

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE
SEPARADORA T-4702, DE LA PLANTA DE HIDROTRATAMIENTO DE DIÉSEL
U-4700, CON EL FIN DE INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE JET
HIDROTRATADO Y ESTABLECER SU POTENCIAL FINANCIERO**

JULIO CÉSAR HURTADO LEÓN



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

2017

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE
SEPARADORA T-4702, DE LA PLANTA DE HIDROTRATAMIENTO DE DIÉSEL
U-4700, CON EL FIN DE INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE JET
HIDROTRATADO Y ESTABLECER SU POTENCIAL FINANCIERO**

JULIO CÉSAR HURTADO LEÓN

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Química

Director

LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO

Ingeniero Químico, PhD.

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

2017

DEDICATORIA

***A mi esposa, Martha Isabel
y a mis hijos, Daniel y Juliana***

quienes son el pilar de mi vida y fueron un apoyo incondicional durante todo mi tiempo de formación

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS ECOPETROL, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de vida con una formación en postgrado, contribuyendo también al mejoramiento productivo de la compañía.

Al profesor Luis Javier, por su dedicación, incontable apoyo y aliento para culminar esta importante etapa de mi vida.

A los estudiantes, Camila Margarita Ramírez Beltrán y Álvaro Javier Vesga Gavanzo, por su excelente trabajo, y a Mónica Andrea Moya por su valiosa ayuda y asesoría.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. HISTORIA Y MARCO TEÓRICO	20
1.1 HISTORIA	20
1.2 MARCO TEÓRICO	25
1.2.1 Diseño de la Unidad U-4700	25
1.3 ESTADO DEL ARTE	28
2. METODOLOGÍA	34
2.1 CONTEXTUALIZACIÓN Y ALCANCE	34
2.2 TABULACIÓN Y CÁLCULOS DE LOS DATOS HISTÓRICOS DE LA UNIDAD	36
2.3 DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	38
2.4 VALORES ATÍPICOS	39
2.4.1 Análisis de datos para recuperación de jet	39
2.4.2 Análisis de datos para punto de congelación.....	39
2.5 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE DATOS PARA EL MODELO	40
2.5.1 Análisis Primario	40
2.5.2 Análisis Secundario	40
2.6 VALIDACIÓN DEL MODELO Y CÁLCULO DE ERRORES.....	40
2.7. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE PERMITAN MEJORAR LA	

RECUPERACIÓN DE JET CUMPLIENDO CON CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD	41
2.7.1 Análisis de la influencia de las condiciones de operación sobre el porcentaje de recuperación y punto de congelamiento del Jet	41
2.7.2 Análisis de sensibilidad de las variables independientes sobre en porcentaje de recuperación y calidad del jet.....	42
2.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	42
2.8.1 Modelo Económico	43
2.8.2. Casos de estudio	44
3. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MODELO	45
3.1 TABULACIÓN Y CÁLCULO DE LOS DATOS HISTÓRICOS DE LA UNIDAD	45
3.2 VALORES ATÍPICOS	46
3.2.1 Análisis de datos para recuperación de jet	46
3.2.2 Análisis de datos para punto de congelación.....	47
3.3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE DATOS PARA EL MODELO	48
3.3.1 Análisis primario.....	49
3.1.1.1 Análisis para el modelo de recuperación de jet.....	49
3.1.1.2 Análisis para el modelo de punto de congelación	52
3.3.2 Análisis secundario	54
3.3.2.1 Análisis para porcentaje de recuperación	55
3.3.2.2 Análisis para punto de congelación	57
3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO Y CÁLCULO DE ERRORES.....	60
3.4.1 Modelo para el porcentaje de recuperación.....	61
3.4.2 Modelo para el punto de congelación	62

4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE PERMITAN MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE JET CUMPLIENDO CON CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD	64
4.1 CORRELACIÓN DE VARIABLES CON LA RECUPERACIÓN DE JET	64
4.2 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES CON EL PUNTO DE CONGELACIÓN	66
4.3 ECUACIONES DEL MODELO	68
4.4 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS	69
4.5 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN Y CALIDAD DEL JET	76
4.5.1 Variación de jet (carga) y respuesta de los modelos	77
4.5.2 Variación de diésel (carga) y respuesta de los modelos	78
4.5.3 Variación de temperatura de entrada (T-4702) y respuesta de los modelos	79
4.5.4 Variación de reciclo (T-4702) y respuesta de los modelos.....	80
4.5.5 Variación de temperatura de cima (T-4702) y respuesta de los modelos	80
4.5.6 Variación de temperatura línea de jet y respuesta de los modelos.....	81
4.5.7 Variación de temperatura de fondos (T-4702) y respuesta de los modelos	82
4.5.8 Variación de presión de cima (T-4702) y respuesta de los modelos.....	82
4.5.9 Variación de presión en línea de jet y respuesta de los modelos	83
4.5.10 Variación de presión de fondos (T-4702) y respuesta de los modelos	84
4.5.11 Tabla resumen de intervalos de operación sugeridos para las variables independientes de los modelos.....	84
5. RESULTADOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE AUMENTAN EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN VOLUMÉTRICO DE JET	87

5.1 CASOS DE MAYOR RECUPERACIÓN DE JET	88
5.2 CASOS MEDIOS DE RECUPERACIÓN DE JET	89
5.3 CASOS DE MENOR RECUPERACIÓN	90
5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
6. CONCLUSIONES	93
7. RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	101
ANEXOS.....	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Banda de Proyección Demanda de Diésel	22
Figura 2. Esquema de la planta de Hidrotratamiento	25
Figura 3. Esquema de Proceso en Unidad de Hidrotratamiento U-4700	27
Figura 4. Esquema de torre separadora de diésel y jet	36
Figura 5. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos de porcentaje de recuperación de Jet	46
Figura 6. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos de porcentaje recuperación de Jet (Aumento de frecuencia de distribución 3% - 97%)	47
Figura 7. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos para punto de congelación	48
Figura 8. Distribución del error de % de recuperación de Jet	62
Figura 9. Distribución del error para punto de congelación	63
Figura 10. Correlación entre la temperatura de entrada TI 47074 y el porcentaje de recuperación	65
Figura 11. Gráfica entre la temperatura de entrada (°F) Vs Punto de congelación (°C)	67
Figura 12. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Jet (Carga U-4700)	77
Figura 13. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Diésel (Carga U-4700)	78
Figura 14. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de entrada	79
Figura 15. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Reciclo	80
Figura 16. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de cima	80

Figura 17. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura
línea de Jet81

Figura 18. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de
fondos82

Figura 19. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión de cima82

Figura 20. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión en línea
de Jet83

Figura 21. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión de fondos...84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Perfil de alimentación a la unidad de hidrotratamiento U-4700.....	22
Tabla 2. Resultados estudio de Cordido, Guerra y Pérez.....	29
Tabla 3. Ejemplo datos de laboratorio de la curva de destilación (ASTM D86) de la carga a la unidad.....	37
Tabla 4. Porcentajes de recuperación de jet históricos calculados.....	45
Tabla 5. Parámetros estimados para el modelo inicial de porcentaje de recuperación de Jet	49
Tabla 6. Efectos significativos para el modelo inicial de porcentaje de recuperación de Jet	50
Tabla 7. Parámetros estimados para el modelo inicial de punto de congelación...	52
Tabla 8. Efectos significativos para el modelo de punto de congelación del Jet....	53
Tabla 9. Parámetros lineales y cuadráticos del modelo mejorado de recuperación de Jet.	56
Tabla 10. Parámetros cruzados del modelo mejorado de recuperación de Jet	56
Tabla 11. Parámetros lineales del modelo mejorado de punto de congelación	58
Tabla 12. Parámetros cruzados del modelo mejorado de punto de congelación...	59
Tabla 13. Error estimado por cada caso para el porcentaje de recuperación de Jet.....	61
Tabla 14. Error estimado por cada caso para el punto de congelación del Jet.....	63
Tabla 15. Resumen de intervalos de operación seleccionados para las variables independientes que tienen un efecto en el porcentaje de recuperación de jet	65
Tabla 16. Resumen de intervalos de operación seleccionados para las variables independientes que tienen un efecto en el punto de congelación	67
Tabla 17. Valores promedio de las variables independientes.....	70

Tabla 18. Resultado del análisis de los casos planteados.....	71
Tabla 19. Promedio de los casos planteados	72
Tabla 20. Resultado de los casos de mayor recuperación	73
Tabla 21. Promedio de los casos planteados	73
Tabla 22. Resultado de los casos de menor recuperación	74
Tabla 23. Promedios de menores	74
Tabla 24. Resultado de los casos de recuperación media.....	75
Tabla 25. Promedio.....	75
Tabla 26. Valores promedio de las variables independientes	76
Tabla 27. Sugerencia de intervalos de variables independientes para modelo de porcentaje de recuperación de Jet.....	85
Tabla 28. Sugerencia de intervalos de variables independientes para modelo de punto de congelación del Jet	86
Tabla 29. Ejemplo del análisis económico de los valores de mayor de recuperación de jet	88
Tabla 30. Ejemplo del análisis económico de los valores medios de recuperación de Jet	90
Tabla 31. Ejemplo del análisis económico de los valores de menor de recuperación de jet	91
Tabla 32. Características mejor escenario económico	92

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Errores de los modelos.....	108
Anexo B. Mejores condiciones de porcentaje de recuperación	114
Anexo C. Mejores condiciones con punto de congelación (°C)	119
Anexo D. Escenarios económicos	124

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE SEPARADORA T-4702, DE LA PLANTA DE HIDROTRATAMIENTO DE DIÉSEL U-4700, CON EL FIN DE INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE JET HIDROTRATADO Y ESTABLECER SU POTENCIAL FINANCIERO

AUTOR: Hurtado León, Julio César**

PALABRAS CLAVES: Hidrotratamiento, Diésel, Jet, destilación, separación, modelo matemático, modelo estadístico

DESCRIPCIÓN:

Para lograr el cumplimiento de las leyes medioambientales (la Ley 1180 de 2006 y posterior resolución 1205 de 2008), la empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL debía limitar el contenido de azufre de sus productos finales a máximo 50 ppm. Dado esto, se requirió realizar modificaciones al diseño original de la planta de hidrotratamiento de diésel U-4700 para cumplir con la especificación y a su vez se decidió aumentar la capacidad de producción de 56,6 kBPD A 60 kBPD. Sin embargo, se ha evidenciado que parte de la carga de jet alimentada no es recuperada en la torre T-4702, lo que se traduce en una disminución del margen financiero de la operación. El propósito de este trabajo fue estudiar el efecto de las condiciones de funcionamiento de la unidad para proponer expresiones de correlación del efecto de las condiciones de operación sobre el rendimiento de recuperación y calidad del jet que se obtiene de la torre T-4702, determinando un conjunto de condiciones operativas y económicamente viables, que permitan aumentar los porcentajes de recuperación manteniendo los requerimientos de calidad del jet hidrotratado.

Para esto, inicialmente se recopiló y se analizó estadísticamente la influencia de los parámetros de operación sobre el porcentaje de recuperación. Seguidamente se ajustó el porcentaje de recuperación y el parámetro de calidad (punto de congelación) a funciones matemáticas no lineales con la interacción. Después, se evaluaron los modelos matemáticos en escenarios operacionales en los que se opera comúnmente la unidad. Finalmente, se evaluó el margen de utilidad que se obtiene cuando la unidad de hidrotratamiento opera en las condiciones que permiten aumentar los porcentajes de recuperación manteniendo los requerimientos de calidad del jet.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Luis Javier López Giraldo

ABSTRACT

TITLE: ASSESSMENT OF OPERATING CONDITIONS OF SEPARATOR TOWER T-4702, OF DIESEL HYDROTREATING PLANT U-4700, IN ORDER TO ITS FINANCIAL POTENTIAL*

AUTOR: Hurtado León, Julio César**

KEYWORDS: Hydrotreating, Diesel, Jet, Distillation, Separation, mathematical model, statistical model, freezing point, percentage of Recovery

DESCRIPTION:

According to Environmental Laws (Law 1180 of 2006 and subsequent resolution 1205 of 2008), ECOPETROL (Empresa Colombiana de Petroleos) have had to limit the sulfur content of their final products to maximum 50 ppm. For achieve this goal, the company required to perform modifications to the original design of the diesel hydrotreater plant U-4700; and taking advantage of this changes, the company decided to increase the production capacity since 56.6 kBPD a 60kBPD. However, after the modifications, evidence showed that some of the burden fed jet is not recovered in the tower T-4702, situation which have negative economic consequences. The purpose of this project was to study the effect of the operating conditions onto the Unit to propose mathematical expressions capable to show the effect of operating conditions on the performance of recovery (%) and stream quality obtained from the tower T-4702, and establish viable conditions (economically and operationally) that allows increase recovery rates keeping the quality requirements of hydrotreated jet.

The data of operating parameters was studied and analyzed statistically to discover the influence of the operating parameters on the percentage of recovery. This percentage of recovery and the quality parameter (freezing point) were adjusted using Nonlinear mathematical functions. Then, the mathematical models obtained in the previous step were evaluated in actual operational scenarios. Finally, the profit margin was obtained.

* Research Degree Project

** Physicochemical Faculty of Engineering, School of Chemical Engineering, Master of Chemical Engineering. Director: Luis Javier López Giraldo, Chemical Engineer, PhD.

INTRODUCCIÓN

La Refinería de Barrancabermeja, perteneciente a la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPETROL S.A., es la encargada de satisfacer la demanda interna de combustibles en el país. Para ello basa su operación en el procesamiento de diferentes tipos de crudos provenientes de los campos de producción operados directa e indirectamente por ECOPETROL.

Si bien los productos de la Refinería de Barrancabermeja son muy variados, este trabajo de aplicación centró su atención en el impacto de las condiciones de operación en la torre de destilación T4702 sobre la calidad del jet A1, utilizado en la industria de la aviación para el funcionamiento de los motores de combustión interna. Para ello se propone y valida un modelo empírico que describe el rendimiento y calidad de jet hidrotratado, producto del proceso llevado a cabo en la planta de hidrotratamiento de diésel U-4700, específicamente en la columna T4702, como una función de las condiciones de proceso.

En la primera parte de este documento se presenta un breve resumen de la historia de la planta de hidrotratamiento y de los esfuerzos de ECOPETROL por cumplir con las regulaciones ambientales vigentes, además de una explicación de la unidad U4700. Adicionalmente, se expone el estado del arte de los modelos matemáticos hallados en la revisión bibliográfica.

En la segunda parte, se describe la metodología empleada, el desarrollo de dicha metodología con sus respectivos resultados y análisis, presentando el modelo obtenido que permite predecir el funcionamiento de la unidad de hidrotratamiento con un nivel de error aceptable. Finalmente, en la tercera parte, se presenta la

evaluación económica de las condiciones de operación para la recuperación de jet, y se enumeran algunas conclusiones y recomendaciones del trabajo global.

1. HISTORIA Y MARCO TEÓRICO

1.1 HISTORIA

A comienzo del año 2000 se percibe la necesidad de que a futuro los combustibles comercializados por ECOPETROL S.A. deben cumplir con los requerimientos establecidos por la ley asociados con el contenido de azufre. En Colombia, se han legislado dos leyes importantes: la ley 1180 de 2006, la cual establece que el producto de venta final al público debe tener un contenido máximo de azufre de 500 ppm, y la resolución 1205 de 2008 que limita el contenido de azufre a un máximo de 50 ppm.

Acatando el cumplimiento de la ley 1180 de 2006, la Refinería de Barrancabermeja, proyectó la construcción y puesta en marcha de la unidad de hidrotratamiento de combustible (HDT); ésta incluye 7 unidades: 2 hidrotratadoras, 1 generadora de hidrógeno y 4 unidades para el tratamiento de amina, aguas agrias y azufre. Hacia el año 2008 se inicia su construcción y en el año 2010 entran en operación todas las unidades con una capacidad de producción global de 56 000 barriles por día (BPD). Una de las plantas de la HDT es la unidad hidrotratadora de diésel, U-4700. Inicialmente la unidad fue diseñada por la firma AXENS S.A. con el objetivo de disminuir el contenido de azufre del diésel producido en las unidades de destilación atmosférica (UDA), de 5 500 a 500 ppm.

Debido a que las regulaciones ambientales se tornaron más estrictas con la expedición de ley 1205 de 2008, hubo la necesidad de replantear la unidad de tratamiento de manera que ésta fuera capaz de producir dos tipos de diésel: un diésel pesado de 28 ppm de azufre y un diésel liviano (jet) de 5 ppm de azufre. Adicionalmente se produciría una fracción liviana de gasolina denominada

wildnafta por su alto contenido de H₂S. Estos cambios implicaron la adición de un nuevo reactor, una torre de tratamiento con amina y la repotenciación de algunas bombas.

Durante la construcción de las unidades, la Refinería encontró la necesidad de producir un fluido llamado “cuña” que permitiera transportar el diésel de bajo azufre a través de los oleoductos hacia el interior del país. Éste fluido debería ser compatible con el producto a transportar y ser de muy bajo contenido de azufre para evitar la contaminación del diésel.

Teniendo en cuenta que en algunas de las unidades de destilación atmosférica (UDA) se produce un jet que no cumple con las especificaciones de calidad cuando se carga crudo de alto número de ácido, se validó con los licenciadores la posibilidad de llevar ésta corriente a la unidad hidrotratadora de diésel, para que a través del hidrotratamiento se pudiera mejorar la condición de calidad y recuperarlo en la torre separadora de diésel, T-4702, como un diésel liviano con características de jet, y finalmente ser usado como “cuña”. Luego, debido a las características similares de destilación entre el diésel y el aceite liviano de ciclo (ALC) proveniente de las unidades de *cracking*, se validó con el licenciador la posibilidad de cargar esta corriente aumentando su valor comercial al pasar de componente del combustóleo a diésel de bajo azufre. Finalmente, la operación cotidiana de la unidad HDT (U-4700) y las dietas que se alimentan normalmente son las mostradas en la tabla 1 en donde se muestra las posibles mezclas de diésel pesado, liviano, ALC y Jet.

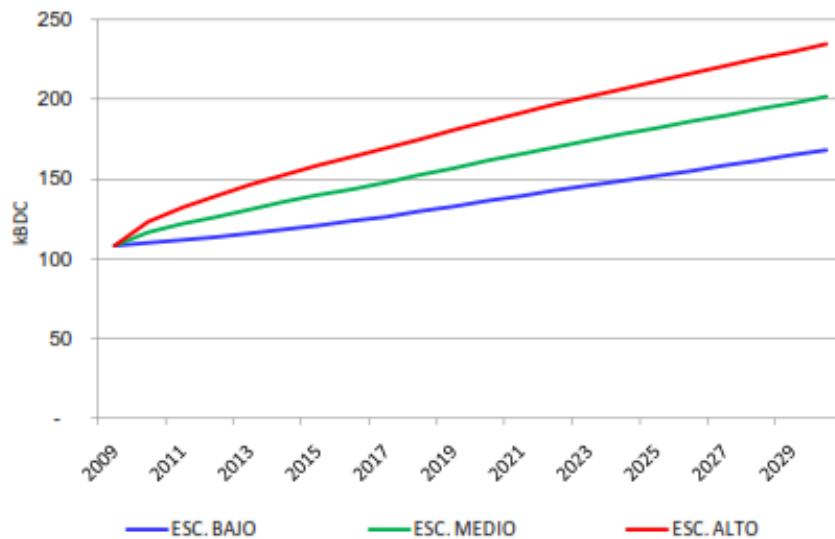
Tabla 1. Perfil de alimentación a la unidad de hidrotreatmento U-4700

Casos	Caso 1		Caso 2.1		Caso 2.3		Caso 3.1	
	%	BPDP	%	BPDP	%	BPDP	%	BPDP
Diésel Pesado	83,4	47 200	79,5	45 000	79,5	45 000	79,5	45 000
Diésel Liviano	0	0	15,2	8 600	3,5	2 000	20,5	11 6000
Jet 1A	0	0	5,3	3 000	17	9 600	0	0
Liviano (LCO)	16,6	9 400	0	0	0	0	0	0
Total	100	56 600	100	56 600	100	56 600	100	56 600

Fuente: AXENS, Process Design Book. HDT Project – Barrancabermeja Refinery Diesel Hydrotreating unit, unit 4700. January 2010.

Teniendo en cuenta la alta demanda de diésel en el país según proyecciones del Ministerio de Minas y Energía (ver figura 1), se evaluó la posibilidad de aumentar la carga a la unidad de 56,6 kBPD hasta 60,0 kBPD.

Figura 1. Banda de Proyección Demanda de Diésel



Fuente: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPÚBLICA DE COLOMBIA. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA Proyección de demanda de combustibles líquidos y GNV en Colombia. Octubre 2010.

La evaluación se hizo a través de una (1) corrida (*Informe Interno de la Empresa - Informe corrida de desempeño de la unidad de hidrotreatmento de diésel a carga máxima (60 kBPD). 03/08/2011*); los resultados obtenidos demuestran que la unidad tiene la capacidad de procesar un volumen de 60 kBPD con un máximo de 10,2 kBPD de jet como componente de la carga.

El aumento en la producción a nivel operativo implicó:

1. Alteraciones en el funcionamiento en elementos como válvula de control de carga, el pre calentador de carga y una bomba
2. Los sistemas de bombeo y compresión presentaron un desempeño satisfactorio, no se evidenciaron afectaciones mecánicas o de proceso como resultado de la corrida
3. Los sistemas de control y el sistema de parada de emergencia de la planta mantuvieron una disponibilidad del 100% y,
4. El sobre diseño de los equipos de la unidad, el cual se encuentran entre un 10% y 30% cubre a satisfacción los nuevos requerimientos de la unidad.

A pesar que con el hidrotreatmento se obtiene un jet que cumple con las características de calidad, la recuperación de éste empleando la torre separadora T-4702 (figura 2) ha evidenciado una baja eficiencia de recuperación. En efecto, se ha demostrado que, bajo las condiciones actuales de operación, en promedio sólo se recupera el 70% del volumen de jet que se adiciona a la dieta de carga de la unidad de hidrotreatmento (PI, ECOPETROL, 2014).

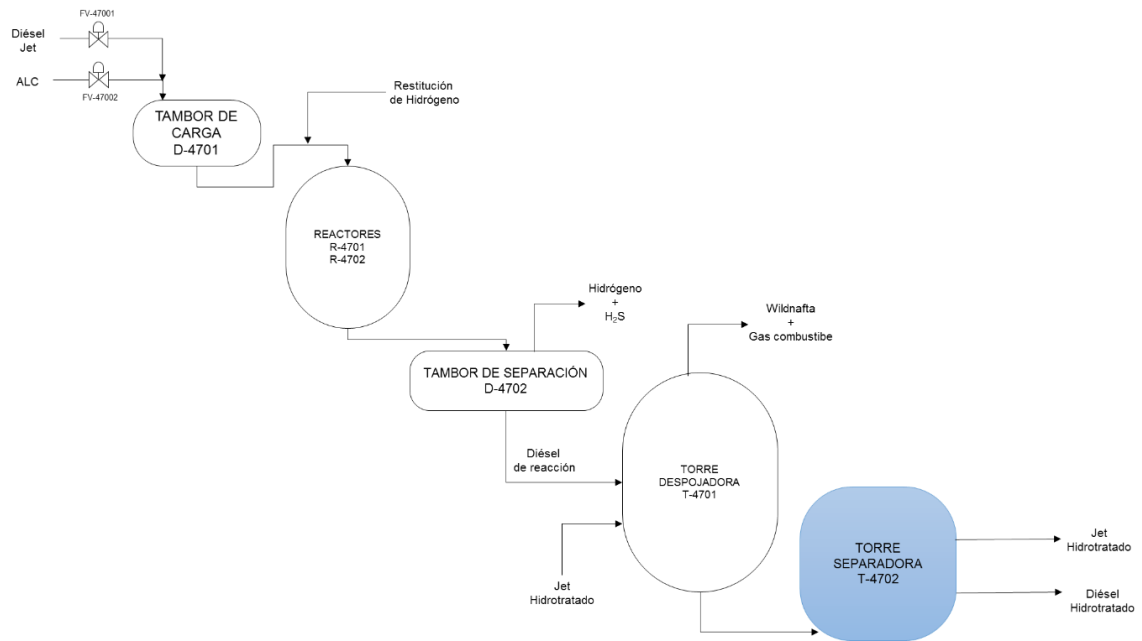
Debido a la baja recuperación que se obtiene en la T-4702, la refinería optó por re direccionar la corriente de jet de alto número de ácido hacia tratamiento con soda, con resultados positivos que han permitido satisfacer la demanda de jet en el país sin necesidad de importar. No obstante, este tratamiento ha incrementado el consumo de soda que ha llegado a 0,4 galones de soda día/barril de jet (según Ingeniero de procesos de la planta), generando un volumen adicional que

incrementa los costos de operación por demanda de insumos y, por tratamiento y disposición de sodas gastadas. No obstante, la planta de soda tiene una limitante de tratamiento de 22 kBPD según su diseño (11 kBPD por cada tren).

Debido a que la producción de Jet en las plantas *destilación primaria* es aproximadamente de 25 kBPD, un total de 3 kBPD no se pueden tratar en la planta de soda por lo que son direccionados hacia la corriente de diésel liviano. La planta funciona mejor con menos consumo de soda, y por ende con una carga menor a los 25 kBPD (18 kBPD o 20 kBPD). Sin embargo, ya que a la fecha el porcentaje de recuperación de jet no es óptimo, la dirección de la empresa prefiere trabajar a carga plena. De esta manera, si el porcentaje de recuperación de jet y su calidad fueran mejorados en la T-4702, se incrementaría no sólo la producción de un diésel liviano de mejor calidad, sino que se disminuiría el consumo de soda y se obtendrían mejores resultados globales.

Así las cosas, se requiere estudiar el efecto de las condiciones de funcionamiento de la unidad con el fin de determinar la factibilidad de determinar un conjunto de condiciones operativa y económicamente alcanzables, que permitan aumentar el porcentaje de rendimiento y la cantidad, tanto del jet como del diésel obtenido.

Figura 2. Esquema de la planta de Hidrotratamiento



1.2 MARCO TEÓRICO

La información presentada en esta sección fue obtenida del manual de proceso de la planta de la refinería (AXENS, Process Design Book. HDT Project – Barrancabermeja Refinery Diesel Hydrotreating unit, unit 4700. January 2010), y complementada con el conocimiento y experiencia del autor del presente proyecto.

1.2.1 Diseño de la Unidad U-4700. La unidad de hidrotratamiento de diésel está diseñada por la firma AXENS S.A. con la tecnología Prime D+TM para tratar una mezcla de diésel y jet provenientes de las unidades de destilación atmosférica (UDA), y aceite liviano de ciclo (ALC) proveniente de las unidades de cracking catalítico (URC); para obtener un producto liviano con características de jet y un producto pesado (diésel) con un contenido mínimo de azufre.

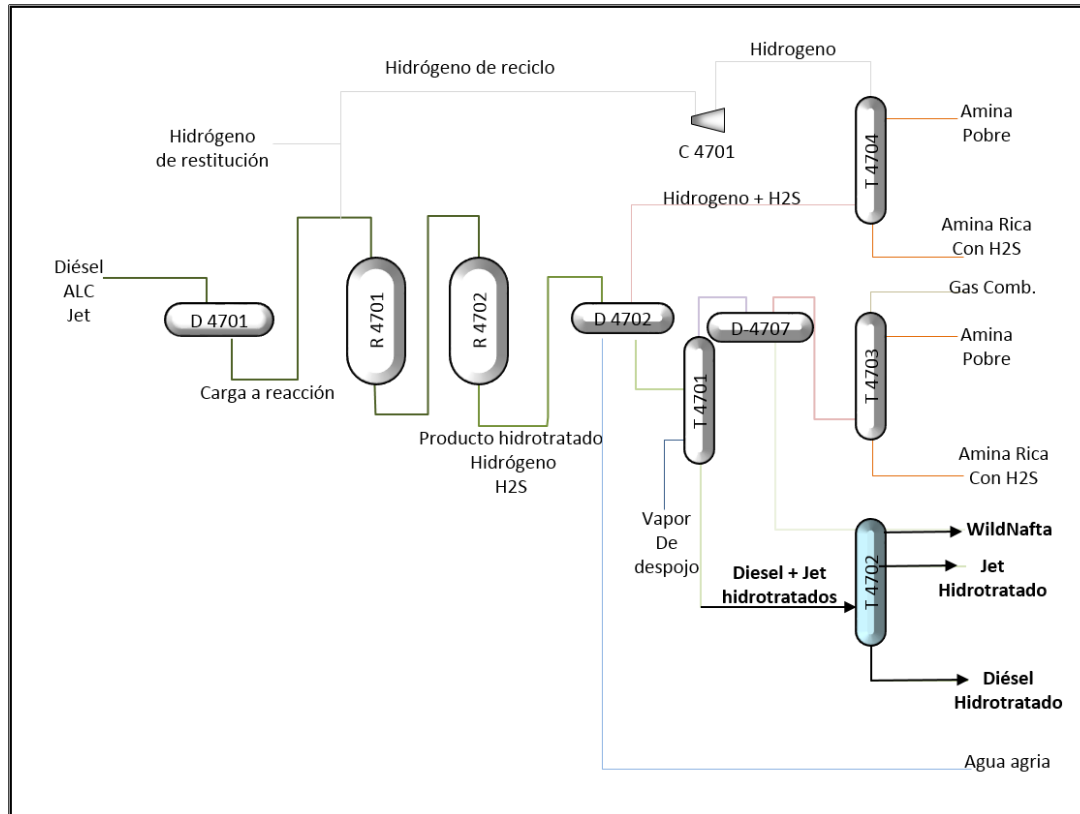
En la figura 3, se puede apreciar un esquema tipo caja negra de las entradas y salidas de la unidad de hidrotreatmento de diésel.

A un nivel más detallado la carga a la unidad proveniente de las UDA y de las URC entran a la planta de hidrotreatmento y se mezclan en un tambor de estabilización (D 4701) y luego son enviadas a la sección de reacción, que cuenta con dos reactores en serie (R4701 y R4702), en donde en contacto con hidrógeno y gracias a un catalizador es transformado gran parte del azufre que la carga contiene. La planta está diseñada para retirar 99,4% en peso de azufre (según Ingeniero de Proceso de la unidad); proceso que permite obtener un producto de 28 ppm de azufre.

El producto de la reacción pasa a un proceso de separación en un tambor (D4702) donde la fracción liviana de gases, junto con el hidrógeno es dirigida hacia una torre de absorción (T 4704) con amina para retirar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) de la corriente de hidrógeno y poder reutilizar el hidrógeno como reciclo. Los gases son enviados al sistema de gas combustible de la refinería y la amina con H_2S es dirigida a una torre de despojo para retirarle el H_2S y ser retornada al proceso.

El agua generada en la reacción sale por la parte inferior del tambor a través de una bota y seguidamente es tratada en una unidad de despojo en donde se le retira el amoníaco producto de la reacción.

Figura 3. Esquema de Proceso en Unidad de Hidrotratamiento U-4700



La corriente de diésel hidrotratado se lleva a una torre de despojo (T 4701) con vapor de media presión con el objetivo de cambiar la presión parcial de los componentes y extraer la parte liviana y el H₂S arrastrado, por la parte superior de la torre. Cabe destacar que las corrientes laterales de diésel liviano (jet) y diésel pesado (diésel convencional) son el objeto del presente estudio.

Parte de la corriente superior es gasolina con un alto contenido de H₂S por lo que se denomina *wildnafta* y es enviada a la unidad de hidrotratamiento de gasolina para ser recuperada, el gas es dirigido a una torre de absorción (T 4703) con amina para retirarle el H₂S y de ahí es enviado hacia la red de gas combustible de la refinería.

El producto de fondo de la torre despojadora (T 4701) es llevado a una torre separadora a baja presión (T 4702) en donde por calentamiento se separan dos corrientes, una de diésel liviano por la parte media superior y una de diésel pesado por el fondo. La energía para esta separación es suministrada por un horno de combustión.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Realizada una búsqueda bibliográfica en bases de datos disponibles en la UIS, tales como Web of Science y Scopus, y herramientas libres como Google académico; empleando como motores de búsqueda los términos. *model, recovery, prediction, jet, diésel, HDT, diesel and jet separation, freezing point of jet, mathematical models for distillation columns, improve separation of jet and diesel*, no se encontraron trabajos de desarrollo de modelos estadísticos dirigidos a la predicción del porcentaje de recuperación y calidad de jet obtenido en plantas de hidrotreatmento de diésel.

Sin embargo, se encontraron estudios que plantean el uso de modelos estadísticos que predicen algunos comportamientos en la industria de la petroquímica como es el caso del trabajo de Cordido *et al.* (2011), titulado “Modelaje de los principales equipos de la unidad de alquilación de la refinería el Palito” presentados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El objetivo principal de este trabajo fue el de desarrollar correlaciones o modelos estadísticos, a partir de datos operacionales, que permitan predecir con una gran confiabilidad el comportamiento de los principales equipos de la unidad de alquilación de la Refinería El Palito.

La estrategia metodológica utilizada, en primera instancia define el objetivo final de la correlación a desarrollar, para luego proceder a identificar la variable

dependiente y las variables independientes con la ayuda de un programa de computación estadístico, en este caso STATGRAPHICS.

Siguiendo esta metodología, se obtuvieron correlaciones para corrientes de proceso en el despojador de isobutano, el depropanizador y el despojador de ácido. Para determinar si las correlaciones obtenidas con el método estadístico tienen una aceptación estadística y validez operacional se calculó el error entre las variables predichas por las correlaciones, utilizando datos para las variables independientes de fechas posteriores a las usadas, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Resultados estudio de Cordido, Guerra y Pérez

Variable	Máximo error (%)	Error promedio (%)
Pureza de isobutano de reflujo	4,01	2,59
Porcentaje de propano en el isobutano de recicló	13,14	7,53
Porcentaje de n-butano en el isobutano de recicló	10,27	4,87
Pérdida de isobutano en el n-butano	1,59	0,89
RVP del alquilato	4,26	2,76
Punto final de ebullición del alquilato	2,05	0,91
Presión del tope del depropanizador	0,31	0,18

Fuente: CORDIDO, A. GUERRA, A. PÉREZ, S. Modelaje de los principales equipos de la unidad de alquilación de la refinería el Palito. Universidad de Carabobo. Venezuela. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a1n2/ing1.pdf>

Finalmente, el estudio concluyó que:

- La estrategia metodológica utilizada para la obtención de correlaciones entre variables en la unidad de alquilación, resultó efectiva.
- Las correlaciones obtenidas en este estudio tienen aceptación estadística, al igual que aplicación para condiciones operacionales de la unidad de alquilación.

En 2007, la tesis sustentada por Carvalho (2007), ante la Universidad Federal de Rio de Janeiro, para obtener el título de Doctor en Ingeniería Química, plantea una metodología basada en metamodelos. Este es un estudio de un caso real de optimización a escala industrial, basado en una unidad de destilación de petróleo, usando como modelo matemático un simulador secuencial modular Petrox. En este trabajo se muestra la mejora significativa en el rendimiento computacional y de confiabilidad, combinando un modelo riguroso con el meta modelo, permitiendo su uso en la optimización en tiempo real.

Su principal propósito fue el de proponer una metodología para la utilización de meta modelos en la optimización en tiempo real de procesos petroquímicos.

En 2008, López *et al.* (2008), realizaron un estudio denominado “Análisis jerárquico de variables de operación de una torre de destilación de crudo usando datos de planta, modelos de simulación y diseño de experimentos”, mediante el cual se determinaron las variables de operación de mayor impacto sobre los productos blancos (nafta, jet, diésel) de una torre de destilación atmosférica (TDA), considerando composición constante de crudo y calidad de productos medida como punto final de la destilación ASTM D-86.

La significancia estadística de cada efecto se evaluó usando los valores del estadístico P, donde valores de $P < 0,05$ indican que los efectos son significativamente diferentes de cero en un nivel de confianza del 95%.

Como resultado del estudio se encontró que los estadísticos R^2 son capaces de explicar la variabilidad en el rendimiento nafta, jet y diésel en un 99,76; 99,69 y 99,75; respectivamente.

En el trabajo realizado por Castillo (Castillo, 2010) presentado a la Universidad de Oriente, titulado: “Desarrollo de modelos de regresión que representen el

comportamiento del número de octano y rendimiento del reformado de la unidad de reformación catalítica de nafta (U-20) de la refinería Puerto la Cruz-PDVSA”, se desarrollaron modelos de regresión para el número de octano (RONC) y rendimiento del reformado (REND) de la unidad de reformación catalítica de nafta, con el propósito de obtener una ecuación que describa satisfactoriamente el comportamiento de estos parámetros, a través de la unidad ante variaciones tanto en la alimentación como en las variables de proceso. Para ello se procesaron los datos operacionales de la unidad y se graficaron cada una de las variables independientes (gravedad API, temperatura del lecho catalítico, y las temperaturas y presiones de los tambores de recontacto) contra las variables dependientes (RONC y REND), seleccionando aquellas variables que presentaran un grado de relación lineal con las variables dependientes para luego realizar una matriz de correlación para verificar si las variables independientes presentaban o no problemas de multicolinealidad.

Seguidamente se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) con el fin reducir la dimensionalidad del conjunto de datos interrelacionados obteniéndose 9 y 10 componentes para el RONC y REND respectivamente, las cuales fueron sometidas a un análisis de mínimos cuadrados parciales obteniéndose así los coeficientes de estimación necesarios para la construcción de los modelos de regresión, donde el RONC obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,4077 y de 0,8207 para el REND. De este estudio se concluyó que:

- Los métodos de selección de variables resultaron de mucha importancia porque evitaron el problema de sobredimensionar los modelos de regresión.
- Los porcentajes de error relativo más bajos, obtenidos con los modelos fueron de 1,21% para el número de octano y 1,45% para el rendimiento del reformado.

El trabajo realizado por investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Puebla y la Universidad Autónoma de Nuevo León. (Alcántar, R. Treviño, F y

Martínez, J., 2015), titulado: “Modelo estadístico que permite observar el impacto de los factores que inciden en el rendimiento de combustible” propone un modelo estadístico de regresión lineal múltiple para la toma de decisiones sobre el rendimiento de combustible con aplicación a la industria del autotransporte en México considerando los factores con mayor incidencia en el consumo. El modelo aplicado tiene significancia estadística, así como las variables explicativas: tipo de ruta, antigüedad y cantidad de diésel consumido, esto con un nivel de confianza del 95%.

El trabajo se sustenta en la aplicación de un método estadístico para modelar y posteriormente pronosticar el comportamiento de un efecto de interés (rendimiento de combustible), en función de varios factores significativos, tanto cuantitativos como cualitativos (peso, tipo de ruta, antigüedad de la unidad, diésel consumido en “baja”), a través de una regresión lineal múltiple (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

La ecuación utilizada para este caso fue:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \xi \quad \text{EC 1}$$

Donde:

$y =$ *rendimiento de combustible*

$\beta_{0,1,2,3} =$ *constantes del modelo*

$X_1 =$ *Tipo de ruta de operación*

$X_2 =$ *Antigüedad de la Unidad*

$X_3 =$ *Diésel consumido en baja*

El modelo propuesto fue aplicado en una empresa transportista mexicana clasificada como grande dentro del sector, de acuerdo al criterio de ventas, con una flotilla integrada por 176 unidades.

Los trabajos presentados en esta revisión del estado del arte, permiten plantear la hipótesis de trabajo: “es posible correlacionar los datos históricos de la unidad de hidrotratamiento U4700, a través de modelos estadísticos multiparamétricos que permita predecir el porcentaje de jet recuperado y el parámetro de calidad punto de congelación del mismo”.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se empleó para plantear y ajustar el modelo matemático que describe el comportamiento de la torre separadora T-4702; el modelo fue propuesto con un foco especial hacia aumentar el porcentaje de recuperación del jet cumpliendo con el parámetro de calidad de punto de congelación.

2.1 CONTEXTUALIZACIÓN Y ALCANCE

En la sección 1.1 (Historia), en la figura 2, se mostró el proceso de la planta de hidrot ratamiento con cada una de las unidades que la conforman. De manera general, la unidad cuenta con una sección de carga y separación; para las cuales fueron analizadas las variables de proceso usando el método de cajas y bigotes.

Los diagramas de caja y bigotes (boxplots o box and whiskers) son una presentación visual que describe varias características importantes al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría. En general los diagramas de caja y bigotes:

- ✓ Proporcionan una visión general de la simetría de la distribución de los datos; si la mediana no está en el centro del rectángulo, la distribución no es simétrica.
- ✓ Son útiles para ver la presencia de valores atípicos también llamados outliers.
- ✓ Pertenece a las herramientas de la estadística descriptiva. Permite ver como es la dispersión de los puntos con la mediana, los percentiles 25 y 75 y los valores máximos y mínimos.

- ✓ Ponen en una sola dimensión los datos de un histograma, facilitando así el análisis de la información al detectar que el 50% de la población está en los límites de la caja.

El objetivo de dicho análisis es el de determinar cuáles de las variables de operación son más influyentes sobre el porcentaje de recuperación y calidad del jet recuperado de la torre T-4702.

A continuación, se muestran cada una de las variables de operación que fueron consideradas para realizar el análisis estadístico.

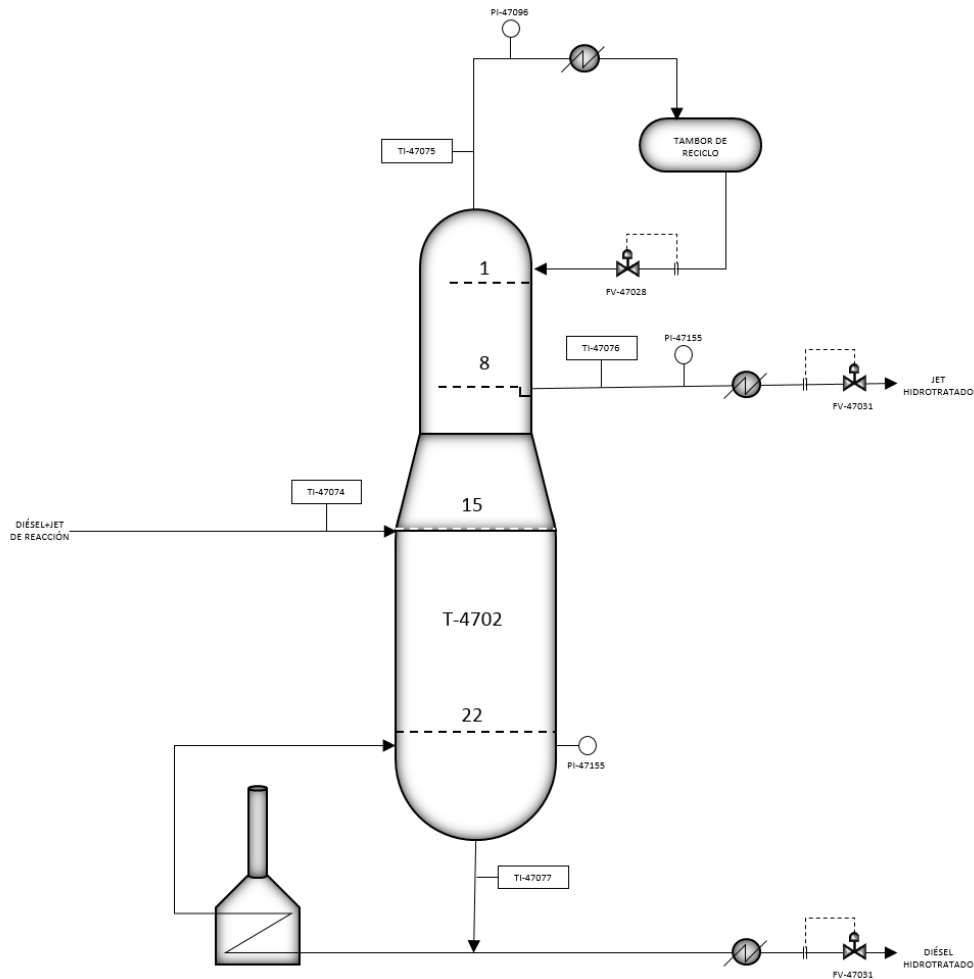
Las cargas a la unidad son controladas con las válvulas FV47001 y FV47002 para diésel y ALC, respectivamente. Es a partir de ellas junto con la caracterización de las curvas de destilación que se calcularon los flujos de jet (x_1) y diésel (x_2) que fueron considerados como variables independientes en el desarrollo del modelo.

En la Figura 4, se identifica el indicador de temperatura de entrada TI-47074 (x_3), a la torre T-4702 que hará parte del modelado como variable independiente. De igual manera la válvula FV-47028 que se controla el reciclo (x_4), los indicadores de temperatura TI-47075, TI-47076, TI-47077 que corresponden a la temperatura de cima (x_5), temperatura en el plato de jet (x_6) y temperatura de fondos (x_7) respectivamente, que fueron consideradas como variables independientes en el desarrollo del modelo. Además, los indicadores de presión PI-47096, PI-47155, PI-47081 que corresponden a la presión de cima (x_8), presión en el plato de jet (x_9) y presión de fondos (x_{10}) respectivamente, las cuales también fueron variables independientes dentro del modelo.

La válvula FV-47031 controla el flujo volumétrico de jet producido. Esta variable fue empleada para calcular matemáticamente el porcentaje de recuperación de jet

obtenido históricamente en la planta de hidrot ratamiento de diésel durante los años 2012 a 2014.

Figura 4. Esquema de torre separadora de diésel y jet



2.2 TABULACIÓN Y CÁLCULOS DE LOS DATOS HISTÓRICOS DE LA UNIDAD

Los datos de curvas de destilación que fueron empleados para calcular el porcentaje de recuperación; así como los datos de puntos de congelación, condiciones de operación de la torre y flujos de entrada y salida, fueron tomados

del resultado operativo y de laboratorio a través de la herramienta PI, para el periodo comprendido entre 2012 – 2014.

Debido a que se tenía un gran número de datos operativos (datos diarios promedio) en comparación con los resultados de laboratorio, de los cuales se obtuvieron tres resultados semanales, se realizó un tamizaje de la información de manera que se pudiera tener tanto la analítica como las condiciones de proceso de la torre separadora de la unidad.

Tabla 3. Ejemplo datos de laboratorio de la curva de destilación (ASTM D86) de la carga a la unidad

% Vol. Recobrado	Temperatura [°F]
5%	415,9
10%	449,2
50%	567,7
90%	679,5
95%	720,7

Fuente: Sistema de información de datos de laboratorio de la refinería, CDLAB.

En la tabla 3 se muestran los datos de laboratorio típicos para una curva de destilación de la carga que sale del tambor de carga D-4701. Empleando estos valores, se calcularon los porcentajes volumétricos de las corrientes de jet y diésel en la carga, a través del siguiente procedimiento:

1. Se definieron los límites de temperatura para diésel ($> 500^{\circ}\text{F}$) y Jet ($\leq 500^{\circ}\text{F}$).
2. Se ajustaron los valores de la curva de destilación (Véase Tabla 3) a una función del tipo lineal donde %Vol. recobrado es la variable independiente y la temperatura es la variable dependiente
3. Con un valor de 500°F de la variable dependiente (temperatura) se calculó el valor de la raíz, es decir, el %Vol. recobrado que corresponde al porcentaje volumétrico de jet. Para este cálculo se empleó el método de Newton.

4. Se restó el 5% al porcentaje obtenido en el numeral anterior dado que este es el valor inicial en la curva de destilación.

Empleando la siguiente ecuación y basado en la fracción volumétrica definida anteriormente, se calcularon los flujos volumétricos:

$$\text{Flujo de Jet} = \text{Fracción volumétrica de Jet} * \text{Flujo total alimentado} \quad \text{Ec. 2}$$

Después, se calculó el porcentaje de recuperación de la unidad mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Recuperación de Jet} = \frac{\text{Jet producto}}{\text{Jet de carga}} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

2.3 DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

De acuerdo con las experiencias de trabajos e investigaciones previamente consultadas en la revisión bibliográfica y nombradas en el estado del arte, se encontró que a través de un modelo no lineal cuadrático con interacción es posible representar el comportamiento de una torre de destilación, alimentando el modelo con los datos tabulados de la planta para obtener la función que describa el proceso (ecuación 3):

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i * x_i + \sum_{i=1}^n C_{ii} * x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} * x_{ij} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde:

C_i representa los coeficientes para cada uno de los términos de la ecuación

x_i son las variables independientes del modelo
 x_{ij} representa el producto o interacción entre las variables independientes x_i y x_j
 y_1 es la variable dependiente para el porcentaje de recuperación, y
 y_2 es la variable dependiente para el punto de congelación

2.4 VALORES ATÍPICOS

Con el fin de eliminar datos atípicos, se procedió a aplicar el procedimiento estadístico de caja y bigotes. El objetivo de este análisis fue determinar cuáles de los valores históricos asociados con el porcentaje de recuperación y punto de congelación del jet, se encuentran en regiones deseables; es decir que se obtienen porcentajes de recuperación alrededor del 90% y puntos de congelamiento entre -53 a -60 °F.¹

2.4.1 Análisis de datos para recuperación de jet. Inicialmente, se analizaron los datos de planta con el fin de determinar cuáles de ellos tienen un comportamiento atípico para el porcentaje de recuperación de jet.

2.4.2 Análisis de datos para punto de congelación. Al igual que con los datos de recuperación de jet, se analizaron los datos históricos del resultado de laboratorio para el punto de congelación de manera que se descarten los datos que pueden influir negativamente en el desarrollo del modelo.

¹ ECOPETROL S.A. Plan de Calidad para Jet, ECOPETROL S.A.

2.5 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE DATOS PARA EL MODELO

Después de haber descartado los datos atípicos y con el objetivo de seleccionar los datos con mayor significancia para el modelo, se realizaron dos tipos de análisis, primero un análisis ANOVA de varianza y posteriormente un análisis con la herramienta estadística STATISTICA v7 (*Free Trial*) para realizar el ajuste de parámetros a través del uso de mínimos cuadrados.

2.5.1 Análisis Primario. Se realizó un ajuste de parámetros para las dos variables objetivo por medio de pruebas F parciales, que permitió obtener la significancia de los factores sobre los modelos de manera que se pudo identificar los factores que no tenían un efecto significativo sobre los modelos.

2.5.2 Análisis Secundario. Utilizando el programa STATISTICA v7 (*Free Trial*) en la opción de estimación no lineal se ajustaron los parámetros de las variables que tienen significancia y que conforman el modelo estadístico. Es importante mencionar que el ajuste se hace empleando una rutina interna del software que usa la aproximación de Cuasi Newton. Este método resuelve problemas de optimización sin restricciones, donde a través de un proceso iterativo se llega a la minimización del problema. Es una modificación del método de Newton, que por su sencillez y propiedades de convergencia asegura la obtención de la solución

2.6 VALIDACIÓN DEL MODELO Y CÁLCULO DE ERRORES

La validación de los modelos ajustados se evaluó calculando el error absoluto experimental (ec. 4) Se tiene un banco de 69 datos del análisis experimental perteneciente al segundo semestre del año 2014. El modelo fue alimentado con los valores de las variables independientes registradas en la operación normal de la planta en el segundo periodo del año 2014; seguidamente se calcularon los

valores del porcentaje de recuperación y punto de congelamiento del jet usando el modelo; finalmente se realizó un comparativo entre los valores calculados con el modelo versus los datos históricos experimentales.

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ experimental - Valor\ teórico}{Valor\ experimental} \right| * 100 \quad Ec. 4$$

Donde el valor experimental es el tomado de los datos históricos y el valor teórico es el valor predicho por el modelo.

Una vez se calculó el error para cada uno de los datos analizados se procedió a calcular el error promedio de predicción, el cual facilita visualizar la desviación que presenta el modelo respecto a los datos obtenidos de la operación normal de la planta. Para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$Error\ Promedio = \frac{\sum_{i=1}^n \%Error_i}{n} \quad Ec. 5$$

Donde n son los 69 datos o casos históricos utilizados para la validación del modelo.

2.7. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE PERMITAN MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE JET CUMPLIENDO CON CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD

2.7.1 Análisis de la influencia de las condiciones de operación sobre el porcentaje de recuperación y punto de congelamiento del Jet. La influencia de las condiciones de operación sobre el porcentaje de recuperación y punto de congelamiento del jet, se evaluó empleando una aproximación de análisis de

sensibilidad. Se empleó la correlación ajustada para evaluar cada una de las variables independientes (temperaturas, presiones, reciclo) versus las variables dependientes (%de recuperación y punto de congelación) de manera que se encontraran condiciones operacionales que aumentan la recuperación, pero siempre cumpliendo el parámetro de calidad (punto de congelamiento).

2.7.2 Análisis de sensibilidad de las variables independientes sobre en porcentaje de recuperación y calidad del jet. Para evaluar el efecto de cada variable independiente respecto al porcentaje de recuperación y el punto de congelación del Jet, se realizó un análisis gráfico. Básicamente, el análisis se desarrolló evaluando cada variable independiente por separado manteniendo en un valor promedio los valores de las demás variables independientes. Los valores promedio con los que se trabajó fueron calculados con base en los datos históricos del segundo semestre del 2014. (Ramirez y Vesga, 2015)

2.8 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para determinar los valores operacionales de la unidad de hidrotatamiento que mejoran el porcentaje de recuperación de jet, cumpliendo con la característica de calidad (punto de congelación); se revisaron nueve (9) escenarios posibles que consideran: el máximo, el mínimo y un valor intermedio de carga típica a la unidad; con tres valores de jet en la carga para cada caso (ver sección 2.8.2).

El análisis económico desarrollado en este trabajo de maestría, se basó en el margen económico que puede obtenerse al incrementar el porcentaje de recuperación del volumen de jet. Por lo tanto, este no tiene en cuenta costos asociados con compra de equipos y mano de obra, puesto que la solución propuesta a través del modelo, únicamente considera cambios de condiciones operativas de la unidad de hidrotatamiento.

El análisis se basa en un valor diferencial presentando el precio (U\$), calculado a partir de las mejores condiciones de operación realizando una evaluación comparativa entre el escenario base actual en el que jet es dejado en la corriente de ACPM y el escenario modelado con el ajuste de variables propuesto en el presente proyecto, es decir, se realizará una evaluación financiera comparativa entre el valor del producto comercializado actualmente como diésel y el valor de la diferencia del producto recuperado con potencial a ser comercializado como jet calculando la ganancia adicional que podría tenerse al recuperar este jet de la corriente de diésel. Para determinar el contenido de jet en la carga se utilizó la curva de temperatura de ebullición (TBP, *Temperature Boiling point*) y a partir de los datos de análisis de laboratorio se hizo el corte en 500 °F.

Es así como se tomó un día operacional en el cual se presentaran los valores de carga total igual a los casos analizados con el modelo (caso 1 de 42000, caso 2 de 51000 y caso 3 de 60000), los cuales arrojaran datos operativos y de calidad, que se usaron como referencia para comparar los precios de venta del día de estudio y los proyectados de ser aplicado el modelo objeto de estudio de este proyecto.

2.8.1 Modelo Económico. La ecuación 6 se usó para hacer la evaluación económica de los escenarios seleccionados en la sección anterior:

$$\text{Margen Operacional} = (\text{Precio de venta} * \text{barriles de diésel} + \text{precio de venta} * \text{barriles de jet}) - \text{costo} * \text{barriles de materia prima} \quad \text{Ec. 6}$$

El margen operacional corresponde a la suma de valor de venta de los productos multiplicado por el volumen de cada uno de ellos menos el costo de la materia prima multiplicado por el volumen de carga. En este caso de estudio, los productos de la unidad son diésel y jet hidrotratado y la carga es el diésel y jet atmosférico proveniente de las unidades de destilación primaria.

2.8.2. Casos de estudio. El análisis económico se realizó con cada uno de los casos planteados a continuación. Se presentan tres niveles de carga, casos 1, 2 y 3 (42.000, 51.000 y 60.000 BPD) con tres diferentes concentraciones de jet A, B y C (2.500, 5.000 y 10.000 BPD):

- CASO 1: 42 000 BPD de carga:
 - Caso 1A: 2 500 de jet + 39 500 de diésel
 - Caso 1B: 5 000 de jet + 37 000 de diésel
 - Caso 1C: 10 000 de jet + 32 000 de diésel

- CASO 2: 51 000 de carga:
 - Caso 2A: 2 500 de jet + 48 500 de diésel
 - Caso 2B: 5 000 de jet + 46 000 de diésel
 - Caso 2C : 10 000 de jet + 41 000 de diésel

- CASO 3: 60 000 de carga:
 - Caso 3A: 2 500 de jet + 57 500 de diésel
 - Caso 3B: 5 000 de jet + 55 000 de diésel
 - Caso 3C: 10 000 de jet + 50 000 de diésel.

Los nueve casos seleccionados fueron evaluados con los rangos de las condiciones operativas sugeridas en la sección 2.7.1 y se agruparon teniendo en cuenta la mayor, media y menor recuperación de jet para cada uno de los niveles de carga planteados:

- Primer grupo: 3 análisis, el más alto valor de recuperación (%) para cada caso.
- Segundo grupo: 3 análisis, los valores intermedios de recuperación de cada caso.
- Tercer grupo: 3 análisis, el valor de recuperación más bajo de cada caso.

3. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MODELO

3.1 TABULACIÓN Y CÁLCULO DE LOS DATOS HISTÓRICOS DE LA UNIDAD

En la tabla 4 se presentan algunos ejemplos de los 413 valores obtenidos después de aplicar el procedimiento descrito en la sección 2.2 de la metodología.

Tabla 4. Porcentajes de recuperación de jet históricos calculados

Caso	Jet (Carga U-5700) [BPD]	Jet (Producto) [BPD]	% Recuperación Jet
1	14 480,84	5 900,43	41%
2	14 398,28	5 696,23	40%
3	13 511,42	5 196,67	38%
//	//	//	//
413	6 311,43	4 633,30	73%
Promedio			54%

A partir de los resultados mostrados en la tabla 4, se aprecia que en promedio el porcentaje de recuperación de jet está en un 54%, el cual está 46% por debajo del valor de diseño para dicha unidad (La unidad está diseñada para recuperar 100% de jet según AXENS, Process Design Book. HDT Project – Barrancabermeja Refinery Diesel Hydrotreating unit, unit 4700. January 2010). Este resultado confirma la necesidad de proponer una correlación que permita predecir el porcentaje de recuperación de jet, con el fin de emplearla para proponer opciones de operación que aumenten el porcentaje de recuperación en la unidad.

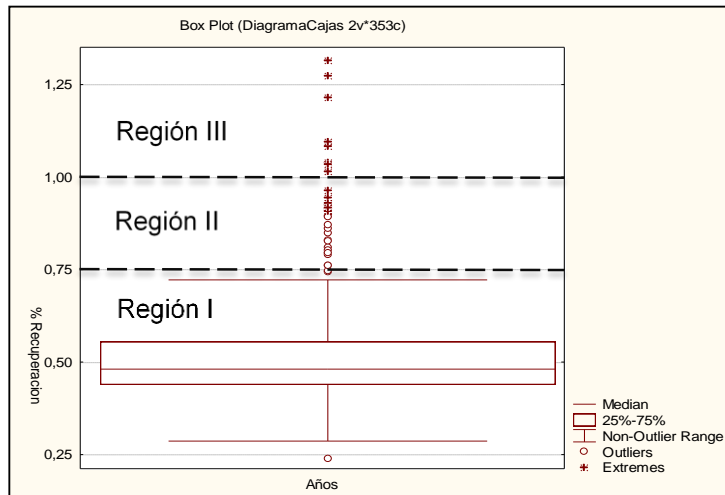
Ahora bien, antes de proponer un modelo es necesario determinar desde el punto de vista histórico si existen valores de porcentaje de recuperación de jet por encima del 70%. Este análisis se hace con el fin de seleccionar los datos que serán objeto de análisis. En la siguiente sección se muestran los resultados

obtenidos del análisis estadístico empleado para determinar el conjunto de valores que serán empleados para el ajuste del modelo.

3.2 VALORES ATÍPICOS

3.2.1 Análisis de datos para recuperación de jet. El primer análisis efectuado se realizó considerando una frecuencia de distribución entre 10 y 90%. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5. De acuerdo con la figura, los valores de porcentaje de recuperación de jet se distribuyen en tres regiones bien diferenciadas. De manera general, de la figura 5 se concluye que con la distribución empleada, los valores de recuperación de porcentaje de jet fluctúan entre el 25 y el 73%, los cuales están lejos de la meta de recuperación planteada del 85%.

Figura 5. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos de porcentaje de recuperación de Jet



Región I: Se observa que el valor máximo y mínimo son respectivamente 73% y 25%.

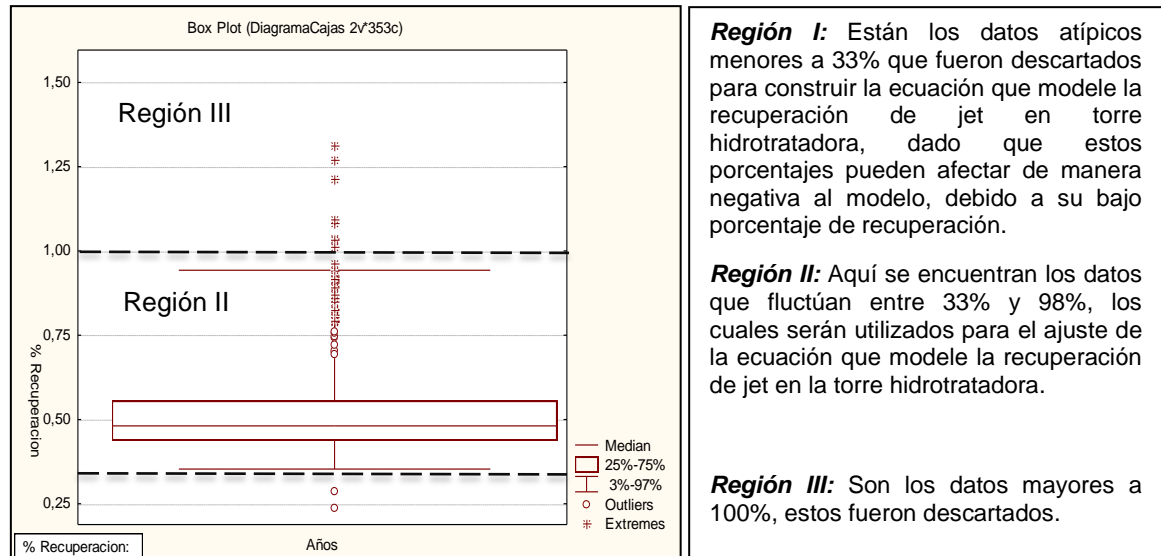
Región II: Se aprecian valores de porcentaje de recuperación que fluctúan entre el 75% y 100%.

Región III: Se observan porcentajes de recuperación que superan el 100%.

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Teniendo en cuenta el análisis anterior se incrementó la frecuencia de distribución a valores entre 3 y 97% encontrándose una distribución que permite definir los datos históricos que se deberán utilizar para el ajuste del modelo.

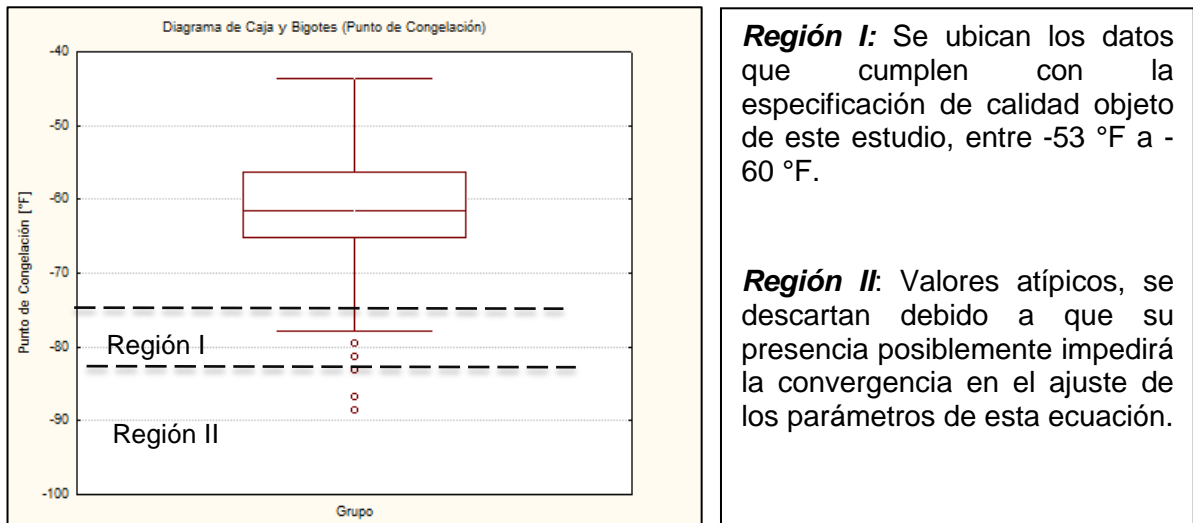
Figura 6. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos de porcentaje recuperación de Jet (Aumento de frecuencia de distribución 3% - 97%)



Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

3.2.2 Análisis de datos para punto de congelación. Similar al ítem anterior, se desarrolló el análisis empleando una distribución entre el 10 y el 90%. En la figura 7 se encuentra la respectiva descripción de las regiones del análisis estadístico basado en diagrama de caja y bigotes para el punto de congelación.

Figura 7. Diagrama de caja y bigotes de datos históricos para punto de congelación



Fuente: RAMÍREZ y VESGA, 2015

En total se descartaron 17 datos atípicos para las dos variables analizadas ya que presumiblemente afectarán negativamente la predicción del modelo, quedando así un total de 413 datos que fueron posteriormente separados en dos grupos. El primero de ellos con 344 datos, fue empleado para el análisis y ajuste de las relaciones matemáticas. Mientras que el segundo grupo de 69 datos se empleó para validar el modelo. De acuerdo con los datos históricos de la planta, el porcentaje de recuperación de jet y punto de congelación promedio fueron de 54% y -61°F, respectivamente.

3.3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE DATOS PARA EL MODELO

A continuación, se explica los procedimientos realizados para el análisis y la selección de datos para la construcción del modelo matemático.

3.3.1 Análisis primario

3.1.1.1 Análisis para el modelo de recuperación de jet Inicialmente, se realizó el ajuste de parámetros para todos los regresores del modelo (ecuación 7) propuesto para predecir el porcentaje de recuperación de jet, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0,88. Los parámetros ajustados se muestran en la tabla 5:

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i * x_i + \sum_{i=1}^n C_{ii} * x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} * x_{ij} \quad Ec.7$$

Tabla 5. Parámetros estimados para el modelo inicial de porcentaje de recuperación de Jet

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Jet en la carga	Diesel en la carga	Temp. de entrada	Reciclo	Temp. de cima	Temp. de medios	Temp. de fondos	Presión de cima	Presión de medios	Presión de fondos
BPD	BPD	°F	BPD	°F	°F	°F	PSI	PSI	PSI
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
Jet (Carga Unidad HDT)	Diésel (Carga Unidad HDT)	Temperatura de Entrada	Reciclo	Temperatura de Cima	Temperatura Línea de Jet	Temperatura de Fondos	Presión de Cima	Presión de Medios	Presión de Fondos

C ₀	-1,42E+02
C ₁	8,58E-04
C ₂	1,46E-04
C ₃	-2,81E-01
C ₄	1,25E-03
C ₅	1,12E-01
C ₆	1,91E-01
C ₇	4,09E-01
C ₈	9,86E+00
C ₉	-2,59E+00
C ₁₀	5,58E+00

C _{1,3}	2,71E-06
C _{2,3}	-1,26E-06
C _{1,4}	-4,20E-09
C _{2,4}	-2,33E-09
C _{3,4}	3,21E-06
C _{1,5}	2,30E-07
C _{2,5}	6,07E-08
C _{3,5}	-3,85E-04
C _{4,5}	-1,71E-06
C _{1,6}	8,07E-07
C _{2,6}	4,89E-07

C _{3,8}	-7,12E-03
C _{4,8}	-2,72E-06
C _{5,8}	-3,20E-03
C _{6,8}	-2,13E-03
C _{7,8}	2,90E-03
C _{1,9}	-2,31E-05
C _{2,9}	6,20E-06
C _{3,9}	1,16E-03
C _{4,9}	-2,70E-08
C _{5,9}	-3,99E-03
C _{6,9}	4,44E-03

C _{1,1}	3,29E-09	C _{3,6}	-1,14E-03	C _{7,9}	0,00E+00
C _{2,2}	1,44E-10	C _{4,6}	-1,11E-06	C _{8,9}	-1,13E-02
C _{3,3}	9,72E-04	C _{5,6}	3,67E-04	C _{1,10}	1,49E-05
C _{4,4}	2,18E-09	C _{1,7}	-3,12E-06	C _{2,10}	1,90E-05
C _{5,5}	-3,46E-05	C _{2,7}	3,68E-07	C _{3,10}	-2,08E-02
C _{6,6}	-2,39E-04	C _{3,7}	0,00E+00	C _{4,10}	-3,00E-05
C _{7,7}	-8,12E-04	C _{4,7}	-2,82E-06	C _{5,10}	4,60E-03
C _{8,8}	-2,92E-01	C _{5,7}	1,59E-04	C _{6,10}	-1,15E-02
C _{9,9}	1,30E-02	C _{6,7}	8,89E-04	C _{7,10}	1,56E-02
C _{10,10}	-1,26E-01	C _{1,8}	-3,30E-05	C _{8,10}	1,24E-01
C _{1,2}	-1,29E-09	C _{2,8}	-3,12E-05	C _{9,10}	4,01E-02

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

A través de un análisis de varianza ANOVA se obtienen los *p – value* empleando pruebas F parciales para cada una de las posibles combinaciones utilizando la Ecuación 7.

De las 65 posibles combinaciones sólo 18 tienen influencia significativa con un intervalo de confianza de 95% como se aprecia en la tabla 6. De los resultados de esta tabla se infiere que la ecuación que se empleará para el modelo mejorado del porcentaje de recuperación solo considerará las variables y combinación de éstas con p-value <0,05 (marcados en rojo).

Tabla 6. Efectos significativos para el modelo inicial de porcentaje de recuperación de Jet

Efecto	<i>p – value</i>	$x_1 * x_3$	0,162477	$x_3 * x_8$	0,809418
x_1	0,123587	$x_2 * x_3$	0,01302	$x_4 * x_8$	0,943357
x_2	0,538593	$x_1 * x_4$	0,173451	$x_5 * x_8$	0,610833
x_3	0,388743	$x_2 * x_4$	0,008653	$x_6 * x_8$	0,81017
x_4	0,021416	$x_3 * x_4$	0,117925	$x_7 * x_8$	0,9084

Efecto	<i>p - value</i>				
		$x_1 * x_3$	0,162477	$x_3 * x_8$	0,809418
x_5	0,189276	$x_1 * x_5$	0,587197	$x_1 * x_9$	0,131373
x_6	0,149769	$x_2 * x_5$	0,656686	$x_2 * x_9$	0,42774
x_7	0,321458	$x_3 * x_5$	0,216852	$x_3 * x_9$	-
x_8	0,115196	$x_4 * x_5$	0,002284	$x_4 * x_9$	1
x_9	0,032216	$x_1 * x_6$	0,185755	$x_5 * x_9$	0,030558
x_{10}	0,280211	$x_2 * x_6$	0,008026	$x_6 * x_9$	0,224729
$x_1 * x_1$	0,001221	$x_3 * x_6$	0,006428	$x_7 * x_9$	-
$x_2 * x_2$	0,449469	$x_4 * x_6$	0,126617	$x_8 * x_9$	0,953534
$x_3 * x_3$	0,02791	$x_5 * x_6$	0,000346	$x_1 * x_{10}$	0,390901
$x_4 * x_4$	0,436511	$x_1 * x_7$	0,077128	$x_2 * x_{10}$	0,009329
$x_5 * x_5$	0,019806	$x_2 * x_7$	0,340272	$x_3 * x_{10}$	0,188623
$x_6 * x_6$	0,023651	$x_3 * x_7$	-	$x_4 * x_{10}$	0,308627
$x_7 * x_7$	1	$x_4 * x_7$	0,146472	$x_5 * x_{10}$	0,237701
$x_8 * x_8$	0,294386	$x_5 * x_7$	0,588456	$x_6 * x_{10}$	0,045673
$x_9 * x_9$	0,005419	$x_6 * x_7$	0,03202	$x_7 * x_{10}$	0,286503
$x_{10} * x_{10}$	0,308576	$x_1 * x_8$	0,180583	$x_8 * x_{10}$	0,699291
$x_1 * x_2$	0,05937	$x_2 * x_8$	0,011407	$x_9 * x_{10}$	0,82611

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Algunos resultados no registran un p -value debido a que para el análisis a través de pruebas F parciales los grados de libertad son cero.

3.1.1.2 Análisis para el modelo de punto de congelación Para este análisis se utilizó un $p - value < 0,05$ al igual que en el análisis anterior, sin embargo, se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) menor a 0,2 el cual es considerado muy bajo en el ajuste de parámetros del modelo; por lo tanto, se decidió aumentar el valor de criterio a $p - value < 0,10$ de manera que se puedan abarcar más términos significativos. Finalmente se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,53. Si bien este valor es bajo, se decidió seguir trabajando con él, debido a que el modelo se validaría con datos históricos reales que no hicieron parte del ajuste inicial. Dado que error no superó el 8%, así las cosas, el modelo se aproxima de manera significativa a los valores deseados. Los resultados se aprecian en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros estimados para el modelo inicial de punto de congelación

C_0	2,56E+04
C_1	-1,31E-01
C_2	3,83E-02
C_3	-9,22E+01
C_4	-2,14E-02
C_5	-7,65E+00
C_6	-2,45E+01
C_7	3,58E+01
C_8	-1,37E+03
C_9	-1,65E+02
C_{10}	6,72E+02
$C_{1,1}$	-6,31E-08
$C_{2,2}$	4,06E-08
$C_{3,3}$	1,07E-01
$C_{4,4}$	5,55E-07
$C_{1,3}$	5,13E-04
$C_{2,3}$	-1,56E-04
$C_{1,4}$	1,18E-07
$C_{2,4}$	-1,79E-07
$C_{3,4}$	2,55E-04
$C_{1,5}$	2,05E-05
$C_{2,5}$	-8,57E-06
$C_{3,5}$	1,41E-02
$C_{4,5}$	6,09E-05
$C_{1,6}$	1,56E-04
$C_{2,6}$	2,39E-05
$C_{3,6}$	-7,21E-02
$C_{4,6}$	-1,51E-04
$C_{5,6}$	5,32E-03
$C_{1,7}$	-4,41E-04
$C_{3,8}$	6,53E-01
$C_{4,8}$	3,14E-03
$C_{5,8}$	2,43E+00
$C_{6,8}$	1,32E+00
$C_{7,8}$	-2,38E+00
$C_{1,9}$	1,15E-03
$C_{2,9}$	-1,16E-03
$C_{3,9}$	2,80E-01
$C_{4,9}$	3,21E-03
$C_{5,9}$	-1,24E-01
$C_{6,9}$	2,79E-02
$C_{7,9}$	0,00E+00
$C_{8,9}$	5,38E+01
$C_{1,10}$	2,87E-03
$C_{2,10}$	-5,78E-04

C_{5,5}	1,37E-03
C_{6,6}	-5,79E-03
C_{7,7}	-6,83E-02
C_{8,8}	-5,75E+01
C_{9,9}	1,03E-01
C_{10,10}	8,45E+00
C_{1,2}	-3,69E-08

C_{2,7}	1,11E-04
C_{3,7}	0,00E+00
C_{4,7}	-2,38E-04
C_{5,7}	-1,26E-02
C_{6,7}	1,03E-01
C_{1,8}	-3,47E-03
C_{2,8}	2,27E-03

C_{3,10}	-1,46E+00
C_{4,10}	-6,65E-03
C_{5,10}	-1,20E+00
C_{6,10}	-5,60E-01
C_{7,10}	2,58E+00
C_{8,10}	3,33E+01
C_{9,10}	-3,83E+01

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Para el ajuste del modelo mejorado de punto de congelación solo se considerará las variables y combinación de éstas, para $p - value < 0,10$ (marcados en rojo en la tabla 8).

De las 65 posibles combinaciones sólo 18 tienen influencia significativa con un intervalo de confianza de 90%.

Tabla 8. Efectos significativos para el modelo de punto de congelación del Jet

Efecto	$p - value$	$x_1 * x_3$	0,049796	$x_3 * x_8$	0,869422
x_1	0,080425	$x_2 * x_3$	0,022703	$x_4 * x_8$	0,541494
x_2	0,232415	$x_1 * x_4$	0,77603	$x_5 * x_8$	0,004301
x_3	0,035995	$x_2 * x_4$	0,132843	$x_6 * x_8$	0,269528
x_4	0,769686	$x_3 * x_4$	0,355407	$x_7 * x_8$	0,481341
x_5	0,502705	$x_1 * x_5$	0,718657	$x_1 * x_9$	0,576032
x_6	0,169426	$x_2 * x_5$	0,640588	$x_2 * x_9$	0,718262
x_7	1	$x_3 * x_5$	0,736602	$x_3 * x_9$	-
x_8	0,103026	$x_4 * x_5$	0,414883	$x_4 * x_9$	0,267784

x_9	0,307986	$x_1 * x_6$	0,057525	$x_5 * x_9$	0,616648
x_{10}	0,333785	$x_2 * x_6$	0,333336	$x_6 * x_9$	0,954645
$x_1 * x_1$	0,64163	$x_3 * x_6$	0,195767	$x_7 * x_9$	-
$x_2 * x_2$	0,113957	$x_4 * x_6$	0,121869	$x_8 * x_9$	0,040817
$x_3 * x_3$	1	$x_5 * x_6$	0,696404	$x_1 * x_{10}$	0,220332
$x_4 * x_4$	0,141308	$x_1 * x_7$	0,063343	$x_2 * x_{10}$	0,553749
$x_5 * x_5$	0,489944	$x_2 * x_7$	0,032599	$x_3 * x_{10}$	0,492896
$x_6 * x_6$	0,6819	$x_3 * x_7$	-	$x_4 * x_{10}$	0,093788
$x_7 * x_7$	0,15723	$x_4 * x_7$	0,361122	$x_5 * x_{10}$	0,02282
$x_8 * x_8$	0,125731	$x_5 * x_7$	0,750098	$x_6 * x_{10}$	0,468471
$x_9 * x_9$	0,869174	$x_6 * x_7$	0,063911	$x_7 * x_{10}$	0,188494
$x_{10} * x_{10}$	0,612409	$x_1 * x_8$	0,294817	$x_8 * x_{10}$	0,440601
$x_1 * x_2$	0,687225	$x_2 * x_8$	0,169564	$x_9 * x_{10}$	0,119928

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Algunos resultados no registran un p-value debido a que para el análisis a través de pruebas F parciales los grados de libertad son cero.

3.3.2 Análisis secundario Utilizando el programa STATISTICA v7 (*Free Trial*) en la opción de estimación no lineal se ajustaron los parámetros de las variables que tienen significancia y que conforman el modelo estadístico. Es importante mencionar que el ajuste se hace empleando una rutina interna del software que usa la aproximación de mínimos cuadrados, la cual es una técnica de análisis

numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados (variable independiente, variable dependiente) y una familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático

3.3.2.1 Análisis para porcentaje de recuperación Con el software estadístico se obtuvieron los parámetros a partir del método numérico QUASI-NEWTON con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,87. Respecto a otros modelos, como el de (Álvarez, 2012) en el cual el valor de (R^2) corresponde a 0,98; este valor se encuentra en el mismo orden de magnitud, lo que permite concluir que este es un valor aceptable en la aplicación del modelo.

Examinando el caso de recuperación de jet, se encuentran términos tanto de signo positivo como de signo negativo. Esto se traduce en que las variables de signo positivo favorecen el aumento de la recuperación de jet, mientras que los valores negativos disminuyen el porcentaje de recuperación.

En las tablas 9 y 10 se muestran los valores de cada una de las variables y sus efectos de interacción para el modelo de recuperación de jet.

Tabla 9. Parámetros lineales y cuadráticos del modelo mejorado de recuperación de Jet.

		Términos Lineales		Términos Cuadrados				
Variable Independiente	-	Reciclo	Presión Línea Jet	Flujo Jet (Carga U-5700)	Temperatura Entrada	Temperatura Cima	Temperatura Línea Jet	Presión Línea Jet
Unidad	-	[BPD]	[psi-g]	[BPD]	[°F]*[°F]	[°F]*[°F]	[°F]*[°F]	[psi-g]*[psi-g]
Nomenclatura	-	x_4	x_9	$x_{1,1}$	$x_{3,3}$	$x_{5,5}$	$x_{6,6}$	$x_{9,9}$
Parámetro Ajustado	C_0	C_4	C_9	$C_{1,1}$	$C_{3,3}$	$C_{5,5}$	$C_{6,6}$	$C_{9,9}$
	- 4,31	2,27E-04	1,07E-01	-1,07E-09	8,94E-05	-2,44E-05	1,42E-04	8,93E-04

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Tabla 10. Parámetros cruzados del modelo mejorado de recuperación de Jet

Términos Cruzados										
Flujo Diésel (Carga U-5700)	Flujo Diésel (Carga U-5700)	Reciclo	Flujo Diésel (Carga U-5700)	Temperatura Entrada	Temperatura Cima	Temperatura Línea Jet	Flujo Diésel (Carga U-5700)	Temperatura Cima	Flujo Diésel (Carga U-5700)	Temperatura Línea Jet
Temperatura Entrada	Reciclo	Temperatura Cima	Temperatura Línea Jet HDT	Temperatura Línea Jet	Temperatura Línea Jet	Temperatura Fondos	Presión Cima	Presión Línea Jet	Presión Fondos	Presión Fondos
[BPD]*[psi-g]	[BPD]*[BPD]	[BPD]*[°F]	[BPD]*[°F]	[°F]*[°F]	[°F]*[°F]	[°F]*[°F]	[BPD]*[psi-g]	[°F]*[psi-g]	[BPD]*[psi-g]	[°F]*[psi-g]
$x_{2,3}$	$x_{2,4}$	$x_{4,5}$	$x_{2,6}$	$x_{3,6}$	$x_{5,6}$	$x_{6,7}$	$x_{2,8}$	$x_{5,9}$	$x_{2,10}$	$x_{6,10}$
$C_{2,3}$	$C_{2,4}$	$C_{4,5}$	$C_{2,6}$	$C_{3,6}$	$C_{5,6}$	$C_{6,7}$	$C_{2,8}$	$C_{5,9}$	$C_{2,10}$	$C_{6,10}$
6,63E-08	9,38E-11	-8,67E-07	-3,96E-08	-2,99E-04	9,97E-05	4,79E-05	1,09E-06	-5,94E-04	-2,03E-06	2,43E-04

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

A manera de ejemplo, se explica que el valor para la variable temperatura de entrada es positivo ($8,94 \times 10^{-5}$) debido a que entre más alto sea la temperatura de entrada a la torre, se favorece la recuperación de jet.

De la misma manera, se explica que entre mayor sea el contenido de jet en la carga, menor es la recuperación de jet.

3.3.2.2 Análisis para punto de congelación Con el software estadístico se obtuvieron los parámetros a partir del método numérico QUASI-NEWTON con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,7.

El R^2 es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Por lo general, mientras mayor sea el R^2 , mejor será el ajuste del modelo a sus datos. El R^2 siempre se encuentra entre 0 y 100%.

Teniendo en cuenta el anterior comentario, aunque el R^2 del modelo planteado es un valor bajo, es aceptable comparado con otros trabajos encontrados en la literatura como el obtenido por Castillo (2010) para el caso del parámetro de calidad número de octano en un modelo predictivo de calidad de gasolina que fue de 0,4077.

Similar al ítem anterior, los términos de signo positivos favorecen la obtención de puntos de congelación mayores y los signos negativos afectan de forma no deseable el punto de congelación.

En este punto es de resaltar que este análisis se hace teniendo en cuenta que el modelo planteado es un modelo matemático estadístico que si bien representa el comportamiento histórico de la unidad no es una representación del balance

másico y energético de la torre, por lo que se sugiere verificar los resultados obtenidos en la torre en tiempo real o a través de un simulador.

En las tablas 11 y 12 se muestran los valores de cada una de las variables y sus efectos de interacción para el modelo de punto de congelamiento del jet.

Tabla 11. Parámetros lineales del modelo mejorado de punto de congelación

		Términos Lineales	
Variables Independientes	-	Flujo Jet (Carga U-5700)	Temperatura Entrada
Unidad	-	[BPD]	[°F]
Nomenclatura	-	x_1	x_3
Parámetro Ajustado	C_0	C_1	C_3
	82,5	-1,21E-02	-2,08E-01

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Tabla 12. Parámetros cruzados del modelo mejorado de punto de congelación

Términos Cruzados									
Flujo Jet (Carga U- 5700)	Flujo Diésel (Carga U- 5700)	Flujo Jet (Carga U- 5700)	Flujo Jet (Carga U- 5700)	Flujo Diésel (Carga U- 5700)	Temperatura Línea Jet HDT	Temperatura Cima	Presión Cima	Reciclo	Temperatura Cima
Temperatura Entrada	Temperatura Entrada	Temperatura Línea Jet HDT	Temperatura Fondos	Temperatura Fondos	Temperatura Fondos	Presión Cima	Presión Línea Jet HDT	Presión Fondos	Presión Fondos
[BPD]*[°F]	[BPD]*[°F]	[BPD]*[°F]	[BPD]*[°F]	[BPD]*[°F]	[°F]*[°F]	[°F]*[psi-g]	[psi- g]*[psi-g]	[BPD]*[psi- g]	[°F]*[psi-g]
$x_{1,3}$	$x_{2,3}$	$x_{1,6}$	$x_{1,7}$	$x_{2,7}$	$x_{6,7}$	$x_{5,8}$	$x_{8,9}$	$x_{4,10}$	$x_{5,10}$
$C_{1,3}$	$C_{2,3}$	$C_{1,6}$	$C_{1,7}$	$C_{2,7}$	$C_{6,7}$	$C_{5,8}$	$C_{8,9}$	$C_{4,10}$	$C_{5,10}$
2,07E-04	-5,26E-05	5,01E-05	-2,09E-04	4,98E-05	-6,70E-05	-1,08E-02	1,52E-02	0	0

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Igualmente, se explica a manera de ejemplo, el valor de la temperatura de entrada es negativo para el punto de congelación debido a que entre más alta sea la temperatura de entrada menor será el punto de congelación.

Asimismo, entre mayor sea el contenido de jet en la carga menor es el punto de congelación.

3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO Y CÁLCULO DE ERRORES

La validación de los modelos ajustados se evaluó calculando el error absoluto experimental (ec. 8). Se tiene un banco de 69 datos del análisis experimental perteneciente al segundo semestre del año 2014. El modelo fue alimentado con los valores de las variables independientes registradas en la operación normal de la planta en el segundo periodo del año 2014; seguidamente se calcularon los valores del porcentaje de recuperación y punto de congelamiento del jet usando el modelo; finalmente se realizó un comparativo entre los valores calculados con el modelo versus los datos históricos experimentales.

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ experimental - Valor\ teórico}{Valor\ experimental} \right| * 100 \quad Ec.8$$

Donde el valor experimental es tomado de los datos históricos y el valor teórico es el valor predicho por el modelo.

Una vez se calculó el error con la ecuación 8 para cada uno de los datos analizados se procedió a calcular el error promedio de predicción, el cual facilita visualizar la desviación que presenta el modelo respecto a los datos obtenidos de la operación normal de la planta. Para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$Error\ Promedio = \frac{\sum_{i=1}^n \%Error_i}{n} \quad Ec.9$$

Donde n son los 69 datos o casos históricos utilizados para la validación del modelo.

3.4.1 Modelo para el porcentaje de recuperación Para el caso del porcentaje de recuperación de jet, el error absoluto promedio fue de 12% (ver tabla 13) como resultado de la comparación con 69 datos históricos de operación de la unidad.

Tabla 13. Error estimado por cada caso para el porcentaje de recuperación de Jet

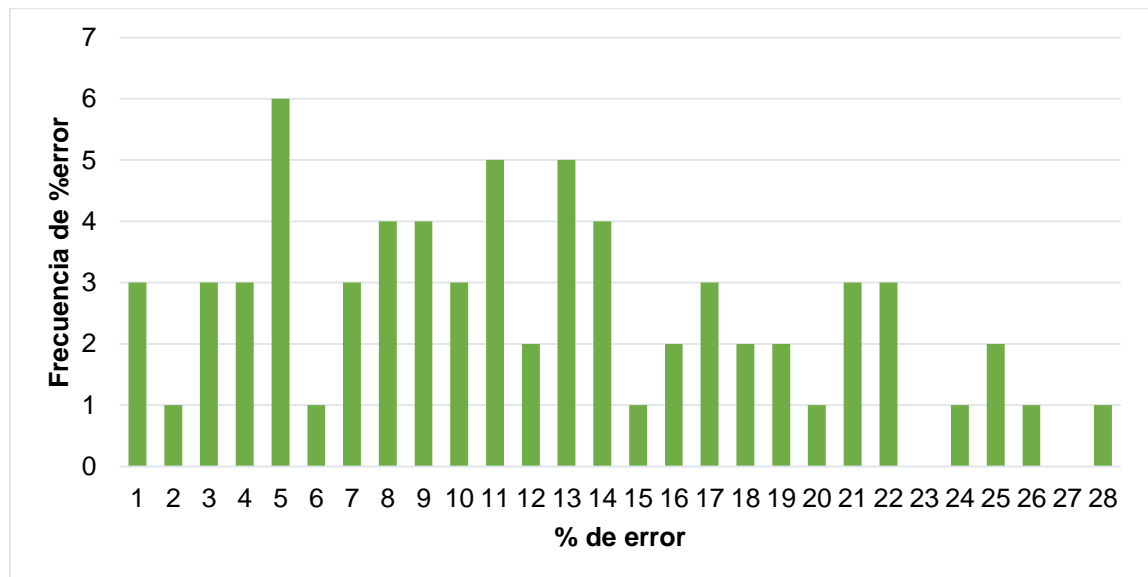
Caso	Porcentaje de Recuperación de Jet		ERROR
	Experimental (Estimado Históricos)	Teórico (Estimado Modelo)	
1	72%	79%	8%
2	74%	81%	9%
3	71%	80%	11%
4	69%	80%	14%
5	68%	80%	15%
6	79%	73%	8%
7	89%	79%	13%
8	70%	75%	7%
9	78%	77%	1%
//	//	//	//
69	73%	81%	9%
ERROR ABSOLUTO PROMEDIO			12%

Donde el valor teórico es el valor predicho por el modelo y el valor experimental es el valor tomado de los datos históricos. La tabulación completa se encuentra en el ANEXO A-1.

En el estudio de Cordido y Pérez (2011), el error absoluto promedio estuvo en el rango de 0,1 a 7,53%. Se considera que el error promedio del presente trabajo sigue estando en parámetros aceptables, teniendo en cuenta que se encuentra en el mismo orden de magnitud que el estudio mencionado y considerando el análisis de la distribución del error que se encuentra a continuación:

En la figura 8 se grafica la distribución del error para el % de recuperación de jet en donde se logra apreciar la frecuencia de los errores. Esta gráfica refleja que en general el modelo tiende a valores de error bajos.

Figura 8. Distribución del error de % de recuperación de Jet



3.4.2 Modelo para el punto de congelación En el caso del punto de congelación el error absoluto promedio fue de 8%. El resultado se presenta en la siguiente tabla:

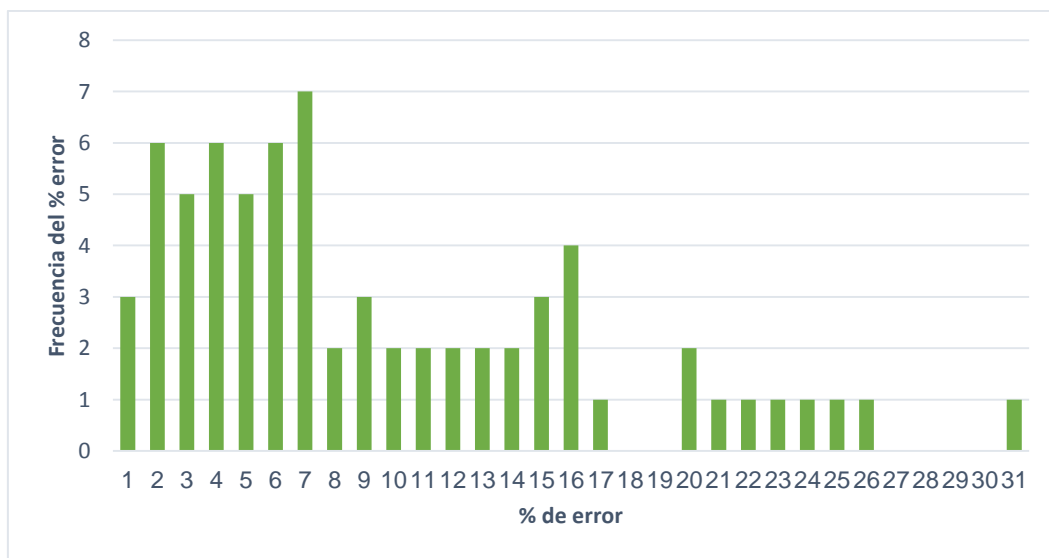
Tabla 14. Error estimado por cada caso para el punto de congelación del Jet

Caso	Punto de Congelación [°F]		ERROR
	Experimental (Estimado Históricos)	Teórico (Estimado Modelo)	
1	-56,2	-58,3	4%
2	-56,2	-57,4	2%
3	-58,0	-57,5	1%
4	-61,6	-59,4	4%
5	-59,8	-60,8	2%
6	-58,0	-59,8	3%
7	-54,4	-57,5	5%
8	-58,0	-58,8	1%
9	-61,6	-57,8	7%
//	//	//	//
69	-54,4	-56,3	3%
ERROR ABSOLUTO PROMEDIO			8%

El total de los resultados se encuentra en el ANEXO A-2.

Como puede observarse en la figura 10, la frecuencia del porcentaje del error se mantuvo en valores bajos, entre el 2% y 7%, comprobando que este modelo mantiene características muy similares al proceso real que representa.

Figura 9. Distribución del error para punto de congelación



4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE PERMITAN MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE JET CUMPLIENDO CON CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD

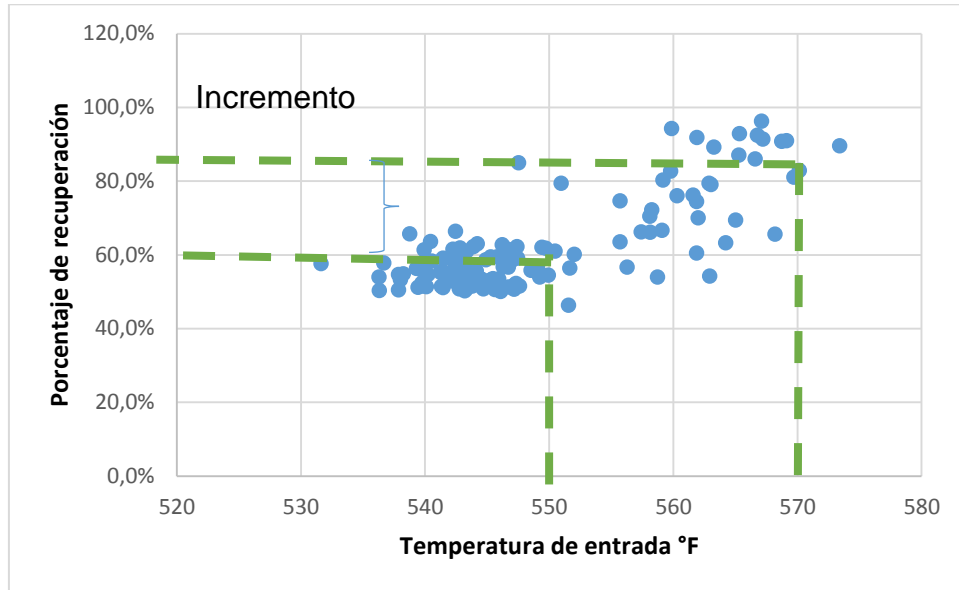
Para este análisis se graficaron las correlaciones entre las variables manipuladas en la torre de separación T-4702 y las variables dependientes porcentaje de recuperación y punto de congelamiento, de manera que se pudiera establecer un rango para cada variable con los cuales se pueda evaluar los modelos encontrando las condiciones operativas que maximicen la recuperación de jet cumpliendo el parámetro de calidad punto de congelamiento.

Esta correlación obtenida a partir de los datos históricos de la unidad y el resultado de laboratorio permiten asegurar que los rangos recomendados son posibles con el actual diseño de la torre.

4.1 CORRELACIÓN DE VARIABLES CON LA RECUPERACIÓN DE JET

En la figura 10, se ejemplifican las relaciones existentes entre la variable dependiente (porcentaje de recuperación de jet) y las variables independientes (temperatura de entrada) consideradas en este trabajo de aplicación. El objetivo de este análisis es el de identificar la región en la que una fluctuación de la variable independiente ocasiona un aumento en el porcentaje de recuperación. En ese orden de ideas, en la figura 10 se aprecia que el intervalo de temperatura estaría entre 550 y 570°F.

Figura 10. Correlación entre la temperatura de entrada TI 47074 y el porcentaje de recuperación



El procedimiento descrito se repitió para cada una de las variables independientes con significancia estadística. Los intervalos hallados que aumentan el valor del porcentaje de recuperación de jet, son particulares de diseño de planta y el proceso estudiado y se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Resumen de intervalos de operación seleccionados para las variables independientes que tienen un efecto en el porcentaje de recuperación de jet

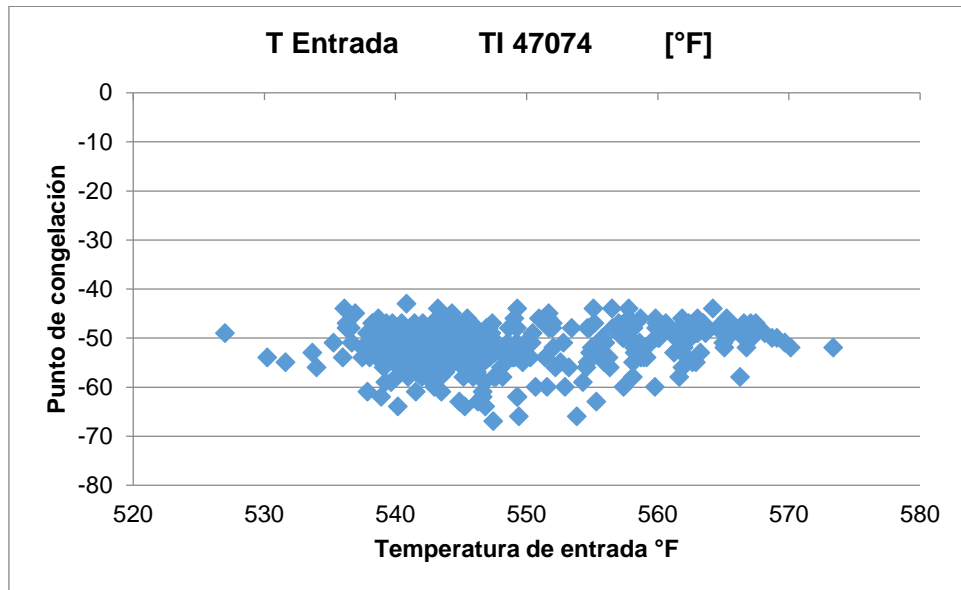
Porcentaje de recuperación de jet	
Temperatura (°F)	Intervalo
Entrada	550 – 570
Cima	240 – 260
Medio	395 – 410
Fondo	590 – 610
Flujo (BPD)	
Reciclo	8 000-13 000
Presión (PSIG)	
Cima	9,0 – 9,5
Medio	34 – 35
Fondo	11 – 12,5

Los resultados obtenidos para la variable presión muestran que el intervalo es muy reducido; en consecuencia, estas variables se mantendrán constantes en la evaluación del modelo en cada uno de los casos propuestos para análisis (ver Anexo B, Tabla B-6, B-7, B-8).

4.2 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES CON EL PUNTO DE CONGELACIÓN

A manera de ejemplo se muestra la gráfica de correlación de la temperatura de entrada a la T-4702 con el resultado de punto de congelación (Figura 11). El total de las gráficas se encuentran en el ANEXO C. En las gráficas se busca encontrar un intervalo operativo dado el diseño de la planta, y se observan los puntos que muestran la correlación, en este caso, entre la temperatura de entrada (°F) y el punto de congelación, y de esta forma puede observarse la influencia de cada ítem representado en las gráficas del anexo C, los rangos significativos de estos factores en el punto de congelación deseado están entre -53 °F a -60°F, ya que se espera que cumplan con el parámetro de calidad (punto de congelación menor a -47°C)

Figura 11. Gráfica entre la temperatura de entrada (°F) Vs Punto de congelación (°C)



En la tabla 16 se presentan el resumen del intervalo de valores encontrados a partir de las gráficas de correlaciones de los datos históricos, entre las variables de presión, reciclo y temperatura vs el parámetro de calidad punto de congelación:

Tabla 16. Resumen de intervalos de operación seleccionados para las variables independientes que tienen un efecto en el punto de congelación

Punto de congelación de jet	
Temperatura (°F)	Rango
Entrada	540 – 570
Cima	240 – 260
Medio	390 – 410
Fondo	570 – 610
Flujo (BPD)	
Reciclo	8 000-13 000
Presión (PSIG)	
Cima	9,0 – 9,5
Medio	34 – 35
Fondo	11 - 12,5

Los valores de la Tabla 16 muestran el intervalo de valores reales de las variables en la operación de la torre T-4702, extraídos de los datos históricos de la unidad; por lo tanto, son operacionalmente posibles y adecuados para la planta. Los resultados obtenidos para la variable presión muestran que el intervalo es muy reducido; en consecuencia, estas variables se mantendrán constantes en la evaluación del modelo en cada uno de los casos propuestos para análisis (Ver anexo B-Grafica B-6, B-7, B-8).

4.3 ECUACIONES DEL MODELO

Se presentan las ecuaciones resultantes (modelo matemático) para la recuperación de jet (y_1) (ecuación 9) y para punto de congelación (y_2) (ecuación 10), los valores ajustados se encuentran tabulados en la tabla 5-12 de las secciones 3.3

$$y_1 = c_0 + c_4 * x_4 + c_9 * x_9 + c_{1,1} * x_1^2 + c_{3,3} * x_3^2 + c_{5,5} * x_5^2 + c_{6,6} * x_6^2 + c_{9,9} * x_9^2 + c_{2,3} * x_2 * x_3 + c_{2,4} * x_2 * x_4 + c_{4,5} * x_4 * x_5 + c_{2,6} * x_2 * x_6 + c_{3,6} * x_3 * x_6 + c_{5,6} * x_5 * x_6 + c_{6,7} * x_6 * x_7 + c_{2,8} * x_2 * x_8 + c_{5,9} * x_5 * x_9 + c_{2,10} * x_2 * x_{10} + c_{6,10} * x_6 * x_{10}$$

Ec 9

$$y_2 = c_0 + c_1 * x_1 + c_3 * x_3 + c_{1,3} * x_1 * x_3 + c_{2,3} * x_2 * x_3 + c_{1,6} * x_1 * x_6 + c_{1,7} * x_1 * x_7 + c_{2,7} * x_2 * x_7 + c_{6,7} * x_6 * x_7 + c_{5,8} * x_5 * x_8 + c_{8,9} * x_8 * x_9 + c_{4,10} * x_4 * x_{10} + c_{5,10} * x_5 * x_{10}$$

Ec 10

4.4 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos al evaluar los modelos (ecuaciones 9 y 10) en los intervalos seleccionados en la sección anterior y en cada uno de los escenarios planteados (sección 2.8.2). Se procedió a modificar de manera secuencial las temperaturas de entrada, de medios y de fondos y el reciclo.

Para el caso de las presiones, estas se mantuvieron constantes en el valor promedio de los datos con los que validaron los modelos correspondientes al segundo semestre del año 2014, ya que su influencia en la respuesta puede ser considerada despreciable (ver discusión sección 4.1 y 4.2).

En el caso de la temperatura de cima, su valor se mantuvo en 245 °F debido a que este valor es requerido por integridad mecánica de la torre T-4702; valores inferiores pueden llevar a generar condensación de agua agria generando corrosión en las bandejas que son de acero al carbón.

Para las demás variables (temperatura de entrada, temperatura de cima, temperatura de medios, temperatura de fondos y reciclo) se evaluó modificando una de ellas mientras las demás se mantenían en el valor promedio de los valores tomados del segundo semestre del 2014 (Tabla 17), los mismos que se usaron para la validación de los modelos.

Es de anotar en este análisis, que si bien existe una interacción entre las variables evaluadas, este estudio es el resultado de un estudio estadístico que busca encontrar valores que maximicen la recuperación de jet en la torre separadora T-4702 cumpliendo con el parámetro de calidad de punto de congelamiento.

Los valores que se obtuvieron deberán ser comprobados en un posterior estudio ya sea de manera real en planta o a través de un simulador de procesos.

De acuerdo con este estudio, el porcentaje de recuperación de jet en la torre separadora T-4702 con respecto al que contiene la carga de la unidad es de 54%, de esta manera, si se quiere mostrar la diferencia de recuperación sería restar la diferencia de porcentaje en cada caso.

Tabla 17. Valores promedio de las variables independientes

Variable Independiente	Unidad	Valor Promedio
Temperatura Entrada	°F	558,71
Reciclo	BPD	10.762,50
Temperatura de medios	°F	408,38
Temperatura de Fondos	°F	600,12
Presión de Cima	psi-g	9,26
Presión Línea de Jet	psi-g	34,45
Presión de Fondos	psi-g	11,70

La Tabla 17 muestra los valores promedios de las variables que se utilizaran para evaluar los modelo de rendimiento y punto de congelamiento. Este promedio se calculó del banco de 69 datos históricos utilizado para la validación de los modelos.

Tabla 18. Resultado del análisis de los casos planteados

Carga Total [BPD]		VARIABLES MEDIBLES								VARIABLES DEPENDIENTES				
		Jet [BPD]	Diesel [BPD]	T Entrada TI 47074 [°F]	Reciclo FIC47028 [BPD]	T Cima TI47075 [°F]	T Medios TI47076 [°F]	T Fondos TI47077 [°F]	P Cima PIC47096 [psi]	P Medios PI47155 [psi]	P Fondos PI47081 [psi]	Recuperacion Jet [%] - Modelo	Punto de Congelacion [°F] - Modelo	° C
42000	CASO 1 A	2500,0	39500,0	558,7	10762,5	245,0	400,3	600,1	9,3	34,5	11,7	80%	-53	-47,00
	CASO 1 B	5000,0	37000,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	605,3	9,3	34,5	11,7	89%	-53	-47,00
	CASO 1 C	10000,0	32000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	70%	-66	-54,48
51000	CASO 2 A	2500,0	48500,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	597,2	9,3	34,5	11,7	84%	-53	-47,00
	CASO 2 B	5000,0	46000,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	599,5	9,3	34,5	11,7	85%	-53	-47,00
	CASO 2 C	10000,0	41000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	78%	-61	-51,81
60000	CASO 3 A	2500,0	57500,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	595,7	9,3	34,5	11,7	89%	-53	-47,00
	CASO 3 B	5000,0	55000,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	596,8	9,3	34,5	11,7	87%	-53	-47,00
	CASO 3 C	10000,0	50000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	85%	-56	-49,14

De los casos anteriores se calculó un promedio de la recuperación y del punto de congelación del jet, con el siguiente resultado:

Tabla 19. Promedio de los casos planteados

Promedios	
% Recup.	Pto Cong.
83%	-48,6

Los resultados de la tabla 18 muestran que con la sola manipulación de las variables de proceso es posible aumentar en un 29% el porcentaje de recuperación de jet manteniendo su calidad.

Se destaca que para los tres casos de máximo flujo de jet en la carga (10.000 BPD) la variable que maximiza la recuperación del jet es el reciclo de la torre cumpliendo en exceso el parámetro de calidad punto de congelamiento.

Cada uno de los casos analizados (Tabla 18) fueron clasificados en tres categorías:

- Mayor porcentaje de recuperación (Tabla 20)
- Porcentaje de recuperación intermedio (Tabla 24)
- Menor porcentaje de recuperación (Tabla 22)

Lo anterior con el fin de analizar por cada categoría los márgenes económicos que pueden obtenerse de la operación de la planta de hidrotreatmento.

Todos los intervalos mostrados en estas tablas son alcanzables operacionalmente, ya que se calcularon a partir de datos reales de operación de la planta.

Tabla 20. Resultado de los casos de mayor recuperación

		VARIABLES MEDIBLES									VARIABLES DEPENDIENTES			
Carga Total [BPD]		Jet [BPD]	Diesel [BPD]	T Entrada TI 47074 [°F]	Reciclo FIC47028 [BPD]	T Cima TI47075 [°F]	T Medios TI47076 [°F]	T Fondos TI47077 [°F]	P Cima PIC47096 [psi]	P Medios PI47155 [psi]	P Fondos PI47081 [psi]	Recuperación Jet [%] - Modelo	Punto de Congelación [°F] - Modelo	° C
42000	CASO 1 B	5000,0	37000,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	605,3	9,3	34,5	11,7	89%	-53	-47,00
51000	CASO 2 B	5000,0	46000,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	599,5	9,3	34,5	11,7	85%	-53	-47,00
60000	CASO 3 A	2500,0	57500,0	558,7	10762,5	245,0	408,4	595,7	9,3	34,5	11,7	89%	-53	-47,00

Tabla 21. Promedio de los casos planteados

Promedios	
% Recup.	Pto Cong.
87%	-47

Para este caso el porcentaje de aumento en la recuperación de jet es del 33%, comparado con el promedio de recuperación histórico de la unidad de hidrotreamiento.

Tabla 22. Resultado de los casos de menor recuperación

Carga Total [BPD]		VARIABLES MEDIBLES										VARIABLES DEPENDIENTES		
		Jet [BPD]	Diesel [BPD]	T Entrada TI 47074 [°F]	Reciclo FIC47028 [BPD]	T Cima TI47075 [°F]	T Medios TI47076 [°F]	T Fondos TI47077 [°F]	P Cima PI47096 [psi]	P Medios PI47155 [psi]	P Fondos PI47081 [psi]	recup. racion Jet [%] - Modelo	Punto de Congelacion [°F] - Modelo	° C
42000	CASO 1 C	10000	32000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	70%	-66	-54,48
51000	CASO 2 C	10000	41000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	78%	-61	-51,81
60000	CASO 3 C	10000	50000,0	558,7	13000,0	245,0	408,4	600,1	9,3	34,5	11,7	85%	-56	-49,14

Tabla 23. Promedios de menores

Promedios	
% Recup.	Pto Cong.
78%	-51,81

Para este caso el porcentaje de aumento en la recuperación de jet es del 24%, comparado con el promedio de recuperación histórico de la unidad de hidrotreamiento y se destacan por presentarse con el mayor contenido de jet en la carga y por maximizar la recuperación de jet ajustando al flujo máximo de reciclo de la torre. Puede deberse a

una limitación mecánica en la torre de destilación que se podrá comprobar haciendo el ejercicio en planta o con la ayuda de un simulador.

Tabla 24. Resultado de los casos de recuperación media.

Carga Total [BPD]		VARIABLES MEDIBLES										VARIABLES DEPENDIENTES		
		Jet [BPD]	Diesel [BPD]	T Entrada TI 47074 [°F]	Reciclo FIC47028 [BPD]	T Cima TI47075 [°F]	T Medios TI47076 [°F]	T Fondos TI47077 [°F]	P Cima PIC47096 [psi]	P Medios PI47155 [psi]	P Fondos PI47081 [psi]	Recuperación Jet [%] - Modelo	Punto de Congelación [°F] - Modelo	° C
42000	CASO 1 A	2500,0	39500	558,7	10762,5	245,0	400,3	600,1	9,3	34,5	11,7	80%	-53	-47,00
51000	CASO 2 A	2500,0	48500	558,7	10762,5	245,0	408,4	597,2	9,3	34,5	11,7	84%	-53	-47,00
60000	CASO 3 B	5000,0	55000	558,7	10762,5	245,0	408,4	596,8	9,3	34,5	11,7	87%	-53	-47,00

Tabla 25. Promedio

Promedios	
% Recup.	Pto Cong.
84%	-47

Para este caso el porcentaje de aumento en la recuperación de jet es del 30%, comparado con el promedio de recuperación histórico de la unidad de hidrotreatmento.

4.5 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN Y CALIDAD DEL JET

Esta sección fue tomada del capítulo 2.5 del proyecto de pregrado titulado: “Propuesta y desarrollo de un modelo estadístico para predecir el porcentaje de recuperación y calidad de jet obtenido en una unidad de hidrotreatmento de diésel”, de Ramirez y Vesga, el cual hace parte integral de la presenta investigación de Maestría, ya que el autor de la misma fue codirector del trabajo de pregrado y participó activamente en el logro de los objetivos del mismo.

Tabla 26. Valores promedio de las variables independientes

Variable Independiente	Unidad	Valor Promedio
Jet (Carga U-4700)	BPD	7.536,86
Diésel (Carga U-4700)	BPD	40.492,33
Temperatura Entrada	°F	558,71
Reciclo	BPD	10.762,50
Temperatura de Cima	°F	252,55
Temperatura Línea de Jet	°F	408,38
Temperatura de Fondos	°F	600,12
Presión de Cima	psi-g	9,26
Presión Línea de Jet	psi-g	34,45
Presión de Fondos	psi-g	11,70

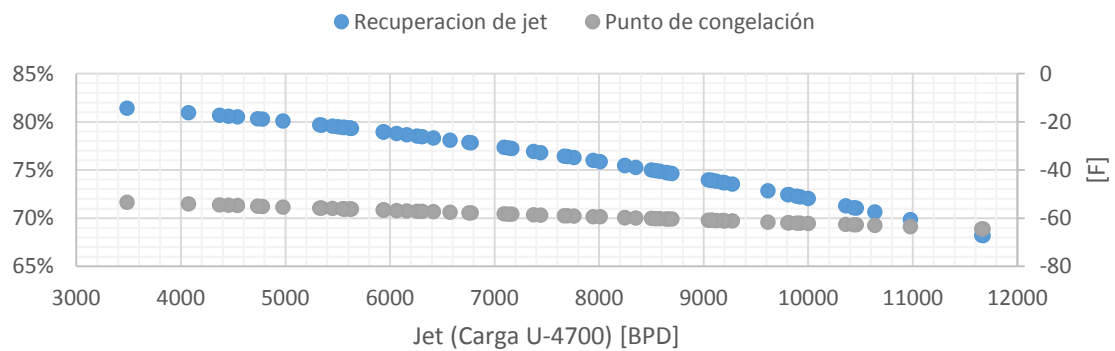
Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

La Tabla 24 muestra los valores promedios de las variables independientes que se utilizaran para trazar gráficamente el comportamiento de los modelos estadísticos

con respecto a la variación de una de ellas. Este promedio se calculó del banco de 69 datos históricos para la validación de los modelos.

4.5.1 Variación de jet (carga) y respuesta de los modelos

Figura 12. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Jet (Carga U-4700)



Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

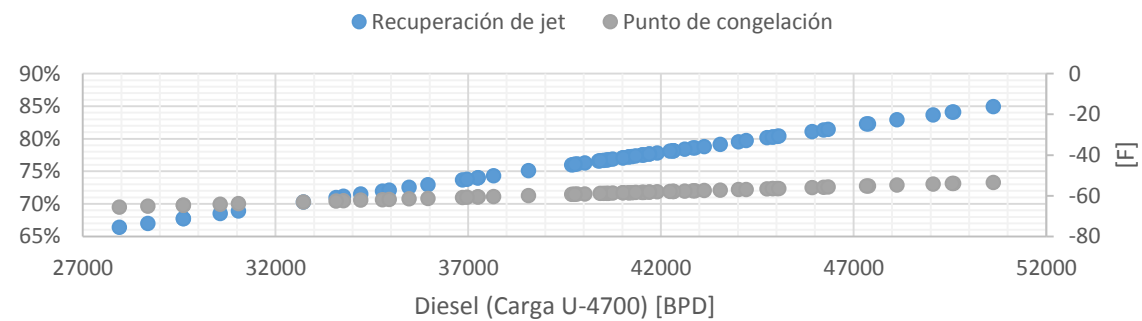
En la Figura 12 se observa el comportamiento del porcentaje de recuperación y punto de congelación conforme cambia la carga de Jet en la alimentación. A partir de la cual se puede inferir que cargas bajas en contenido de Jet favorecen el porcentaje de recuperación del mismo, mientras que cargas con alto contenido de este no implican mayores recuperaciones.

En la refinería se evidenció este comportamiento ya que al intentar alimentar cargas con mayores contenidos de Jet no notaron que se recuperara mayor contenido de éste como producto destilado. Una posible explicación para este comportamiento es que las fracciones más livianas del Diésel alimentado a la unidad de hidrotreatmento, son recuperadas como Jet en la torre T-4702.

La gráfica muestra que el punto de congelación se hace menor para cargas con alto contenido de Jet.

4.5.2 Variación de diésel (carga) y respuesta de los modelos

Figura 13. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Diésel (Carga U-4700)



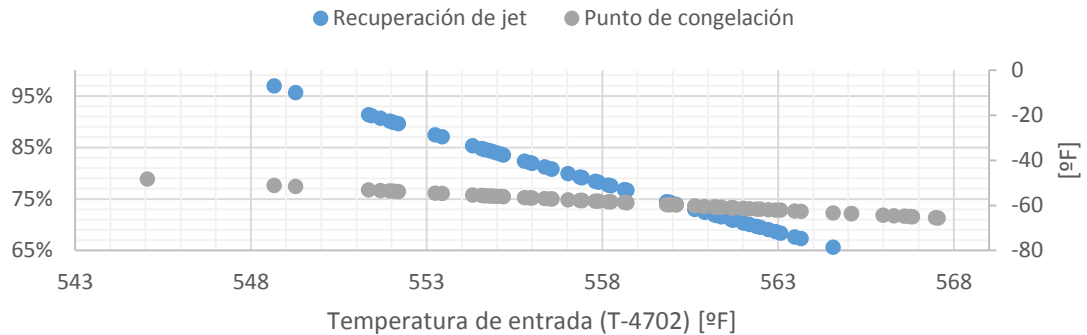
Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

La recuperación de Jet es mayor para cargas con alto porcentaje de Diésel, teniéndose porcentajes de recuperación superiores al 85% para cargas con valores superiores a los 50.000 BPD de Diésel.

En términos de calidad del Jet la presencia de bajo contenido de Diésel en la carga hace que el punto de congelación del Jet destilado sea menor, que es lo que se desea obtener, por tanto, se podría recomendar que los valores de Diésel en la carga estén alrededor de los 50.000 BPD, los cuales según los históricos de la planta, con este valor de carga registra calidades de Diésel aceptables.

4.5.3 Variación de temperatura de entrada (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 14. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de entrada

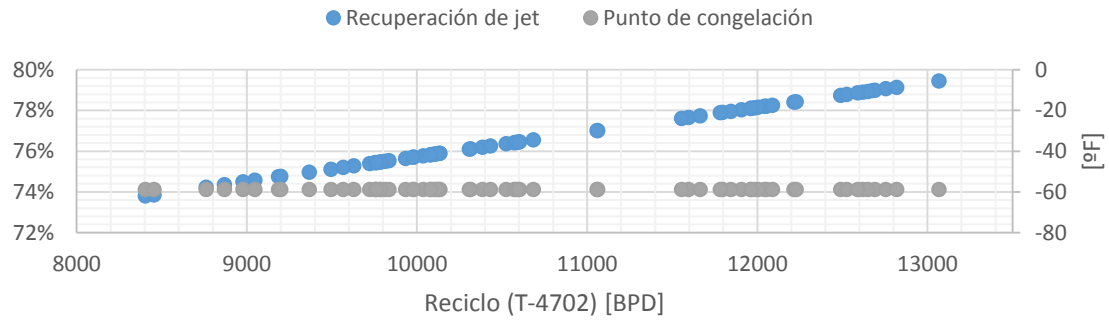


Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

En la Figura 14 se observa el comportamiento del porcentaje de recuperación y el punto de congelamiento conforme la temperatura de entrada a la torre T-5702 cambia. En esta figura se aprecia claramente que los valores de temperatura de entrada en la torre se deben mantenerse en el intervalo 550 a 560 °F para favorecer el porcentaje de recuperación, ya que a medida que se da la transferencia a lo largo de la torre esta se va enfriando, de modo que se debe garantizar que haya una elevada temperatura en la entrada y así en el plato donde se retira el Jet, la torre alcance una temperatura que sea cercana al intervalo de punto de ebullición del Jet. Además por encima de 560 °F se aprecia que la temperatura del punto de congelamiento cumple con el parámetro de calidad, es decir, está alrededor de -60°F ^[10].

4.5.4 Variación de reciclo (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 15. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Reciclo



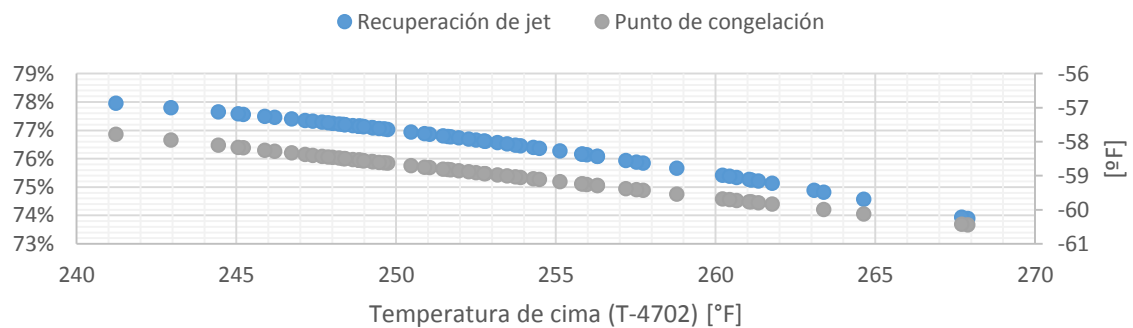
Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

El reciclo determina la cantidad de Jet recuperado, en proporción más o menos de Jet puede llegar a ser el 70% del reciclo^[10].

El reciclo parece no tener ninguna relación con el punto de congelación del Jet.

4.5.5 Variación de temperatura de cima (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 16. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de cima

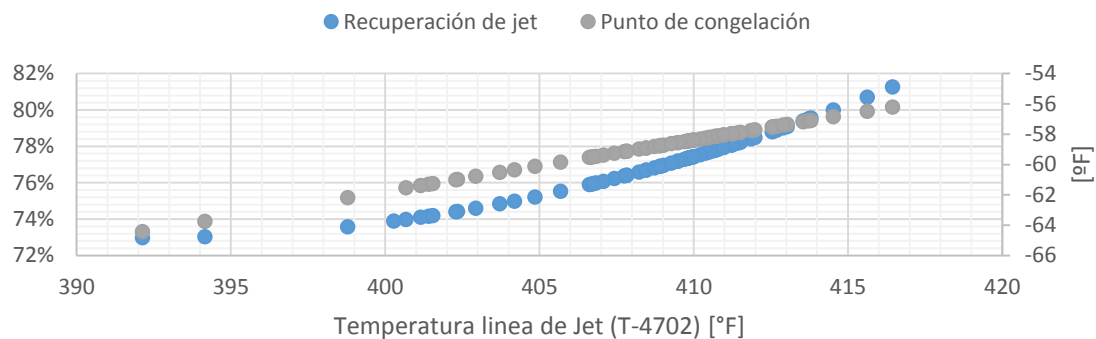


Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Para temperaturas de cima menores a los 250 °F se tendrían mayores rendimientos; sin embargo el punto de congelamiento estaría por encima del mínimo permitido de -60°F. Esta temperatura de cima en la refinería no se trabaja a valores menores a los 240 °F ya que de lo contrario se correría el riesgo de dañar la torre. Se sugiere mantener la temperatura de cima en valores de 240°F a 250°F.

4.5.6 Variación de temperatura línea de jet y respuesta de los modelos

Figura 17. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura línea de Jet

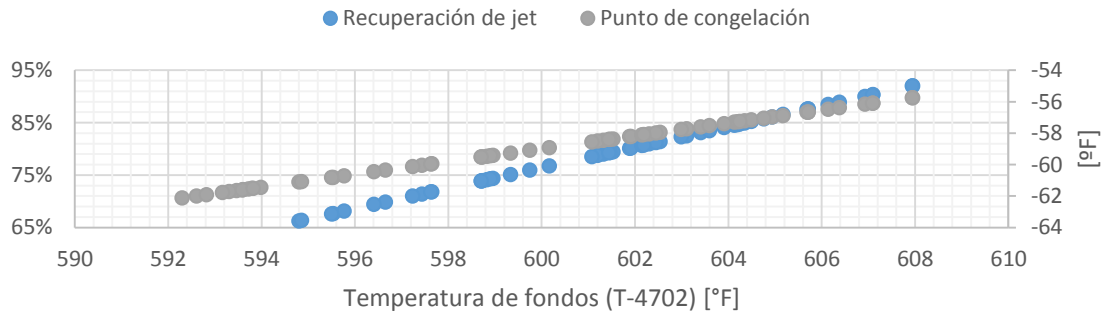


Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Los valores de temperatura en la línea de Jet deben ser altos si se quieren obtener altos porcentajes de recuperación y se recomienda que estos valores se encuentren cercanos al intervalo de temperatura de ebullición del Jet que es de 350°F a 500°F. Por otra parte el punto de congelamiento se hace menor para valores de temperatura de línea de Jet alrededor de 410°F.

4.5.7 Variación de temperatura de fondos (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 18. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Temperatura de fondos

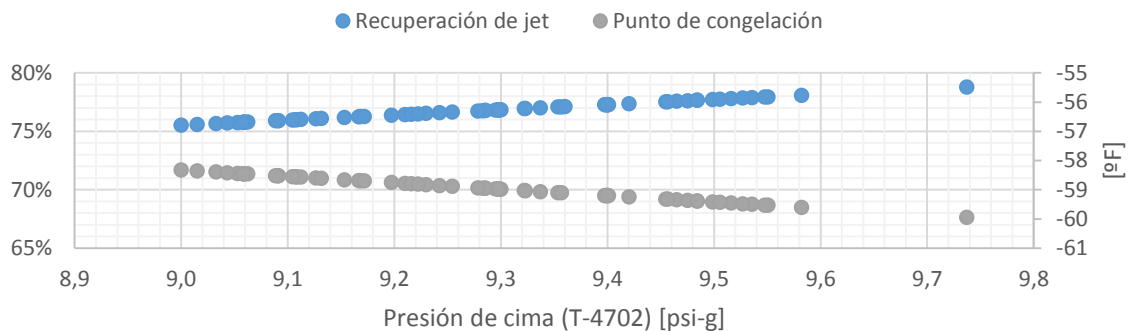


Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Con una temperatura de los fondos mayores a 600°F se contribuye a una mayor recuperación de Jet, pero se sacrifica un poco el punto de congelamiento. Se sugiere trabajar con una temperatura de fondo que esté en valores cercanos a 608°F.

4.5.8 Variación de presión de cima (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 19. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión de cima

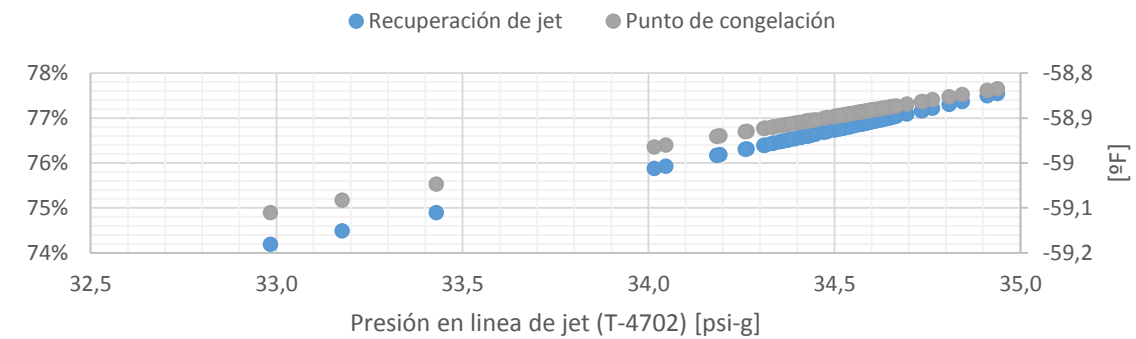


Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Desde el punto de vista de la recuperación de Jet, una mayor presión de cima favorece la recuperación, para en este caso en especial se sugiere que la presión esté en un valor de 9,5 psi-g. De igual manera este valor favorece al punto de congelación que se encuentra en valor estimado de -60 °F [10].

4.5.9 Variación de presión en línea de jet y respuesta de los modelos

Figura 20. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión en línea de Jet



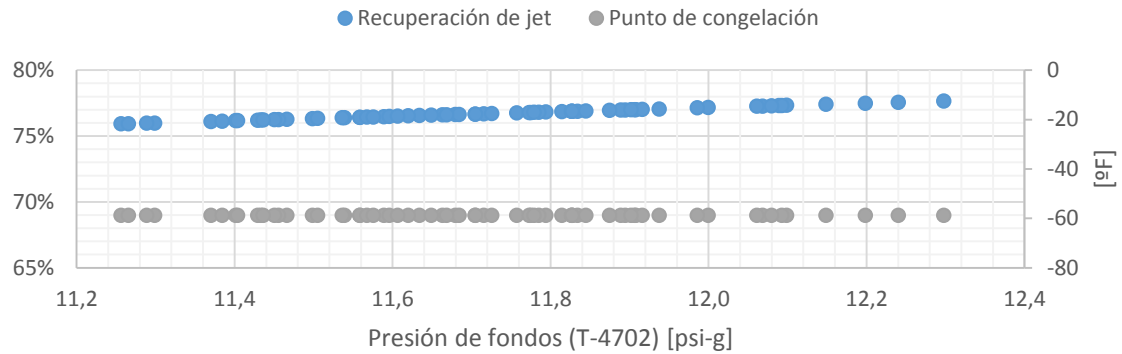
Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

En esta figura la recuperación y el punto de congelación del Jet tienen un mismo comportamiento.

Se sugiere que se mantenga en un valor cercano a 35 psi-g.

4.5.10 Variación de presión de fondos (T-4702) y respuesta de los modelos

Figura 21. Recuperación y Punto de congelación de Jet Vs. Presión de fondos



Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Con respecto a la recuperación de Jet, se puede evidenciar que fluctúa entre 76% a 78% a una presión de 11 a 12 psi-g, lo que hace la distancia entre estos muy pequeña, pudiéndose considerar casi constantes durante el proceso.

De igual manera para el punto de congelación, se observó una temperatura casi constante en cualquier valor de presión.

Se sugiere operar la torre a una presión de fondo de 12 psi-g para una mejor recuperación de Jet dado que es uno de los valores de presión de fondos más utilizado en la planta.

4.5.11 Tabla resumen de intervalos de operación sugeridos para las variables independientes de los modelos A continuación, se muestra un resumen (Véase Tablas 25 y 26) de las sugerencias de los valores en los cuales debería operar la torre separadora T-4702 perteneciente a la unidad de HDT, los

cuales surgieron del análisis de la influencia de las variables independientes sobre el porcentaje de recuperación y calidad del Jet.

Tabla 27. Sugerencia de intervalos de variables independientes para modelo de porcentaje de recuperación de Jet

Condición Operación	Rango de Operación	Observación
Jet (Carga U-4700)	4.000 a 6.000 BPD	De acuerdo al estudio, cargas menores en contenido de Jet favorecen la recuperación del mismo
Diésel (Carga U-4700)	Alrededor de 50.000 BPD	Los valores de Diésel no deben ser mayores a la capacidad de la torre que es de 56000 BPD
Temperatura de Entrada	Alrededor de 550 °F	Se utilizara esta temperatura ya que garantiza que no haya perdida del compuesto volátil (Jet)
Reciclo	13.000 BPD	Favorece la cantidad del producto recuperado
Temperatura de Cima	De 240°F a 250°F	Dado que a valores menores se corre el riesgo de dañar los platos de la torre, ya que presentaría condensación de agua
Temperatura en Línea de Jet	Alrededor de 410 °F	Temperatura dentro del intervalo de ebullición y utilizada históricamente en la planta
Temperatura de Fondos	Alrededor de 608 °F	Para mantener un perfil de temperatura adecuado
Presión de Cima	9,5 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta
Presión Línea de Jet	35 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta
Presión de Fondos	12 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 2015

Tabla 28. Sugerencia de intervalos de variables independientes para modelo de punto de congelación del Jet

Condición Operación	Rango de Operación	Observación
Jet (Carga U-4700)	6.000 a 10.000 BPD	A mayor contenido de Jet en la carga, se mejora la calidad del mismo
Diésel (Carga U-4700)	Alrededor de 50.000 BPD	Los valores de Diésel no deben ser mayores a la capacidad de la torre que es de 56000 BPD
Temperatura de Entrada	Alrededor de 560 °F	Genera valores de calidad aceptables
Reciclo	13.000 BPD	Favorece la calidad del producto recuperado
Temperatura de Cima	De 240°F a 250°F	Dado que a valores menores se corre el riesgo de dañar los paltos de la torre, ya que presentaría condensación de agua
Temperatura en Línea de Jet	Alrededor de 410 °F	Temperatura dentro del intervalo de ebullición y utilizada históricamente en la planta
Temperatura de Fondos	Alrededor de 608 °F	Genera valores de calidad aceptables
Presión de Cima	9,5 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta
Presión Línea de Jet	35 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta
Presión de Fondos	12 psi-g	Valor constante en operabilidad de la planta

Fuente: RAMIREZ y VESGA, 201

5. RESULTADOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN QUE AUMENTAN EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN VOLUMÉTRICO DE JET

A continuación, se presenta la evaluación económica de los 9 casos planteados para la evaluación de los modelos estadísticos.

Los casos fueron evaluados a partir de los datos operativos de la unidad de manera que coincidan con el volumen de carga para cada caso (42.000, 51.000 y 60.000 BPD) y el flujo de jet alimentado en la carga (2.500, 5.000 y 10.000 BPD).

Para todos los casos, se encontró que a pesar de que se reporta un flujo de jet con la carga, al momento de aplicar la metodología descrita en el numeral 2.2, el contenido real de jet es superior, esto debido a que el corte en las torres de las unidades de destilación primaria permiten un traslapo entre los diferentes productos, en este caso, entre el diésel y el jet, lo que aumenta el contenido de livianos en el jet, es decir, un volumen adicional de jet en la carga total a la unidad de hidrotratamiento.

Con este argumento, se entiende que, para los días analizados, de haberse aplicado las condiciones operativas sugeridas por el modelo, hubiese sido mayor la recuperación del jet que contenía la carga cumpliendo siempre con el parámetro de calidad punto de congelación.

5.1 CASOS DE MAYOR RECUPERACIÓN DE JET

Los casos en donde se presenta mayor recuperación con la aplicación de los modelos son los casos 1B, 2B Y 3A. Como característica especial la mayor recuperación se da ajustando la temperatura de fondos mientras las demás variables permanecen en los valores promedio lográndose un promedio del porcentaje de recuperación de jet para los tres casos de 87%.

Se presenta a manera de ejemplo el caso en donde el flujo de carga es de 42 kBPD con un flujo de jet de 5 kBPD (Caso 1B). El total de los casos se presentan en el ANEXO D.

Tabla 29. Ejemplo del análisis económico de los valores de mayor de recuperación de jet

Caso evaluado		1B	
Composición (BPD)			
Carga	Diésel	Jet	
42.000	37.000	5.000	

Real Planta	42.334,8	38.956,9	3.377,9
Calculado Modelo	42.000,0	37.888,2	4.111,8

Precios (U\$/bl)	Fecha	26 de marzo de 2014	
	118,50	120,00	121,50

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	68.569,11	%	U\$/dia
Calculado Modelo	69.167,70	0,87	598,59

En este caso, el día 26 de marzo se tenía una carga de 42.334,8 BPD. Aplicando la metodología descrita en el numeral 2.2, el contenido de jet en la carga era del

11% (4.656,8 barriles) de los cuales se logró recuperar solo el 73% (3.377,9 barriles).

Con las condiciones mostradas en la Tabla 20 se pudo haber recuperado el 89% del jet que contenía la carga (4.111,8 barriles) arrojando una ganancia adicional de 598,59 dólares.

5.2 CASOS MEDIOS DE RECUPERACIÓN DE JET

Los casos en donde la recuperación de jet cumpliendo el parámetro de calidad de punto de congelación es un valor intermedio son los casos 1A, 2A, 3B.

Se presenta el análisis económico para caso 1A en donde la carga total es de 42.000 BPD y el contenido de jet en la carga era de 2.500 BPD, (Tabla 28). Los otros dos casos se encuentran en el ANEXO D.

En este caso el ajuste que maximiza la recuperación se hizo sobre la variable temperatura de medios alcanzando una recuperación de 80% del jet en la carga y representando una ganancia adicional de 361,65 U\$ por día. Al igual que en los otros análisis, las demás variables permanecieron en el valor promedio.

El día 5 de marzo de 2012, el contenido de jet en la carga era del 8% (3302,4 bls) y se recuperó el 73% de este contenido de jet (2.456,7 bls) mientras que con el análisis de los modelos se podría haber recuperado hasta el 80% (2.688 bls).

Tabla 30. Ejemplo del análisis económico de los valores medios de recuperación de Jet

Caso evaluado		1A	
Composición (BPD)			
Carga	Diésel	Jet	
42.000	39.500	2.500	

Real Planta	42.179,7	39.723,0	2.456,7
Calculado Modelo	42.000,0	39.312,0	2.688,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	5 marzo de 2012	
	133,2	134,2	136,5

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	47.751,61	%	U\$/día
Calculado Modelo	48.113,26	0,75	361,65

5.3 CASOS DE MENOR RECUPERACIÓN

Particularmente el menor porcentaje de recuperación se presentaron en los casos en donde el flujo de jet es el mayor, casos 1C, 2C y 3C, sin embargo y debido a que el flujo de jet es alto, al momento de realizar la evaluación económica da como resultado un valor adicional de ingresos alto. Por ejemplo, en el caso 1C analizado con los datos del día 5 de junio de 2013, en donde el total de la carga es de 42.000 BPD y el contenido de jet es de 10.000 BPD, se recuperó el 40% del total de jet en la carga (4147 bls) mientras que con las condiciones planteadas a partir de los modelos de este estudio la recuperación podría haber llegado hasta el 70% (7.056 bls) arrojando una ganancia adicional de 11.649,32 U\$ por día. El ajuste que maximiza la recuperación para los tres casos es el reciclo con un valor de 13.000 BPD, aumentando el intercambio al interior de la torre lo que se ve

reflejado en un mayor flujo de producto. Se presenta como ejemplo en la tabla 28, el caso 1C, los otros dos casos se encuentran en el ANEXO D.

Tabla 31. Ejemplo del análisis económico de los valores de menor de recuperación de jet

Caso evaluado		1C	
Composición (BPD)			
Carga	Diésel	Jet	
42.000	32.000	10.000	

Real Planta	43.640,5	39.493,0	4.147,4
Calculado Modelo	42.000,0	34.944,0	7.056,0

Precios (U\$/b)	Fecha	5 de junio de 2013	
	115,10	115,80	120,20

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	48.797,08	%	U\$/dia
Calculado Modelo	60.446,40	19,27	11.649,32

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Evaluando cada caso, el mejor escenario financiero, es el caso 1C, que corresponde a una carga 42.000 BPD con una concentración de 10.000 BPD de jet en la carga. Un resumen de sus condiciones operativas se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 32. Características mejor escenario económico

	Carga Total [BPD]	42 000
		CASO 1C
VARIABLES INDEPENDIENTES (En Planta)	Jet [BPD]	10 000
	Diésel [BPD]	32 000
	T Entrada TI 47074 [°F]	558,7
	Reciclo FIC47028 [BPD]	13 000
	T Cima TI47075 [°F]	245
	T Medios TI47076 [°F]	408,4
	T Fondos TI47077 [°F]	600,1
	P Cima PIC47096 [psi]	9,3
	P Medios PI47155 [psi]	34,5
	P Fondos PI47081 [psi]	11,7
VARIABLES DEPENDIENTES (Modelo)	Recuperación Jet [%]	70%
	Punto de Congelación [°F]	-66
	° C	-54,48

El ítem más relevante para este caso es el reciclo de la torre con un valor de 13.000 BPD, las demás variables se mantienen en el promedio de los valores del último semestre del 2014 con los cuales se validaron los modelos resultado de este estudio.

6. CONCLUSIONES

- Del estudio estadístico de la operación de la unidad de hidrotratamiento se obtienen dos modelos matemáticos independientes que representan la recuperación de jet y el de punto de congelación como función de las variables de temperatura, reciclo y presión; siendo las más influyentes la temperatura y el reciclo.
- Los modelos matemáticos representan una aproximación aceptable del comportamiento de la torre separadora de diésel T-4702 con un error promedio máximo de 12% y un nivel de confianza de 95%.
- Los modelos matemáticos presentados en este estudio son independientes. Esta característica, representa una ventaja significativa pues es posible direccionar la producción de acuerdo con las necesidades del negocio.
- El ejercicio realizado en este documento es de vital importancia para ECOPETROL S.A, ya que los estudios realizados anteriormente estaban enfocados desde una perspectiva volumétrica, pero esta vez, se examinó también la calidad del producto. Esto demuestra el valioso aporte de la propuesta del modelo ya que permite aumentar los porcentajes de recuperación manteniendo la calidad del producto.
- El mejor margen operativo, fue obtenido en el caso 1C (carga máxima de 42 kBPD: 32 kBPD Diésel, 10 kBPD Jet), obteniendo un margen adicional de 19,27%, lo que representan aproximadamente (US) \$11 649,32 diarios.
- Los resultados de este estudio fueron obtenidos a partir de un análisis estadístico y aunque se encuentran condiciones operativas para cada caso que maximizan la recuperación de jet de la carga cumpliendo el parámetro de calidad de punto de congelamiento, cada una de ellas deben ser verificadas en planta o con la ayuda de un simulador de procesos.

7. RECOMENDACIONES

Evaluar las condiciones propuestas en planta, de manera que se pueda verificar la confianza de los modelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, PA; CORSANO G y BARTTFELD M.:Un Método Híbrido para la Síntesis Óptima de Procesos de Destilación Multicomponente. En: Información Tecnológica. Vol 12 N. 1 (2001). p 119-126. ISSN 0716-8756.

ALVAREZ, M.; HOYOS, L., y ZAMBRANO, L.: Modelado del proceso de hidrotratamiento de diesel.. En: Revista ION. Vol 25 N°2. 2012 p 7-13.

ALCANTAR, R; TREVIÑO, F; y MARTINEZ, J.: Modelo estadístico que permite observar el impacto de los factores que inciden en el rendimiento de combustible. En: Revista Nova Scientia, Vol. 7. 2015.

ANDREWS, S. Fastqc, (2010). A quality control tool for high throughput sequence data. 2010

AUGEN, J. Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine: Addison-Wesley Professional,2004. 408 p. ISBN-10: 0321173864

AXENS NORTH AMERICA, INC. Procesos de Hidrotratamiento de combustibles. Princeton, North America. 2008

BAUER, M. H.. Design and economic optimization of azeotropic distillation processes using mixed integer nonlinear programming. En: Computers & Chemical Engineering. Vol. 22 Issue 9. 1998. p 1271-1286

BLANKENBERG, D et al (2010). Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists. En: Current protocols in molecular biology, 2010. Capitulo 9 y 10.

BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. En: Numerical Mathematics. Vol. 4 Issue 1. 1962. p 238 - 252.

BOLGER, A.; LOHSE, M y USADEL,B: Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. En: Bioinformatics. 2014. Disponible en: <http://bioinformatics.oxfordjournals.org/>

BORCHERS, B. &. An improved branch and bound algorithm for mixed integer nonlinear programming. En: Computers and Operations Research. NY. 1991

BRUGGEMANN S., M. W. Shortcut methods for nonideal multicomponent distillation: Providing initials and bounds for rigorous optimization. 2001

CARVALHO, M. V. Otimização seqüencial por aproximações – uma aplicação em tempo real para o refino de petróleo. Doctor en Ingeniería Química. Rio de Janeiro, Brasil. Universidad Federal de Río de Janeiro. 2007.

CASTILLO, R. Desarrollo de modelos de regresión que representen el comportamiento del número de octano y rendimiento del reformado de la unidad de reformación catalítica de nafta (U-20) de la refinería Puerto la Cruz-PDVSA. Universidad de Oriente. Venezuela. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Barcelona: Universidad de Oriente. Departamento de Ingeniería Química. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. 2010. 122 p

CORDIDO, A; GUERA, A; y PEREZ, S.: Modelaje de los principales equipos de la unidad de alquilación de la refinería de Palito. 2011. Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a1n2/ing1.pdf>

COORDINACIÓN DE PROCESOS, ECOPETROL S.A. Corrida de evaluación para cargar 60 kBPD en U-4700. Barrancabermeja. 2013

DING-MEI, S. R. A combined SQP and branch and bound algorithm for MINLP optimization. Internal Report, London: Centre for Process Systems Engineering. 1992.

DUNNEBIER, G. &.. Optimal design of thermally coupled distillation columns. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. 1999. p 162-176

DURAN, M. A.. An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. En: Mathematical Programming. Vol 36 Issue 3.1986. 307-339 p.

FLETCHER, R. &. Solving mixed integer nonlinear programs by outer approximation. En: Mathematical Programming. Vol 66 Issue 1.1994. 327-349 p.

FLETCHER, R. &. Initializing distillation column models. Numerical Analysis Report N/A. 2000. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.24.6603&rep=rep1&type=pdf>

GARZÓN, L. L. Levantamiento de informacion y preparacion de informe para la validacion del modelo caso base en pro/ii de la planta de hidrotratamiento prime de de la refineria GRB. Piedecuesta, Colombia. 2012

GEOFFRION, A. M. Generalized benders decomposition. En: Journal of Optimization Theory and Applications. Vol 10 N 4. 1972

GROSSMAN, I. Review of nonlinear mixed-integer and disjunctive programming techniques. En: Optimization and Engineering. 2002. Disponible en: <https://www.math.ucdavis.edu/~deloera/MISC/BIBLIOTECA/trunk/GrossmannReviewNon.pdf>

GUPTA, O. K.: Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming. En: Management Science. 1985. p 1533-1546.

JACKSON, J y GROSSMAN, I: A Disjunctive programming approach for the optimal design of reactive distillation columns. En: Computers & Chemical Engineering. Vol 25 Issues 11-12. 2001. p 1661-1673.

KOCIS, G. R.: Relaxation strategy for the structural optimization of process flowsheets. En: Industrial and Engineering Chemical Research. Vol 26. N 9. 1987. p 1869-1880.

LÓPEZ, D. C. et al. Análisis jerárquico de variables de operación de una torre de destilación de crudo usando datos de planta, modelos de simulación y diseño de experimentos. En: Revista ION. Vol 1 No2. 2008. p7-16.

Mohammed Jibril, A. D: Simulation of Kaduna Refining and Petrochemical Company (KRPC) Crude Distillation Unit (CDU I) Using Hysys. International journal of advanced scientific research and technology, Volumen 1. 2012

MORA, J. Formulación de un modelo matemático para estimar el volumen recobrado de los principales productos en torres de destilación atmosférica. Trabajo de grado. Ingeniero Químico. Cartagena, Colombia. Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2013

PI, ECOPETROL. Datos operativos U-4700. Barrancabermeja. 2014

PROYECCION DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y GNV EN COLOMBIA. República de Colombia Ministerio de Minas y Energías; UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. Octubre 2010

RAMIREZ , C y VESGA, A. Propuesta y desarrollo de un modelo estadístico para predecir el porcentaje de recuperación y calidad de jet obtenido en una unidad de hidrotreatmento de diésel. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2015. 62 p

RAMAN, R. y GROSSMAN I. Modelling and computational techniques for logic based integer programming. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 18 Issue 7. 1994. p 563-578.

STUBBS, R y MEHROTRA, S. A branch-and-cut method for 0–1 mixed convex programming. En: Mathematical Programming. Vol 86 issue 3. 1999. p 515-532

VISWANATHAN, J. &.. A combined penalty function and outer-approximation method for MINLP optimization. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 14 issue 7. 1990. p 769-782.

VISWANATHAN, J. y GROSSMAN, I.: An alternative MINLP model for finding the number of trays required for a specified separation objective. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 7 Issue 9.1993. p 949-955

YEOMANS, H.y GROSSMAN I.: Disjunctive programming models for the optimal design of distillation columns and separation sequences. En: Industrial and Engineering Chemical Research. Vol 39 Issue 6. 2000. p 1637-1648.

YUAN, X. Z.. Une Methode d'optimisation Nonlineare en variables Mixtes pour la
Conception de Procedes. 1988

BIBLIOGRAFÍA

AGUIRRE, PA; CORSANO G y BARTTFELD M.:Un Método Híbrido para la Síntesis Óptima de Procesos de Destilación Multicomponente. En: Información Tecnológica. Vol 12 N. 1 2001. p 119-126. ISSN 0716-8756.

ALVAREZ, M.; HOYOS, L., y ZAMBRANO, L.: Modelado del proceso de hidrotratamiento de diesel.. En: Revista ION. Vol 25 N°2. 2012 p 7-13.

ALCANTAR, R; TREVIÑO, F; y MARTINEZ, J.: Modelo estadístico que permite observar el impacto de los factores que inciden en el rendimiento de combustible. En: Revista Nova Scientia, Vol. 7. 2015.

ANDREWS, S. Fastqc, . A quality control tool for high throughput sequence data. 2010

AUGEN, J. Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine: Addison-Wesley Professional, 2004. 408 p. ISBN-10: 0321173864

AXENS NORTH AMERICA, INC. Procesos de Hidrotratamiento de combustibles. Princeton, North America. 2008

BAUER, M. H.. Design and economic optimization of azeotropic distillation processes using mixed integer nonlinear programming. En: Computers & Chemical Engineering. Vol. 22 Issue 9. 1998. p 1271-1286

BLANKENBERG, D et al . Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists. En: Current protocols in molecular biology, 2010. Capitulo 9 y 10.

BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. En: Numerical Mathematics. Vol. 4 Issue 1. 1962. p 238 - 252.

BOLGER, A.; LOHSE, M y USADEL,B: Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. En: Bioinformatics. 2014. [en línea] Disponible en: <http://bioinformatics.oxfordjournals.org/>

BORCHERS, B. &. An improved branch and bound algorithm for mixed integer nonlinear programming. En: Computers and Operations Research. NY. 1991

BRUGGEMANN S., M. W. Shortcut methods for nonideal multicomponent distillation: Providing initials and bounds for rigorous optimization. 2001

CARVALHO, M. V. Otimização seqüencial por aproximações – uma aplicação em tempo real para o refino de petróleo. Doctor en Ingeniería Química. Rio de Janeiro, Brasil. Universidad Federal de Río de Janeiro. 2007.

CASTILLO, R. Desarrollo de modelos de regresión que representen el comportamiento del número de octano y rendimiento del reformado de la unidad de reformación catalítica de nafta (U-20) de la refinería Puerto la Cruz-PDVSA. Universidad de Oriente. Venezuela. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Barcelona: Universidad de Oriente. Departamento de Ingeniería Química. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. 2010. 122 p

CORDIDO, A; GUERA, A; y PEREZ, S.: Modelaje de los principales equipos de la unidad de alquilación de la refinería de Palito. 2011. [en línea] Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a1n2/ing1.pdf>

COORDINACIÓN DE PROCESOS, ECOPETROL S.A. Corrida de evaluación para cargar 60 kBPD en U-4700. Barrancabermeja. 2013

DING-MEI, S. R. A combined SQP and branch and bound algorithm for MINLP optimization. Internal Report, London: Centre for Process Systems Engineering. 1992.

DUNNEBIER, G. &.. Optimal design of thermally coupled distillation columns. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. 1999. p 162-176

DURAN, M. A.. An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. En: Mathematical Programming. Vol 36 Issue 3.1986. 307-339 p.

FLETCHER, R. &. Solving mixed integer nonlinear programs by outer approximation. En: Mathematical Programming. Vol 66 Issue 1.1994. 327-349 p.

FLETCHER, R. &. Initializing distillation column models. Numerical Analysis Report N/A. 2000. [en línea] Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.24.6603&rep=rep1&type=pdf>

GARZÓN, L. L. Levantamiento de informacion y preparacion de informe para la validacion del modelo caso base en pro/ii de la planta de hidrotratamiento prime de de la refineria GRB. Piedecuesta, Colombia. 2012

GEOFFRION, A. M. Generalized benders decomposition. En: Journal of Optimization Theory and Applications. Vol 10 N 4. 1972

GROSSMAN, I. Review of nonlinear mixed-integer and disjunctive programming techniques. En: Optimization and Engineering. 2002. [en línea] Disponible en: <https://www.math.ucdavis.edu/~deloera/MISC/BIBLIOTECA/trunk/GrossmannReviewNon.pdf>

GUPTA, O. K.: Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming. En: Management Science. 1985. p 1533-1546.

JACKSON, J y GROSSMAN, I: A Disjunctive programming approach for the optimal design of reactive distillation columns. En: Computers & Chemical Engineering. Vol 25 Issues 11-12. 2001. p 1661-1673.

KOCIS, G. R.: Relaxation strategy for the structural optimization of process flowsheets. En: Industrial and Engineering Chemical Research. Vol 26. N 9. 1987. p 1869-1880.

LÓPEZ, D. C. et al. Análisis jerárquico de variables de operación de una torre de destilación de crudo usando datos de planta, modelos de simulación y diseño de experimentos. En: Revista ION. Vol 1 No2. 2008. p7-16.

MOHAMMED Jibril, A. D: Simulation of Kaduna Refining and Petrochemical Company (KRPC) Crude Distillation Unit (CDU I) Using Hysys. International journal of advanced scientific research and technology, Volumen 1. 2012

MORA, J. Formulación de un modelo matemático para estimar el volumen recobrado de los principales productos en torres de destilación atmosférica. Trabajo de grado. Ingeniero Químico. Cartagena, Colombia. Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2013

PI, ECOPETROL. Datos operativos U-4700. Barrancabermeja. 2014

PROYECCION DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y GNV EN COLOMBIA. República de Colombia Ministerio de Minas y Energías; UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. Octubre 2010

RAMIREZ , C y VESGA, A. Propuesta y desarrollo de un modelo estadístico para predecir el porcentaje de recuperación y calidad de jet obtenido en una unidad de hidrotreatmento de diésel. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2015. 62 p

RAMAN, R. y GROSSMAN I. Modelling and computational techniques for logic based integer programming. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 18 Issue 7. 1994. p 563-578.

STUBBS, R y MEHROTRA, S. A branch-and-cut method for 0–1 mixed convex programming. En: Mathematical Programming. Vol 86 issue 3. 1999. p 515-532

VISWANATHAN, J. &.. A combined penalty function and outer-approximation method for MINLP optimization. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 14 issue 7. 1990. p 769-782.

VISWANATHAN, J. y GROSSMAN, I.: An alternative MINLP model for finding the number of trays required for a specified separation objective. En: Computer and Chemical Engineering. Vol 7 Issue 9.1993. p 949-955

YEOMANS, H.y GROSSMAN I.: Disjunctive programming models for the optimal design of distillation columns and separation sequences. En: Industrial and Engineering Chemical Research. Vol 39 Issue 6. 2000. p 1637-1648.

YUAN, X. Z.. Une Methode d'optimisation Nonlineare en variables Mixtes pour la
Conception de Procedes. 1988

ANEXOS

Anexo A. Errores de los modelos

Tabla A-1. Error del modelo mejorado de porcentaje de recuperación de Jet

Caso	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Recuperación Jet [%]	Recuperación Jet [%] - Modelo	
1	6259,923	41163,739	562,931	9982,086	255,843	409,703	604,346	9,255	34,424	11,663	72%	79%	8%
2	6164,821	41256,876	562,196	10136,387	254,302	409,963	604,132	9,337	34,523	11,757	74%	81%	9%
3	6416,829	41009,844	561,741	9934,859	252,508	410,505	603,412	9,322	34,525	11,679	71%	80%	11%
4	7700,130	39831,538	558,176	11961,671	251,620	409,823	599,336	9,582	34,764	12,099	69%	80%	14%
5	8249,977	39687,133	560,637	11597,188	248,391	410,723	601,325	9,737	34,939	12,240	68%	80%	15%
6	5614,439	41172,555	562,504	9755,568	257,742	407,753	601,529	9,167	34,431	11,559	79%	73%	8%
7	5936,316	41516,253	560,921	10385,032	248,918	408,907	601,200	9,354	34,615	11,775	89%	79%	13%
8	6779,684	40630,696	561,390	10110,232	249,742	408,233	601,886	9,168	34,512	11,684	70%	75%	7%
9	6063,977	39736,456	562,002	10038,345	251,058	410,375	603,107	9,172	34,426	11,559	78%	77%	1%
10	4782,781	40594,645	562,022	9629,467	255,128	409,491	602,989	9,197	34,440	11,539	89%	78%	14%
11	4977,131	40517,665	561,260	10083,741	246,201	406,689	602,542	9,323	34,737	11,814	87%	80%	9%
12	5634,192	40023,767	561,712	9814,722	251,718	415,625	604,494	9,283	34,530	11,634	85%	84%	1%
13	9084,199	33765,797	556,008	11664,434	253,180	416,451	601,472	9,400	34,500	11,908	68%	84%	19%
14	9276,449	33570,889	555,947	12216,086	258,795	412,695	601,075	9,357	34,572	12,068	58%	80%	27%
15	5567,698	37260,747	561,193	8405,221	255,974	413,557	602,306	9,091	34,193	11,256	77%	74%	3%
16	5565,059	37243,084	561,662	8454,750	261,775	401,411	601,914	9,000	34,047	11,266	58%	67%	14%
17	5506,604	40381,759	551,440	12678,424	263,083	400,282	593,083	9,360	34,410	12,089	90%	75%	21%
18	5942,522	39769,189	562,394	10433,239	261,127	411,241	604,940	9,465	34,586	11,906	80%	82%	3%
19	7762,267	40751,903	563,077	10525,214	260,668	408,461	604,197	9,455	34,625	11,916	58%	76%	23%
20	8249,671	42330,777	559,911	12621,572	251,966	407,437	601,438	9,420	34,650	12,093	64%	81%	21%
21	9819,549	28688,487	549,279	12692,339	267,894	400,681	593,468	9,475	34,572	12,298	54%	63%	14%

Caso	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Recuperación Jet [%]	Recuperación Jet [%] - Modelo	
22	10462,484	27946,049	545,058	12491,316	256,300	409,842	593,602	9,516	34,580	12,000	76%	82%	7%
23	7375,476	31038,460	551,352	9724,395	255,809	406,838	593,988	9,551	34,638	11,794	76%	71%	7%
24	8660,904	34214,858	548,669	11797,603	234,531	404,858	592,604	7,807	33,177	10,290	74%	65%	13%
25	8644,718	36853,797	554,571	8868,746	242,957	394,162	592,817	9,053	34,184	11,299	45%	57%	21%
26	9046,532	38566,795	555,191	9836,404	248,341	408,459	594,804	9,400	34,624	11,715	61%	69%	12%
27	10641,467	36971,360	553,246	11062,242	252,799	401,158	593,308	9,401	34,605	11,895	49%	63%	23%
28	8504,027	41519,663	554,786	9785,460	254,487	411,444	593,797	9,536	34,735	11,828	68%	74%	8%
29	10361,445	40429,951	552,202	12650,857	241,238	401,546	593,720	9,499	34,844	12,149	63%	77%	18%
30	7168,776	30561,622	554,664	10134,482	260,220	403,723	595,534	9,484	34,504	11,834	69%	65%	5%
31	7094,074	29605,739	554,880	10684,682	248,963	410,986	596,652	9,398	34,545	11,773	82%	72%	13%
32	7442,392	37663,016	556,369	11058,751	260,442	407,837	597,434	9,457	34,561	11,889	71%	74%	4%
33	7945,178	45022,677	557,429	11907,834	261,056	411,242	598,709	9,506	34,695	12,061	74%	82%	10%
34	9808,558	34775,795	554,314	10099,299	267,710	402,943	592,301	9,484	34,016	11,938	54%	56%	5%
35	9207,002	41022,144	556,575	12526,955	253,896	410,657	598,957	9,548	34,649	12,199	73%	81%	10%
36	7135,398	42312,961	562,734	9048,666	252,761	410,010	602,449	9,527	34,587	11,785	66%	76%	13%
37	5347,904	48131,138	564,574	11556,443	245,222	404,192	605,710	9,398	34,659	12,080	90%	89%	1%
38	5625,229	50627,058	565,093	10571,736	253,737	411,866	605,689	9,399	34,597	11,827	93%	89%	5%
39	9188,344	47390,129	558,703	11845,612	251,473	410,501	598,830	9,298	34,554	11,845	59%	80%	26%
40	9185,590	47341,118	557,419	12756,555	247,153	407,077	597,651	9,300	34,608	11,902	60%	81%	26%
41	5942,463	49594,574	559,839	10604,201	244,440	406,625	598,735	9,299	34,630	11,705	76%	82%	8%
42	6758,715	49563,909	559,933	10316,737	248,013	410,211	596,408	9,298	33,430	11,649	62%	74%	17%
43	9926,475	44915,929	554,989	12053,680	253,482	409,812	593,587	9,295	34,809	11,779	55%	73%	25%
44	11675,426	42882,639	552,063	12819,963	264,640	409,032	593,164	9,285	34,911	11,986	62%	69%	11%
45	10979,992	43538,338	553,452	12590,869	249,628	411,984	594,860	9,243	34,667	11,827	73%	78%	6%
46	11662,246	42834,232	551,957	13068,038	263,389	413,031	593,822	9,286	34,541	11,875	68%	74%	9%
47	5451,577	49064,189	561,692	8977,826	250,476	409,494	597,631	9,298	34,585	11,499	77%	75%	4%
48	9891,630	44758,257	555,791	11985,789	247,395	405,687	595,771	9,091	34,337	11,589	61%	73%	16%

Caso	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Recuperación Jet [%]	Recuperación Jet [%] - Modelo	
49	9123,445	41562,359	557,371	10581,498	261,341	409,999	598,902	9,108	34,310	11,505	59%	73%	20%
50	8582,528	41902,929	557,799	10596,033	248,219	411,235	600,166	9,109	34,408	11,402	70%	78%	10%
51	8541,747	41703,825	556,540	9788,444	257,530	408,729	598,703	9,127	34,426	11,404	61%	75%	18%
52	8013,842	41699,817	558,634	9368,153	249,246	406,746	599,748	9,132	34,372	11,370	69%	73%	5%
53	10439,230	34948,728	557,898	12042,441	246,733	412,550	606,141	9,153	34,472	11,620	68%	84%	19%
54	10004,378	35470,069	554,639	12089,383	248,832	414,535	602,148	9,230	34,598	11,669	77%	87%	11%
55	9616,521	35959,410	557,034	11783,976	249,283	411,523	603,908	9,210	34,534	11,596	73%	83%	12%
56	8351,793	29610,904	551,692	12230,137	252,274	392,136	595,499	9,216	34,481	11,726	70%	66%	5%
57	8698,827	32724,160	555,115	12004,725	256,308	411,271	603,596	9,279	34,514	11,705	87%	85%	3%
58	4735,296	42617,664	566,828	8762,112	248,854	402,351	607,103	9,033	34,315	11,289	74%	76%	2%
59	9076,820	41349,956	558,252	11963,568	249,476	407,823	602,188	9,089	34,435	11,568	72%	80%	11%
60	6576,653	44012,987	560,110	9495,632	257,198	398,792	597,239	9,062	32,984	11,466	68%	65%	5%
61	5549,089	44897,178	563,481	10119,770	245,891	410,791	604,244	9,043	34,266	11,537	99%	81%	23%
62	4542,290	45927,598	566,303	9756,520	245,058	402,296	605,170	9,059	34,395	11,434	82%	78%	4%
63	7669,005	42324,511	566,750	9764,175	248,648	408,913	606,931	9,059	34,333	11,456	53%	74%	29%
64	4456,686	45062,047	566,600	9566,970	248,409	412,571	607,094	9,060	34,353	11,429	91%	82%	11%
65	4074,478	46227,718	565,992	9187,882	248,845	412,903	605,718	9,058	34,361	11,384	95%	81%	17%
66	3487,811	46338,054	567,485	10078,976	248,998	410,969	607,952	9,015	34,260	11,451	97%	84%	16%
67	5330,529	43128,822	565,099	10308,261	250,898	413,723	606,382	9,112	34,374	11,576	68%	83%	17%
68	4372,795	44213,820	567,563	9199,934	247,683	409,284	607,947	9,104	34,384	11,436	90%	80%	13%
69	6311,432	42238,047	563,660	9978,012	247,877	413,807	604,760	9,222	34,450	11,607	73%	81%	9%
PROMEDIO	7536,861	40492,330	558,707	10762,497	252,548	408,379	600,120	9,262	34,454	11,702	72%	77%	12%

Tabla A-2. Error del modelo mejorado de punto de congelación del Jet

Fecha	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Punto de Congelación [°F]	Punto de Congelación [°F] - Modelo	
1	6259,923	41163,739	562,931	9982,086	255,843	409,703	604,346	9,255	34,424	11,663	-56	-58	4%
2	6164,821	41256,876	562,196	10136,387	254,302	409,963	604,132	9,337	34,523	11,757	-56	-57	2%
3	6416,829	41009,844	561,741	9934,859	252,508	410,505	603,412	9,322	34,525	11,679	-58	-58	1%
4	7700,130	39831,538	558,176	11961,671	251,620	409,823	599,336	9,582	34,764	12,099	-62	-59	4%
5	8249,977	39687,133	560,637	11597,188	248,391	410,723	601,325	9,737	34,939	12,240	-60	-61	2%
6	5614,439	41172,555	562,504	9755,568	257,742	407,753	601,529	9,167	34,431	11,559	-58	-60	3%
7	5936,316	41516,253	560,921	10385,032	248,918	408,907	601,200	9,354	34,615	11,775	-54	-58	5%
8	6779,684	40630,696	561,390	10110,232	249,742	408,233	601,886	9,168	34,512	11,684	-58	-59	1%
9	6063,977	39736,456	562,002	10038,345	251,058	410,375	603,107	9,172	34,426	11,559	-62	-58	7%
10	4782,781	40594,645	562,022	9629,467	255,128	409,491	602,989	9,197	34,440	11,539	-58	-57	2%
11	4977,131	40517,665	561,260	10083,741	246,201	406,689	602,542	9,323	34,737	11,814	-58	-56	3%
12	5634,192	40023,767	561,712	9814,722	251,718	415,625	604,494	9,283	34,530	11,634	-54	-55	1%
13	9084,199	33765,797	556,008	11664,434	253,180	416,451	601,472	9,400	34,500	11,908	-54	-62	12%
14	9276,449	33570,889	555,947	12216,086	258,795	412,695	601,075	9,357	34,572	12,068	-67	-64	5%
15	5567,698	37260,747	561,193	8405,221	255,974	413,557	602,306	9,091	34,193	11,256	-45	-58	21%
16	5565,059	37243,084	561,662	8454,750	261,775	401,411	601,914	9,000	34,047	11,266	-65	-62	6%
17	5942,522	39769,189	562,394	10433,239	261,127	411,241	604,940	9,465	34,586	11,906	-58	-58	0%
18	7762,267	40751,903	563,077	10525,214	260,668	408,461	604,197	9,455	34,625	11,916	-58	-62	6%
19	8249,671	42330,777	559,911	12621,572	251,966	407,437	601,438	9,420	34,650	12,093	-56	-60	6%
20	9819,549	28688,487	549,279	12692,339	267,894	400,681	593,468	9,475	34,572	12,298	-76	-72	5%
21	10462,484	27946,049	545,058	12491,316	256,300	409,842	593,602	9,516	34,580	12,000	-54	-71	24%
22	7375,476	31038,460	551,352	9724,395	255,809	406,838	593,988	9,551	34,638	11,794	-54	-63	13%
23	8660,904	34214,858	548,669	11797,603	234,531	404,858	592,604	7,807	33,177	10,290	-54	-57	5%
24	8644,718	36853,797	554,571	8868,746	242,957	394,162	592,817	9,053	34,184	11,299	-56	-65	14%
25	9046,532	38566,795	555,191	9836,404	248,341	408,459	594,804	9,400	34,624	11,715	-53	-61	13%

Fecha	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Punto de Congelación [°F]	Punto de Congelación [°F] - Modelo	
26	10641,467	36971,360	553,246	11062,242	252,799	401,158	593,308	9,401	34,605	11,895	-76	-66	15%
27	8504,027	41519,663	554,786	9785,460	254,487	411,444	593,797	9,536	34,735	11,828	-54	-58	7%
28	10361,445	40429,951	552,202	12650,857	241,238	401,546	593,720	9,499	34,844	12,149	-69	-63	9%
29	7168,776	30561,622	554,664	10134,482	260,220	403,723	595,534	9,484	34,504	11,834	-67	-65	3%
30	7094,074	29605,739	554,880	10684,682	248,963	410,986	596,652	9,398	34,545	11,773	-60	-62	3%
31	7442,392	37663,016	556,369	11058,751	260,442	407,837	597,434	9,457	34,561	11,889	-56	-61	8%
32	7945,178	45022,677	557,429	11907,834	261,056	411,242	598,709	9,506	34,695	12,061	-58	-57	2%
33	9808,558	34775,795	554,314	10099,299	267,710	402,943	592,301	9,484	34,016	11,938	-56	-67	16%
34	9207,002	41022,144	556,575	12526,955	253,896	410,657	598,957	9,548	34,649	12,199	-51	-60	15%
35	7135,398	42312,961	562,734	9048,666	252,761	410,010	602,449	9,527	34,587	11,785	-56	-60	6%
36	5347,904	48131,138	564,574	11556,443	245,222	404,192	605,710	9,398	34,659	12,080	-54	-55	1%
37	5625,229	50627,058	565,093	10571,736	253,737	411,866	605,689	9,399	34,597	11,827	-51	-54	6%
38	9188,344	47390,129	558,703	11845,612	251,473	410,501	598,830	9,298	34,554	11,845	-51	-57	11%
39	9185,590	47341,118	557,419	12756,555	247,153	407,077	597,651	9,300	34,608	11,902	-54	-58	5%
40	5942,463	49594,574	559,839	10604,201	244,440	406,625	598,735	9,299	34,630	11,705	-53	-55	4%
41	6758,715	49563,909	559,933	10316,737	248,013	410,211	596,408	9,298	33,430	11,649	-49	-58	15%
42	9926,475	44915,929	554,989	12053,680	253,482	409,812	593,587	9,295	34,809	11,779	-58	-58	0%
43	11675,426	42882,639	552,063	12819,963	264,640	409,032	593,164	9,285	34,911	11,986	-62	-61	0%
44	10979,992	43538,338	553,452	12590,869	249,628	411,984	594,860	9,243	34,667	11,827	-54	-58	6%
45	11662,246	42834,232	551,957	13068,038	263,389	413,031	593,822	9,286	34,541	11,875	-65	-59	10%
46	5451,577	49064,189	561,692	8977,826	250,476	409,494	597,631	9,298	34,585	11,499	-53	-59	11%
47	9891,630	44758,257	555,791	11985,789	247,395	405,687	595,771	9,091	34,337	11,589	-54	-59	8%
48	9123,445	41562,359	557,371	10581,498	261,341	409,999	598,902	9,108	34,310	11,505	-54	-60	9%
49	8582,528	41902,929	557,799	10596,033	248,219	411,235	600,166	9,109	34,408	11,402	-69	-57	20%
50	8541,747	41703,825	556,540	9788,444	257,530	408,729	598,703	9,127	34,426	11,404	-67	-59	14%
51	8013,842	41699,817	558,634	9368,153	249,246	406,746	599,748	9,132	34,372	11,370	-54	-59	8%
52	10439,230	34948,728	557,898	12042,441	246,733	412,550	606,141	9,153	34,472	11,620	-58	-66	12%

Fecha	VARIABLES INDEPENDIENTES										COMPARACION		ERROR
	Jet [BPD]	Diésel [BPD]	T Entrada TI 57074 [°F]	Reciclo FIC57028 [BPD]	T Cima TI57075 [°F]	T Medios TI57076 [°F]	T Fondos TI57077 [°F]	P Cima PIC57096 [psi]	P Medios PI57155 [psi]	P Fondos PI57081 [psi]	Punto de Congelación [°F]	Punto de Congelación [°F] - Modelo	
53	10004,378	35470,069	554,639	12089,383	248,832	414,535	602,148	9,230	34,598	11,669	-51	-62	19%
54	9616,521	35959,410	557,034	11783,976	249,283	411,523	603,908	9,210	34,534	11,596	-54	-63	14%
55	8351,793	29610,904	551,692	12230,137	252,274	392,136	595,499	9,216	34,481	11,726	-49	-70	30%
56	8698,827	32724,160	555,115	12004,725	256,308	411,271	603,596	9,279	34,514	11,705	-54	-64	15%
57	4735,296	42617,664	566,828	8762,112	248,854	402,351	607,103	9,033	34,315	11,289	-56	-58	4%
58	9076,820	41349,956	558,252	11963,568	249,476	407,823	602,188	9,089	34,435	11,568	-63	-60	6%
59	6576,653	44012,987	560,110	9495,632	257,198	398,792	597,239	9,062	32,984	11,466	-74	-63	19%
60	5549,089	44897,178	563,481	10119,770	245,891	410,791	604,244	9,043	34,266	11,537	-53	-55	4%
61	4542,290	45927,598	566,303	9756,520	245,058	402,296	605,170	9,059	34,395	11,434	-72	-58	25%
62	7669,005	42324,511	566,750	9764,175	248,648	408,913	606,931	9,059	34,333	11,456	-62	-61	2%
63	4456,686	45062,047	566,600	9566,970	248,409	412,571	607,094	9,060	34,353	11,429	-56	-55	3%
64	4074,478	46227,718	565,992	9187,882	248,845	412,903	605,718	9,058	34,361	11,384	-54	-55	1%
65	3487,811	46338,054	567,485	10078,976	248,998	410,969	607,952	9,015	34,260	11,451	-54	-54	1%
66	5330,529	43128,822	565,099	10308,261	250,898	413,723	606,382	9,112	34,374	11,576	-58	-55	5%
67	4372,795	44213,820	567,563	9199,934	247,683	409,284	607,947	9,104	34,384	11,436	-51	-56	10%
68	6311,432	42238,047	563,660	9978,012	247,877	413,807	604,760	9,222	34,450	11,607	-54	-56	3%
PROMEDIO	7566,718	40493,956	558,814	10734,322	252,393	408,498	600,223	9,260	34,455	11,696	-58	-60	8%

Anexo B. Mejores condiciones de porcentaje de recuperación

Todas las siguientes figuras son de autoría propia, y han sido graficadas con los datos históricos de la planta.

Figura B-1. Gráfica de temperatura de entrada TI 47074 vs porcentaje de recuperación

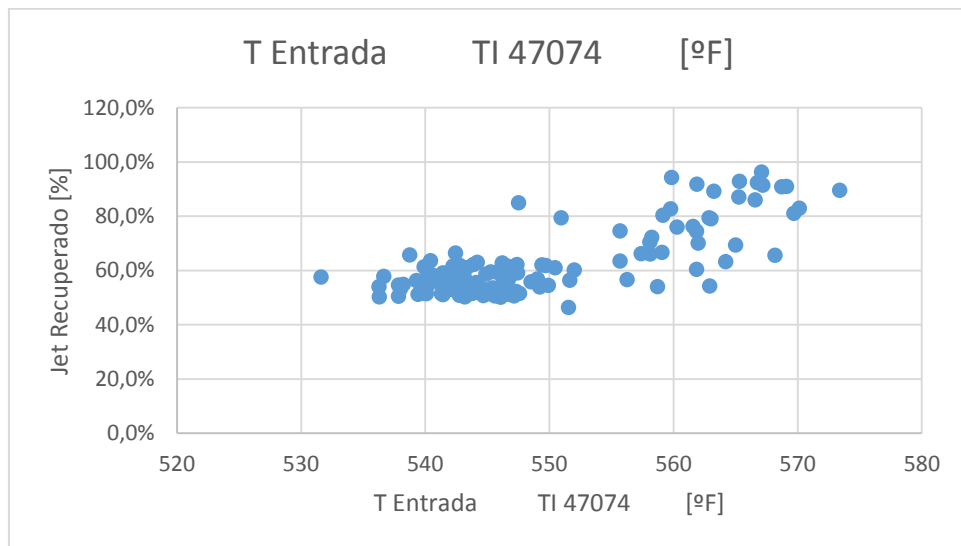


Figura B-2. Gráfica de temperatura de cima TI 47075 vs porcentaje de recuperación

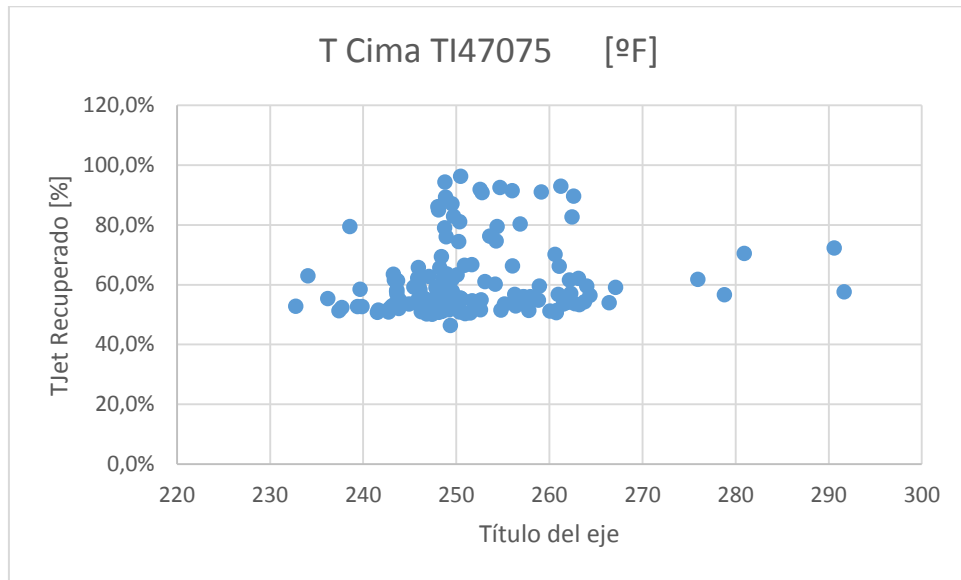


Figura B-3. Gráfica de reciclo FIC47028 (BPDP) vs porcentaje de recuperación

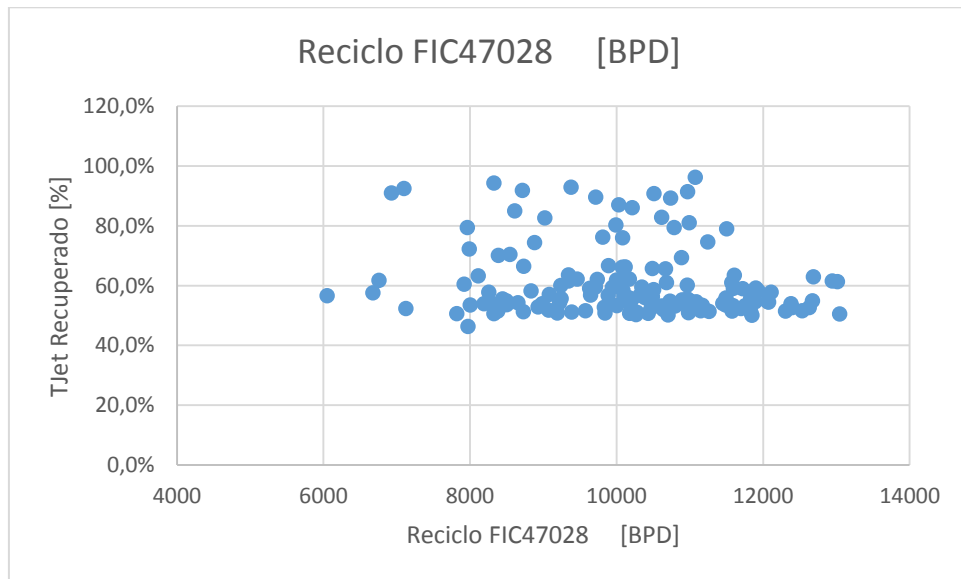


Figura B-4. Gráfica de temperatura de medios TI 47076 (°F) vs porcentaje de recuperación

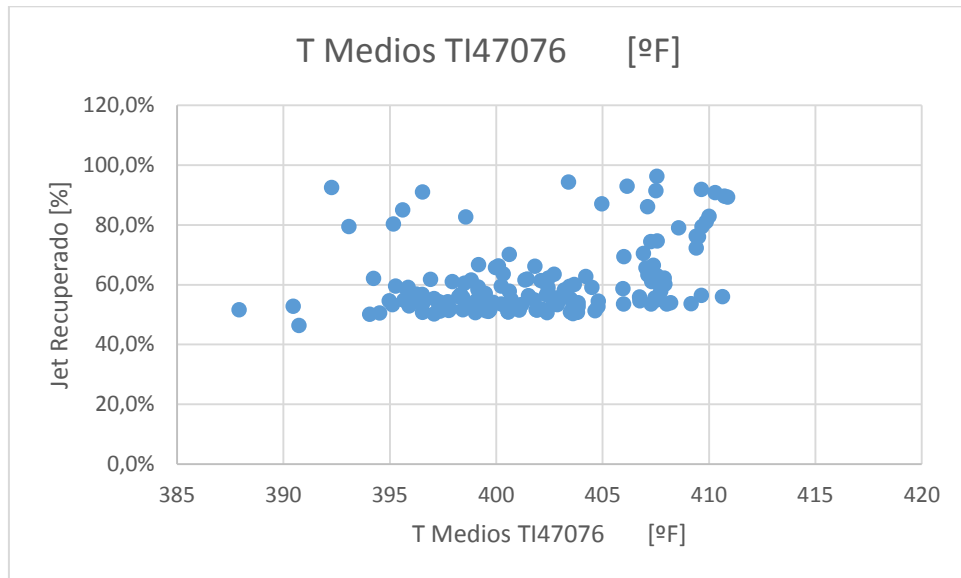


Figura B-5. Gráfica de temperatura de Fondos TI47077 [°F] vs porcentaje de recuperación

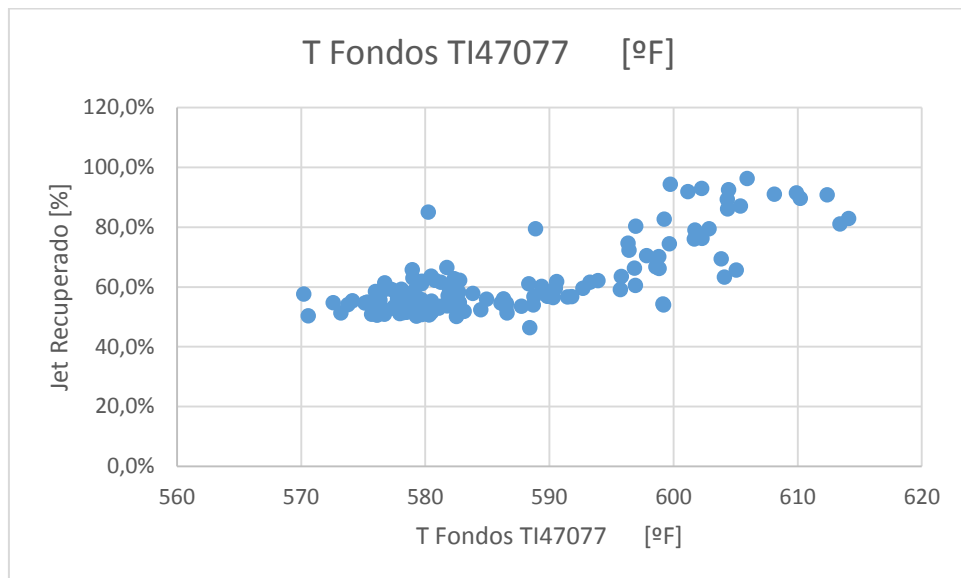


Figura B-6. Gráfica de presión de Cima PIC47096 [psi] vs porcentaje de recuperación

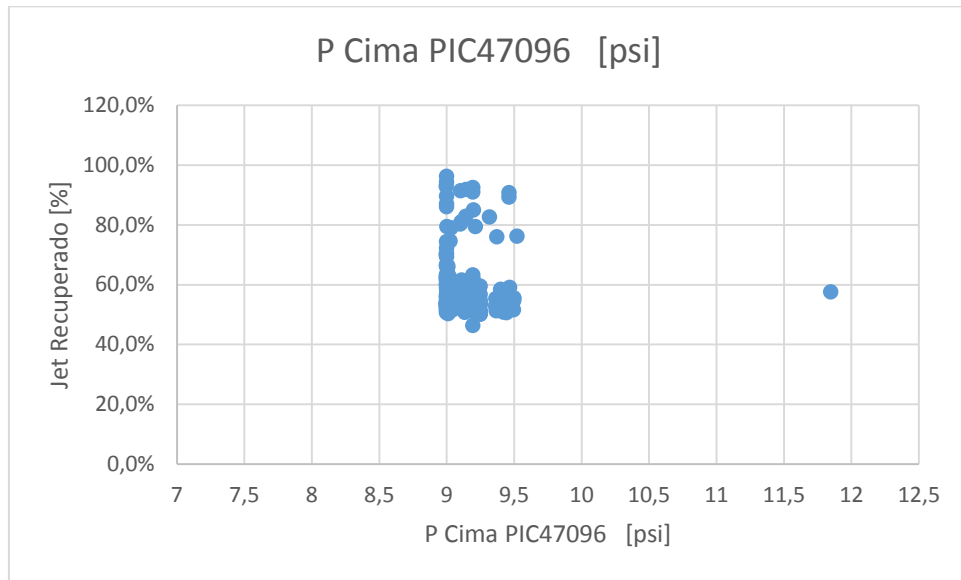


Figura B-7. Gráfica de Presión de Medios PI47155 [psi] vs porcentaje de recuperación

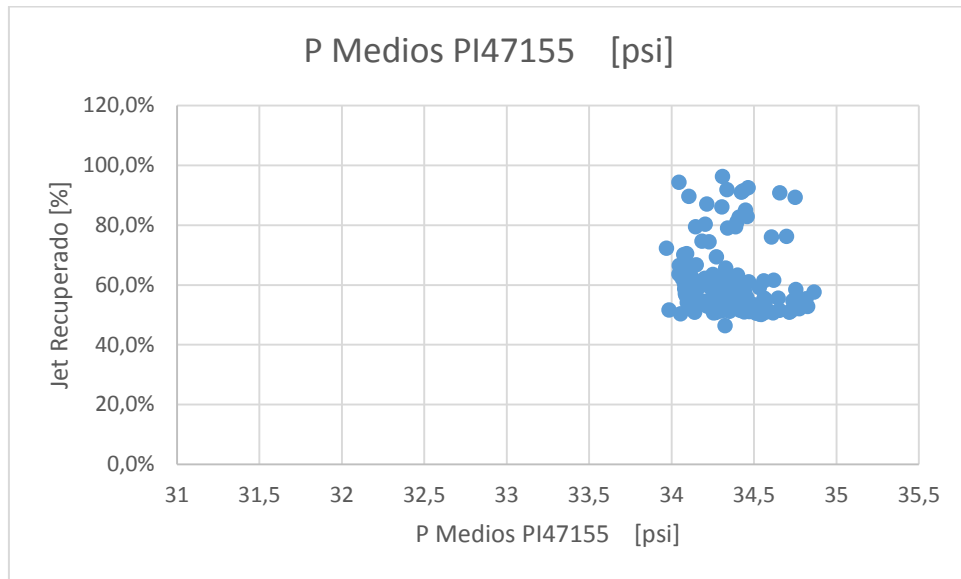
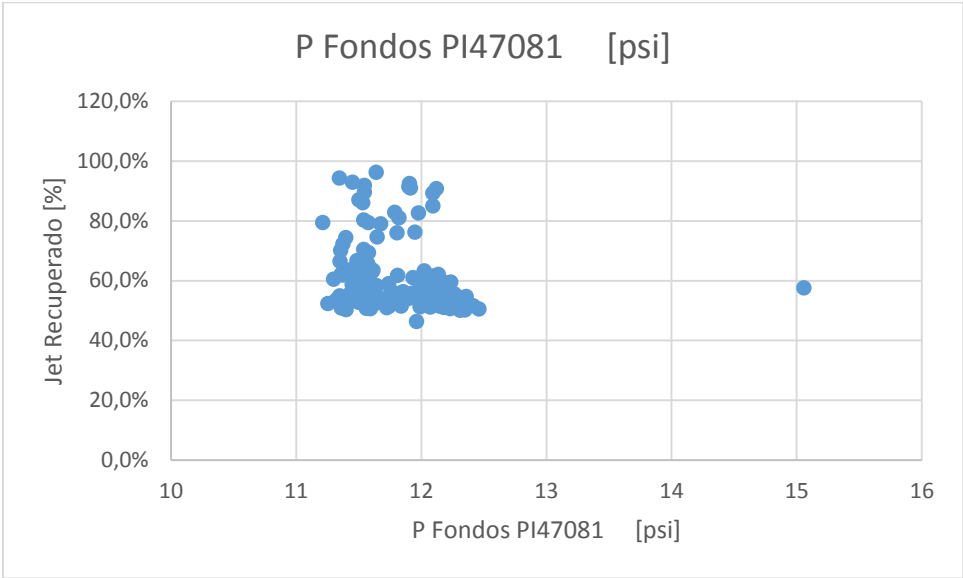


Figura B-8. Gráfica de Presión de Fondos PI47081 [psi] vs porcentaje de recuperación



Anexo C. Mejores condiciones con punto de congelación (°C)

Todas las siguientes figuras son de autoría propia, y han sido graficadas con los datos históricos de la planta.

Figura C-1. Gráfica de temperatura de entrada TI 47074 vs punto de Congelación °C

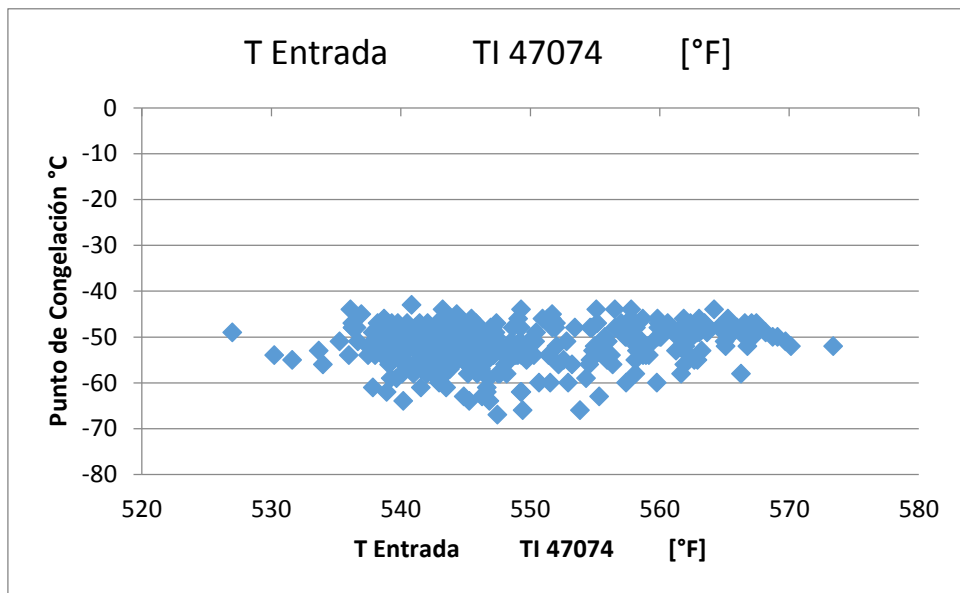


Figura C-2. Gráfica de temperatura de cima TI47075 (°F) vs punto de Congelación (°C)

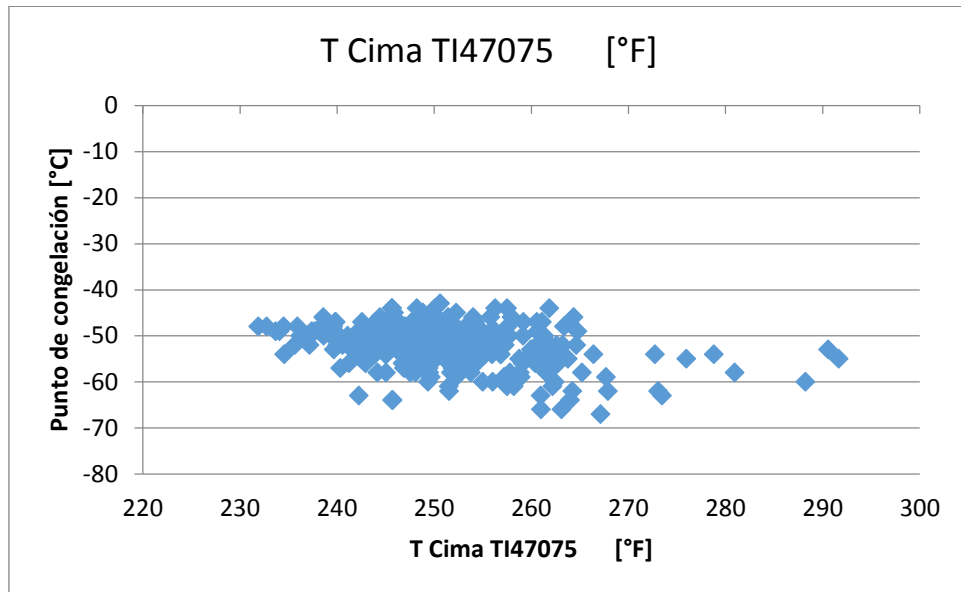


Figura C-3. Gráfica de reciclo FIC47028 (BPD) vs punto de Congelación (°C)

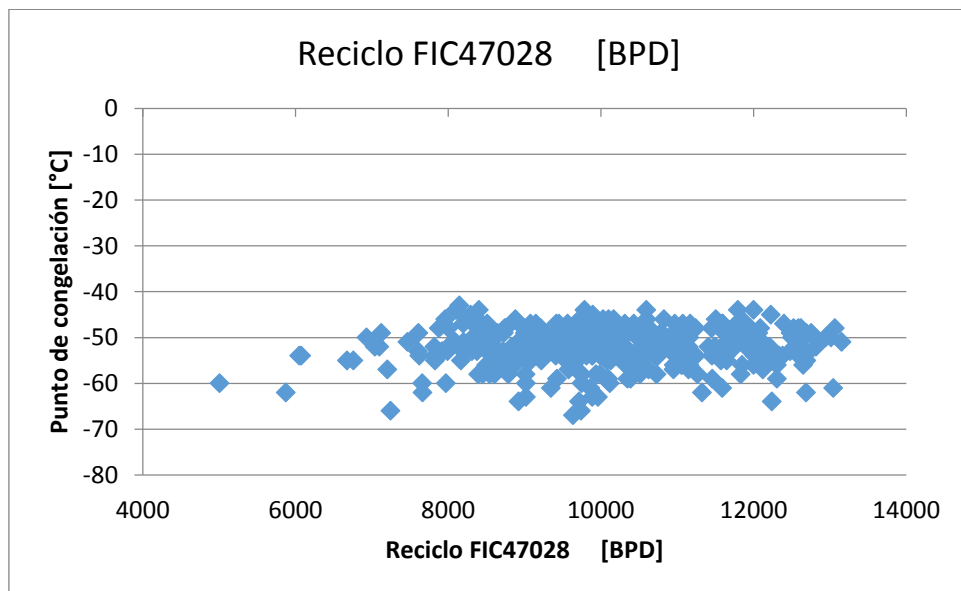


Figura C-4. Gráfica de temperatura de medios TI 47076 vs punto de Congelación (°C)

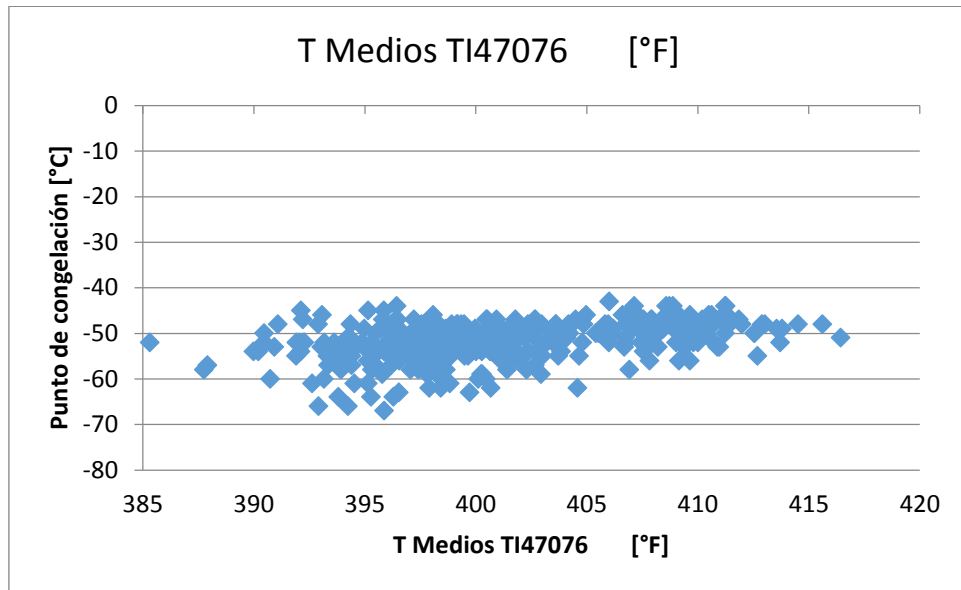


Figura C-5. Gráfica de temperatura de fondos TI 47077 vs punto de Congelación (°C)

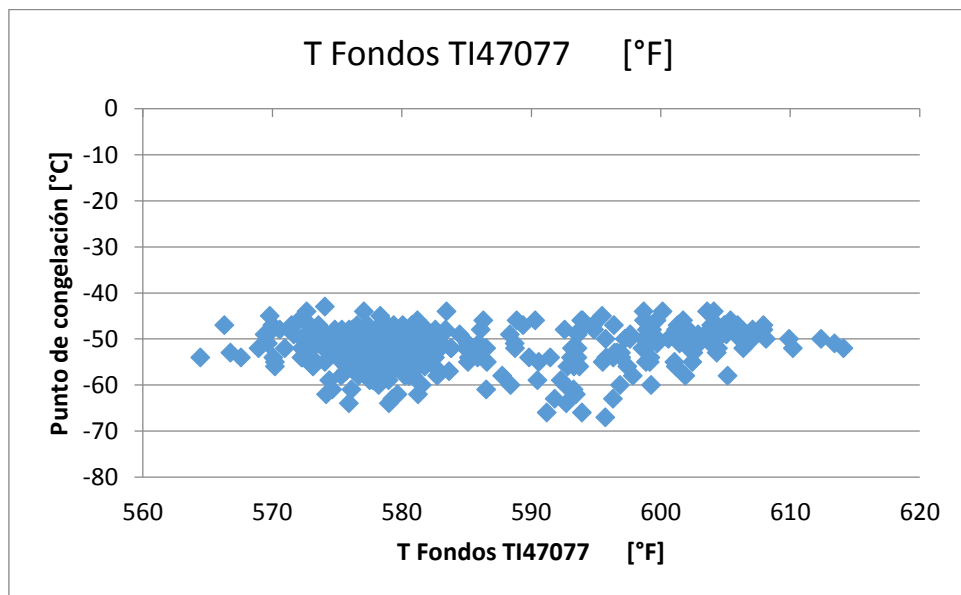


Figura C-6. Gráfica de Presión Cima PIC46098 (psi) vs punto de Congelación (°C)

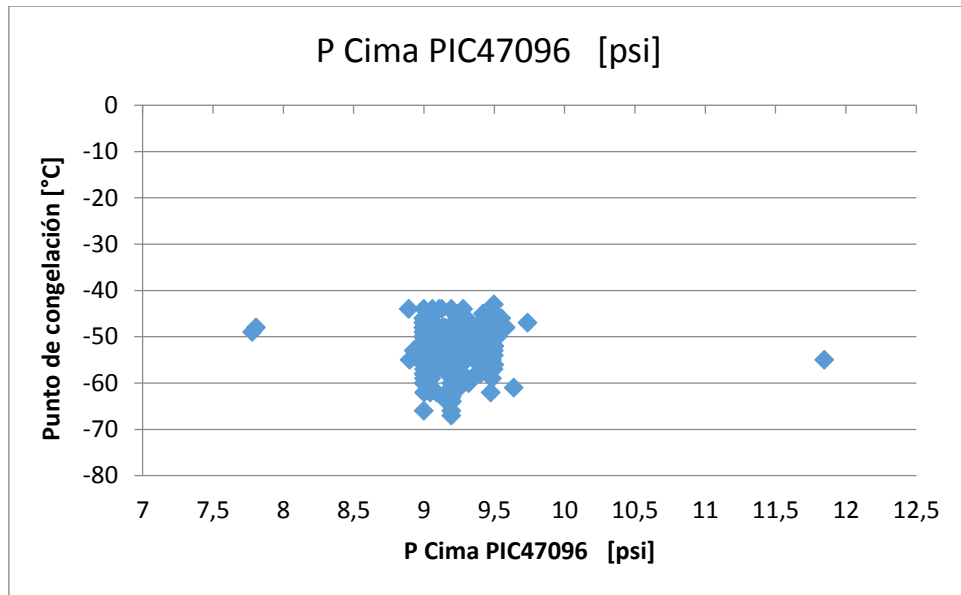


Figura C-7. Gráfica de presión de medios PI47155 (psi) vs punto de Congelación (°C)

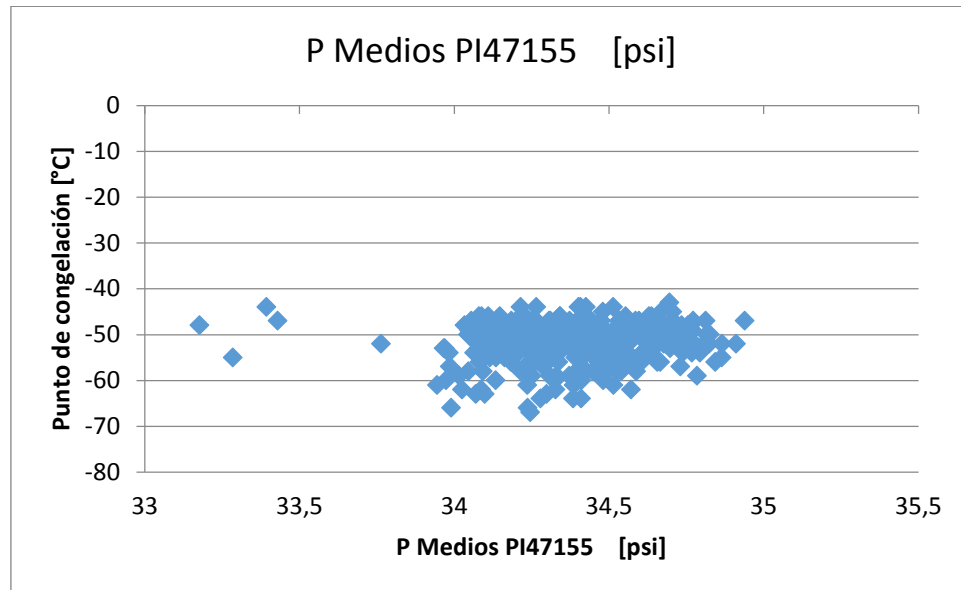
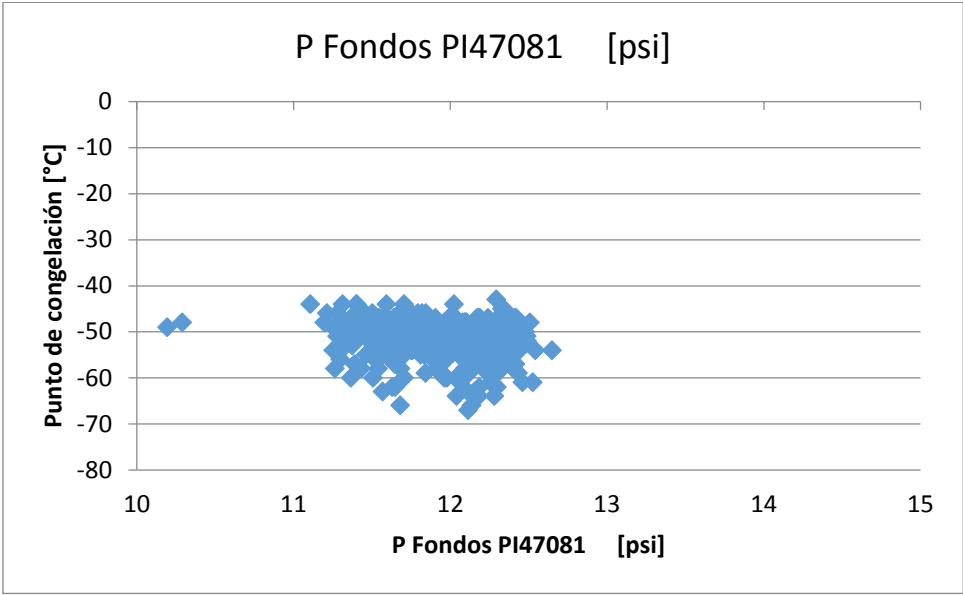


Figura C-8. Gráfica de presión de fondos PI47081(psi) vs punto de Congelación (°C)



Anexo D. Escenarios económicos

Tabla D-1a. Máximos, caso 1B

Caso evaluado		1B	
Composición (BPD)			
Carga	Diésel	Jet	
42.000	37.000	5.000	

Real Planta	42.334,8	38.956,9	3.377,9
Calculado Modelo	42.000,0	37.888,2	4.111,8

Precios (U\$/bl)	Fecha	26 de marzo de 2014	
	118,50	120,00	121,50

	Ingresos	Diferencia	
	Real Planta	68.569,11	%
Calculado Modelo	69.167,70	0,87	598,59

	Jet en carga	11%	4656,8
Jet recuperado			
Real en planta	73%		
Calculado Modelo	89%		

Tabla D-1b. Máximos, caso 2B

Caso evaluado		2B
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
51.000	46.000	5.000

Real Planta	50.469,9	46.767,0	3.702,9
Calculado Modelo	51.000,0	46.914,9	4.085,1

Precios (U\$/bl)	Fecha	12 de diciembre de 2014	
	74,70	76,40	78,20

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	92.464,06	%	U\$/dia
Calculado Modelo	94.053,18	1,69	1.589,12

Jet en carga 9% 4542,3

Jet recuperado
Real en planta 82%
Calculado Modelo 89%

Tabla D-1c. Máximos, caso 3

Caso evaluado		3A
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
60.000	57.500	2.500

Real Planta	60.155,7	55.593,4	4.562,4
Calculado Modelo	60.000,0	53.700,0	6.300,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	18 de febrero de 2013	
		130,90	133,00 133,80

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	129.976,94	%	U\$/dia
Calculado Modelo	131.040,00	0,81	1.063,06

Jet en carga 15% 9023,4

Jet recuperado
Real en planta 51%
Calculado Modelo 70%

Tabla D-2a. Mínimos, caso 1C

Caso evaluado		1C
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
42.000	32.000	10.000

Real Planta	43.640,5	39.493,0	4.147,4
Calculado Modelo	42.000,0	34.944,0	7.056,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	5 de junio de 2013	
		115,10	115,80 120,20

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	48.797,08	%	U\$/dia
Calculado Modelo	60.446,40	19,27	11.649,32

Jet en carga 24% 10473,7

Jet recuperado
Real en planta 40%
Calculado Modelo 70%

Tabla D-2b. Mínimos, caso 2C

Caso evaluado		2C
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
51.000	41.000	10.000

Real Planta	50.808,5	44.674,3	6.134,2
Calculado Modelo	51.000,0	43.044,0	7.956,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	5 de febrero de 2014	
	119,70	122,10	124,50

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	136.662,47	%	U\$/dia
Calculado Modelo	141.494,40	3,41	4.831,93

Jet en carga 20% 10161,7

Jet recuperado
Real en planta 60%
Calculado Modelo 78%

Tabla D-2c. Mínimos, caso 3C

Caso evaluado		3C
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
60.000	50.000	10.000

Real Planta	60.155,7	55.593,4	4.562,4
Calculado Modelo	60.000,0	52.350,0	7.650,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	18 de febrero de 2013	
	130,90	133,00	133,80

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	129.976,94	%	U\$/dia
Calculado Modelo	132.120,00	1,62	2.143,06

Jet en carga 15% 9023,4

Jet recuperado
Real en planta 51%
Calculado Modelo 85%

Tabla D-3a. Medios, caso 1A

Caso evaluado		1A
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
42.000	39.500	2.500

Real Planta	42.179,7	39.723,0	2.456,7
Calculado Modelo	42.000,0	39.312,0	2.688,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	5 marzo de 2012	
		133,2	134,2 136,5

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	47.751,61	%	U\$/dia
Calculado Modelo	48.113,26	0,75	361,65

Jet en carga 8% 3374,4

Jet recuperado
Real en planta 73%
Calculado Modelo 80%

Tabla D-3b. Medios, caso 2A

Caso evaluado		2A
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
51.000	48.500	2.500

Real Planta	51.003,8	47.990,5	3.013,4
Calculado Modelo	51.000,0	47.965,5	3.034,5

Precios (U\$/bl)	Fecha	25 marzo de 2014	
		74,70	76,40 78,20

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	92.130,60	%	U\$/dia
Calculado Modelo	92.162,10	0,03	31,50

Jet en carga 7% 3570,3

Jet recuperado
Real en planta 84%
Calculado Modelo 85%

Tabla D-3c. Medios, caso 3B

Caso evaluado		3B
Composición (BPD)		
Carga	Diésel	Jet
60.000	55.000	5.000

Real Planta	60.252,3	55.335,5	4.916,8
Calculado Modelo	60.000,0	54.780,0	5.220,0

Precios (U\$/bl)	Fecha	19 de septiembre de 2014	
	109,70	111,60	113,50

	Ingresos	Diferencia	
Real Planta	123.821,31	%	U\$/dia
Calculado Modelo	123.918,00	0,08	96,69

Jet en carga 10% 6025,2

Jet recuperado
Real en planta 82%
Calculado Modelo 87%