

Analisis multifactorial y optimizacion de Normal Butano (NC₄) en un proceso de fraccionamiento

Analysis and optimization of normal butane (NC₄) separation tower using a multifactorial model

L. M. Sarache B.

Departamento de Tecnología y Diseño, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, ULA.

Av. Don Tulio Febres Cordero. Mérida 5101, Venezuela.

e-mail: sarachel@ula.ve

Resumen.

Este trabajo utiliza el Diseño Factorial Experimental, para determinar las variables que afectan la calidad de Normal Butano (NC₄), obtenido en el fraccionamiento de Líquidos del Gas Natural, en la Torre Separadora de Butanos, del Complejo Criogénico de Oriente. Se experimenta para lograr el Control Estadístico del Proceso, mediante las significancias de las variables Flujo de Alimentación, Temperatura de la Bandeja 28 entre y la Temperatura del Rehervidor de Fondo de la Torre, que permitan operar si el control avanzado señala incomunicación con el sistema de cromatografía en línea. Se realiza el análisis de estas variables experimentales para cumplir las exigencias de comercialización internacional, lográndose conseguir la operación eficiente del efecto cruzado de las variables Flujo de Alimentación a 300 gpm y Temperatura del Rehervidor de Fondo de la Torre con temperatura de 165 or 167 °F con un porcentaje molar del 98,11% muy superior al requerido internacionalmente de 97%.

Palabras Claves: Butano, Optimización, Fraccionamiento, Multifactorial y Diseño Factorial.

Abstract.

This work utilizes the Basic Factorial Design (BFD), to determine what variables affect the quality of the Normal Butane (NC₄), gotten in the division of Liquids of the Natural Gas, in a Separation Tower of Butanes, from the Criogenic Complex of East. The Statistical Control of the Process is achieved by studying the significant changes of variables like the Volumetric Flow, the Temperature of the Tray 28 between and the boiler Temperature at the Bottom of the Tower, that allow to operate if the advanced control marks shows an isolation effect with the inline chromatograph. The analysis of these experimental variables satisfy all the demands for Butane international commercialization, the success is gotten by the crossed effect of the variables as a Volumetric flow of 300 gal./min., and boiler Temperature to 165 or 167 °F with a molar percentage of 98,51 % higher than the required international value of 97 %.

Keywords: Butane, Optimization, Separation Tower, Multifactorial y Factorial Design.

1 Introducción.

El objetivo de este trabajo de aplicación experimental es determinar los valores y las tendencias de las concentraciones molares de Normal-Butano (NC₄), en un tren de procesos de la Planta de Fraccionamiento, del Complejo Criogénico de Oriente de PDVSA, aplicando la metodología de un Diseño Factorial Básico (DFB) y utilizando como apoyo analítico el programa de computación denominado (SEMPRO) desarrollado en el Postgrado de Ingeniería en Mantenimiento de la

Universidad de Los Andes; lo anterior sin poner en riesgo la producción por lo delicado de este tipo de operaciones y establecer los rangos operacionales de las variables críticas del proceso de fraccionamiento, en el caso de que se presente una avería en el sistema de control de cromatografía en línea, y de esta manera continuar la producción de (NC₄) acorde con los requisitos de comercialización internacional con un valor no inferior al 97% molar. Igualmente se desea crear la base de datos para el establecimiento de un Control Estadístico del Proceso como el exigido por las normas (CPV, 1997); es necesario

aclarar que este sistema esta asociado a otro sistema de cromatografía en línea, que sirve como elemento de respaldo a todas las operaciones planteadas y el cual mide la proporción molar de LGN, para la producción de otros productos como son: Hidrocarburos más pesados, Iso-Butano y Propano, los cuales fueron analizados igualmente por esta metodología de la misma manera como se presenta en este trabajo.

Es importante aclarar la necesidad de hacer este estudio, ya que por periodos entre 5 y 24 horas en un mes, el sistema de cromatografía en línea se incomunica con el sistema de control, si a esta condición normal de operación se le agrega el hecho de que se procesan 50 mil barriles de LGN por día, la incomunicación es un factor de alto riesgo para la posible contaminación de la producción de unos 10 mil barriles por día; asociado lo anterior a la pérdida de material y costos directos o indirectos de toda la operación, entonces, lo que se pretende es lograr que el operario pueda con los datos obtenidos mantener las especificaciones de producción internacionales del Normal-Butano, basado en estos datos experimentación del (DFB) Pⁿ, tal como lo plantea (Anderson y Thomas, 1980), para el estudio en

situaciones restringidas como éste, considerando variables de operación críticas.

2 Fase pre-experimental.

Considerando todas las variables del proceso y luego seleccionando las variables que se consideran críticas por el personal altamente capacitado y responsable en operaciones de fraccionamiento, se logra con la Técnica del Grupo Nominal (TGN), determina entre un universo relativamente grande de variables de estudio que se consideran pesadas o significativas del proceso, distinguir las siguientes: el Flujo de Alimentación de LGN a la Torre Separadora de Butanos, el control de la Temperatura de la Bandeja N° 28 de la torre y el control de Temperatura del Rehervidor de Fondo, las anteriores afectan el proceso para destilar hidrocarburos livianos con vapor de agua o aceite y estas variables son mostradas en la tabla 1, con sus distintos niveles, que sin poner en riesgo la operación pueden proporcionar información muy útil en cuanto a las tendencias para el control estadístico de la operación.

Tabla 1. Diseño Factorial Básico 2³ aplicado a la Torre Separadora de Butanos.

Variables de Estudio		Niveles de las Variables	
		Bajo	Alto
Flujo de Alimentación. (GPM)	[FA]	280	300
Temperatura de la Bandeja N° 28. (°F)	[TB]	146	148
Temperatura del Rehervidor de Fondo. (°F)	[TR]	165	167

Las diferencia mínima entre los niveles de la variable temperatura en la bandeja N° 28, que esta asociada a la separación del (NC₄), depende en principio de un controlador de flujo de aceite caliente y este flujo de aceite es el que fija nuevamente el grado de fraccionamiento; igualmente la mínima diferencia de valores para los niveles de la temperatura del rehervidor de fondo como elemento para comparar del proceso, obedece básicamente al riesgo considerable de la operación, en este caso, el tratamiento estadístico se aplica teniendo como pauta lo planteado por (Atkinson, 1988), donde las pruebas se deben realizar y analizar cuidadosamente para lograr las tendencias y significancias, eliminando en lo posible cualquier riesgo, atribuible a la experimentación que ponga en peligro la producción.

3 Fase experimental.

En este caso la unidad experimental es la Torre de Fraccionamiento o Torre Separadora de Butanos; se

realizan dos corridas por prueba a fin de interferir lo mínimo posible con la operación por el riesgo de la misma. Estas corridas son previamente aleatorizadas para lograr una mayor validez de los resultados, tal como se presenta en la tabla 2, en este caso se debe realizar la evaluación de los niveles de significancia con la ecuación de la Varianza de las diferencias al poseer solo dos corridas, tal como lo plantea (Walpole y Myers, 1989), para la determinación práctica de los errores de las variables; valores éstos con los cuales se pueden hacer las comparaciones individuales o de interacción que sean significativas de las variables de estudio, siempre y cuando estos valores en magnitud absoluta resulten superiores a dos veces la Varianza (error) de los Efectos de las variables involucradas en el proceso de estudio.

Tabla 2. Resultados de los experimentos del diseño 2³ en la Torre Separadora de Butanos.

Número de pruebas	Corrida Aleatoria	[FA]	[TB]	[TR]	Corridas %		Promedio % Mol de (NC ₄)
					1	2	
1	8 y 9	-	-	-	97.06	97.00	97.03
2	2 y 13	+	-	-	98.70	98.48	98.59
3	7 y 16	-	+	-	97.21	97.21	97.21
4	6 y 15	+	+	-	98.32	98.56	98.44
5	5 y 12	-	-	+	97.41	97.05	97.23
6	4 y 11	+	-	+	98.59	99.01	98.80
7	1 y 10	-	+	+	98.20	97.82	98.01
8	3 y 14	+	+	+	98,30	98.16	98.23

Tabla 3. Generación de las columnas de interacción de variables requeridas para el cálculo de efectos.

Número de pruebas	Interacción de variables			
	[FA][TB]	[FA][TR]	[TB][TR]	[FA][TB][TR]
1	+	+	+	-
2	-	-	+	+
3	-	+	-	+
4	+	-	-	-
5	+	-	-	+
6	-	+	-	-
7	-	-	+	-
8	+	+	+	+

La generación de las columnas de signos de la Tabla 3, se logra mediante la aplicación de un algoritmo planteado por (Yates,1970) en el cual la columna de signos de una variable independiente o de interacción es multiplicada por la columna de signos de otra variable sea esta independiente o no y se genera una nueva columna que representa la interacción de esta dos variables, lo anterior se aplica para todas y cada una de las columnas generadas, de igual forma esto se aplica para interacción de alto orden, es decir en aquellos casos donde se desea conocer el efecto simultáneo de más de dos variables.

Para calcular el efecto de cada variable o los efectos de interacción de variables de estudio se utilizan las ecuaciones para efectos independientes o no, planteadas por (Box, Hunter and Hunter, 1978), en la cual el valor del signo de la columna es un factor determinante para la respuestadonde :

$$\text{Efecto } [X_i] = 2/N \Sigma [\text{Promedio \% Mol} * \text{el signo de la columna del resultado}] \quad (1)$$

$$\text{Efecto } [X_i X_j] = 2/N \Sigma [\text{Promedio \% Mol} * \text{el signo de la columna del resultado}] \quad (2)$$

Para calcular la Varianza Individual del efecto de cada variable o los efectos de interacción de variables basta

utilizar las ecuaciones general utilizada por (Rascón, 1986), que incluye el efecto de la diferencia de valores:

$$S_i^2 = [\text{dif}^2 / 2] \quad (3)$$

En este caso la denominación dif^2 es la diferencia de las dos mediciones experimentales y la Varianza del Experimento es igual a:

$$S^2 = [(\Sigma \text{dif}^2) / 2g] \quad (4)$$

Donde g es el grado de libertad total del experimento, en este caso 8 corresponde al número de ensayos en el diseño factorial y el error normal de los experimentos es:

$$S' = [S^2]^{1/2} \quad (5)$$

Para determinar la Varianza y el error de los efectos tanto individuales como en interacción se aplican las ecuaciones de (Montgomery, 1993), la Varianza del efecto de estas variables será dependiente del valor de la varianza de la experimentación:

$$V(\text{efecto}) = (1/4) S^2 \quad (6)$$

El Error de estos efectos esta dado para este caso en el cual existen solo dos corridas experimentales por la siguiente ecuación, que posteriormente servirá de elemento

de comparación para determinar las significancias de los efectos:

$$E(\text{efecto}) = [V(\text{efecto})]^{1/2} \quad (7)$$

4 Fase post-experimental.

En la Tabla 4, se aprecia que este proceso esta altamente controlado debido a que la varianza es extremadamente pequeña, además solo dos variables

indican aumento del (NC_4) que se encuentra dentro del rango de dos veces el error estándar; en este caso se aplica lo establecido por (Kuwada, 1993), solo para el caso de análisis de la varianza de los diseños experimentales cuando se presentan altamente controlados, si lo que se pretende es optimar el procesos con una aproximación del método (DFB). Esto resulta para este caso no práctico ya que los efectos de interacción negativos inducen a una disminución del (NC_4) y no se ajusta a los estudios anteriores planteados por (Oles, 1990).

Tabla 4. Efectos de las variables en forma individual y de interacción.

Efectos de las Variables de Estudio		Valor Estimado	Error Estándar
Efectos de las Variables Principales			
Flujo de Alimentación.	[FA]	1,145	± 0,0952
Temperatura de la Bandeja 28.	[TB]	0,060	± 0,0952
Temperatura del Rehervidor.	[TR]	0,250	± 0,0952
Efectos de interacción de dos Variables			
Flujo de Alimentación y Temperatura de la Bandeja 28.	[FA] [TB]	- 0,420	± 0,0952
Flujo de Alimentación Temperatura del Rehervidor.	[FA] [TR]	- 0,250	± 0,0952
Temperatura de la Bandeja 28 y Temperatura del Rehervidor.	[TB] [TR]	0,045	± 0,0952
Efectos de interacción de las tres Variables			
	[FA] [TB] [TR]	- 0,255	± 0,0952

Como elemento de análisis se tiene que comparar el efecto de cada variable independiente o en interacción, si esta es o no superior al doble de error estándar, como se trata de un proceso muy controlado, es válido para este caso indicar que los efectos independientes de las variables de estudio Flujo de Alimentación y Temperatura del Rehervidor de Fondo, son significativas y anulan un posible análisis de los efectos de interacción, ya que los mismos tienen la tendencia a disminuir el % molar, sin embargo, el elemento clave para control según criterios de optimización dados por (Nishii, 1993), son el análisis de diagramas de dos vías o de análisis factorial de correspondencias planteado por (Castillo y Rodríguez, 1997), para variables cualitativas, que es el caso por tener el efecto cruzado de dos variables.

Con relación al efecto independiente de la Temperatura del Rehervidor de Fondo, se aprecia que cuando esta temperatura se incrementa en dos grados al pasar de 165 a 167 °C, se produce un incremento en el porcentaje molar de Normal Butano hasta alcanzar 98.06 %, inferior el efecto independiente de la temperatura pero superior al 97 % requerido por las exigencias internacionales, por lo tanto genera condiciones claramente delimitadas y positivas al proceso, si se trata de condiciones aisladas, pero en este caso se requiere hacer un análisis de los efectos de interacción de estas variables y definir

claramente la condición de operación simultánea, dado que su efecto cruzado es negativo y se necesita definir la mejor condición.

Como se aprecia en la figura 1 en cualquiera de las dos condiciones de temperatura del rehervidor de fondo se presenta un alto valor de porcentaje molar, lo que si es importante es mantener el flujo en la condición máxima para de esta manera garantizar el alto porcentaje, sin

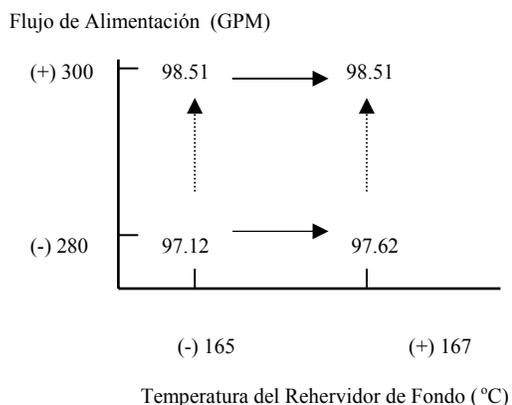


Fig. 1. Diagrama de dos vías del efecto cruzado del Flujo de Alimentación y Temperatura del Rehervidor de Fondo.

embargo, la mejor condición desde el punto de vista operacional por los costos asociados a la producción es con la mínima temperatura del rehervidor de fondo manteniéndola en 165 °C.

Lo anterior satisface la hipótesis planteada y presentada por (Ahmed, Laucam, y Bolton, 1990), sobre los efectos de las condiciones de resolución y capacidad de factores en el estudio de cromatógrafos, se desprende que en casos controlados como éste, en el cual el error es sumamente pequeño 0,095 y con variaciones extremadamente controladas y con magnitudes muy pequeñas los resultados producen beneficios a muy corto plazo y a bajo costo, el lograr una aproximación mediante el análisis individual resulta la solución práctica adecuada para al análisis de las tendencias.

5 Conclusiones.

La variable Flujo de Alimentación resultó ser significativa y presenta una tendencia favorable a obtener mayor concentración de Normal-Butano en el fondo de la torre al incrementar el caudal de GLP de 280 a 300 galones por minuto, produciendo en promedio 98,51 % molar muy superior a lo solicitado por las especificaciones internacionales de calidad, por lo tanto se tiene el beneficio, en principio de generar una mayor cantidad de GLP con 20 galones por minuto adicionales y con una mejor calidad del producto significativa al aumentar de 97,37 a 98,51 % mol de (NC₄) y mejorando la oferta para venta en cuanto a cantidad producida.

Es sorprendente un resultado como este, donde el efecto de la Temperatura de la Bandeja N° 28, de forma individual o colectiva no generan beneficios en cuanto a aumentar el % molar de (NC₄), por el contrario los efectos de interacción tienden a disminuir este porcentaje, siendo contradictorio con los análisis previos realizados por (Sarache, 1997).

Para una Torre Separadora de Iso Butano, donde los efectos de interacción resultan ser los significativos para la obtención de este producto; no se puede considerar el error de cálculo ya que el proceso experimental se realizó utilizando el Sistema de Análisis Multifactorial de Productos, Procesos y Organizaciones (SAMPRO) (Torres y Sarache, 1997) y se descarta la posible falla de medición por utilizarse los registros aportados por el sistema TDC-3000 del centro de operaciones del control principal, de la Refinería de Oriente.

6 Referencias.

- Ahmed, S., Laucam, C. y Bolton, S., 1990, "Factorial Design in the Study of the Effects of Selected Liquid-Chromatographic Condition on Resolution and Capacity Factor". *Journal of Liquid Chromatography*, Vol 13, , Iss 3, pp. 525-541.
- Anderson D. A. y Thomas, A.M., 1980, "3 Search Designs for the Pⁿ Factorial Experiment". *Statistics Plann. Inference* 4. Weakly resolvable IV., , pp. 299-312.
- Atkinson, A.C., 1988, "Recent Developments in the Methods of Optimum and Related Experimental Designs". *Internat. Statistics. Rev.* 56, pp. 99-115.
- Box, G. E. P., Hunter, W.S. and Hunter, J. S., 1978, *Statistics for Experiments*, Wiley & Sons, New York.
- Cámara Petrolera Venezolana, 1997, "Guía de Apoyo para la Implantación, Certificación y Mantenimiento de Sistemas de Aseguramiento de la Calidad Modelo ISO 9000". 1^{era}. Edición, Caracas.
- Castillo W. y Rodríguez, O., 1997, "Algoritmo e Implementación del Análisis Factorial de Correspondencias, Método, Teoría y Algoritmos". *Revista Matemática* 4, Programa de Investigación en Modelos y Análisis de Datos (PIMAD), Escuela de Matemática, 51-62. Universidad de Costa Rica, San José.
- Kuwada, M., 1993, "Analysis of Variance of Balanced Fractional Factorial Designs". *Discrete Mathematics*, Vol 116, Iss 1-3, pp 335-336.
- Montgomery, C., 1993, *Diseño de Experimentos para Ingeniería*, McGraw Hill, México.
- Nishii, R., 1993, "Optimality of Experimental Designs". *Discrete Mathematics*, Vol 116, pp.209-225. *International*, Vol 76, Iss 3, pp 615-620.
- Oles, P., 1990, "Fractional Factorial Design Approach for Optimizing". *Analytical Methods Journal Aoac*, , pp 6 .
- Rascón, O. A., 1986, *Estadística Descriptiva*, División de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, pp.23 UNAM, México.
- Sarache, L. M., 1997, "Análisis Multifactorial del Proceso de Producción en una Planta de Fraccionamiento". III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, En CD. La Habana, Cuba.
- Torres, A. y Sarache, L., 1997, "Sistema de Análisis Multifactorial de Procesos u Organizaciones (SAMPRO)". II Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Venezuela.
- Walpole R. y Myers, R. 1989, *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, 3^{era}. Edición, McGraw Hill. New York.
- Yates, F., 1970, "The Design and analysis of Factorial Experiments". *Bulletin* 35, Imperial Bureau of Soil Science, England.