

ANÁLISIS JERÁRQUICO DE VARIABLES DE OPERACIÓN DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN DE CRUDO USANDO DATOS DE PLANTA, MODELOS DE SIMULACIÓN Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS

D. C. LÓPEZ*, C. A. MAHECHA**, L. ACEVEDO*, L. J. HOYOS**

*Universidad Industrial de Santander

**Instituto Colombiano del Petróleo –ECOPETROL S.A.

iq.diana_lopez@yahoo.com, cesar.mahecha@ecopetrol.com.co, lacevedo@uis.edu.co

Fecha Recepción: 3 de Marzo de 2008

Fecha Aceptación: 22 de Abril de 2008

RESUMEN

Dentro de un proceso de refinación de crudo, las variables independientes son un conjunto bien conocido pero su número suele ser grande en especial para el asociado a torres de destilación atmosférica (TDA) variando ligeramente dependiendo del diseño de cada torre. El alto número de variables o dimensiones de análisis aumentan la complejidad y dificultad en aplicaciones como análisis operacional, construcción de metamodelos, optimización, entre otras. Es, entonces muy útil reducir el número de variables sin perder funcionalidad en las aplicaciones y una manera de lograrlo es mediante la jerarquización de variables. En este estudio se determinaron las variables de operación de mayor impacto sobre los productos blancos (Nafta, Jet, Diesel) de una TDA considerando composición constante de crudo y calidad de productos medida como punto final de la Destilación ASTM D-86. El análisis de jerarquización permitió reducir desde un conjunto de 16 variables independientes a uno de menor tamaño que es más fácil de manipular y que ofrece los mismos resultados que el conjunto original. Para realizar la jerarquización o el análisis de variables dentro de la TDA se usaron Diseños de Experimentos de Filtrado (screening) como Plackett-Burman y Balance Aleatorio los cuales identificaron las variables con efectos principales relevantes sobre el rendimiento de los productos blancos, reduciendo la dimensión del espacio de entrada.

PALABRAS CLAVES: *Unidad de Destilación de Crudo, Análisis de Variables Operacionales, Diseño de Experimentos, Diseños Plackett-Burman, Balance Aleatorio*

ABSTRACT

Inside a crude refinement process, independent variables are a well known set but its size is very large in special for Atmospheric Distillation Towers (ADT) changing softly for their design. Many variables or dimensions increase the complexity and difficulty in applications like Operational Analyses, Metamodeling, Optimization, between others. Reducing the number of variables is very useful without losing functionality in applications and a way is by variables hierarchization. In this study, it determined principal impact operational variables in white products (Naphtha, Jet and Diesel) of ADT considering crude with constant composition and products quality measure with final boiling point of ASTM D-86 Distillation. Hierarchical analyze allowed to reduce a set with 16 independent variables until one of small size easier to manipulate than the original offering the same results. For doing the hierarchization or variables analyzes inside of ADT, it was used Screening Experiment Designs like Plackett-Burman and Random Balance which identified variables with principal relevant effects for white product yield, reducing entrance space dimension.

KEYWORDS: *Crude Distillation Unit, Operational Variables Analyze, Plackett-Burman Designs, Method of Random Balance*

INTRODUCCIÓN

Para muchos procesos multivariados en los cuales numerosos factores pueden estar involucrados, no siempre es obvio determinar cuales son los más importantes. Por lo tanto, es necesario someter el proceso a un diseño de filtrado inicial que descubra las variables con mayores efectos principales dentro del grupo disponible.

La Destilación de Crudo (DC) es un proceso de separación física por diferencia de puntos de ebullición de las diversas fracciones que componen el petróleo crudo. A nivel industrial las instalaciones que realizan este proceso se conocen como Unidades de Destilación de Crudo (UDC) y su objetivo es separar los hidrocarburos livianos tales como Gas, Nafta, Jet, Diesel y Gasóleo atmosférico (GOA) presentes en el crudo que se le alimenta; para este fin la UDC consta de una sección atmosférica que realiza el primer fraccionamiento del crudo una vez se ha calentado a través de una red de intercambiadores y el horno, y la sección de vacío que se encarga de terminar de despojar las fracciones livianas de la corriente de fondo de la torre atmosférica mediante condiciones de baja presión.

Dentro de una torre de destilación atmosférica (TDA) existen muchas variables que ejercen influencia sobre su funcionamiento y por tanto que afectan la separación de los hidrocarburos. Dichas variables están constituidas por flujos, temperaturas y presiones y pueden ser más de 16 dependiendo del diseño de las columnas. La existencia de un número tan elevado de variables pone a este proceso como multivariado y altamente complejo para realizar análisis operacionales por la posibilidad de variación de muchos factores.

El desarrollo de una jerarquización de las variables operacionales permite disminuir y priorizar el conjunto de variables de entrada útiles para modelar el fenómeno y/o para manipular en una optimización, por lo que existirá un ahorro significativo en esfuerzos humanos y computacionales. Con el fin de brindar estos beneficios, en este estudio se realiza el estudio de las variables de mayor impacto sobre los rendimientos de los productos Nafta, Jet y Diesel de una TDA.

Para realizar la jerarquización de variables dentro del proceso de destilación se usaron Diseños de Experimentos de filtrado (screening) como Plackett-

Burman (P-B) y Balance Aleatorio (BA) los cuales identificaron las variables con efectos principales relevantes sobre el rendimiento de Nafta, Jet y Diesel, reduciendo la dimensión del espacio de entrada y generando el orden de impacto de las mismas sobre cada variable de respuesta.

DISEÑOS DE FILTRADO

La aplicación de diseños de screening es obligatoria cuando se opera con un número relativamente grande de variables ($k \geq 7$), debido a que en la primera fase, facilitan la inclusión de todos los factores que no afectan considerablemente la respuesta. Por lo tanto, simplifican considerablemente la investigación del dominio del espacio del factor y el modelado de la superficie de respuesta.

Diseño de Screening Plackett-Burman

Es un diseño factorial fraccionado de 2 niveles con número de corridas múltiplo de 4. La metodología de Plackett-Burman [1] es una herramienta para filtrado inicial, que detecta las variables más relevantes dentro del conjunto a través de un número reducido de corridas y genera un subconjunto que luego se debe analizar con mayor profundidad a través de un diseño factorial completo el cual determinará en forma definitiva el escalafón y por ende la jerarquización de las variables del proceso. La extrapolación es una de las ventajas de los diseños factoriales fraccionados como el diseño Plackett-Burman, infortunadamente, estos diseños tienen una estructura alias muy confusa.

MÉTODO DEL BALANCE ALEATORIO

Este método facilita una selección relativamente simple de los factores significantes sobre el nivel de ruido o el nivel de variación aleatoria de la respuesta con un número limitado de puntos de diseño. El método está basado en el mismo principio que el análisis de varianza. El análisis de varianza se basa en el hecho que los efectos significantes de ciertos factores dependen de su contribución a la varianza de la respuesta. El análisis de varianza se usa con poca frecuencia en el caso de un gran número de factores, ya que este requiere un número relativamente grande de puntos de diseño. La eficiencia de los experimentos activos de filtrado puede mejorar considerablemente con el método de balance aleatorio.

La selección de los factores por significancia de sus efectos en la respuesta se realiza en 2 fases: en la primera fase, la matriz de diseño de experimentos es definida, los experimentos toman lugar y basado en sus resultados se construyen diagramas de dispersión (scatter diagrams). En la segunda fase, los factores significantes se toman de los diagramas de dispersión y su selección se prueba mediante cálculos de análisis de varianza [2].

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El análisis de variables operacionales se realizó para una torre de destilación atmosférica (TDA1) perteneciente a la Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A. como ejemplo ilustrativo de la metodología.

Las características generales de la torre son: torre de platos con secciones empacadas en la zona de recobro de productos, recibe vapor por el fondo para despojar los líquidos que llegan, Cuenta con tres torres despojadoras de Jet, Diesel y Gasóleo atmosférico (GOA), que también usan vapor para despojar, tiene 3 retiros de calor laterales conocidos como pumparounds (cima-UPA, medio-MPA, inferior-LPA) quienes seden su energía a la corriente de crudo que llega a la unidad a través de la integración energética. Su capacidad máxima de procesamiento es de 55000 barriles por día (BPD) (Figura 1).

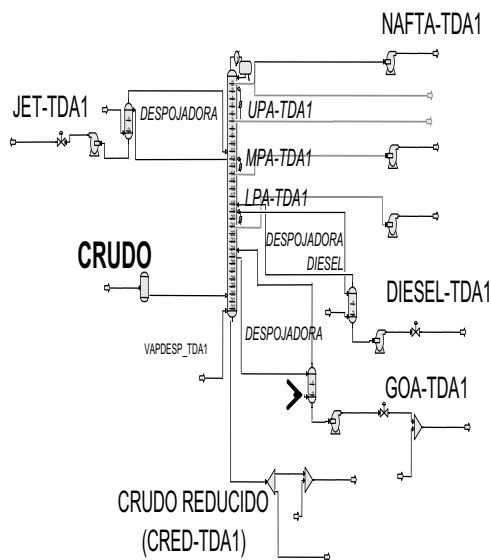


Figura 1. Diagrama de Torre TDA1

METODOLOGÍA

En el presente estudio, los diseños de screening fueron usados en combinación con la simulación de procesos industriales para Jerarquizar las variables que inciden en la producción (flujo volumétrico) de Nafta, Jet y Diesel de una TDA.

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y DE RESPUESTA

Para esta etapa se indagó sobre la operación en planta de la torre atmosférica y el conjunto de variables de entrada quedó formado por aquellas que se manipulan normalmente en la operación dentro de la torre. Se revisó que en el modelo de simulación en PRO/II las variables que pueden ser manipuladas por el usuario sean las mismas manipulables en la planta. En la Tabla 1 se muestran las variables de entrada para la torre TDA1.

La variable de salida fue el rendimiento volumétrico de los productos de la torre atmosférica Nafta, Jet y Diesel, $s=1,2,3$ respectivamente.

$$\%R_s = \frac{F_s}{F_t} \quad (1)$$

Donde, F_s es el flujo volumétrico en barriles por día (BPD) del producto s y F_t es el flujo volumétrico en BPD del crudo total que entra a TDA1 y R_s el rendimiento de cada producto.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE SCREENING

Teniendo en cuenta que los diseños de filtrado usados en este estudio son de 2 niveles, el primer paso fue definir el máximo y el mínimo de las 16 variable de entrada (Tabla 1), tomando como criterio los límites operacionales de la planta, es decir los valores extremos de las variables que aseguran un buen funcionamiento de los equipos. Con los 2 niveles, se crearon las matrices de experimentos para el diseño Plackett-Burman y para el Balance Aleatorio.

CORRIDAS DE LOS EXPERIMENTOS EN PRO/II

Para el desarrollo de los experimentos de screening, se usó la plataforma comercial de simulación en estado estacionario PRO/II versión 8.0 (SimSci-Esscor®), en el cual se configuró y sintonizó la

TDA de acuerdo a la planta industrial. El modelo en PRO/II representa la operación de la planta en cuanto a rendimientos y calidad de productos con un error del 2.5% para flujos y 3% para las demás propiedades; el modelo refleja de manera acertada el desempeño de la torre ante cambios operacionales como variación de la carga de crudo (tanto en cantidad, como en composición), presión y temperaturas en la torre, temperatura a la salida del horno y calidad de los productos Jet y Diesel a través de los puntos finales (PFE) de la curva verdadera de distribución de puntos de ebullición (TBP). Se seleccionó como paquete termodinámico para el caso de simulación en la sección atmosférica la ecuación de estado de Grayson-Streed y un conjunto de pseudocomponentes (componentes hipotéticos) para representar el petróleo de 110 puntos de corte [3].

Al modelo de PRO/II se le suministraron cada uno de los puntos experimentales generados por los diseños de screening para su simulación. Como resultado (variables de salida) se obtuvo el flujo volumétrico de los productos que junto con la ecuación (1) permitieron obtener el rendimiento de cada corriente de interés para cada corrida.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS EXPERIMENTOS

El análisis de los datos obtenidos por los diseños de screening se llevó a cabo en el paquete estadístico Statgraphics Centurion XV versión 15.1 [4]. Para los cálculos estadísticos, las variables de entrada (Tabla 1) fueron codificadas tomando valores de +1 y -1 según el valor fuera el máximo o el mínimo respectivamente.

Tabla 1. Variables de Entrada en los Metamodelos de Torre de Destilación 1 (TDA1)

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	TDA1	
			MAX (+1)	MIN (-1)
X ₁	Flujo Volumétrico de Crudo a Torre	BPD	35000	55000
X ₂	Temperatura salida Pre calentamiento	°F	430	500
X ₃	Temperatura a la Salida del Horno	°F	660	710
X ₄	Temperatura de Cima	°F	270	320
X ₅	Presión de Cima	Psig	13	20
X ₆	Temperatura Condensador	°F	90	115
X ₇	Flujo Volumétrico de Reflujo Medio	BPD	10556	17593
X ₈	Flujo Volumétrico de Reflujo Inferior	BPD	10200	18000
X ₉	Temperatura Retorno de Reflujo Cima	°F	75	135
X ₁₀	Temperatura Retorno de Reflujo 1/2	°F	260	330
X ₁₁	Temperatura Retorno de Reflujo Inf.	°F	460	500
X ₁₂	Flujo de Vapor de Despojo a Torre	Lb/day	72000	192000
X ₁₃	Presión en Condensador	Psig	9	18
X ₁₄	Vapor a Despojadora T-A	BPD	16800	36000
X ₁₅	Vapor a Despojadora T-B	BPD	16800	36000
X ₁₆	Vapor a Despojadora T-C	BPD	9600	24000

RESULTADOS

DISEÑO PLACKETT-BURMAN

El screening con Plackett-Burman estudió el efecto de 16 factores en 40 corridas con resolución IV sobre el rendimiento de Nafta, Jet y Diesel, el orden de los experimentos fue completamente aleatorio. Por la resolución del diseño, los efectos principales

no están confundidos con los de 2 interacciones, sin embargo, las interacciones entre 2 factores están confundidas entre ellas. Por lo anterior, este diseño permite estimar los efectos principales pero no aporta a los efectos binarios.

Con la matriz de experimentos de dimensiones 40x16 se realizaron las corridas de simulación en PRO/II y los resultados obtenidos de rendimientos

se analizaron usando un análisis de varianza (ANOVA). 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%.

Jerarquización sobre Nafta

En la Tabla 2 se muestra el ANOVA de los efectos de las variables sobre el rendimiento de Nafta y se observa que 12 factores tienen efectos significantes sobre dicha variable con un nivel de confianza del 95% (valores $P < 0.05$).

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 99.76% de la variabilidad en el Rendimiento de Nafta con un R^2 ajustado de 99.6%.

En la carta de Pareto (Figura 2) se muestra que los factores con mayores efectos sobre la respuesta, en su orden son: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Diesel y de Jet, flujo de crudo, flujo de vapor de la despojadora de GOA, flujo de MPA y LPA, temperatura LPA, temperatura a la salida del horno y temperatura MPA.

Tabla 2. ANOVA de los Efectos del Diseño Plackett-Burman sobre Rendimiento de Nafta

Efectos	SC	GL	MC	F	P
A:F_Crudo	0,13110	1	0,13110	106,63	0,000
B:T_HornoAtm	0,01482	1	0,01482	12,06	0,002
C:T_CimaAtm	6,8807	1	6,8807	5596,5	0,000
D:P_CimaAtm	0,87912	1	0,87912	715,05	0,000
E:T_Conden	0,00012	1	0,00012	0,10	0,755
F:F_MPAAtm	0,06972	1	0,06972	56,71	0,000
G:F_LPAAtm	0,03192	1	0,03192	25,96	0,000
H:T_UPAAtm	$2 \cdot 10^{-6}$	1	$2 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,964
I:T_MPAAtm	0,01122	1	0,01122	9,13	0,006
J:T_LPAAtm	0,02070	1	0,02070	16,84	0,000
K:F_VaporAtm	3,34662	1	3,34662	2722,0	0,000
L:P_Conden	0,00012	1	0,00012	0,10	0,755
M:F_VaporTA	0,14042	1	0,14042	114,22	0,000
N:F_VaporTB	0,18090	1	0,18090	147,14	0,000
O:F_VaporTC	0,11342	1	0,11342	92,25	0,000
P:T_Precal	0,00006	1	0,00006	0,05	0,824
Total error	0,02828	23	0,00123		
Total (corr.)	11,8493	39			
$R^2=99.76\%$			$R^2(\text{ajustado por G.L.})=99.6\%$		

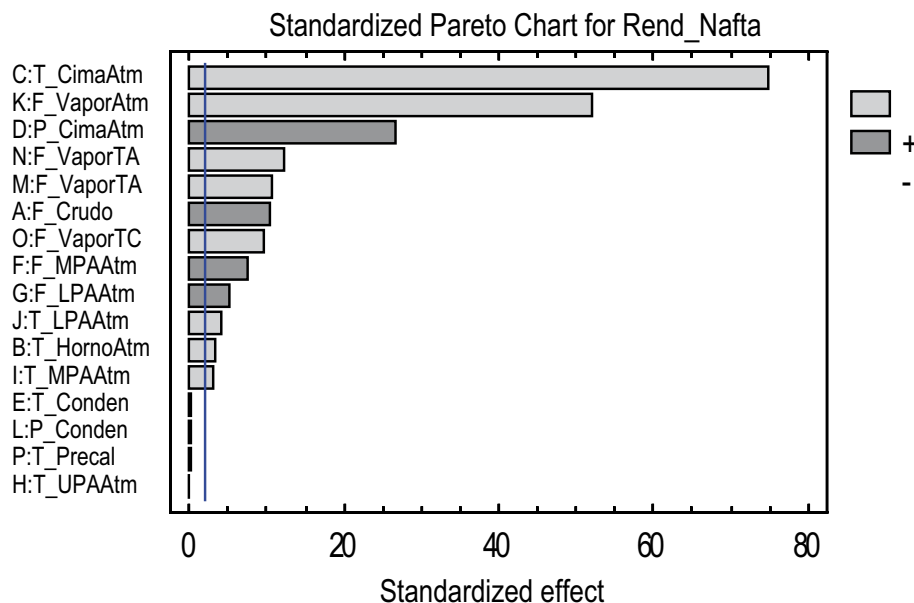


Figura 2. Carta de Pareto para Rendimiento de Nafta con Plackett-Burman

Jerarquización sobre Jet

En la Tabla 3 se muestra el ANOVA de los efectos de las variables sobre el rendimiento de Jet y se observa que 10 factores tienen efectos significantes sobre dicha variable con un nivel de confianza del 95% (valores $P < 0.05$). El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 99.69% de la variabilidad en el Rendimiento de Jet con un R^2 ajustado de 99.48%.

En la carta de Pareto (Figura 3) se muestra que los factores con mayores efectos sobre la respuesta, en su orden son: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Jet, flujo de crudo, flujo de LPA, flujo de vapor de la despojadora de Diesel, temperatura LPA, flujo de vapor de la despojadora de GOA, temperatura y flujo de MPA.

Tabla 3. ANOVA de los Efectos del Diseño Plackett-Burman sobre Rendimiento de Jet

Efectos	SC	GL	MC	F	P
A:F_Crudo	0,21609	1	0,21609	98,24	0,000
B:T_HornoAtm	0,00144	1	0,00144	0,65	0,427
C:T_CimaAtm	10,8994	1	10,8994	4955,2	0,000
D:P_CimaAtm	0,82944	1	0,82944	377,09	0,000
E:T_Conden	0,00009	1	0,00009	0,04	0,841
F:F_MPAAtm	0,00676	1	0,00676	3,07	0,093
G:F_LPAAtm	0,21609	1	0,21609	98,24	0,000
H:T_UPAAtm	0,00004	1	0,00004	0,02	0,894
I:T_MPAAtm	0,01681	1	0,01681	7,64	0,011
J:T_LPAAtm	0,13456	1	0,13456	61,18	0,000
K:F_VaporAtm	3,66025	1	3,66025	1664,1	0,000
L:P_Conden	0,00016	1	0,00016	0,07	0,79
M:F_VaporTA	0,26569	1	0,26569	120,79	0,000
N:F_VaporTB	0,19321	1	0,19321	87,84	0,000
O:F_VaporTC	0,02809	1	0,02809	12,77	0,002
P:T_Precal	0,00009	1	0,00009	0,04	0,841
Total error	0,05059	23	0,0022		
Total (corr.)	16,5188	39			
$R^2=99.69\%$		$R^2(\text{ajustado por G.L.})=99.48\%$			

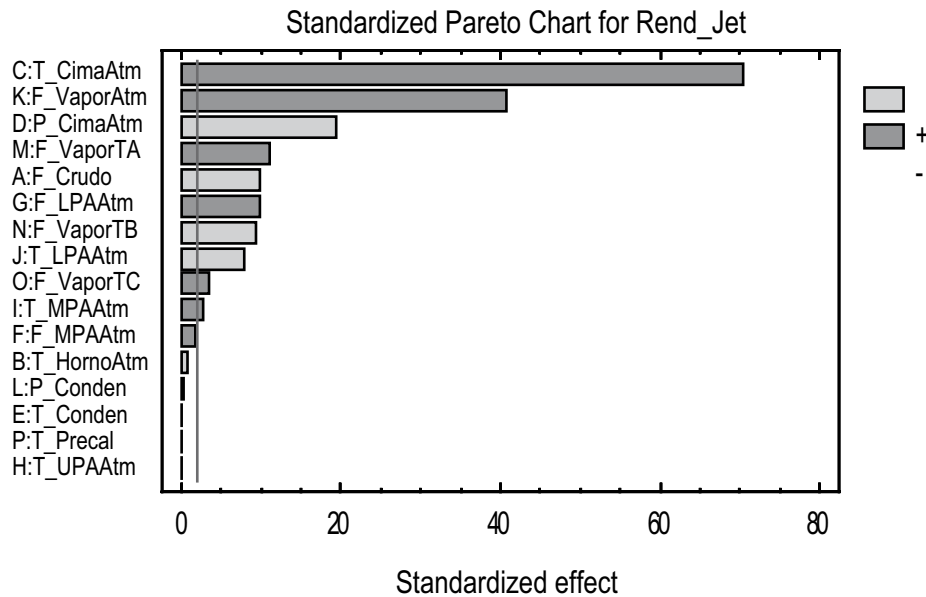


Figura 3. Carta de Pareto para Rendimiento de Jet con Plackett-Burman

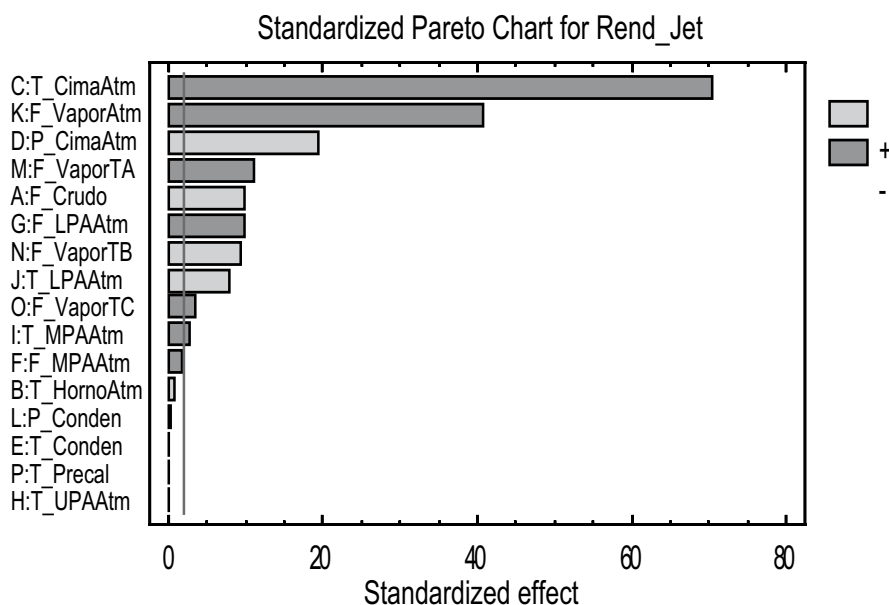
Jerarquización sobre Diesel

En la Tabla 4 se muestra el ANOVA de los efectos de las variables sobre el rendimiento de Diesel y se observa que 11 factores tienen efectos significantes sobre dicha variable con un nivel de confianza del 95% (valores $P < 0.05$). El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 99.85% de la variabilidad en el Rendimiento de Diesel con un R^2 ajustado de 99.75%.

En la carta de Pareto (Figura 4) se muestra que los factores con mayores efectos sobre la respuesta, en su orden son: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Jet, flujo de crudo, flujo de LPA, flujo de vapor de la despojadora de Diesel, temperatura LPA, flujo de vapor de la despojadora de GOA, temperatura y flujo de MPA.

Tabla 4. ANOVA de los Efectos del Diseño Plackett-Burman sobre Rendimiento de Diesel

Efectos	SC	GL	MC	F	P
A:F_Crudo	0,78961	1	0,78961	327,40	0,000
B:T_HornoAtm	11,004	1	11,004	4562,7	0,000
C:T_CimaAtm	0,54756	1	0,54756	227,04	0,000
D:P_CimaAtm	3,27184	1	3,27184	1356,6	0,000
E:T_Conden	0,0	1	0,0	0,00	1,000
F:F_MPAAtm	0,18769	1	0,18769	77,82	0,000
G:F_LPAAtm	0,56169	1	0,56169	232,9	0,000
H:T_UPAAtm	0,0	1	0,0	0,00	1,000
I:T_MPAAtm	0,00001	1	0,00001	0,00	0,949
J:T_LPAAtm	0,35721	1	0,35721	148,1	0,000
K:F_VaporAtm	18,8238	1	18,8238	7805,1	0,000
L:P_Conden	0,00001	1	0,00001	0,00	0,949
M:F_VaporTA	0,02209	1	0,02209	9,16	0,006
N:F_VaporTB	0,88209	1	0,88209	365,8	0,000
O:F_VaporTC	0,68644	1	0,68644	284,6	0,000
P:T_Precal	0,00004	1	0,00004	0,02	0,899
Total error	0,05547	23	0,002411		
Total (corr.)	37,1896	39			
R ² =99.85%			R ² (ajustado por G.L)=99.75%		

**Figura 4.** Carta de Pareto para Rendimiento de Jet con Plackett-Burman

MÉTODO DE BALANCE ALEATORIO

La matriz del diseño se construyó por mezcla aleatoria de filas regulares del diseño factorial 2^4 , creándose una matriz de 16×16 . Para analizar la significancia de los efectos se usó el criterio t-student. Los valores del estadístico t para los niveles de confianza del 95%, 90% y 80% son 1.96, 1.64 y 1.28 respectivamente.

Jerarquización sobre Nafta

En la Figura 5 se muestra el diagrama de dispersión de los 2 niveles de las 16 variables para el Rendimiento de Nafta, de donde se seleccionaron de forma preliminar 6 factores como significantes: flujo de crudo, temperatura de cima, presión de cima, temperatura de UPA, flujo de vapor a la despojadora de Diesel y de GOA.

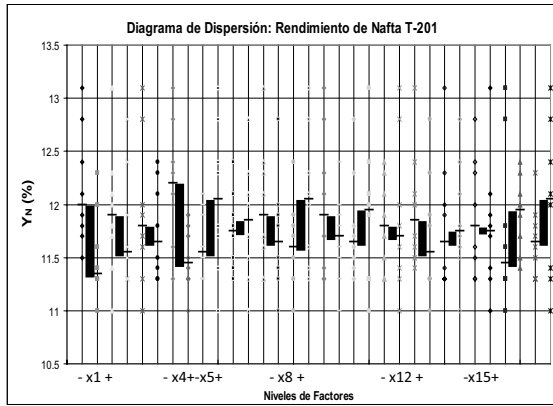


Figura 5. Diagrama de Dispersión para Rendimiento de Nafta

Al analizar la significancia de los efectos de los 6 factores se encontró que los efectos del flujo de crudo y la temperatura de cima son significantes con un nivel de confianza del 80%, 90% y 95% para el Rendimiento de Nafta, mientras que los efectos de la presión de cima y la temperatura de UPA son significantes solo en un nivel de confianza del 80% para el mismo rendimiento (Tabla 5). La jerarquía de impacto de estas variables está en la última columna de la Tabla 5.

Tabla 5. Efectos y Estadístico t para las Variables impactantes sobre Rendimiento de Nafta

	FACTOR	EFEECTO	tx_i	Impacto
X_1	F crudo _ Unidad	0.66	2.50	2
X_4	T_CimaAtm1	0.73	2.78	1
X_5	P_CimaAtm1	-0.40	-1.51	3
X_8	T_UPAAtm1	-0.37	-1.39	4
X_{15}	F_VaporT1B	-0.11	-0.40	6
X_{16}	F_VaporT1C	-0.26	-1.01	5

Jerarquización sobre Jet

En la Figura 6 se muestra el diagrama de dispersión de los 2 niveles de las 16 variables para el Rendimiento de Jet, de donde se seleccionaron de forma preliminar 7 factores significantes: flujo de crudo, temperatura de cima, flujo de LPA, temperatura de UPA, flujo de vapor a TDA1, flujo de vapor a la despojadora de Jet y de GOA.

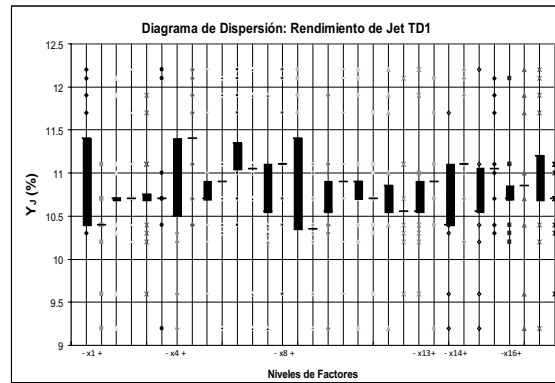


Figura 6. Diagrama de Dispersión para Rendimiento de Jet

Al analizar la significancia de los efectos de los 7 factores se encontró que los efectos del flujo de crudo, temperatura de cima, temperatura de UPA y flujo de vapor a TDA1 son significantes con un nivel de confianza del 80%, 90% y 95% para el Rendimiento de Jet, mientras que los efectos del flujo de LPA, flujo de vapor a la despojadora de Jet y GOA son significantes solo en un nivel de confianza del 80% para el mismo rendimiento (Tabla 6). La jerarquía de impacto de estas variables está en la última columna de la Tabla 6.

Tabla 6. Efectos y Estadístico t para las Variables impactantes sobre Rendimiento de Jet

	FACTOR	EFEECTO	tx_i	Impacto
X_1	Fcrudo_Unidad	1.00	2.73	1
X_4	T_CimaAtm1	-0.83	-2.28	3
X_7	F_LPAAtm1	-0.50	-1.38	7
X_8	T_UPAAtm1	0.91	2.49	2
x_{13}	F_VaporAtm1	-0.81	-2.21	4
x_{14}	F_VaporT1A	-0.54	-1.48	5
x_{16}	F_VaporT1C	0.51	1.40	6

Jerarquización sobre Diesel

En la Figura 6 se muestra el diagrama de dispersión de los 2 niveles de las 16 variables para el Rendimiento de Diesel, de donde se seleccionaron de forma preliminar 7 factores significantes: flujo de crudo, temperatura de horno, temperatura de cima, flujo de LPA, temperatura de UPA, flujo de vapor a TDA1, flujo de vapor a la despojadora de Diesel.

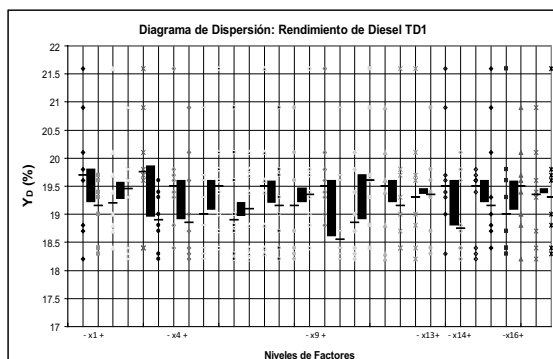


Figura 7. Diagrama de Dispersión para Rendimiento de Diesel

Al analizar la significancia de los efectos de los 7 factores se encontró que los efectos del flujo de crudo, temperatura de horno, y el flujo de vapor a TDA1 son significantes con un nivel de confianza del 80%, y 90% para el Rendimiento de Diesel, mientras que los efectos del flujo de LPA, y la temperatura de UPA son significantes solo en un nivel de confianza del 80% para el mismo rendimiento (Tabla 7). La jerarquía de impacto de estas variables está en la última columna de la Tabla 7.

Tabla 7. Efectos y Estadístico t para las Variables impactantes sobre Rendimiento de Diesel

	FACTOR	EFEECTO	tx_i	Impacto
X_1	Fcrudo_Unidad	0.82	1.75	2
X_3	T_HornoAtm1	0.90	1.92	1
X_4	T_CimaAtm1	0.37	0.79	6
X_9	F_LPAAtm1	0.64	1.37	5
X_{10}	T_UPAAtm1	-0.69	-1.47	4
X_{13}	F_VaporAtm1	0.80	1.70	3
X_{15}	F_VaporT1B	-0.11	-0.23	7

CONCLUSIONES

El conjunto de variables impactantes en la producción de Nafta usando Plackett-Burman, en su orden fue: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Diesel y de Jet, flujo de crudo, flujo de vapor de la despojadora de GOA, flujo de MPA y LPA, temperatura LPA, temperatura a la salida del horno y temperatura MPA. Mientras que usando Balance Aleatorio se obtuvieron, en su orden: temperatura de cima, flujo de crudo, presión de cima, temperatura de UPA, flujo de vapor a despojadora de GOA y de Diesel.

El conjunto de variables impactantes en la producción de Jet usando Plackett-Burman, en su orden fue: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Jet, flujo de crudo, flujo de LPA, flujo de vapor de la despojadora de Diesel, temperatura LPA, flujo de vapor de la despojadora de GOA, temperatura y flujo de MPA. Mientras que usando Balance Aleatorio se obtuvieron, en su orden: flujo de crudo, temperatura de UPA, flujo de vapor a TDA1, flujo de vapor a despojadora de Jet y GOA y flujo de LPA.

El conjunto de variables impactantes en la producción de Diesel usando Plackett-Burman, en su orden fue: temperatura de cima, flujo de vapor de TDA1, presión de cima, flujo de vapor de la despojadora de Jet, flujo de crudo, flujo de LPA, flujo de vapor de la despojadora de Diesel, temperatura LPA, flujo de vapor de la despojadora de GOA, temperatura y flujo de MPA. Mientras que usando Balance Aleatorio se obtuvieron, en su orden: temperatura de horno, flujo de crudo, flujo de vapor a TDA1, temperatura de UPA, flujo de LPA, temperatura de cima, flujo de vapor a despojadora de Diesel.

Se encontró que las variables de mayor impacto en la producción de las corrientes más valiosas de la torre de destilación atmosférica son el flujo de crudo, la temperatura de cima, el flujo del reflujo inferior (LPA) y el vapor a la despojadora de Diesel y GOA. Las variables menos influyentes son la temperatura de precalentamiento y las condiciones del condensador.

El diseño Plackett-Burman mostró ser más sensible a detectar efectos que el Balanceo Aleatorio, ya que los conjuntos de variables principales detectados tienen un mayor tamaño, esto debido al número de corridas usado para el análisis en los dos diseños.

Los diseños de experimentos tipo screening proporcionaron una reducción de la dimensión del espacio de las variables de entrada usando un número pequeño de experimentos, cualidad que los convierte en útiles para hacer análisis de variables antes de realizar modelado y/o optimización de procesos. La reducción de la dimensión del conjunto de variables de entrada estuvo entre 31-44% para el diseño Plackett-Burman y entre 56-63% para el Balance Aleatorio.

Los diseños de experimentos tipo screening proporcionan un conjunto de variables de entrada estadísticamente significantes sobre la variable de respuesta, sin embargo el conjunto obtenido debe ser evaluado por expertos en el proceso para hacer a este tipo de análisis más robusto.

AGRADECIMIENTOS

A ECOPETROL –ICP quienes brindaron la información necesaria para la construcción y sintonización del modelo de PRO/II, y para el desarrollo de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Plackett, R.L. and Burman, J.P. (June 1946) The Design of Optimum Multifactorial Experiments. *Biometrika* 33 (4), pp. 305-25.
- [2] Lazic, Z.R. (2004) Design of Experiments in Chemical Engineering. 1st ed., Wiley-VCH, Morristown.
- [3] PRO/II® Workbook: Hydrocarbon Distillation. Simulation Sciences Inc: SIMSCI. Valencia, 2000
- [4] The User's Guide to STATGRAPHICS® Centurion XV. STATPOINT, Inc. USA, 2005