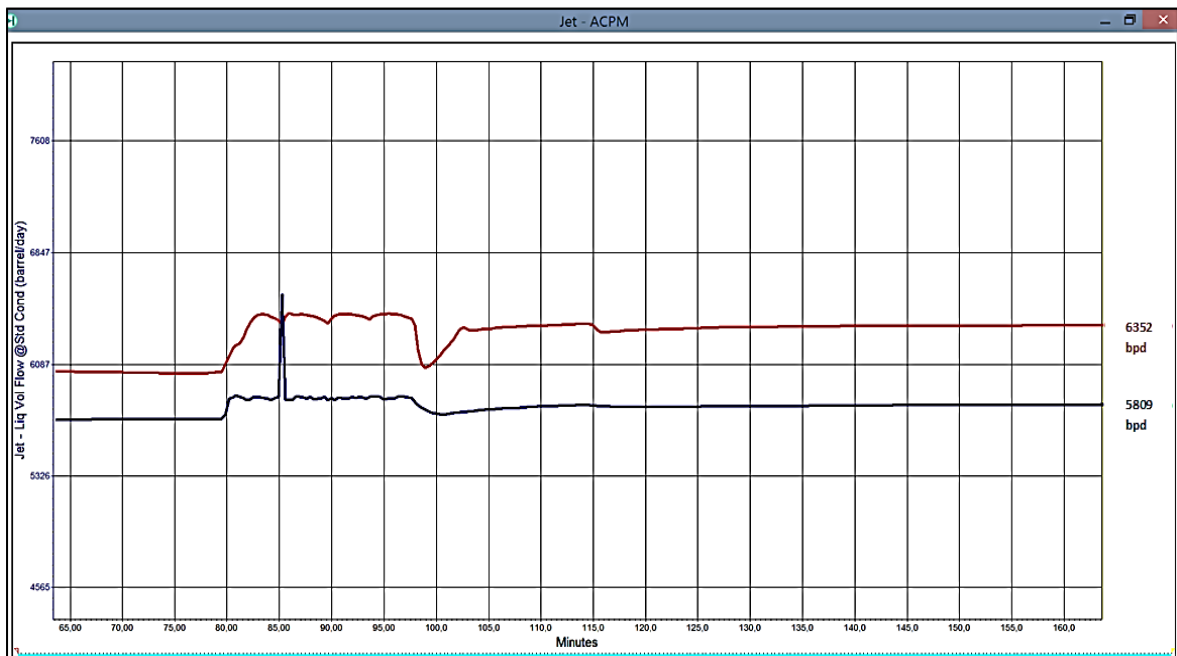
**Figura 30. Aumento de 10% en la carga de crudo.**



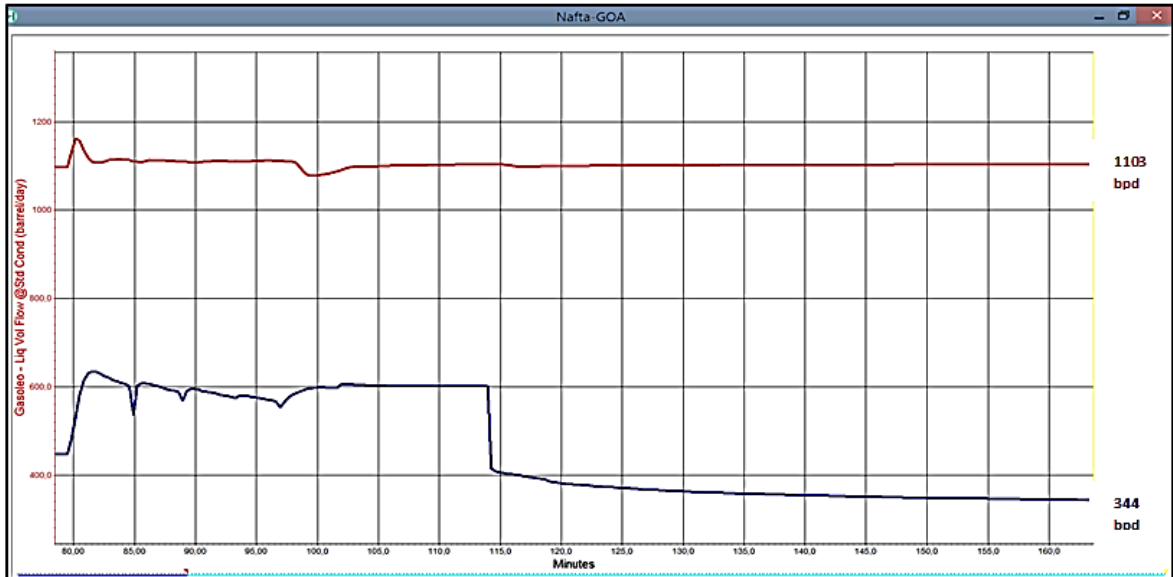
**Figura 31. Flujo de crudo reducido con un incremento de 10% en la carga.**



**Figura 32. Producciones de Jet y Diesel con un incremento de 10% en la carga de crudo.**



**Figura 33. Producciones de Nafta y Gasóleo con incremento de 10% en la carga de crudo.**



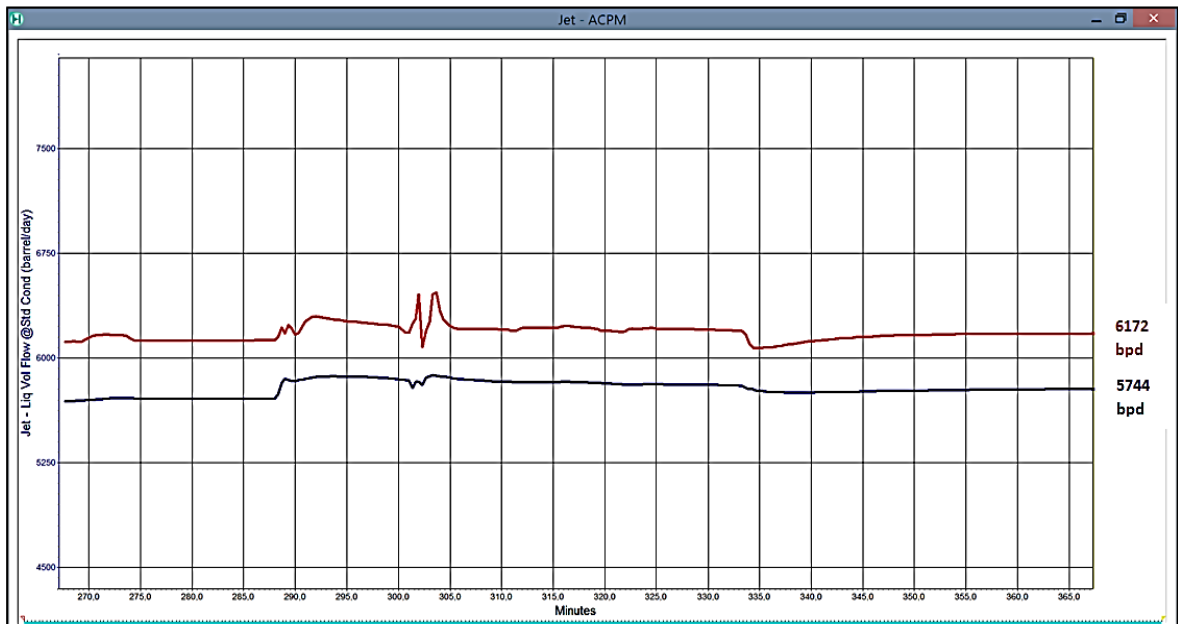
**Tabla 9. Valores estables resultantes de una perturbación de 10% en la carga de crudo.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)					Reflujos				Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)	
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	CR	REF CIMA	REF MEDIO		REF INF			
										Flujo (bpd)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)
NUT	60	643	39598	705	343	5820	6457	1103	22643	7035	12600	288	8850	500	12,5	31,0%
GAL	60	4072														
PRO	60	3471														
CSB	60	18540														
PAY	60	2790														
CAS	60	3093														
NFT	60	499														
CAN	60	1156														
RUB	60	3658														
SFD	60	840														
CNT	60	836														

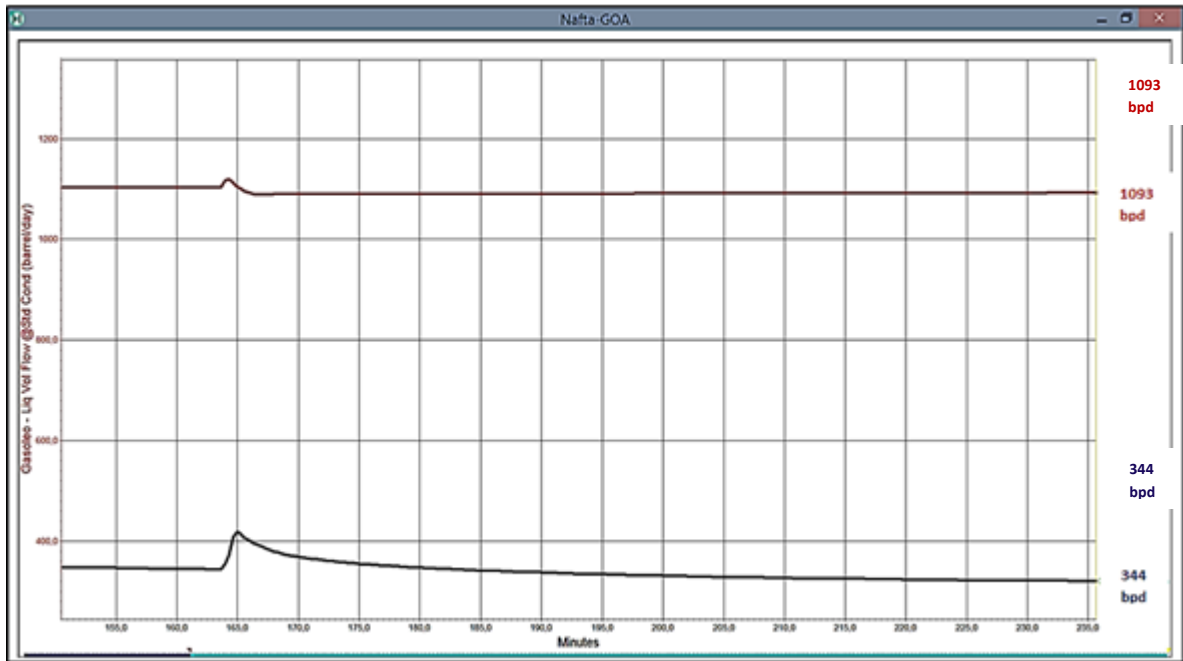
- **Cambio a dieta pesada 1:** La carga de crudo fue alterada para disminuir su API mediante la manipulación de las aperturas de las válvulas de los crudos CAS y SFD; la nueva dieta de crudo reporta un API de 21.5 y un flujo total de 40105 bpd. Las figuras 34 y 35 muestran que el sistema llega a un nuevo estado estacionario después del cambio en la dieta de crudo; los valores en

este nuevo estado pueden ser consultados en la Tabla 10. Los resultados de las respuesta del proceso ante una disminución en el API del crudo (CAS + SFD) reportan una disminución en la producción de nafta y en el rendimiento de productos medios Jet y diésel (30%), mientras que se reporta un incremento en el rendimiento de crudo reducido. Con lo anterior, un incremento en la carga de crudo mediante el aumento de la relación de crudos CAS y SFD, representa pérdidas económicas por la considerable disminución de los productos medios Jet y diésel; asimismo, el proceso reporta mayor consumo energético para el procesamiento de esta dieta.

**Figura 34. Producciones de Jet y Diesel con cambio a dieta pesada 1.**



**Figura 35. Producciones de Nafta y Gasóleo con cambio a dieta pesada 1.**



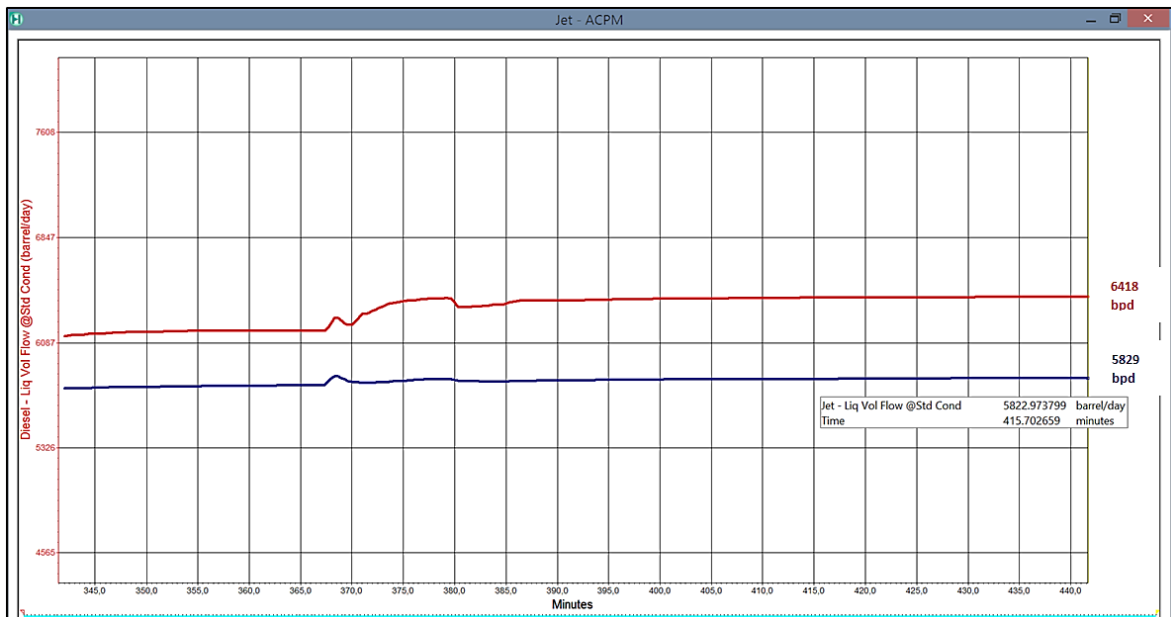
**Tabla 10. Valores estables resultantes de un cambio a dieta pesada 1.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)					Reflujos					Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)	
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	CR	REF CIMA		REF MEDIO		REF INF			
										Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)
NUT	60	640	40105	705	346	5827	6365	1102	23670	12730	12060	289	9404	510	12,4	30,4%	
GAL	60	4100															
PRO	60	3250															
CSB	60	17450															
PAY	60	2486															
CAS	100	4924															
NFT	60	484															
CAN	60	1102															
RUB	60	3484															
SFD	100	1385															
CNT	60	800															

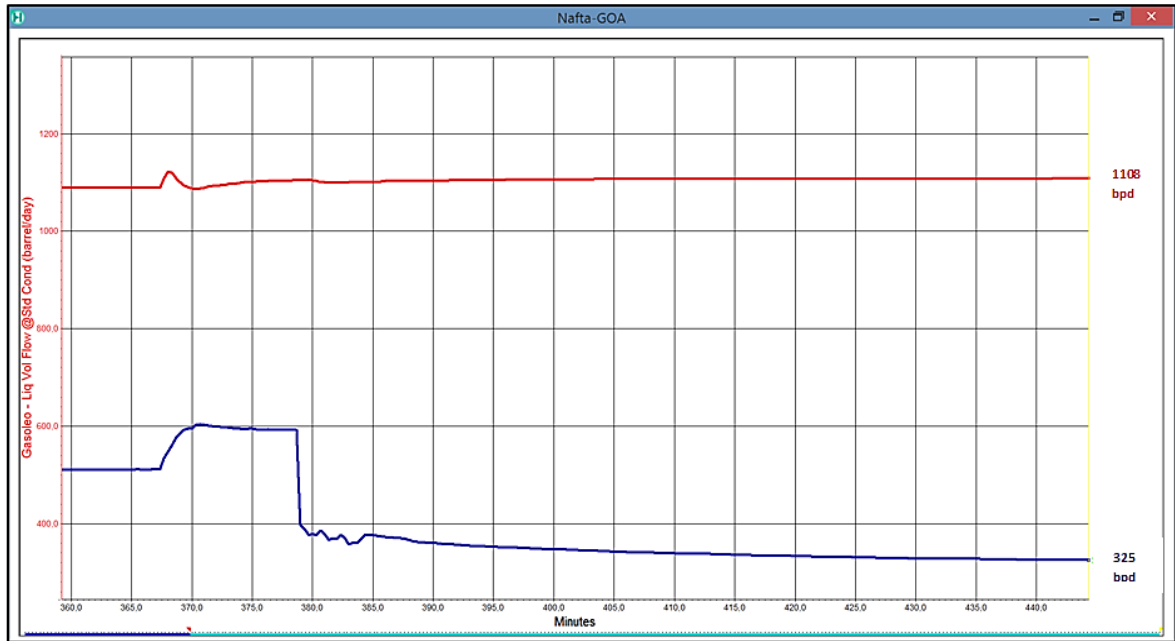
- **Cambio a dieta pesada 2:** La nueva dieta pesada fue establecida aumentando la relación de crudo CNT; el API alcanzado reporta el valor de 21.5, mientras el flujo total de carga corresponde al de la dieta pesada 1. En las figuras 36 a 38 se presenta el comportamiento de las variables en el nuevo estado estacionario con la dieta pesada 2. En la Tabla 11, se presenta el resumen de las principales variables en el nuevo estado estacionario. El incremento en la

relación de crudo CNT en la dieta reporta un aumento de 0.2% en el rendimiento de destilados medios, con relación a la dieta pesada 1. Asimismo, las producciones de nafta y gasóleo y los reflujos medio e inferior no presentan variaciones significativas. La diferencia con la dieta 1 se encuentra en que para la dieta pesada 2 se reporta un mayor valor en el reflujo superior debido al incremento de fracciones pesadas en la corriente de vapor cima, lo cual aumenta la temperatura de los vapores hacia el condensador; la elevación en la temperatura del condensador requiere una aumento en el reflujo para disminuir la temperatura de cima. Aunque ambas dietas de crudo son pesadas, la simulación dinámica nos indica que la columna atmosférica presenta un mejor desempeño con la dieta con mayor cantidad de crudo CNT.

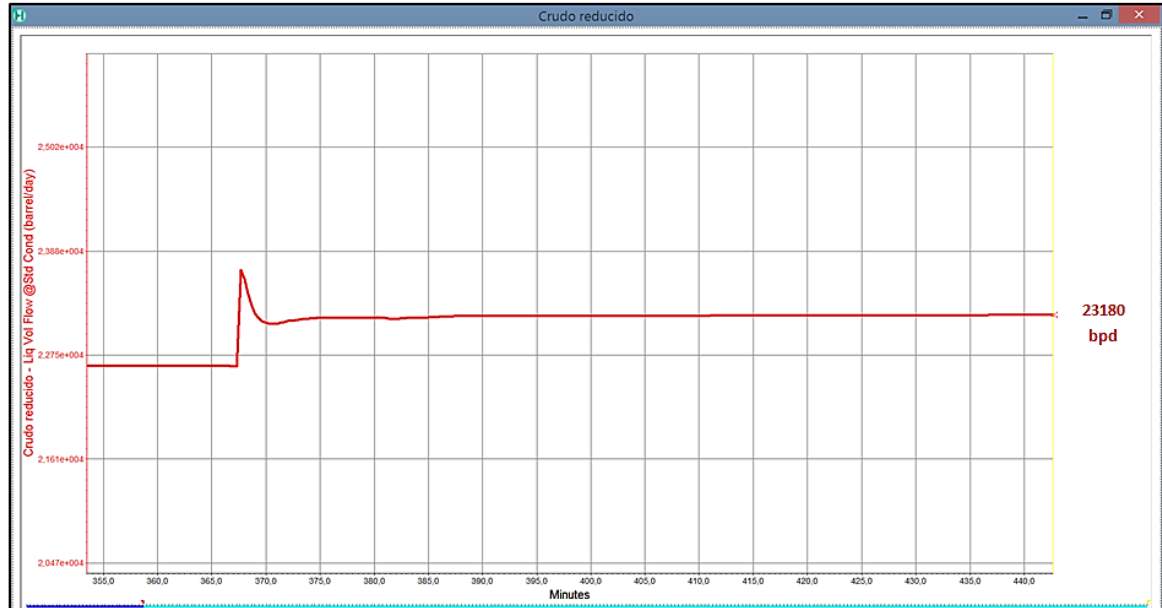
**Figura 36. Producciones de Jet y Diesel con cambio a dieta pesada 2.**



**Figura 37. Producciones de Nafta y Gasóleo con cambio a dieta pesada 2.**



**Figura 38. Rendimiento de crudo reducido con cambio a dieta pesada 2.**



**Tabla 11. Variables de proceso estabilizadas con dieta pesada 2.**

Corriente	Apertura válvula (%)	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)				Reflujos				Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)	
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	REF CIMA	REF MEDIO		REF INF			
										Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)
NUT	60	616	40002	705	300	5829	6400	1103	12700	12060	289	9397	512	12,4	30,6%
GAL	60	3995													
PRO	60	3226													
CSB	60	17700													
PAY	60	2521													
CAS	60	2997													
NFT	60	490													
CAN	60	1117													
RUB	60	3543													
SFD	60	822													
CNT	100	2975													

- **Cambio a dieta liviana:** Los flujos de los constituyentes más pesados de la dieta (crudos CAS, SFD y CNT) fueron disminuidos para alcanzar una dieta con mayor gravedad API (Tabla 12). El API ajustado corresponde a 22.5 con lo cual se puede afirmar que la dieta es más liviana que las establecidas anteriormente. En las figuras 39 y 40 se observa el comportamiento de los productos de cima y laterales con la dieta liviana. Según estas figuras, la producción de destilados medios aumenta en 3% respecto a las dietas pesadas probadas anteriormente, proporcionando un mayor margen económico en la refinación. Adicionalmente, el procesamiento de la dieta liviana reporta un menor consumo energético debido a que se requiere menor temperatura para lograr la destilación en la columna atmosférica, lo que representa menor consumo de gas combustible en el horno atmosférico.

Figura 39. Producciones de Jet y Diesel con dieta más liviana.

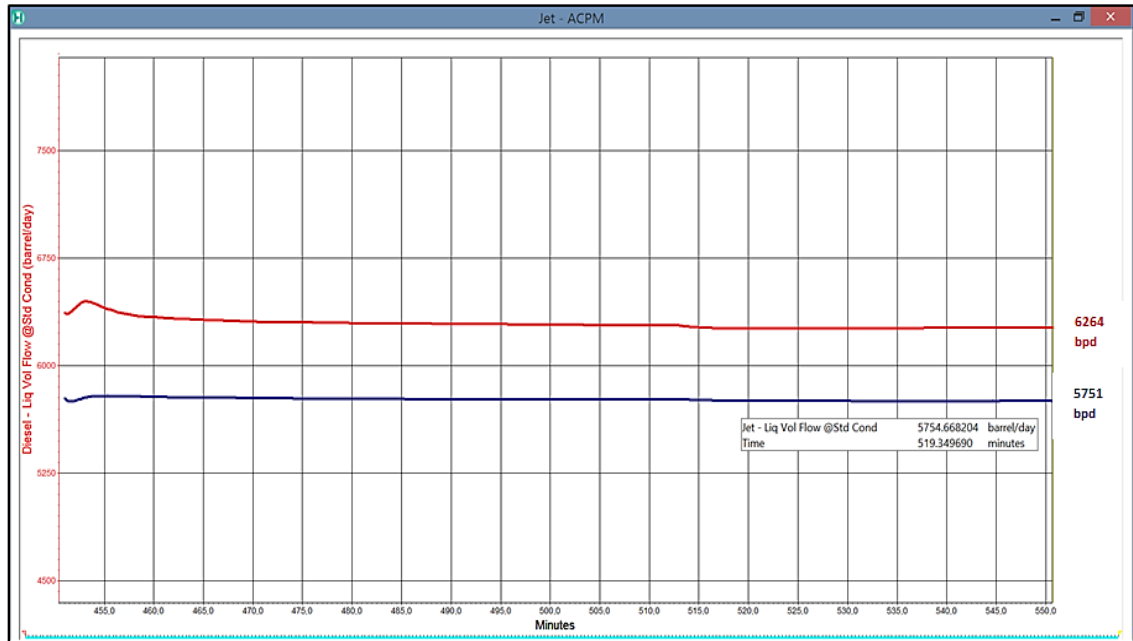
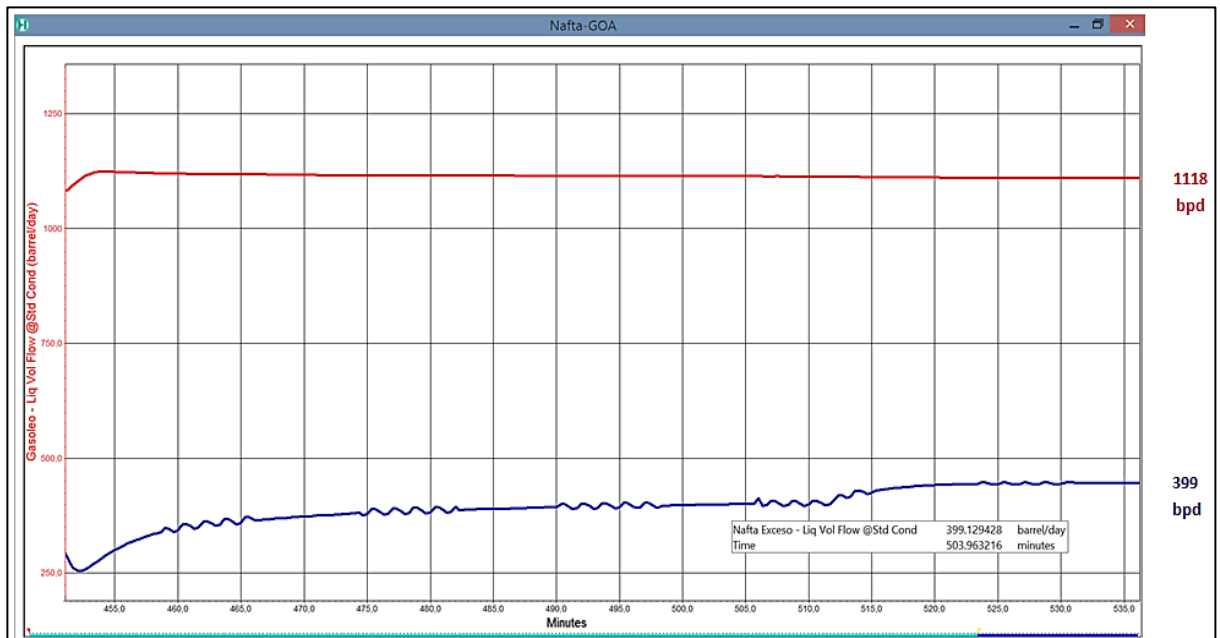


Figura 40. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta más liviana



**Tabla 12. Principales variables de proceso estabilizadas con dieta más liviana.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)				Reflujos				Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)	
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	REF CIMA	REF MEDIO		REF INF			
									Flujo (bpd)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)
NUT	60	645	36143	705	351	5771	6369	1118	12520	12120	277	9411	507	12,3	33,6%
GAL	60	3900													
PRO	60	3214													
CSB	60	18550													
PAY	60	2639													
CAS	20	1046													
NFT	60	512													
CAN	60	1168													
RUB	60	3618													
SFD	20	289													
CNT	20	562													

#### 5.4 IDENTIFICACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Las respuestas dinámicas obtenidas en las simulaciones presentan tendencias que ayudan en la identificación del comportamiento de la unidad industrial y soportan la toma de decisiones dirigidas hacia la producción de combustibles de alto valor comercial como nafta, Jet y ACPM. Para la identificación de las funciones de transferencia, se realizaron perturbaciones tipo escalón en los controladores de reflujo medio e inferior de la columna atmosférica. En la tabla 13 se detallan las variables más importantes a evaluar ante perturbaciones en los reflujos laterales; se priorizaron las producciones de nafta, Jet y Diesel, además del gasóleo, crudo reducido y temperatura de retorno de los reflujos, ya que estas interrelaciones nos permiten evaluar el desempeño de la unidad respecto a la producción de combustibles. Los datos obtenidos fueron tabulados y procesados con la ayuda de la herramienta de identificación de procesos *Ident* de *Matlab*®, para ajustar las respectivas funciones de transferencia.

**Tabla 13. Funciones de transferencia ajustadas con *Ident de Matlab®*.**

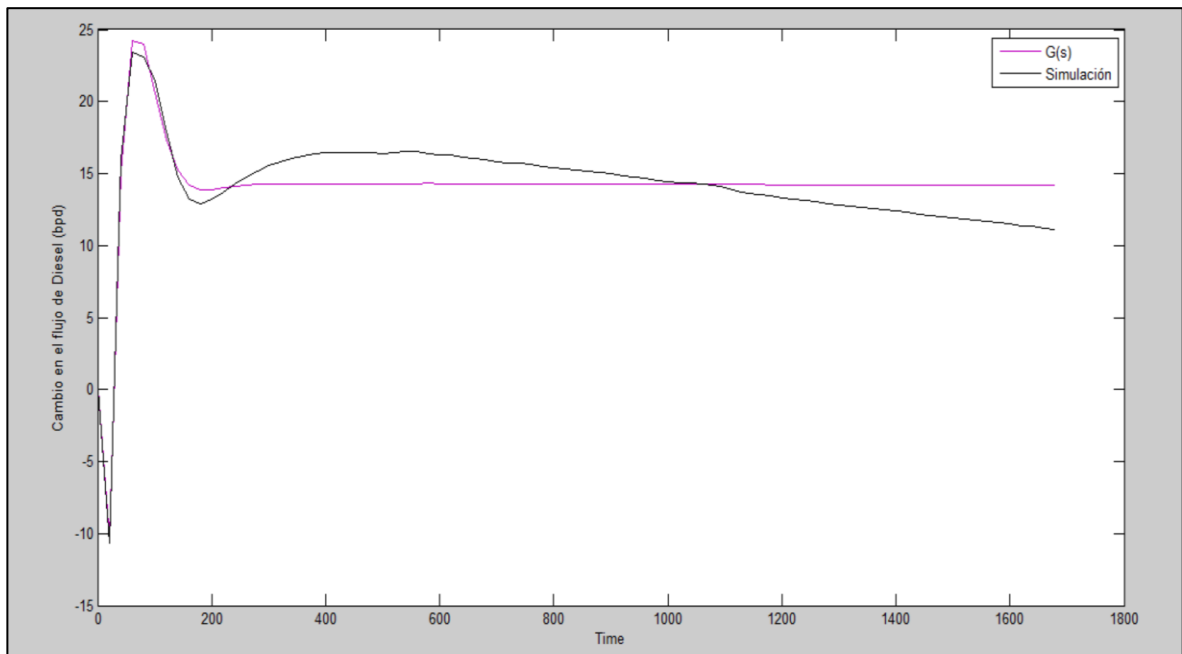
Perturbación	Funciones de transferencia					
	Nafta (bpd)	Jet (bpd)	Diesel (bpd)	Gasóleo (bpd)	Crudo reducido (bpd)	Temperatura de retorno reflujo (F)
Reflujo medio (bpd)	X	X	X			X
Reflujo inferior (bpd)		X	X	X	X	X

Para lograr una buena identificación de las funciones de transferencia, se realizaron varias pruebas variando los polos y ceros de los polinomios, hasta lograr el modelo que mejor representaba el respectivo proceso. A continuación se relacionan las funciones de transferencia calculadas con *Ident de Matlab®*. Una vez identificadas las funciones de transferencia, se ubican los polos y los zeros en el plano mediante la utilización del comando *pzmap* de *matlab*, con lo cual conocemos la estabilidad y comportamiento del proceso.

- **Función de transferencia para el flujo de Diesel ante perturbaciones en el flujo de reflujo inferior.**

$$G_1(s) = \frac{218.9s + 1.93}{653.4s^2 + 34.32s + 1}$$

**Figura 41. Respuesta dinámica del flujo de diesel ante cambios en el reflujo inferior.**

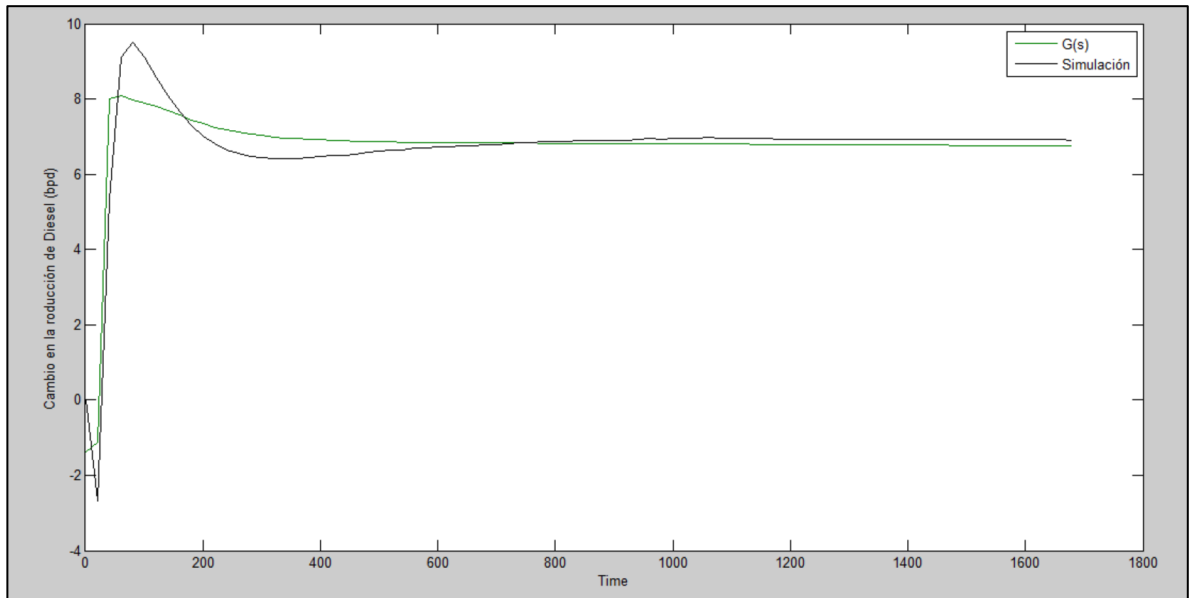


Para este caso la función de transferencia tiene una constante de tiempo de 25,6 segundos y una ganancia de 1,93. Los polos son negativos, lo cual indica que el proceso presenta estabilidad.

- **Función de transferencia para la producción de Jet ante perturbaciones en el flujo de reflujo inferior.**

$$G_2(s) = \frac{(143.4s + 0.9209)e^{-19.8s}}{98.19s + 1}$$

**Figura 42. Comportamiento del flujo de Jet ante cambios en el reflujo inferior.**

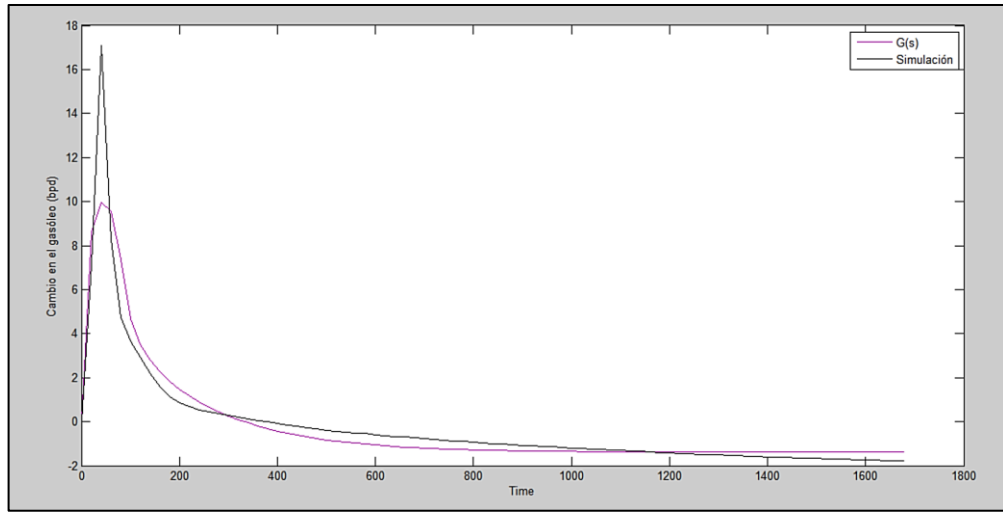


Esta función de adelanto-retardo de primer orden, tiene una ganancia de 0.92, una constante de tiempo de retardo de 98.19 s y una constante de tiempo de adelanto de 155,61s. El polo real negativo indica que el proceso presenta estabilidad y el cero positivo muestra la respuesta inversa de la función ajustada.

- **Función de transferencia para la producción de gasóleo atmosférico ante perturbaciones en el flujo de reflujo inferior.**

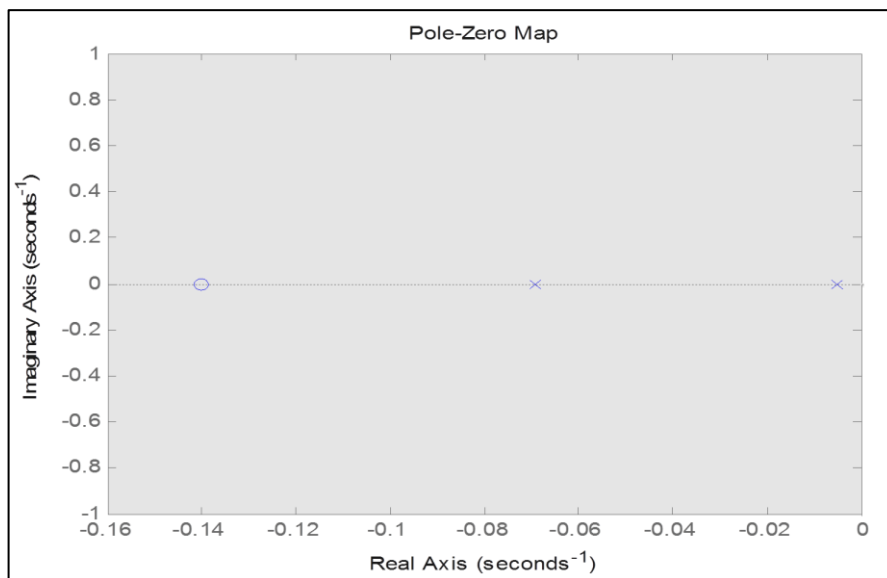
$$G_3(s) = \frac{(-135.2s - 0.1893)}{2899s^2 + 214.9s + 1} e^{-53.7s}$$

**Figura 43. Cambio en el gasóleo ante perturbaciones en el reflujo inferior.**



Esta función de segundo orden tiene una ganancia de 0.92 y un tiempo muerto de 53.7 s. En la figura 44 se observa la ubicación de los polos y ceros en el plano. Los dos polos reales negativos representan la estabilidad del proceso y el cero negativo indica la respuesta inversa del proceso, es decir, el camino seguido por la función de transferencia ajustada –el flujo de gasóleo comienza en aumento ante el cambio el reflujo inferior, pero se estabiliza en un valor inferior al de partida–.

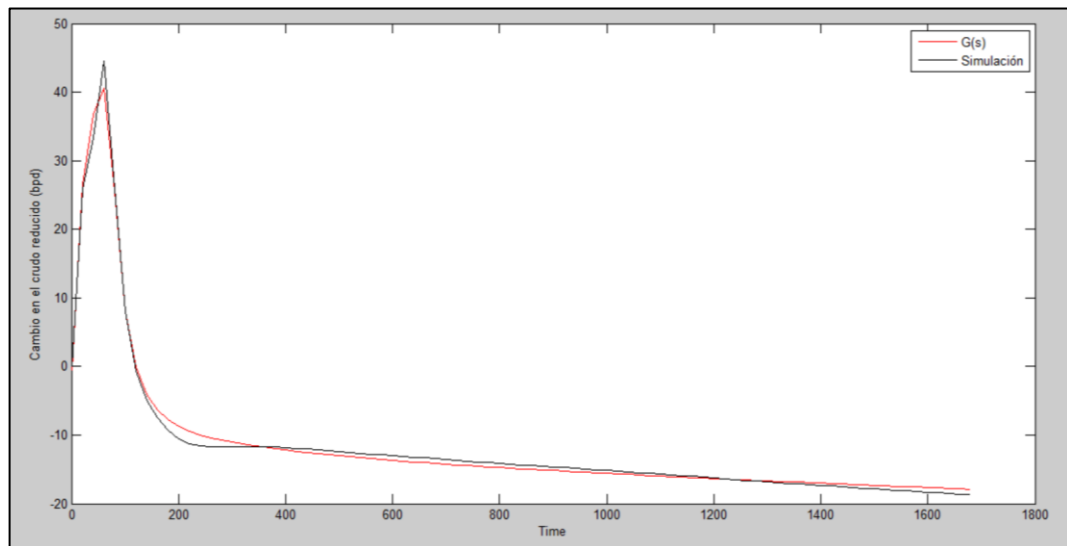
**Figura 44. Polos y ceros de la función de transferencia GOA-Reflujo inferior.**



- **Función de transferencia para el rendimiento de crudo reducido ante perturbaciones en el flujo de reflujo inferior.**

$$G_4(s) = \frac{(-20880s - 3.844)}{60880s^2 + 2917s} e^{(-50.2s)}$$

**Figura 45. Cambios en el flujo de crudo reducido ante perturbaciones en el reflujo inferior.**

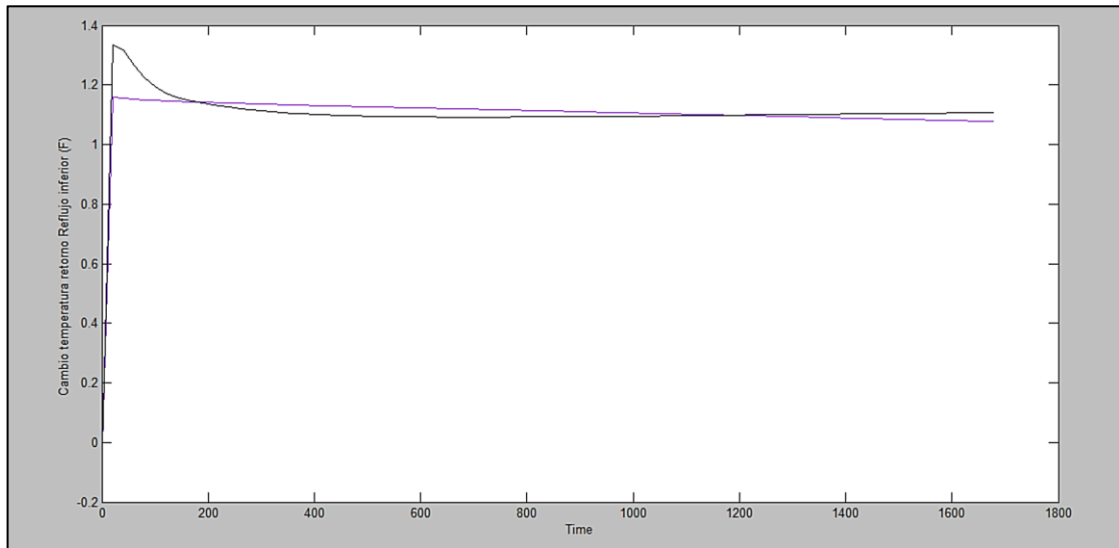


Esta función en particular, presenta una buena estimación del proceso simulado. Presenta una constante de tiempo de 18.23 segundos, lo cual indica una respuesta más rápida ante la perturbación que la reportada por las anteriores funciones de transferencia. Los dos polos reales negativos indican que el proceso es estable. La respuesta de esta función de transferencia, al igual que para el caso del gasóleo, refleja un comportamiento inverso ya que inicialmente la cantidad de crudo reducido aumenta pero se estabiliza en un valor inferior al inicial.

- **Función de transferencia para la temperatura de retorno de reflujo inferior a la columna principal ante cambios en el reflujo inferior.**

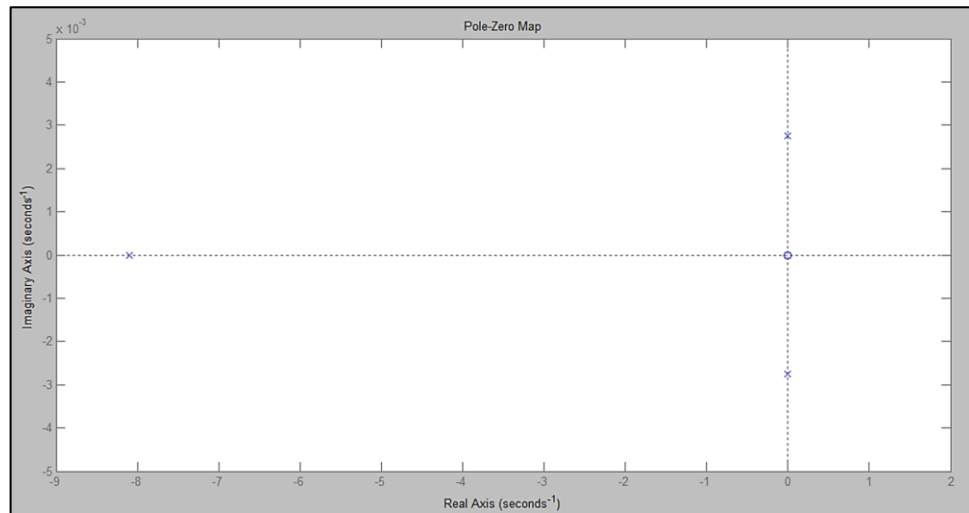
$$G_5(s) = \frac{456700s + 0.9752}{5223s^3 + 5.223 * 10^9s^2 + 228100s + 1}$$

**Figura 46. Cambio en la temperatura de retorno con variación en el reflujo inferior.**



La función de transferencia  $G_5(s)$ , representa el comportamiento de la temperatura de retorno del reflujo inferior ante las variaciones del mismo reflujo. Esta función de tercer orden tiene un polo real negativo y dos polos imaginarios (positivo y negativo), los tres polos en el lado izquierdo del plano representan la estabilidad de la función simulada (Figura 47). El cero negativo indica el camino de tipo subamortiguado con un sobrepaso casi nulo. Esta respuesta del proceso simulado es una representación del comportamiento típico de la operación de la planta, en donde un incremento en el flujo de reflujo inferior manteniendo estable la carga de crudo, representa un incremento de la temperatura del retorno de reflujo, ocasionado por variación de la transferencia de calor en los intercambiadores de calor reflujo inferior-crudo.

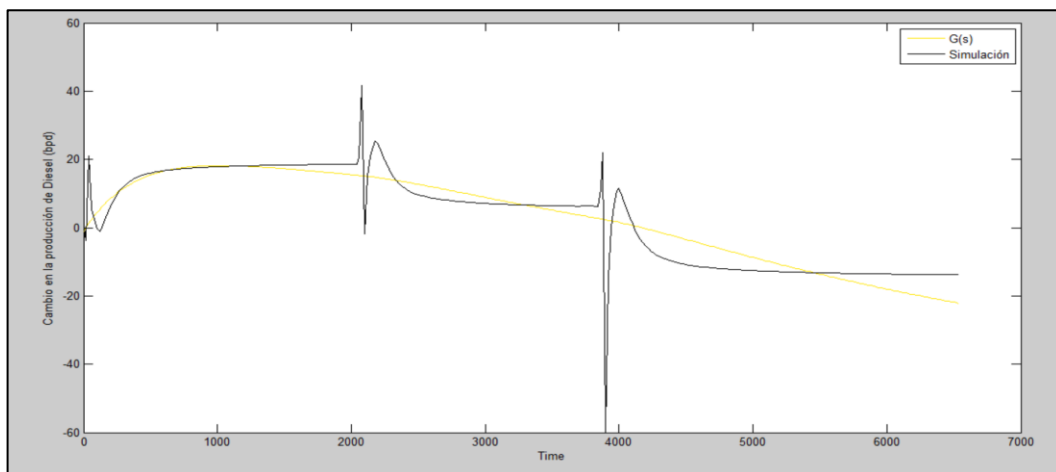
**Figura 47. Polos y ceros función de transferencia  $G_5(s)$ .**



- **Función de transferencia para la producción de Diesel ante cambios en el reflujo medio.**

$$G_6(s) = \frac{0.008992}{1.515 * 10^6 s^2 + 4239s + 1}$$

**Figura 48. Cambio en la producción de Diesel ante perturbaciones en el flujo de reflujo medio.**

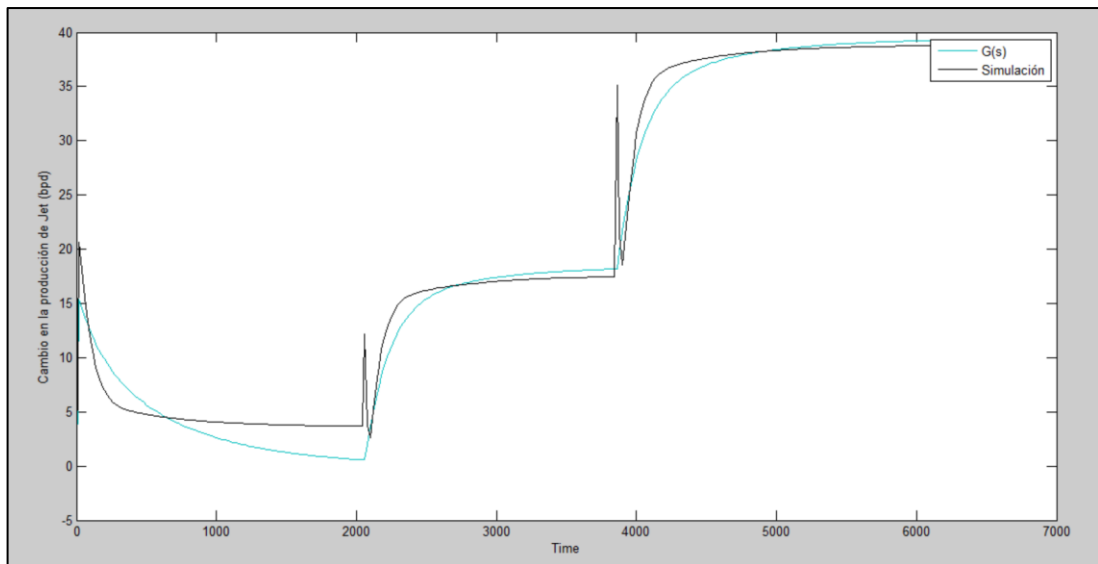


Los picos presentados en la figura 48, representan la respuesta dinámica de la producción de diésel en la simulación, ante la perturbación en el reflujo medio. La función de transferencia de segundo orden, no tiene ceros y tiene dos polos reales negativos que indican la estabilidad del proceso. La tendencia obtenida con esta función de transferencia representa una acción inversa del flujo de reflujo medio en la producción de diésel. Las discontinuidades exhibidas en la Figura 48 pueden estar ocasionadas por el valor elevado de la constante de tiempo de la función de transferencia.

- **Función de transferencia para la producción de Jet ante perturbaciones en el reflujo medio.**

$$G_7(s) = \frac{-30852s - 0.007135}{40570s^3 + 107000s^2 + 829.1s + 1} e^{(-3.1s)}$$

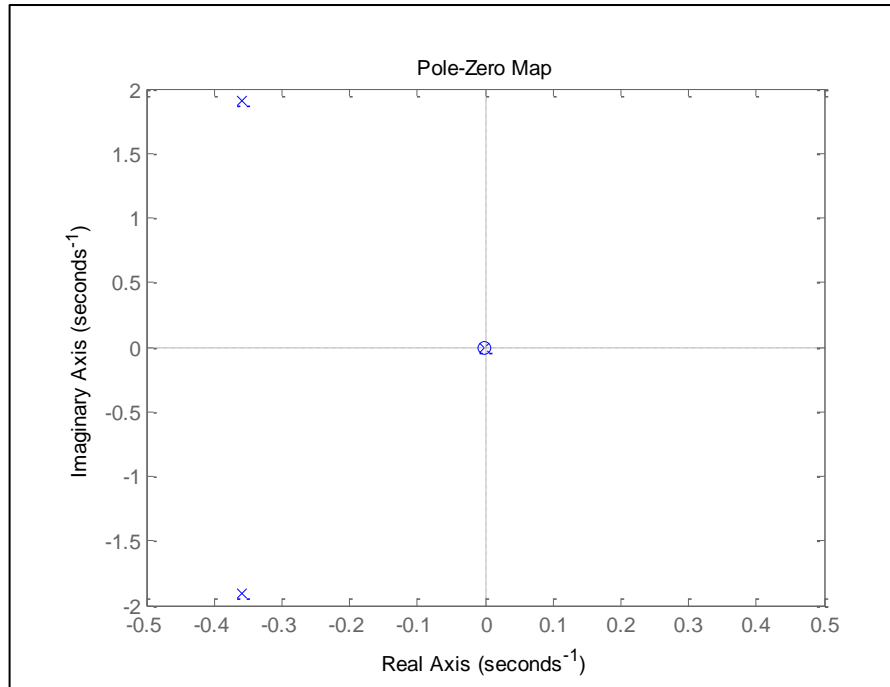
**Figura 49. Cambios en la producción de Jet ante variaciones en el reflujo medio.**



En la figura 49, se observan las perturbaciones realizadas en el flujo de reflujo medio y la estimación realizada por la función de transferencia. En la figura 50, se

observa la ubicación de los polos en la sección izquierda del plano, lo que indica que el proceso es estable; el cero real negativo muestra el camino seguido ante los cambios realizados, es decir, a mayor flujo de reflujo medio a la torre atmosférica, mayor producción de jet.

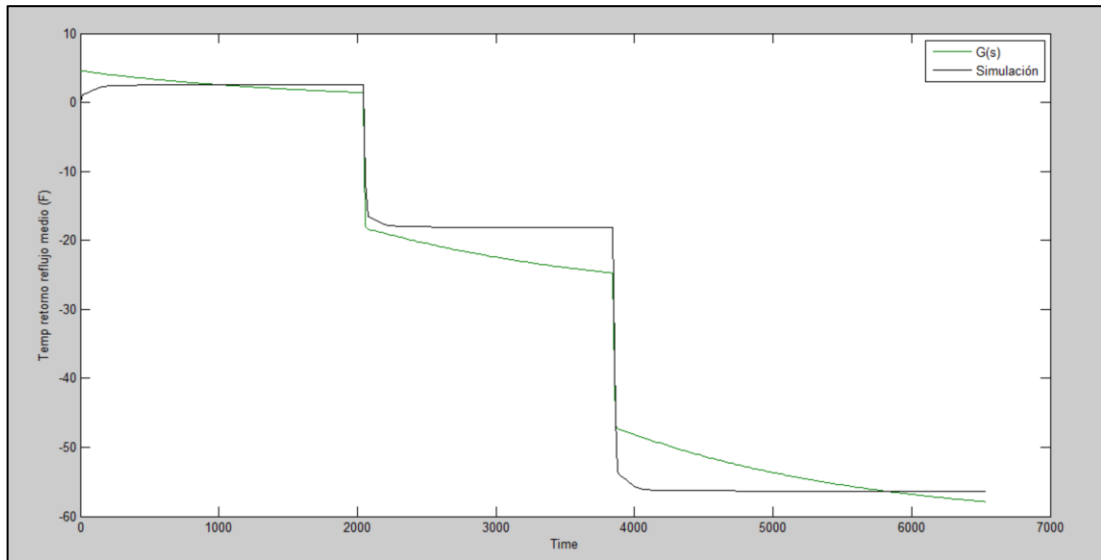
**Figura 50. Ubicación de polos y ceros función de transferencia  $G_7(s)$ .**



- **Función de transferencia temperatura retorno reflujo medio ante cambios en el flujo.**

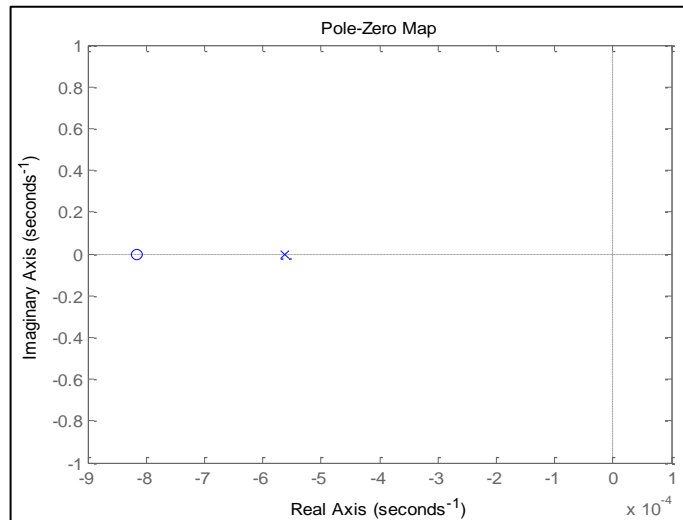
$$G_8(s) = \frac{13.47 s + 0.01103}{1777 s + 1}$$

**Figura 51. Variación en la temperatura de retorno reflujo medio ante cambios en el flujo de reflujo medio.**



Para esta función de transferencia de primer orden (figura 51), se presenta una buena estimación del proceso simulado. La función tiene un polo y un cero, ambos reales negativos que representan la estabilidad del proceso y la respuesta, la cual está asociada a acomodaciones internas del flujo de calor retirado debido a la inercia del sistema.

**Figura 52. Ubicación de polos y ceros función de transferencia  $G_g(s)$ .**



En la tabla 14, se relacionan las ganancias y las constantes de tiempo calculadas para las funciones de transferencia de las respuestas obtenidas con la columna de destilación atmosférica simulada en modo dinámico en *Hysys*. Para todas las funciones de transferencia calculadas, los picos en las gráficas corresponden a las respuestas inmediatas de la simulación del proceso en *Hysys*, ante las perturbaciones. Sin embargo para todos los casos la estimación es adecuada (porcentaje de ajuste superior al 80%), por lo cual representa la dinámica del proceso simulado y soportan el uso de las respectivas funciones de transferencia para análisis de tipo semicuantitativo. Es importante mencionar que las constantes de tiempo y las ganancias del proceso para cada caso deben ser adicionalmente validadas de acuerdo a la respuesta real del proceso, de tal manera que los modelos finalmente calculados correspondan a la dinámica real de la planta. Este último ejercicio forma parte de la fase de implementación posterior a la ejecución del presente trabajo.

**Tabla 14. Ganancia y constantes de tiempo de las funciones de transferencia.**

Perturbación	Variable de salida	Función de Transferencia	Ganancia	Constante de tiempo (s)
Reflujo inferior (bpd)	Producción de Diesel (bpd)	$G_1(s) = \frac{218.9s + 1.93}{653.4s^2 + 34.32s + 1}$	1,930	25,6
	Producción de Jet (bpd)	$G_2(s) = \frac{(143.4s + 0.9209)e^{-19.8s}}{98.19s + 1}$	0,921	98,19
	Producción de GOA (bpd)	$G_3(s) = \frac{(-135.2s - 0.1893)}{2899s^2 + 214.9s + 1} e^{-53.7s}$	0,189	53,84
	Producción de crudo reducido (bpd)	$G_4(s) = \frac{(-2.088e^4s - 3.844)}{6.088e^4s^2 + 2917s} e^{(-50.2s)}$	3,844	18,23
	Temperatura de retorno de reflujo inferior a la columna principal (°F)	$G_5(s) = \frac{4.567e^5s + 0.9752}{5223s^3 + 5.223e^9s^2 + 2.281e^5s + 1}$	0,975	17,35
Reflujo medio (bpd)	Producción de Diesel (bpd)	$G_6(s) = \frac{0.008992}{1.515e^6s^2 + 4239s + 1}$	0,009	24,72
	Producción de Jet (bpd)	$G_7(s) = \frac{-30852s - 0.007135}{4.057e^4s^3 + 1.07e^5s^2 + 829.1s + 1} e^{(-3.1s)}$	0,007	6,05

## 6. SIMULACIÓN DINÁMICA EN LAZO CERADO

Los parámetros para los controladores fueron especificados mediante la herramienta *autotuner* de *hysys* (Tabla 15). Para el caso del FC-NFT, el flujo de proceso es nafta diluyente, la cual se encuentra en fase vapor, por lo cual un incremento en el flujo puede generar sobrepresión en el tren de carga y en la columna atmosférica, por esta razón esta válvula se mantiene en modo manual durante el periodo de pruebas, con una apertura fija de 60%.

**Tabla 15. Valores de sintonía para los controladores de flujo, sugeridos por *hysys*.**

Tuning Parameters	FC-NUT	FC-GAL	FC-PRO	FC-CSB	FC-PAY	FC-AS	FC-NFT	FC-CAN	FC-RUB	FC-SFD	FC-CNT	FIC-2522	FIC-2530
Kc	0,373	0,381	0,381	0,433	0,381	0,373	1	0,381	0,361	0,359	0,377	0,746	0,669
Ti	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,5	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Ultimate Gain	1,19	1,22	1,22	1,39	1,22	1,19	X	1,22	1,15	1,15	1,21	2,39	2,14
Algorithm Type	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys	Hysys

### 6.1 PRUEBAS EN LOS CONTROLADORES DE REFLUJO

Se realizaron pruebas en los controladores de reflujo medio e inferior, considerando que estos influyen directamente en la operación de la columna atmosférica, afectando específicamente la producción de destilados medios, Jet y Diesel. Inicialmente, se realizaron perturbaciones tipo escalón en estos controladores para observar la respuesta de los mismos. De acuerdo a las figuras 53 y 54, la respuesta de los controladores de reflujo medio e inferior es óptima, por cuanto la válvula actúa rápidamente (20 segundos) llevando la señal de flujo al

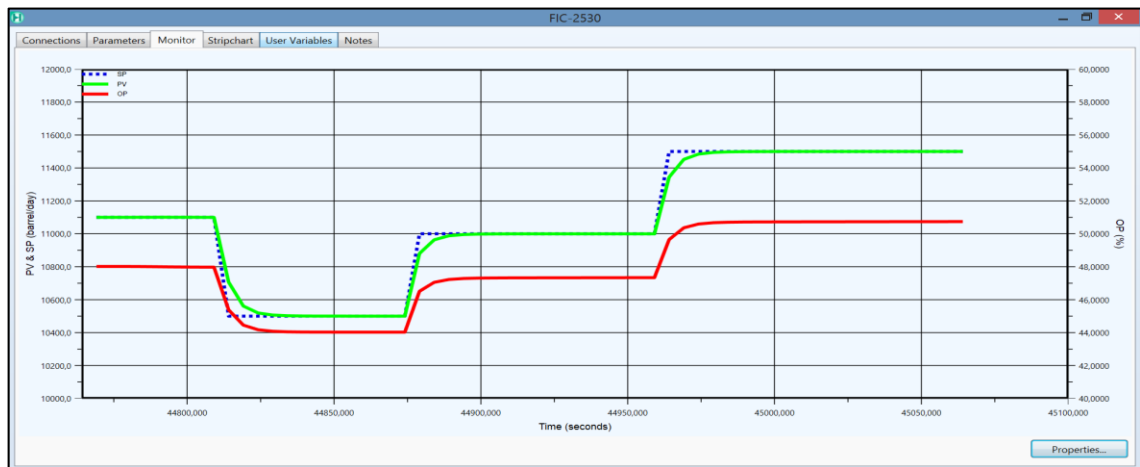
nuevo *setpoint* establecido. En las gráficas de sintonía de controladores se puede observar:

SP: Set-point ajustado en el controlador (línea azul intermitente).

PV: Valor actual de la variable controlada (línea color verde).

OP: Apertura de válvula (línea color rojo).

**Figura 53. Respuesta controlador de reflujo medio con sintonía sugerida por *hysys*.**



**Figura 54. Respuesta controlador reflujo inferior con sintonía sugerida por *hysys*.**



En las figuras 53 y 54 se observa como ante un cambio en el setpoint del controlador, la válvula actúa casi de forma instantánea, llevando la variable al nuevo valor de setpoint establecido.

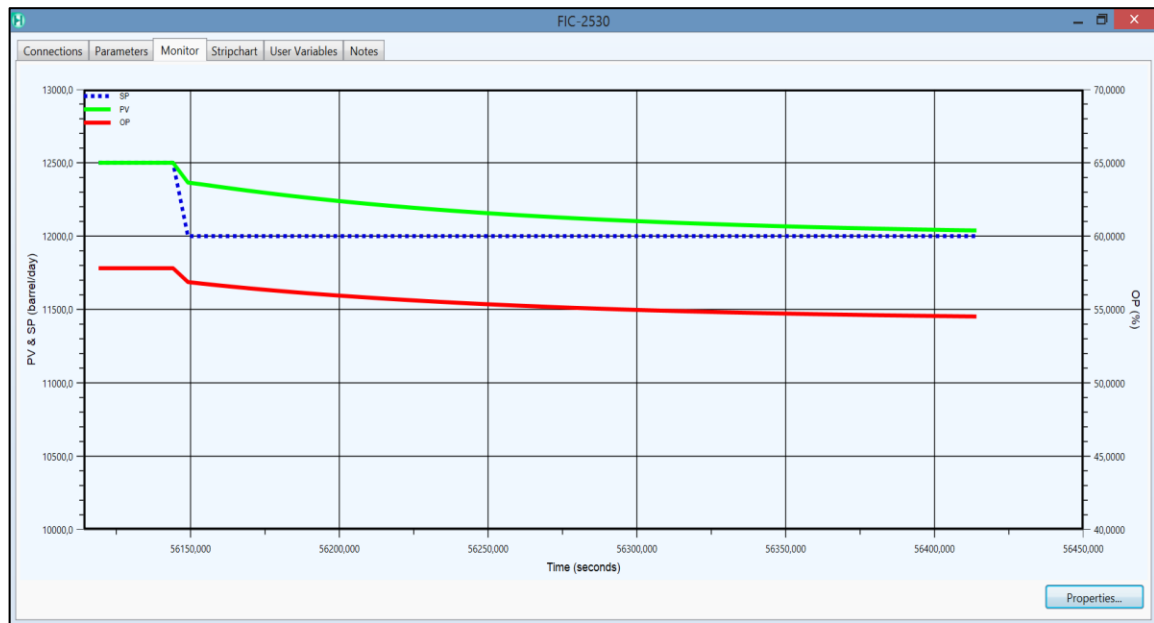
Aunque que la respuesta de los controladores de reflujo medio e inferior, es óptima con la sintonía de hysys, este comportamiento no corresponde a la realidad de la planta. En la operación industrial intervienen muchos otros factores que generan un retardo en la respuesta de los diferentes lazos de control. Basado en este premisa y en la experiencia en la operación de plantas de proceso, se realiza una nueva prueba estableciendo los parámetros de sintonía reales de los controladores de reflujo medio e inferior de la torre atmosférica T-250 (Tabla 16).

**Tabla 16. Datos de sintonía reales de planta.**

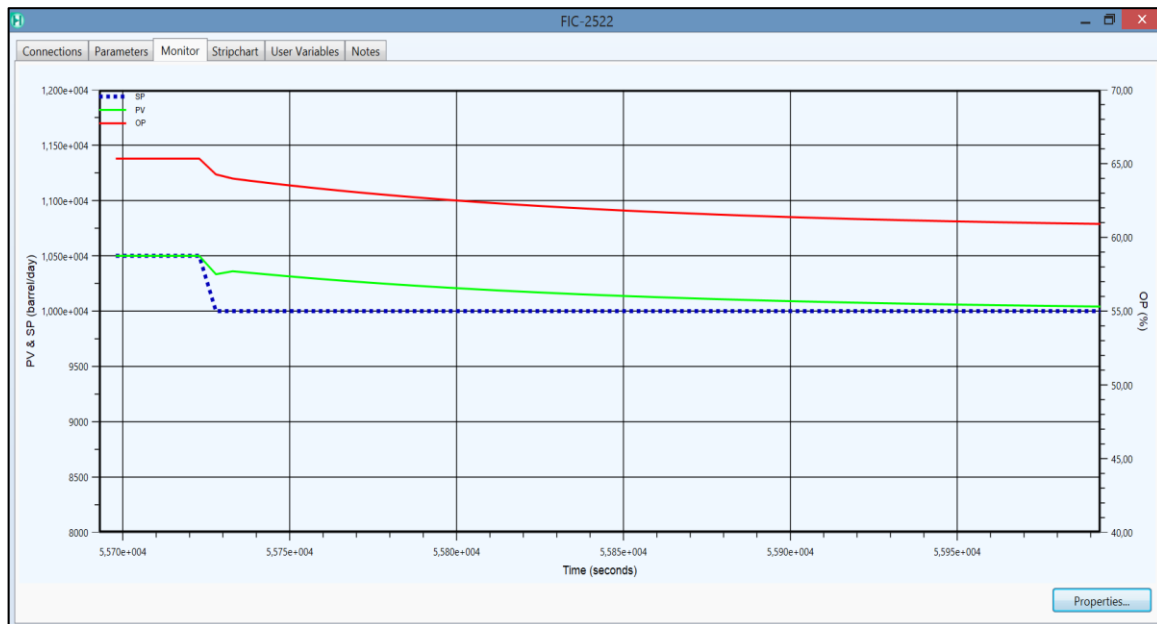
<b>Tunning Parameters</b>	<b>FIC-2522</b>	<b>FIC-2530</b>
<b>P</b>	150	150
<b>I</b>	0,5	0,5
<b>Algorithm Type</b>	Foxboro	Foxboro

Las figuras 55 y 56 presentan las tendencias de operación obtenidas con los valores de los parámetros de los controladores en planta (Tabla 16). Como se observa en las figuras mencionadas, ante un cambi en el setpoint de los controladores, la valvula comienza a actuar gradualmente cambiando lentamente el valor de la variable hasta llevarla lentamente al nuevo setpoint. La respuesta mostrada en las anteriores figuras corresponde a la evidenciada en planta industrial. Con la respuesta adecuada de los controladores de reflujo medio e inferior, acorde a la realidad de la planta, se decide dejar estos parámetros de sintonía para continuar con las pruebas de la simulación dinámica en lazo cerrado.

**Figura 55. Respuesta del controlador de reflujo medio ante perturbaciones tipo escalón, con datos de sintonía reales de la planta.**



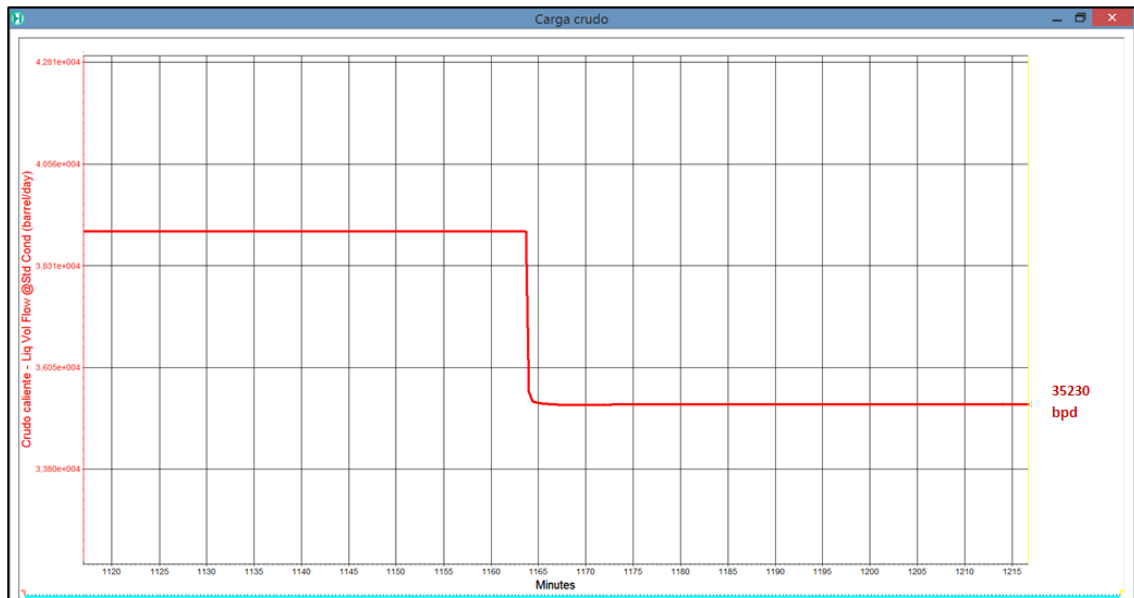
**Figura 56. Respuesta del controlador de reflujo inferior ante perturbaciones tipo escalón, con datos de sintonía reales de planta.**



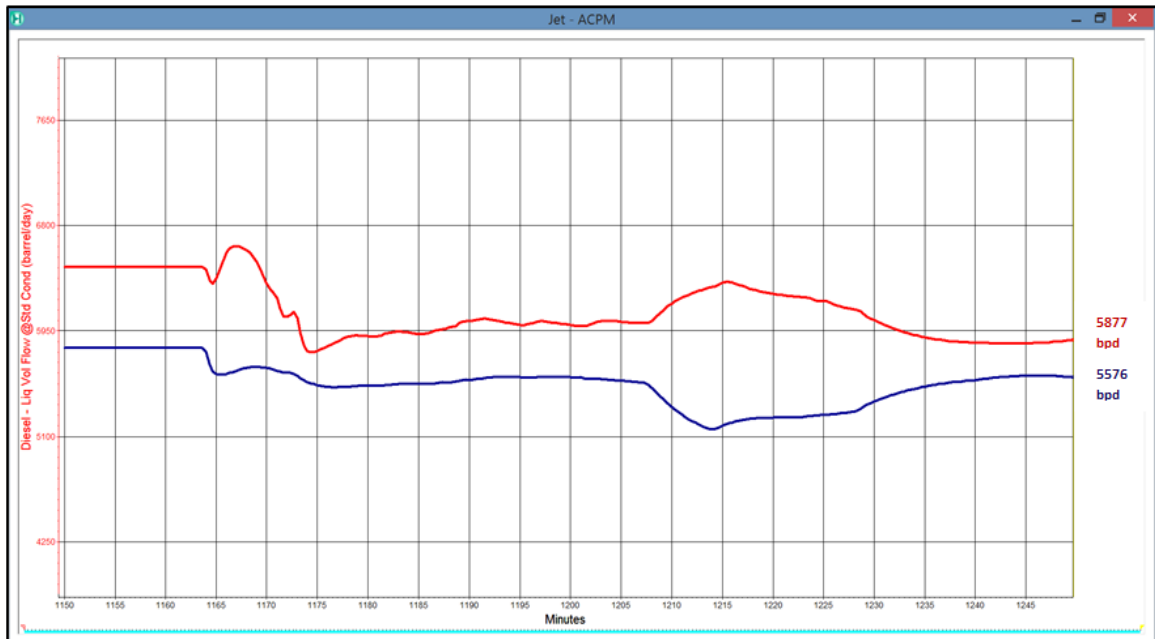
## 6.2 CAMBIOS EN EL FLUJO DE CARGA

Se realizó una disminución del 10% en el *setpoint* de cada controlador de carga de crudo, para disminuir el flujo de carga total en el mismo porcentaje manteniendo la misma relación en los constituyentes de la dieta de crudo (figura 57). En las figuras 58 y 59, se registra el comportamiento de los productos de la torre atmosférica. Aunque se observa variabilidad propia de la dinámica del proceso, las principales variables reportan estabilidad en un tiempo aproximado de 80 minutos; los valores de desempeño reportados por la torre ante la perturbación en el flujo de carga se encuentran consignados en la Tabla 17. Con respecto al mismo escenario presentado en lazo abierto (capítulo 4), se presenta una mejoría en la respuesta en lazo cerrado, llegando a estabilidad en menor tiempo; adicionalmente, la simulación reporta un leve incremento en la producción de destilados medios de 0.3%.

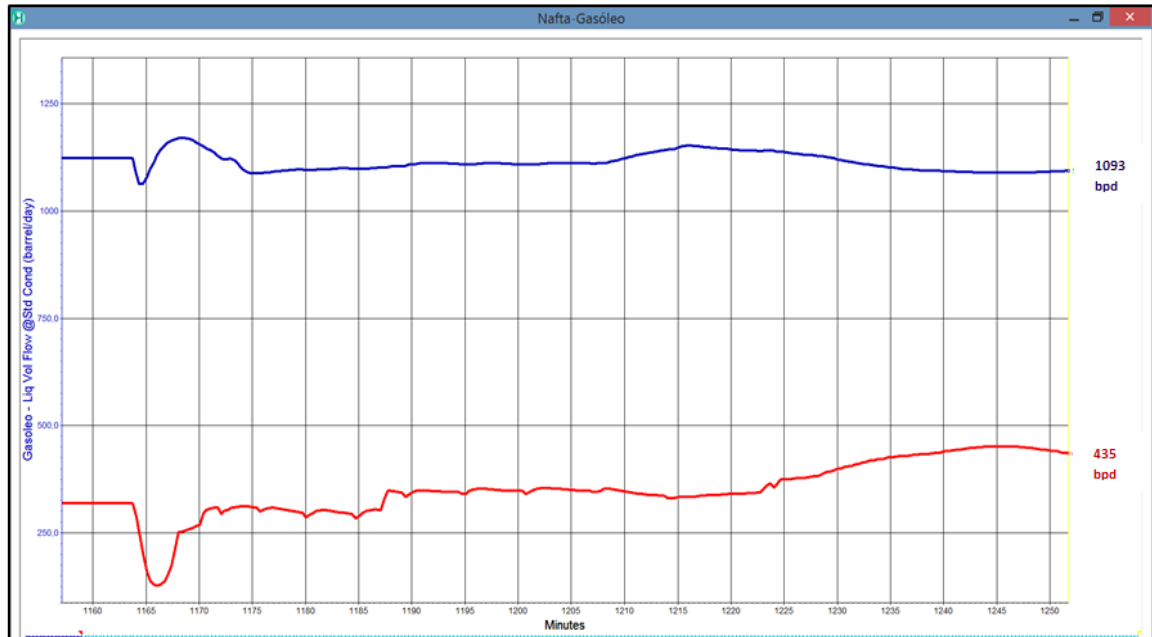
**Figura 57. Disminución de 10% en la carga de crudo en lazo cerrado.**



**Figura 58. Producciones de Diesel y Jet con disminución de 10% en la carga, lazo cerrado.**



**Figura 59. Producciones de Nafta y Gasóleo con disminución de 10% en la carga, lazo cerrado.**



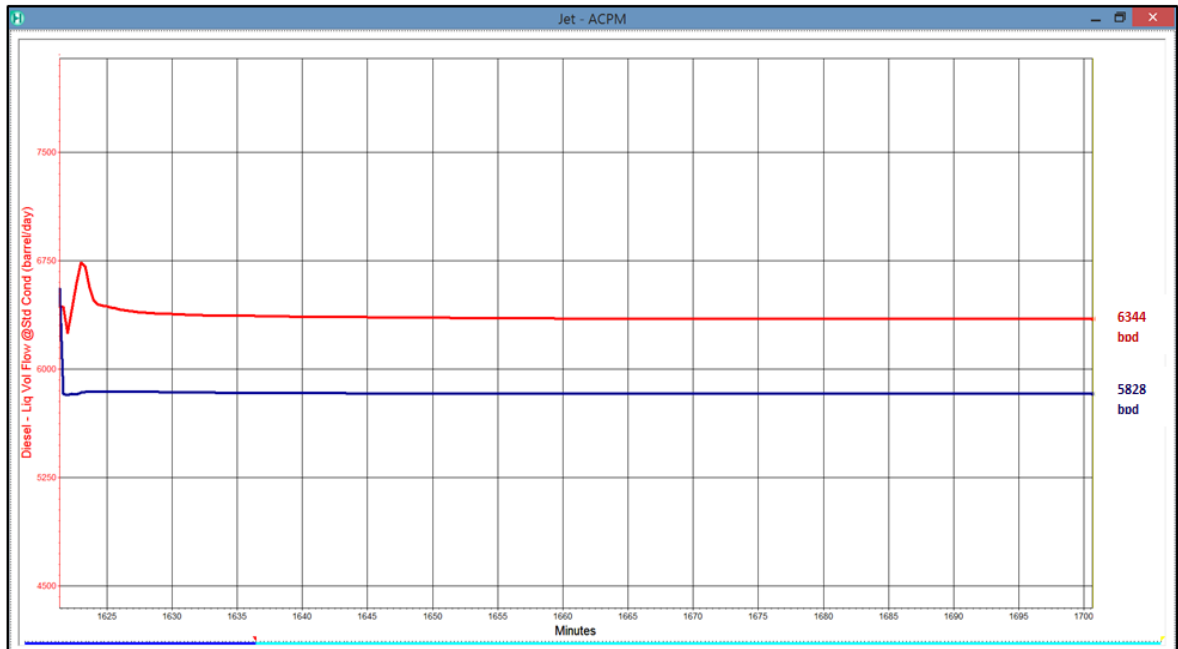
**Tabla 17. Variables estabilizadas con una disminución de 10% en la carga, en lazo cerrado.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)					Reflujos				Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)	
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	CR	REF CIMA	REF MEDIO		REF INF			
										Flujo (bpd)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)
NUT	41,2	580	35142	705	428	5551	5936	1101	20519	7000	12500	223	9500	504	12,3	32,7%
GAL	51,4	3946														
PRO	50,8	3133														
CSB	45,0	15300														
PAY	51,5	2483														
CAS	51,9	2980														
NFT	40,0	373														
CAN	52,2	1111														
RUB	51,5	3600														
SFD	51,7	836														
CNT	51,3	800														

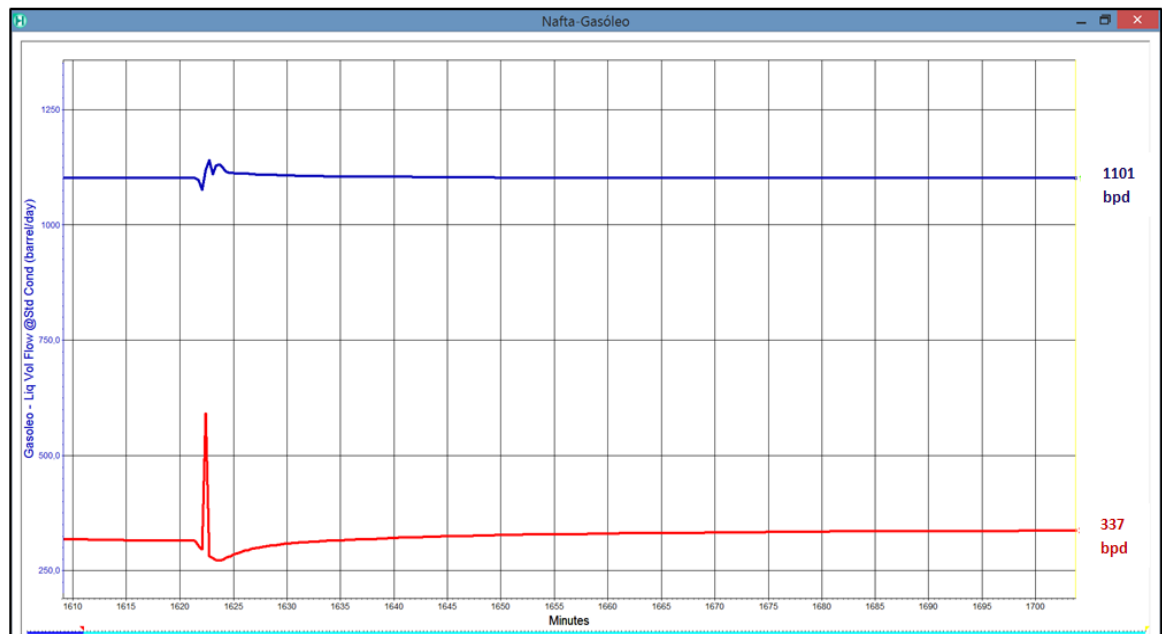
### 6.3 CAMBIO A DIETA PESADA

La carga de crudo fue alterada para disminuir su API mediante el ajuste de los *setpoint* de los controladores de flujo, aumentando la relación de los crudos CAS y SFD; la nueva dieta de crudo reporta un API de 21.5 y un flujo total de 39230 bpd (perturbación). El comportamiento en los flujos de los productos de destilación está representado en las figuras 60 y 61. Según estas figuras, la operación en lazo cerrado reporta un incremento de 0.6% en el rendimiento de destilados medios con respecto al mismo escenario evaluado en lazo abierto (capítulo 4). Asimismo, las relaciones de reflujo de cima y reflujos se mantienen, al igual que las temperaturas de retorno de los reflujos laterales. La Tabla 18 presenta los valores de las principales variables en estabilización.

**Figura 60. Producciones de Jet y Diesel ante un cambio en la composición de la carga (dieta más pesada), en lazo cerrado.**



**Figura 61. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta pesada, lazo cerrado.**



**Tabla 18. Principales variables estabilizadas con dieta pesada, en lazo cerrado.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)					Reflujos					Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	CR	REF CIMA	REF MEDIO		REF INF			
										Flujo (bpd)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)		
NUT	61,0	645	39230	705	335	5828	6345	1101	23260	7500	13000	290	9500	510	12,3	31,0%
GAL	60,4	4170														
PRO	59,3	3250														
CSB	53,2	16500														
PAY	62,3	2486														
CAS	96,7	4924														
NFT	50,0	484														
CAN	58,2	1102														
RUB	57,6	3484														
SFD	98,9	1385														
CNT	58,6	800														

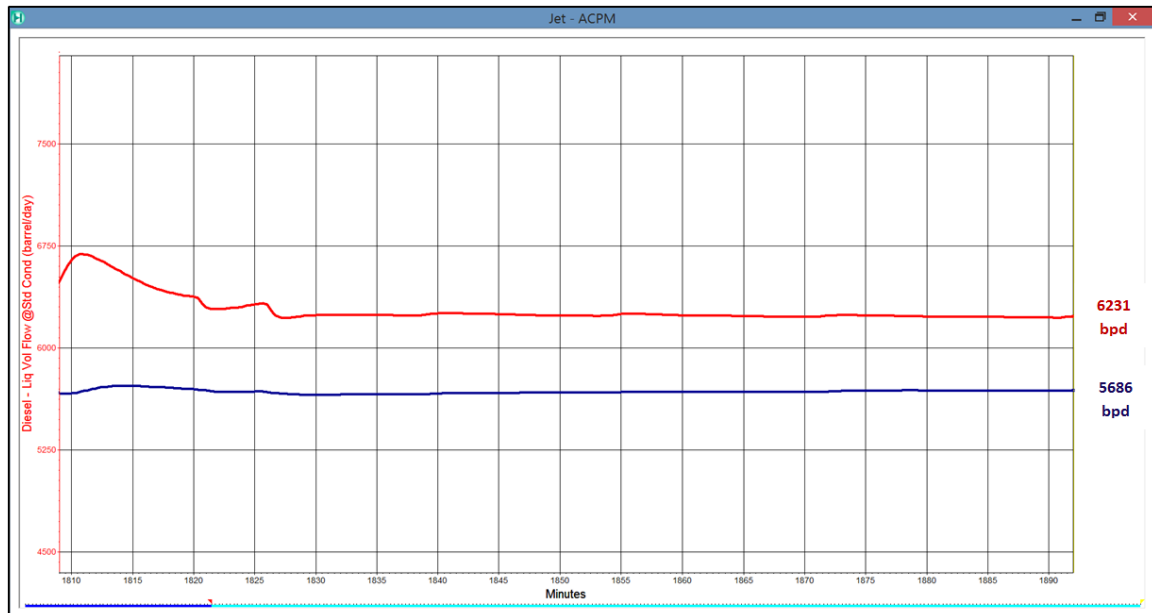
#### 6.4 CAMBIO A DIETA LIVIANA

Al igual que en el capítulo anterior, los flujos de los constituyentes más pesados de la dieta (crudos CAS, SFD y CNT) fueron disminuidos para alcanzar una dieta de crudo liviana. El API ajustado corresponde a 22.5 con lo cual se verifica el cambio en la composición de la carga. En las figuras 62 y 63 se registran los comportamientos de los productos de la columna de destilación ante la perturbación mencionada. Con respecto al mismo escenario analizado en lazo abierto, no hay diferencia en el porcentaje de producción de destilados medios (capítulo 4) (Tabla 19); sin embargo, se reporta un menor tiempo para la estabilidad del proceso en lazo cerrado.

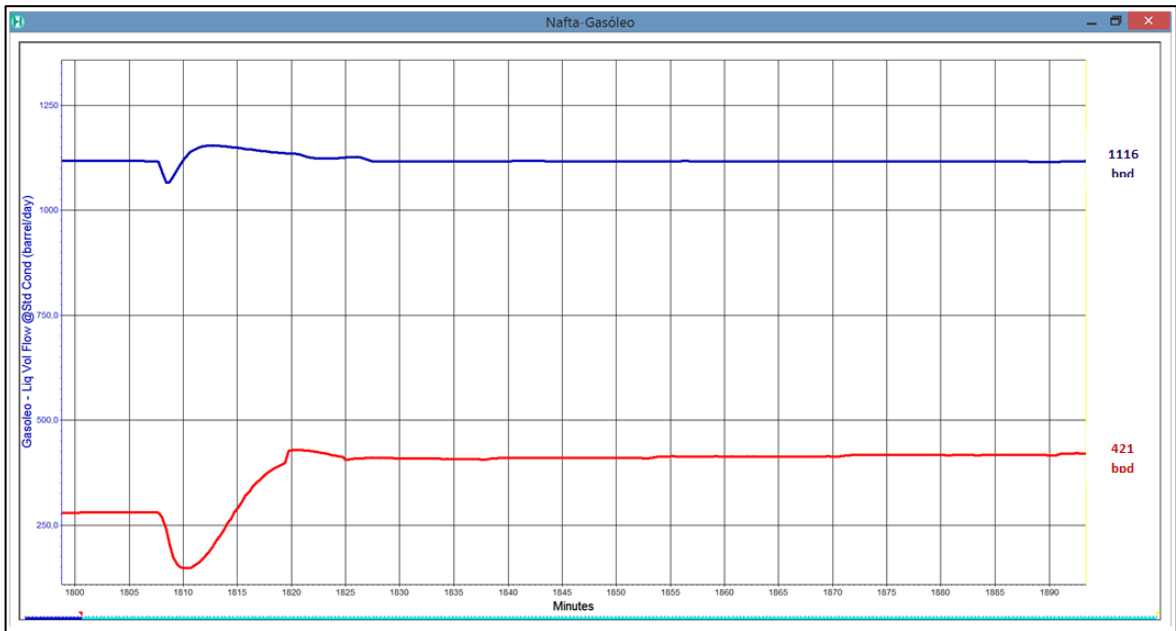
La mayor diferencia del comportamiento del proceso en lazo cerrado respecto al lazo abierto, radica en el menor requerimiento de reflujo superior para controlar la temperatura de los vapores de cima, especificada en 270°F. Comparando estos resultados con los datos de planta (capítulo 2), la temperatura de cima coincide en el valor de 270°F pero el reflujo de cima presenta variaciones apreciables. Al analizar este comportamiento y revisar la operación de la T-250, se identifica la inyección de un flujo no cuantificado de nafta fría al reflujo de cima de la torre

atmosférica proveniente de la segunda etapa de condensación. La inyección de nafta fría se fundamenta en que el líquido acumulado en el tambor de reflujo, no es suficiente para mantener un valor de reflujo y a la vez mantener un nivel adecuado en el tambor de cima. Lo anterior explica las fluctuaciones de los datos históricos para el flujo de nafta; adicionalmente, la entrada de una corriente externa al sistema puede afectar la estabilidad en la operación de toda la torre, afectando la presión de cima.

**Figura 62. Producciones de Jet y Diesel con dieta liviana, en lazo cerrado.**



**Figura 63. Producciones de Nafta y Gasóleo con dieta liviana, en lazo cerrado.**



**Tabla 19. Principales variables estabilizadas con dieta liviana.**

Corriente	Apertura válvula %	Flujo (bpd)	Carga Total (bpd)	Temp entrada (F)	Productos (bpd)					Reflujos					Presión de cima (psig)	Rendimiento destilados medios (%)		
					NAFTA	JET	ACPM	GOA	CR	REF CIMA		REF MEDIO					REF INF	
										Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)	Temp retorno (F)	Flujo (bpd)			Temp retorno (F)	
NUT	59	645	36110	705,8	420	5785	6340	1116	20730	7000	13000	278	9500	507	12,18	33,6%		
GAL	60,0	3900																
PRO	59,8	3214																
CSB	61,0	18600																
PAY	58,0	2650																
CAS	21,3	1050																
NFT	50,0	412																
CAN	61,0	1168																
RUB	59,0	3620																
SFD	20,0	289																
CNT	62,0	562																

De acuerdo con los resultados obtenidos, la simulación en lazo cerrado con una dieta pesada presenta un mejor desempeño en la operación comparado con el mismo escenario evaluado en lazo abierto; *i.e.* el desempeño en lazo cerrado presenta un aumento en la producción de destilados medios y la operación reporta menor tiempo para lograr la estabilidad, lo cual es muy conveniente para la

integralidad de la planta. Con dietas de crudo más livianas (en lazo cerrado y lazo abierto) no se reportan cambios en las producciones, pero igualmente en lazo cerrado, el proceso requiere un menor tiempo para alcanzar el estado estable.

## **7. EFECTOS DEL DESARROLLO DEL TRABAJO DE APLICACIÓN**

Una de las principales causas del desempeño inadecuado de los controladores avanzados de procesos en la industria de refinación del petróleo, es el error de modelado, originado a su vez por cambios presentados en las plantas de proceso, tales como variaciones de la dieta de crudo, ensuciamiento de intercambiadores y modificaciones realizadas en las plantas. Una vez detectado este error se hace preciso realizar una nueva identificación del modelo, con el fin de tener parámetros actualizados del mismo. Sin embargo, el proceso de identificación de un sistema tan complejo como los involucrados en procesos petroquímicos no es sencillo. La identificación a nivel de planta requiere la perturbación por meses del proceso con el objeto de realizar los cambios necesarios y obtener los datos para modelar la dinámica completa de la planta; lo anterior claramente representa pérdidas cuantiosas para cualquier empresa de refinación. Una alternativa a este procedimiento es justamente la re-identificación mediante el uso de simuladores comerciales; esto es, la re-identificación de la planta operada sin detener el proceso, o más concretamente, sin realizar perturbaciones en el sistema.

La principal contribución de este trabajo a la optimización de los procesos de la GRB y consecuentes beneficios económicos, es demostrar como el uso de la simulación para la generación de datos preliminares que pueden ser utilizados para la identificación y la re-identificación de los modelos en los controladores avanzados de procesos en unidades de destilación atmosférica. Los resultados de este trabajo permiten validar el uso de simuladores comerciales para representar la dinámica de la planta y obtener información valiosa que puede ser utilizada para guiar la actualización de los modelos del controlador avanzado de procesos para una columna de destilación atmosférica. Adicionalmente, el desarrollo del presente trabajo será un punto de partida para profundizar en el campo de la optimización

de los sistemas de control, lo cual tiene un gran impacto en la economía y es aplicable a otros procesos de producción en la refinería de Barrancabermeja.

En términos económicos, la re-identificación de los modelos de un controlador avanzado de procesos para una planta de destilación atmosférica, permite la recuperación de los beneficios del mismo, los cuales representan ingresos económicos adicionales aproximados para la compañía de ca. 0.1 US/Barril [12].

## 8. CONCLUSIONES

De acuerdo a las pruebas realizadas, la simulación en estado estacionario y dinámico responde de manera satisfactoria a las perturbaciones realizadas en flujo de carga, relaciones de reflujo y composición de la carga, con base en estos resultados, es posible concluir que la simulación en HYSYS logra una representación adecuada de la operación real de la T-250. Con lo cual, la simulación desarrollada en el presente trabajo constituye una herramienta de gran valor que puede ser utilizada para guiar la actualización de los modelos del control avanzado de procesos (DMC), de la torre de destilación atmosférica T-250.

Los cambios en la dieta de crudo carga a la columna de destilación atmosférica, tienen gran impacto en la dinámica del proceso y en la producción de combustibles de alto valor comercial. De acuerdo con los resultados de la simulación, con una disminución en la relación de crudos pesados CAS y CNT, se pueden obtener rendimientos de productos medios adicionales de 2.6% respecto a la carga de crudo. De otro lado, con una carga de crudo muy próxima a la máxima capacidad, la columna de destilación atmosférica presenta una disminución en los rendimientos de producción de Jet y Diésel.

Las funciones de transferencia identificadas representan una estimación adecuada de las tendencias de la operación de la T-250. Particularmente, la función de transferencia del reflujo inferior con el rendimiento de crudo reducido, nos indica que un incremento en el reflujo inferior en la columna tiene mayor efecto en el incremento del crudo reducido que en la recuperación de gasóleo atmosférico.

La simulación en lazo cerrado no reporta incrementos significativos en la producción de combustibles de la torre atmosférica ante las mismas

perturbaciones en lazo abierto. La diferencia radica en una mejor respuesta ante las perturbaciones y menor tiempo para alcanzar el estado estable.

## **9. RECOMENDACIONES**

Los resultados del presente trabajo de aplicación sugieren que el comportamiento de la T-250 puede conllevar a diferentes escenarios, por lo cual se recomienda programar al interior del control avanzado de la unidad (DMC), los diferentes modelos de respuesta para cada caso, con el objetivo de sacar el máximo provecho al crudo cargado a la unidad. Estos modelos de respuesta pueden ser, en primera instancia, los expresados por las funciones de transferencia identificadas en el capítulo 3.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFÍA

- [1] L Gallinelli, "Studies on dynamics and control issues complex distillation columns using rigorous," *Chemical Engineering*, pp. 635-640, 2005.
- [2] J.P. Wouquier, *El refino del petróleo, petróleo crudo. Productos petrolíferos, esquemas de fabricación.*: Díaz de Santos, 2004.
- [3] David S.J.Jones, *Handbook of Petroleum Processing*, 2006th ed., Springer, Ed. Netherlands: Springer, 2006.
- [4] R.N. Watkins, *Petroleum Refinery Distillation*. Houston: Gulf publishing company, 1979.
- [5] Ecopetrol S.A., *Manual de procesos planta U-250*, TIPIEL S.A., Ed. Barrancabermeja, Colombia, 2005.
- [6] Gabriele Pannocchia, Lorenzo Gallinelli, Alessandro Brambilla, Gabriele Marchetti, and Filippo Trivella, "RIGOROUS SIMULATION AND MODEL PREDICTIVE," in *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, Gramado, Brazil, Italia, 2006.
- [7] Raja Kumar More, Vijaya Kumar Bulasara, Ramgopal Uppaluri, and Vikas R. Banjara, "Optimization of crude distillation system using aspen plus: Effect of binary feed selection on grass-root design," *Chemical engineering research and design. ELSEVIER*, no. 88, pp. 121–134, 2010.
- [8] Abhijit S Badwe, Ravindra D Gudi, Rohit S Patwardhan, Sirish L Shah, and Sachin C Patwardhan, "Detection of model-plant mismatch in MPC applications," *Journal of Process Control*, pp. 1305-1313, 2009.
- [9] K. Anitha, T. Shuwana, and V. R. Kumar, "Simulation of Atmospheric and Vacuum Crude Units Using Aspen Plus," *Petroleum Science and Technology*, no. 29, pp. 1885-1894, Agosto 2011.
- [10] Miguel Ángel García Gallego, *Hysys. Destilación atmosférica de crudo*

*petrolifero.*, 2006.

- [11] Susana Luque Rodríguez and Vega Granda Aurelio B, *Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos: HYSYS*, Tercera ed., Susana Luque Rodríguez, Ed. Oviedo, España, 2005.
- [12] William M. Canney, "The future of advanced process control promises more benefits and sustained value," *OIL&GAS JOURNAL*, 2003.
- [13] Thomas Badgwell S. Joe Qin, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control Engineering Practice*, pp. 733-764, 2003.
- [14] Eder Hans, "Multivariable control," *Chemical Engineering*, pp. 46-51, 2007.
- [15] D Q Mayne, J B Rawlings, C V Rao, and P Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," *Automatica*, p. 36, 2000.
- [16] Minh Tran , Dimitrios K Varvarezos, and Mohamad Nasir, "The importance of first-principles, model-based steady-state gain calculations in model predictive control - a refinery case study," *Control Engineering Practice*, pp. 1369-1382, 2005.

## BIBLIOGRAFIA

ABHIJIT S BADWE, RAVINDRA D GUDI, ROHIT S Patwardhan, Sirish L Shah, and Sachin C Patwardhan, "Detection of model-plant mismatch in MPC applications," Journal of Process Control, pp. 1305-1313, 2009.

CANNEY William M, "The future of advanced process control promises more benefits and sustained value," OIL&GAS JOURNAL, 2003.

D Q MAYNE, J B RAWLINGS, C V RAO, AND P SCOKAERT, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," Automatica, p. 36, 2000.

ECOPETROL S.A., Manual de procesos planta U-250, TIPIEL S.A., Ed. Barrancabermeja, Colombia, 2005.

GARCÍA GALLEGO Miguel Ángel, Hysys. Destilación atmosférica de crudo petrolífero., 2006.

HANS Eder, "Multivariable control," Chemical Engineering, pp. 46-51, 2007.

J.P. WOUQUIER, El refino del petróleo, petróleo crudo. Productos petrolíferos, esquemas de fabricación.: Díaz de Santos, 2004.

K. ANITHA, T. SHUWANA, AND V. R. Kumar, "Simulation of Atmospheric and Vacuum Crude Units Using Aspen Plus," Petroleum Science and Technology, no. 29, pp. 1885-1894, Agosto 2011.

L. GALLINELLI, "Studies on dynamics and control issues complex distillation columns using rigorous," Chemical Engineering, pp. 635-640, 2005.

LUQUE RODRÍGUEZ Susana and VEGA GRANDA Aurelio B, Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos: HYSYS, Tercera ed., Susana Luque Rodríguez, Ed. Oviedo, España, 2005.

MINH TRAN , Dimitrios K Varvarezos, and Mohamad Nasir, "The importance of first-principles, model-based steady-state gain calculations in model predictive control - a refinery case study," Control Engineering Practice, pp. 1369-1382, 2005.

PANNOCCHIA Gabriele, GALLINELLI, Lorenzo BRAMBILLA Alessandro, MARCHETTI Gabriele, AND TRIVELLA Filippo, "RIGOROUS SIMULATION AND MODEL PREDICTIVE," in International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Gramado, Brazil, Italia, 2006.

R.N. WATKINS, Petroleum Refinery Distillation. Houston: Gulf publishing company, 1979.

RAJA KUMAR MORE, VIJAYA KUMAR BULASARA, RAMGOPAL UPPALURI, AND VIKAS R. BANJARA, "Optimization of crude distillation system using aspen plus: Effect of binary feed selection on grass-root design," Chemical engineering research and design. ELSEVIER, no. 88, pp. 121–134, 2010.

S.J.JONES, David Handbook of Petroleum Processing, 2006th ed., Springer, Ed. Netherlands: Springer, 2006.

THOMAS BADGWELL S. JOE QIN, "A survey of industrial model predictive control technology," Control Engineering Practice, pp. 733-764, 2003.