



INGENIERIA UC

Organo de Divulgación Científica y Tecnológica
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo



FACULTAD
DE
INGENIERIA
U.C.

MODELAJE DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA UNIDAD DE ALQUILACION DE LA REFINERIA EL PALITO

Antonio Cordido; Adriana Guerra; Sergio Pérez. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería.

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es 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 consistió, primeramente en definir el objetivo final de la correlación a desarrollar, para luego proceder a definir la variable dependiente y las independientes. Posteriormente se procedió a la recolección diaria de los datos para crear una base de información compatible con el programa de computación estadístico STATGRAPHICS, utilizada para determinar la influencia de las variables independientes sobre la dependiente. Por último, se procedió al desarrollo de los modelos estadísticos, mediante un proceso de ensayo y error.

Siguiendo esta metodología, se obtuvieron correlaciones para corrientes de proceso en el despojador de isobutano, el depropanizador y el despojador de ácido, las cuales tienen aceptación estadística y validez operacional. Entre las conclusiones a las que se llegó se exponen las siguientes: la metodología utilizada es válida para obtener correlaciones entre variables de la Unidad de Alquilación, y las correlaciones obtenidas son útiles al Ingeniero de Procesos ya que le permiten evaluar con precisión la operación de dicha Unidad.

1. INTRODUCCIÓN

En la Refinería El Palito de CORPOVEN, S.A, se cuenta con una Unidad de Alquilación, cuyo objetivo principal es el de producir el alquilato, componente básico en la mezcla para producir gasolina de alto octanaje. Dicho alquilato es obtenido mediante la reacción conocida como alquilación, a partir de la combinación del isobutano de importación con las olefinas provenientes de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), utilizando ácido fluorhídrico como catalizador.

La Unidad de Alquilación está diseñada para procesar una carga máxima de 20422 BPD de alimentación olefínica y 11303 BPD de isobutano, y producir 21636 BPD de alquilato, 2809 BPD de n-butano y 2977 BPD de propano asociado. Dicha unidad está dividida en dos secciones, una de conversión y fraccionamiento, donde se obtiene el alquilato mediante reacción y se separan todos los productos, y otra de neutralización, que tiene por objetivo eliminar, de los efluentes, el ácido fluorhídrico y los iones fluoruros presentes. En la Industria Química es de gran importancia explorar la relación existente entre las variables de un proceso, para así poder realizar con mayor facilidad los trabajos de optimización y control. Para ello, suelen ser de gran utilidad los programas de simulación digital, los cuales permiten evaluar más alternativas y con mayor rapidez que lo que es posible realizar manualmente. Desafortunadamente, con los programas de simulación comerciales disponibles en la Refinería El Palito, no es posible simular unidades de alquilación con ácido fluorhídrico, debido a lo difícil de predecir las propiedades termodinámicas de las mezclas ácido- hidrocarburos.

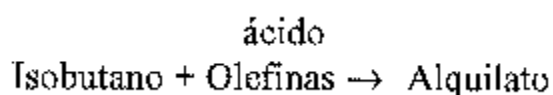
Considerando lo antes planteado y la importancia de la predicción, optimización y control del proceso de alquilación, se presenta el trabajo de investigación titulado "**MODELAJE DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE LA UNIDAD DE ALQUILACION DE LA REFINERIA EL PALITO**", el cual tiene como objetivo general, determinar modelos estadísticos que permitan predecir el comportamiento de los principales equipos de la Unidad de Alquilación, desarrollados a partir de datos operacionales.

Dichas técnicas estadísticas vendrían a reemplazar a la simulación digital, ya que ellas permiten obtener la correlación o modelo matemático requerido, mediante el uso de el denominado análisis de regresión, específicamente, la regresión lineal múltiple. Adicionalmente, la estadística también establece los criterios que permiten evaluar la adecuación del modelo obtenido, tales como el análisis de varianza, el coeficiente de determinación y el análisis de residuales, entre otros. Todo ello puede ser realizado mediante un programa estadístico de computadora; en el caso de éste trabajo, dicho programa fue el **STATGRAPHICS**.

2. PROCESO DE ALQUILACION

El proceso de alquilación consiste en la adición de un hidrocarburo saturado (un alcano) a otro hidrocarburo insaturado (un alqueno), en presencia de un catalizador ácido. En la industria de refinación de petróleo, éste viene representado por la unión de isobutano (hidrocarburo saturado), con las olefinas (mezcla de hidrocarburos insaturados) en presencia de un ácido fuerte que puede ser ácido sulfúrico o ácido fluorhídrico.

La reacción general de alquilación puede expresarse por medio de:



El principal objetivo de la Unidad de Alquilación es el de producir el alquilato, el cual es un componente básico en la mezcla para producir gasolinas de alto octanaje.

3. DESCRIPCION DE LA UNIDAD DE ALQUILACION DE LA REFINERIA EL PALITO

La Unidad de Alquilación de la Refinería El Palito fue diseñada para procesar una carga máxima de 20.422 BPD de alimentación olefinica y 11.303 BPD de isobutano y producir 21.636 BPD de alquilato, 2.809 BPD de normal butano y 2.977 BPD de propano asociado.

Dicha unidad esta dividida en dos secciones, una de conversión y fraccionamiento, y otra de neutralización.

3.1 SECCION DE CONVERSION Y FRACCIONAMIENTO

La alimentación de las olefinas provenientes de la Unidad de Desintegración Catalítica (FCC) se tratan previamente en dos unidades (Amina y Merox) para remover los compuestos de azufre, los cuales desactivan el catalizador de alquilación aumentando así su consumo.

Las olefinas ya liberadas de azufre son secadas para reducir al máximo su contenido de agua, y enviadas directamente a la Unidad de Alquilación, donde se ponen en contacto con el isobutano de reciclaje y el de reposición, para luego alimentarse a los reactores a través de un múltiple de distribución, que conduce la mezcla hacia un contacto íntimo con el ácido fluorhídrico, produciéndose la reacción entre la olefina y el isobutano para formar una estructura saturada y ramificada de alto octanaje llamada alquilato.

Los hidrocarburos generados en el reactor fluyen con el ácido fluorhídrico y el isobutano a los asentadores, donde se realiza la separación del hidrocarburo del ácido por diferencia de densidades, retirándose este último por el fondo del asentador y recirculándolo a los reactores, mientras que el hidrocarburo, constituido por alquilato, isobutano, n-butano, propano, contaminantes y trazas de ácido fluorhídrico (HF), es enviado al despojador de isobutano, donde el alquilato y el n-butano se extraen como productos. Esta corriente va directamente a unos tratadores con KOH para remover cualquier residuo de ácido disuelto y lo arrastrado con dichos productos. El isobutano se extrae como corte lateral de alta pureza y se recircula a los reactores. La corriente del tope del despojador de isobutano, la cual es rica en isobutano, propano y ácido fluorhídrico, se alimenta al depropanizador, obteniéndose una corriente de isobutano por el fondo, que se envía a los reactores,

y una de propano y ácido por el tope, la cual pasa al despojador de ácido para eliminar del propano el ácido fluorhídrico que es arrastrado a través del proceso de fraccionamiento.

El propano libre de HF, es enviado a un sistema de tratamiento formado por dos defluorinadores conectados en serie, cuya función es remover los fluoruros orgánicos del propano, los cuales se forman por reacciones colaterales en los reactores. Una vez eliminados estos contaminantes, el propano es pasado a través de un lecho de KOH para garantizar que al salir de la planta esté libre de ácido fluorhídrico.

Además de los equipos descritos, esta sección cuenta con un tambor de ácido (HF), para garantizar suficiente inventario de catalizador y un regenerador de ácido para mantener la pureza del ácido circulante. A dicho regenerador se envía, eventualmente (cuando el porcentaje de agua en el ácido es mayor de 1 %), una corriente de ácido circulante para que éste sea regenerado, es decir, se le elimine parte del agua que contiene. A esta operación se le denomina regeneración externa y cuando no se aplica se dice que la regeneración es interna ya que es realizada en el despojador de isobutano.

3.2 VARIABLES CONTROLANTES DEL PROCESO DE ALQUILACION

A continuación se presentan las variables que tienen mayor influencia en el proceso de alquilación y que son permanentemente vigiladas para mantener una buena calidad del alquilato:

- 1- Temperatura de reacción
- 2- Relación isobutano/olefinas
- 3- Concentración del ácido
- 4- Relación ácido/hidrocarburo
- 5- Tiempo de reacción
- 6- Presión del reactor

1- Temperatura de reacción

La temperatura a la cual se efectúa la reacción de alquilación es una de las variables de proceso más importante. A bajas temperaturas de reacción se mejora la calidad del alquilato, aumenta el octanaje y disminuye el punto de ebullición final del alquilato, reduciendo la formación de polímeros; sin embargo, el contenido de fluoruros combinados se incrementa. Las temperaturas óptimas a mantener durante una reacción de alquilación oscilan entre 60 °F y 110 °F. En la Unidad de Alquilación de El Palito, se mantiene una temperatura entre 85 °F y 95 °F.

2- Relación isobutano/olefinas

Se entiende por relación isobutano/olefinas, al cociente entre el total de isobutano que entra a los reactores, (isobutano presente tanto en la corriente de olefinas, como el isobutano en la corriente de reciclo) y el total de olefinas presentes en la corriente de carga al reactor. Mantener una relación alta de isobutano a olefinas, es algo necesario y beneficioso, ya que ello garantiza que todas las olefinas de la corriente de alimentación reaccionen; pero si las relaciones son muy altas, pueden traer como consecuencia, un arrastre de ácido (HF) al despojador de isobutano, debido al bajo tiempo de retención, para obtener mejor separación de fases.

3- Concentración del ácido fluorhídrico

La concentración del ácido fluorhídrico circulante en la planta, resulta de un balance entre la calidad de la alimentación, las condiciones de la reacción, la cantidad regenerada y las condiciones en que se opere el regenerador.

En la Unidad de Alquilación de El Palito, se procura mantener una concentración de ácido por encima del 87% en peso.

4- Relación ácido/hidrocarburo

La relación ácido/hidrocarburo, es una variable de operación que indica la cantidad de ácido que necesitan los hidrocarburos que entran a los reactores, para una buena reacción, entendiendo por hidrocarburo el total de barriles de isobutano más el total de barriles de olefinas que vienen de la Unidad de FCC.

La Unidad de Alquilación de la Refinería El Palito, opera entre 1.5 / 1 y 1.9 / 1, como relación de ácido a hidrocarburo, procurando mantenerlo lo más cerca del valor de 1.8 / 1, el cual se considera el óptimo.

5- Tiempo de reacción

El tiempo de reacción va a depender de la cantidad de olefinas que se esté procesando, de la relación de isobutano/olefinas y la relación ácido/hidrocarburo. Por esto, las relaciones volumétricas son vigiladas con mucho celo, para garantizar que el tiempo de reacción sea el apropiado y no se produzcan reacciones secundarias en el reactor.

6- Presión del reactor

La presión del reactor depende directamente de la presión del despojador de isobutano, por lo tanto la presión es controlada en el despojador. La presión al reactor en sí, no es una variables del proceso, pero debe ser suficiente para mantener todos los hidrocarburos en estado líquido; cualquier burbuja de vapor hará que el ácido no se asiente adecuadamente en el asentador de ácido.

4. DESARROLLO DE CORRELACIONES

Se presentan a continuación, cada una de las correlaciones estudiadas, su justificación y los resultados logrados siguiendo la metodología propuesta para este fin.

4.1 CORRELACIONES PARA EL ISOBUTANO DE RECICLO.

El isobutano de reciclo es la corriente que entra a los reactores, y está formado por isobutano del fondo de la depropanizadora, isobutano fresco (también llamado de reposición) y una corriente lateral que se extrae del despojador de isobutano, siendo esta última la que proporciona la mayor parte de isobutano, aproximadamente un 80% del flujo volumétrico total. Debido a esto, se asume que la calidad del isobutano de reciclo está determinada principalmente por las condiciones de operación del despojador de isobutano.

Para el isobutano de reciclo fueron desarrolladas las siguientes correlaciones:

- Pureza del isobutano de reciclo.
- Propano en el isobutano de reciclo.
- N-butano en el isobutano de reciclo.

- Pureza del isobutano de reciclo, PIC4 (% Vol.)

Es importante controlar la pureza del isobutano de reciclo, ya que éste es el que reacciona con los propilenos y butilenos que se alimentan a la unidad de Alquilación. Esta variable es influenciada, entre otros, por los siguientes factores:

- A.- Temperatura de tope del Despojador de Isobutano, TT(F).
- B.- Flujo total de condensado de los rehervidores medios del Despojador de Isobutano, FVM (gpm).
- C.- Presión en el plato de extracción de isobutano del Despojador, PDI (psig).

La correlación final obtenida es la siguiente:

$$PiC4 = 0.553116*TT + 5.20656*(FVM/PDI) \quad (1)$$

- Porcentaje de Propano en el Isobutano de Reciclo, PC3 (%Vol.).

El propano presente en la corriente de isobutano de reciclo se debe controlar ya que éste es el mayor contaminante de esta corriente, tal como se expresó anteriormente. Esta variable es influenciada directamente por diversos factores, siendo los más resaltantes los siguientes:

- A.- Temperatura de tope del despojador de isobutano.
 - B.- Presión en el plato de extracción de isobutano del despojador.
 - C.- Flujo de propano que entra a la unidad con la corriente de olefinas, C30L (BPD).
 - D.- Flujo de propano que entra a la unidad con la corriente de isobutano de reposición, C3iC4(BPD)
 - E.- Flujo de propano a almacén, C3ALM (BPD)
- El modelo logrado fue el siguiente:

$$\text{Ln(PC3)} = 0.020302*\text{PDI} - 0.380096*\text{Ln(TT)} + 0.000391*(\text{C3ALM}-\text{Ln(C30L)} - \text{Ln(C3iC4)}) \quad (2)$$

- Normal-butano en el Isobutano de Reciclo, PnC4 (% Vol.).

Otro parámetro importante de controlar en el isobutano de reciclo, es el contenido de n-butano, ya que éste influye en la pureza del mismo. Además, es recomendable predecir esta variable, ya que un aumento en ella puede significar una acumulación de n-butano en la torre, lo que ocasionaría ciertos problemas de descontrol de la misma, con daños de corrosión al equipo por condensación de HF en los platos de tope por baja temperatura, baja calidad de los productos, problemas tales que pueden conducir a una parada de planta. Esta variable es afectada por diversos factores, entre los cuales se tienen:

- A.- Temperatura de tope del despojador de isobutano.
- B.- Presión en el plato de extracción de isobutano del despojador.
- C.- Porcentaje de normal-butano que entra a la unidad con la corriente de olefinas, nC40L(%VOL)
- D.- Porcentaje de normal-butano que entra a la unidad con isobutano de reposición, nC4iC4(5Vol)
- E.- Flujo de normal-butano a almacén, nC4T (BPD).

De acuerdo al trabajo realizado sobre esta correlación, se determinó que el porcentaje de n-butano en el isobutano de reciclo no es sensible a cambios en la variable n-butano en el isobutano de reposición para el rango de variación de ésta. Debido a esto, dicha variable independiente no formó parte del modelo final obtenido, quedando las restantes como contribuyentes a la adecuación del mismo, resultando lo siguiente:

$$\text{Ln(PnC4)} = 7.544696*(1/\text{nC4T}) + 0.02106*\text{nC40L} + 0.914188*\text{Ln(TT)} - 0.021215*\text{PDI} \quad (3)$$

4.2 CORRELACIONES PARA EL NORMAL-BUTANO A ALMACEN.

El n-butano que se extrae del despojador de isobutano, es uno de los productos de la unidad y es utilizado para mezclas de gasolinas. Las correlaciones desarrolladas en base a esta corriente del proceso fueron las siguientes:

- Pérdidas de isobutano en el normal-butano a almacén.
- Fluoruros combinados en el normal-butano a almacén.

4.2.1 PERDIDAS DE ISOBUTANO EN EL NORMAL-BUTANO A ALMACEN, PIB (% Vol.).

Una vez que el n-butano es extraído del despojador de isobutano, éste es condensado, tratado con KOH y enviado a almacén. Por esta razón se considera como pérdida el isobutano que sale con el n-butano ya que el mismo no puede ser retornado con el isobutano de reciclo a la sección de reacción. Debido a esto, es importante controlar la cantidad de isobutano que se pierde en el n-butano a almacén, la cual está influenciada por las variables siguientes:

- A.- Flujo total de condensado de los rehervidores medios del despojador de isobutano.
- B.- Temperatura del plato 31 del despojador de isobutano, TP31 (F)

Mediante el estudio realizado para esta correlación, se pudo determinar que la variable dependiente no es bien explicada por las independientes. Sin embargo, realizando cierto cambio en la variable dependiente, se pudo

lograr la correlación deseada. Dicho cambio consistió en tomar, de la corriente de n-butano, en vez del porcentaje de isobutano, lo que no es isobutano (PNB), es decir:

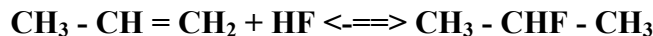
$$\text{PNB (\% Vol.)} = 100 \% - \text{PIB (\% Vol.)} \quad (4)$$

De esta manera se pudo lograr una correlación bien explicada por las variables independientes. El modelo final conseguido es el siguiente:

$$\text{PNB} = 0.554383 * \text{FVM} - 0.001055 * \text{FVM}^2 + 27088.681196 * (1/\text{TP31}) - 4.317075\text{E}6 * (1/\text{TP31}^2) \quad (5)$$

4.2.2 FLUORUROS COMBINADOS EN EL NORMAL-BUTANO A ALMACÉN, FC (ppm).

Una de las reacciones laterales indeseadas que se produce en los reactores, es la que da lugar a la formación de un fluoruro combinado. Dicha reacción consiste en la adición de flúor a una olefina, como por ejemplo el propileno:



Esta reacción puede darse con una olefina C3 o C4. Los fluoruros combinados de C3 ebulen en el mismo intervalo de temperatura del propano, por lo que son descargados junto con la corriente de este compuesto por el fondo del despojador de ácido, para luego entrar en los tratadores de alúmina o defluorinadores, en los cuales se revierte la reacción reversible ya que no es deseable que el propano contenga fluoruros combinados. Por otra parte, los fluoruros formados a partir de olefinas C4 son descargados junto con la corriente de n-butano ya que están en su intervalo de ebullición. Es de gran importancia observar la cantidad de fluoruros combinados presentes en la corriente de n-butano, ya que ello permite detectar fallas en el sistema de reacción por alta producción de fluoruros combinados en los reactores de alquilación.

Las variables que influyen sobre la formación de fluoruros combinados son las siguientes:

- A.- Temperatura de reacción, TRP (F).
- B.- Relación isobutano/olefinas, RIO (BPD/BPD).
- C.- Concentración del ácido, PPHF (% peso).
- D.- Relación ácido/hidrocarburo, HFHC (BPD/BPD).

Para esta correlación no fueron logrados resultados aceptables, aún cuando se intentó correlacionar a la variable dependiente de diversas formas: como ppm de fluoruros combinados en la corriente, como flujo másico, y como flujo másico de fluoruros combinados producidos por MBPD de olefina alimentada.

4.3 CORRELACIONES PARA EL ALQUILATO.

El Alquilato es el principal producto de la Unidad de Alquilación y se obtiene por el fondo del despojador de isobutano en forma líquida, luego es enfriado calentando el fondo y la alimentación del depropanizador, enviado a tratamiento de neutralización con KOH y, por último es almacenado para luego ser exportado. Debido a ello, es muy importante mantener sus especificaciones, por lo cual se desarrollaron las siguientes correlaciones:

- R.V.P. del Alquilato.
- Punto final de ebullición del Alquilato.

4.3.1 R.V.P. DEL ALQUILATO. (psig)

La Presión de Vapor Reid (R.V.P.) es una de las especificaciones más importantes que se debe controlar en el alquilato. Esta es una medida de la presión de vapor de una mezcla a 100 ° F. Al igual que en otras gasolinas, la presión de vapor del alquilato varía con la cantidad de n-butano retenido e indica la tendencia a evaporarse antes

de tiempo en un motor. El R.V.P. es influenciado, entre otras variables, por la temperatura de fondo del despojador de isobutano (TF, F), la cual fue considerada como la variable más influyente en su comportamiento.

Finalmente, la correlación obtenida fue:

$$\text{Ln(RVP)} = 608.969075*(1/TF) \quad (6)$$

4.3.2 PUNTO FINAL DE EBULLICION DEL ALQUILATO, PFE (° F).

El Punto final de ebullición de una muestra es la temperatura a la cual se evapora la última gota de la misma. De acuerdo a esto, mientras la muestra tenga mayor cantidad de compuestos pesados, éstos harán que el punto final sea más elevado. En el caso del alquilato, dichos compuestos pesados son los polímeros formados en los reactores al reaccionar las olefinas entre sí y que salen con el alquilato por el fondo del despojador de isobutano. Es importante predecir y observar el punto final del alquilato, ya que si éste es muy alto, quiere decir que en los reactores están prevaleciendo condiciones polimerizantes y se deben tomar las acciones necesarias para evitarlo. Las variables influyentes sobre la formación de polímeros, es decir, sobre el punto final del alquilato, son las siguientes:

- A.- Temperatura de reacción.
- B.- Relación isobutano/olefinas.
- C.- Concentración del ácido.
- D.- Relación ácido/hidrocarburo.

Para el logro de esta correlación, fue necesario agrupar a las variables independientes temperatura de reacción y relación isobutano/olefina, en una sola en forma de relación logarítmica, es decir: $\text{Ln}(\text{TRT})/\text{Ln}(\text{RI0})$. Con ello se logró la adecuación del modelo a los datos de punto final de ebullición del alquilato.

Por otra parte, no fue posible incluir en el modelo a la relación ácido/hidrocarburo. Ello se debió al carácter constante de esta relación, ya que siempre se procura mantenerla en un valor fijo de 1.8, el cual es considerado el óptimo. La correlación final es la siguiente:

$$\text{PFE} = 50.173611 * (\text{Ln}(\text{TRP})/\text{Ln}(\text{RI0})) + 6.322511 * \text{PPHF} - 0.032397 * \text{PPHF}^2 \quad (7)$$

4.4 PORCENTAJE DE AGUA EN EL ACIDO FLUORHIDRICO CIRCULANTE, PPA (% peso)

A la Unidad de Alquilación entran, inevitablemente, pequeñas cantidades de agua en las corrientes de olefina y de isobutano de reposición. La función principal del regenerador de ácido es eliminar la mayor parte del agua cargada a los reactores, la cual sale por el fondo de este equipo junto con la mayoría del polímero formado. La forma en que sale el agua es como un compuesto de punto de ebullición constante o CBM (azeótropo) formado con el ácido en una mezcla 60% y 40% en peso aproximadamente. De esta forma, por cada libra de agua alimentada a la sección de reacción, se pierde aproximadamente una libra de ácido. Además, el CBM es una mezcla altamente corrosiva, por lo cual un incremento de agua en el sistema aumentará los requerimientos de mantenimiento reduciéndose el tiempo de operación. Por las razones antes expuestas, es altamente recomendable mantener un control del porcentaje de agua en el ácido, logrando evitar así los problemas mencionados.

El contenido de agua en el ácido depende de las siguientes variables:

- A.- Flujo de agua total cargado a la unidad en la corriente olefínica y de isobutano de reposición, FAT (Lbm/h).
- B.- Relación de despojamiento del Regenerador de ácido, RDD (BPD/BPD).

Las gráficas de predicción para la correlación de agua en el ácido no reportaron en ninguna oportunidad una tendencia definida, razón por la cual no pudo ser obtenida una forma satisfactoria para la correlación.

4.5 FLUJO DE GASES DE TOPE DEL DESPOJADOR DE ACIDO FLUORHIDRICO, FGT (Mpie³/h)

Los gases de tope del despojador de ácido están compuestos principalmente por ácido fluorhídrico. En este equipo se desea despojar la mayor cantidad de ácido ya que así se obtiene el propano (que es el producto de fondo) con menos acidez. Entre las variables de las que depende el flujo de gases de tope tenemos:

- A. -Flujo de Condensado del Rehervidor, FC (gpm).
- B. -Flujo de carga al Despojador de Ácido, FCDH(BPD)

La correlación final lograda es la siguiente:

$$FGT = 0.008 * FCHF + 12.653909 * FC \quad (8)$$

4.6 PRESION DE TOPE DEL DEPROPANIZADOR, PTD (psig)

La presión de tope del depropanizador está determinada por la cantidad de propano y ácido fluorhídrico que allí se encuentran. Se debe controlar, ya que si la presión aumenta por encima de la de diseño se debe ventear el acumulador, perdiéndose propano y ácido. Entre las variables que influyen en la presión de tope se tiene:

- A.- Flujo de nafta de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC), FNAF (MBPD).
- B.- Temperatura del plato 30 de la torre, T30 (F).
- C.- Reflujo a la torre, REF (MBPD). El modelo obtenido es el siguiente:

$$PTD = 0.430635 * TP30 + 26.625251 * EXP(FNAF^{.3}) - 13.276591 * FNAF + 19.516983 * REF - 0.435806 * REF^2 \quad (9)$$

5. VALIDACION DE LAS CORRELACIONES

En esta parte, se muestran resultados obtenidos para la validación de los distintos modelos. Dicha validación consiste en el cálculo de las variables predichas por las correlaciones utilizando datos para las variables independientes de fechas posteriores a las usadas paró la obtención de las mismas. Ello permite comparar el valor predicho por la correlación (subíndice p) con el valor observado de la variable dependiente (subíndice o) determinando así el error porcentual cometido. Además, con esta validación se determina, finalmente, si la correlación es aceptable operacionalmente para darle la aplicación que se desea.

A continuación se presentan las tablas de validación para cada correlación.

5.1 CORRELACIONES PARA EL ISOBUTANO DE RECICLO

5.1.1 PUREZA DEL ISOBUTANO DE RECICLO

En la Tabla 1 se muestra la validación de la correlación, observándose que los errores porcentuales obtenidos son bastantes bajos, siendo el mayor de ellos 4.01% por lo que se puede concluir que el modelo sí es aceptable operacionalmente.

5.1.2 PORCENTAJE DE PROPANO EN EL ISOBUTANO DE RECICLO

La validación de éste modelo se presenta en la Tabla 2, observándose que los errores que se cometen al utilizar el modelo son bajos ya que el mayor, error porcentual es 13.14 %, el cual es menor que el error porcentual medio del modelo.

Tabla 1. Validación para la Correlación Pureza del Isobutano de Reciclo

TT	PDI	FVM	PC4 _o	PC4 _o	ERROR %
131.8	146.7	265.0	82.31	82.00	0.38
133.0	145.9	266.2	83.06	85.23	2.55
133.3	148.6	252.9	82.65	80.40	2.80
134.6	148.3	258.1	83.51	87.00	4.01
133.2	146.9	257.9	82.82	86.11	3.82
132.6	145.9	258.2	82.56	84.52	2.32
133.5	148.5	251.9	82.67	85.83	3.68
133.1	147.6	261.0	82.83	84.45	1.92
133.1	148.2	261.3	82.91	84.48	1.86

FUENTE: ELABORACION PROPIA

Tabla 2. Validación para la Correlación Porcentaje de Propano en el Isobutano de Reciclo

TT	PDI	C3ALM	C3OL	C3C4	PC3 _o	PC3 _o	ERROR %
131.8	145.2	2401	2197	125.9	7.59	7.40	2.57
133.1	147.6	2465	2081	130.4	8.14	8.40	3.10
131.8	146.7	2823	2085	237.6	9.22	9.93	7.15
133.2	146.9	2414	1903	123.2	7.87	8.58	8.28
132.6	145.9	2429	1976	126.9	7.77	7.63	1.83
134.6	148.3	2536	2232	117.3	8.46	7.62	11.02
133.4	148.6	2569	3250	120.2	8.65	9.52	9.14
133.5	148.5	2445	2130	126.9	8.22	7.30	13.14
133.0	146.3	2460	1912	125.6	7.92	7.10	11.55

FUENTE: ELABORACION PROPIA

5.1.3 PORCENTAJE DE n-BUTANO EN EL ISOBUTANO DE RECICLO.

La validación de la correlación se expone en la Tabla 3, con lo que se establece la aceptación operacional de la correlación, ya que los errores porcentuales que se cometen al utilizar ésta son bajos, siendo el mayor 10.27 %, que está por el orden del error porcentual medio de la correlación.

Tabla 3 Validación para la Correlación Porcentaje de n-Butano en el Isobutano de Reciclo

TI	PDI	nC4I	nC4OI	PnC4	PnC4 _o	ERROR %
131.8	146.7	1290	7.43	4.54	4.89	7.20
133.0	145.9	1459	7.90	4.70	4.81	2.34
133.4	148.6	967	6.48	4.33	4.25	1.84
132.6	145.9	862	6.64	4.58	4.30	6.47
132.7	146.6	1007	6.04	4.45	4.46	0.19
133.5	148.5	849	7.08	4.40	4.59	4.13
133.0	146.3	1022	6.22	4.51	4.80	6.13
131.8	145.2	1588	6.83	4.62	4.39	5.26
133.3	148.2	1470	7.49	4.44	4.03	10.27

FUENTE: ELABORACION PROPIA

5.2 CORRELACIONES PARA EL NORMAL-BUTANO A ALMACEN

5.2.1.- PERDIDAS DE ISOBUTANO EN EL n-BUTANO A ALMACEN

Con la Tabla 4 se comprueba que definitivamente el modelo para PNB es aceptable operacionalmente, ya que el mayor error es 1.59 %. Sin embargo, es necesario aclarar que para estimaciones de las pérdidas de isobutano (PIB) a partir de PNB el error cometido suele ser mayor, por lo cual este modelo debe ser usado sólo para estimaciones aproximadas de las pérdidas de isobutano en el n-butano a almacén.

5.3 CORRELACIONES PARA EL ALQUILATO

5.3.1 RVP DEL ALQUILATO

La validación operacional de la correlación se muestra en la Tabla 5, donde el error porcentual mayor que se comete al utilizar la correlación es 4.26 %, el cual es tolerable.

5.3.2 PUNTO FINAL DE EBULLICION DEL ALQUILATO.

En la Tabla 6 se presenta la validación, donde se termina de apoyar la aceptación operacional del modelo ya que todos los errores del valor predicho por el modelo respecto al real, muestran valores entre 0% y 2.05%, los cuales son sumamente bajos.

Tabla 4 Validación para la Correlación Pérdidas de Isobutano en el n-Butano a Almacén

TP _i	PVM _i	PNB _i	PBB _i	ERROR %
189.9	257.9	97.74	97.50	0.25
190.4	258.2	96.00	96.44	0.46
187.5	251.9	94.38	95.86	1.54
190.8	249.8	96.04	97.14	1.13
190.5	253.2	95.67	97.39	1.46
190.6	261.0	96.11	95.87	0.26
189.3	261.3	95.45	96.39	0.97
191.0	261.2	96.31	96.56	0.25
190.7	255.1	94.67	96.20	1.59

FUENTE: ELABORACION PROPIA

Tabla 5 Validación para la Correlación RVP del Alquilero

TP	PVP _i	RVP _i	ERROR %
391.2	4.7	4.9	4.26
383.0	4.9	5.0	2.04
387.7	4.8	5.0	4.17
389.0	4.8	5.0	4.17
387.0	4.8	4.9	2.08
385.5	4.8	4.9	2.08
388.2	4.9	5.0	2.04
397.0	4.6	4.6	0.00
390.4	4.8	5.0	4.00

FUENTE: ELABORACION PROPIA

Tabla 6 Validación para la Correlación Punto Final del Alquilero

RIG	TRP	PPHE	PHE _i	PFE _i	ERROR %
16.68	90.00	89.00	386	386	0.00
17.49	90.05	89.00	385	378	1.82
13.62	89.08	91.10	393	392	0.25
15.50	89.53	89.50	389	384	1.29
15.90	90.35	89.20	388	388	0.00
14.24	89.95	89.65	391	399	2.05
16.45	89.10	91.80	388	390	0.52
16.05	89.40	91.40	388	395	1.80
15.53	88.65	91.00	389	391	0.51

FUENTE: ELABORACION PROPIA

5.4 FLUJO DE GASES DE TOPE DEL DESPOJADOR DE ACIDO FLUORHIDRICO

La validación del modelo se muestra en la Tabla 7, en la que se observa que los errores cometidos al usar el modelo no son muy significativos, siendo el mayor de 9.46%.

Tabla 7 Validación para la Correlación Flujo de Gases de Tope del despojador de Acido

FCHF	FC	FCT ₁	FCT ₀	ERROR %
3496	3.973	78.2	85.0	8.00
4500	3.894	85.3	94.0	9.26
3501	4.117	80.1	81.2	1.35
3803	4.075	82.0	75.4	8.75
2801	3.340	64.7	70.0	7.57
4016	4.226	85.6	78.2	9.46
4359	4.938	97.4	91.8	6.10
4006	4.664	91.1	84.9	7.30
3985	4.534	89.3	84.3	5.93

FUENTE: ELABORACION PROPIA

5.5. PRESION DE TOPE DEL DEPROPANIZADOR

La validación operacional se muestra en la Tabla 8, la cual contiene errores porcentuales muy bajos, ya que el mayor es 0.31%, el cual es prácticamente insignificante.

Tabla 8. Validación para la Correlación Presión de Tope del Depropanizador

Fnaf	T30	Ref	PTD ₁	PTD ₀	ERROR %
57.01	151.9	24.35	294.5	294.8	0.10
55.83	152.1	24.48	293.9	294.8	0.31
52.21	151.8	23.57	295.0	295.6	0.20
52.99	152.9	23.72	295.1	294.7	0.14
53.98	152.9	23.94	294.9	294.4	0.17
55.02	152.7	24.19	294.6	294.4	0.06
54.99	152.9	23.99	295.0	295.8	0.27
56.75	151.8	22.89	296.0	295.8	0.07
55.02	151.6	23.02	295.4	294.5	0.31

FUENTE: ELABORACION PROPIA

6. CONCLUSIONES

Dados los objetivos, y en función a los alcances logrados en el presente estudio, a continuación se presentan las conclusiones más resaltantes.

Se concluye:

- 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.
- La composición de la corriente de isobutano de reciclaje depende de la operación del despojador de isobutano, siendo la temperatura de tope y la presión en el plato de extracción de isobutano las variables más importantes en las correlaciones para esta corriente.
- Las pérdidas de isobutano en el n-butano a almacén dependen de la operación del despojador de isobutano, específicamente de la temperatura del plato 31 y del flujo de condensado de los rehervidores medios.
- El RVP del alquilato es sensible a variaciones de la temperatura de fondo del despojador de isobutano.
- El punto final de ebullición del alquilato depende de las condiciones de operación y alimentación de la sección de reacción, es decir, temperatura de reacción, relación isobutano/olefinas y concentración del ácido fluorhídrico. Valores de la relación ácido/hidrocarburo entre 1.26 y 2.07 tienen una influencia relativamente despreciable.
- La alimentación al despojador de ácido y el flujo de condensado del rehervidor, son las variables de las que depende principalmente el flujo de gases de tope de este equipo.
- Las variables que ejercen mayor influencia en la presión de tope del depropanizador, son el flujo de naftas de FCC, la temperatura del plato 30 y el reflujo de la torre.
- Bajo las condiciones en que se realizó este estudio, no fue posible obtener correlaciones estadísticas para los fluoruros combinados en el n-butano a almacén ni para el porcentaje de agua en el ácido fluorhídrico circulante.

BIBLIOGRAFÍA

- CORPOVEN, S.A.: "Manual de Operación. Planta de Alquilación", El Palito, 1986.
- DRAPER, NORMAN y Harry Smith: "Applied Regression Analysis", John Wiley & Sons, Inc., U.S.A, 1966.
- FOSTER WHEELER ENERGY CORPORATION: "HF Alkylation. Unit Operating Manual", New Jersey, 1979.
- GILBERT, NORMA: "Estadística", Nueva Editorial Internacional, S.A. de C.V, México, 1981.
- HIMMELBLAU, DAVID M: "Balance de Masa y Energía", 4ta Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1988.
- MENDENHALL, WILLIAM; Richard L. Scheaffer y Dennis D. Wackerly: "Estadística Matemática con Aplicaciones", Grupo Editorial Iberoamericana; S.A. de C.V., México, 1986.
- MILLER, ROBERT E : "Statistics for Chemical Engineers", Chemical Engineering, CE Tutorial, todos los artículos. (July 1984/September 1986).
- MONTGOMERY, DOUGLAS C.: "Design and Analysis of Experiments" , 2nd Edition, Georgia, 1986
- PERRY, JOHN H y Cecil Chilton: "Manual del Ingeniero Químico", 4ta Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1986.
- STATISTICAL GRAPHIC CORPORATION: "Statgraphics User's Guide", U.S.A, 1987.
- UNIVERSAL OIL PRODUCTS: "HF Alkylation Symposium", Chicago, 1990.
- UNIVERSAL OIL PRODUCTS: "Process Operation. HF Alkylation Training Manual", Chicago, 1991.
- UNIVERSAL OIL PRODUCTS: "Process Technology. HF Alquilation Training", Chicago, 1990.