

OPTIMIZACION ENERGETICA DE UNA UNIDAD DE FRACCIONAMIENTO DE HIDROCARBUROS MEDIANTE LA APLICACION DE METODOS ESTADISTICOS

Quaderns
d'enginyeria

1(1979) 3 p.233-245

por: Juan Trigo Lizarriturri*

RESUMEN

Debido a las consecuencias de la crisis de materias primas de 1973 se llevaron a cabo una serie de experimentos en una planta de fraccionamiento de Gas Natural Licuado de la antigua compañía Gas Natural, S. A. con objeto de optimizar los procesos, empleando métodos estadístico-experimentales. El estudio se dirigió hacia la búsqueda de soluciones que minimizaran los costes operativos con presupuestos reducidos en lo posible. De suerte que quedaban descartadas en principio las medidas que exigieran una inversión importante en equipo y medios de experimentación, prefiriéndose aquellos métodos que aseguraran una continuidad de los objetivos planteados, toda vez que no se trataba de solventar un problema aislado, sino de mejorar sensiblemente una situación.

El trabajo, presentado aquí en esquema, consta de los siguientes apartados: a) planteamiento del problema, que comprende las facetas de introducción y organización del equipo humano y de la marcha de la investigación; b) selección de las variables características y de terminación de las funciones que las relacionan; c) desarrollo de las pruebas experimentales; d) descripción y aplicación del programa Simplex-EVOP y, finalmente, se incluyen una serie de conclusiones donde se valoran los logros obtenidos a la luz de los dos objetivos previstos en el planteo inicial:

- demostrar cuantitativamente que se podía llegar a una situación mejor energéticamente dentro de una progresión hacia niveles de consumo intuitivamente más bajos,
- ofrecer la información que se precise de la unidad en la que se está operando para comprender mejor su funcionamiento, prever de modo eficaz los fallos posibles y programar mejor las revisiones anuales.

SUMMARY

Due to the consequences of the raw material crisis in 1973, several experiments were carried out in a liquefied natural gas craking plant of the former Compañía Gas Natural, S. A. in order to optimise the processes by using statistical and experimental methods.

The study aimed to search minimising solution for operating costs with an as far as possible reduced budget. The endeavour was not to solve a particular problem but to improve a situation sensibly. So, at the beginning, steps demanding an important investment inequipment and experimental means were put aside and methods assuring a continuity of the planned objectives were opted for.

The work presented is outlined as follows

- a. Problem layout which includes introduction and organizing aspects concerning research team and work progress.
- b. Characteristic variables selection and set up of their relating functions.
- c. Development of experimental tests.

Finally, considering the two objectives foreseen in the initial plan and described below, several conclusions estimating the results achieved are included in the work. The initial objectives aiming

(i) to prove quantitavely that a better energetic situation could be reached within a progression towards intuitively lower consumption levels.

(ii) to give the necessary information about the operating unit in order to conceive better its working, to foresee possibles faults in an effective way and program better the annual revisions.

* Doctor Ingeniero Industrial.

INTRODUCCION.

La Unidad industrial objeto de este estudio, constituía la sección de fraccionamiento de la Planta Terminal de Metaneros de Barcelona, que recibía como materia prima la mezcla licuada a -160°C de los ocho primeros alcanos de la serie parafínica, llamada Gas Natural Licuado. Esta mezcla era suministrada a un tren de fraccionamiento compuesto por cuatro torres de destilación de platos a válvulas, cuyos componentes clave ligeros de la destilación eran respectivamente Metano, Etano, Propano y n-Butano. Los destilados de Metano y Etano eran alimentados a la red de distribución para usos industriales y domésticos, mientras que los destilados de propano y de la mezcla de normal e iso-Butano eran enfriados por debajo de su punto de rocío y almacenados en tanques a presión atmosférica para ser bombeados hacia la Planta Envasadora de Butano, S. A. de Barcelona.

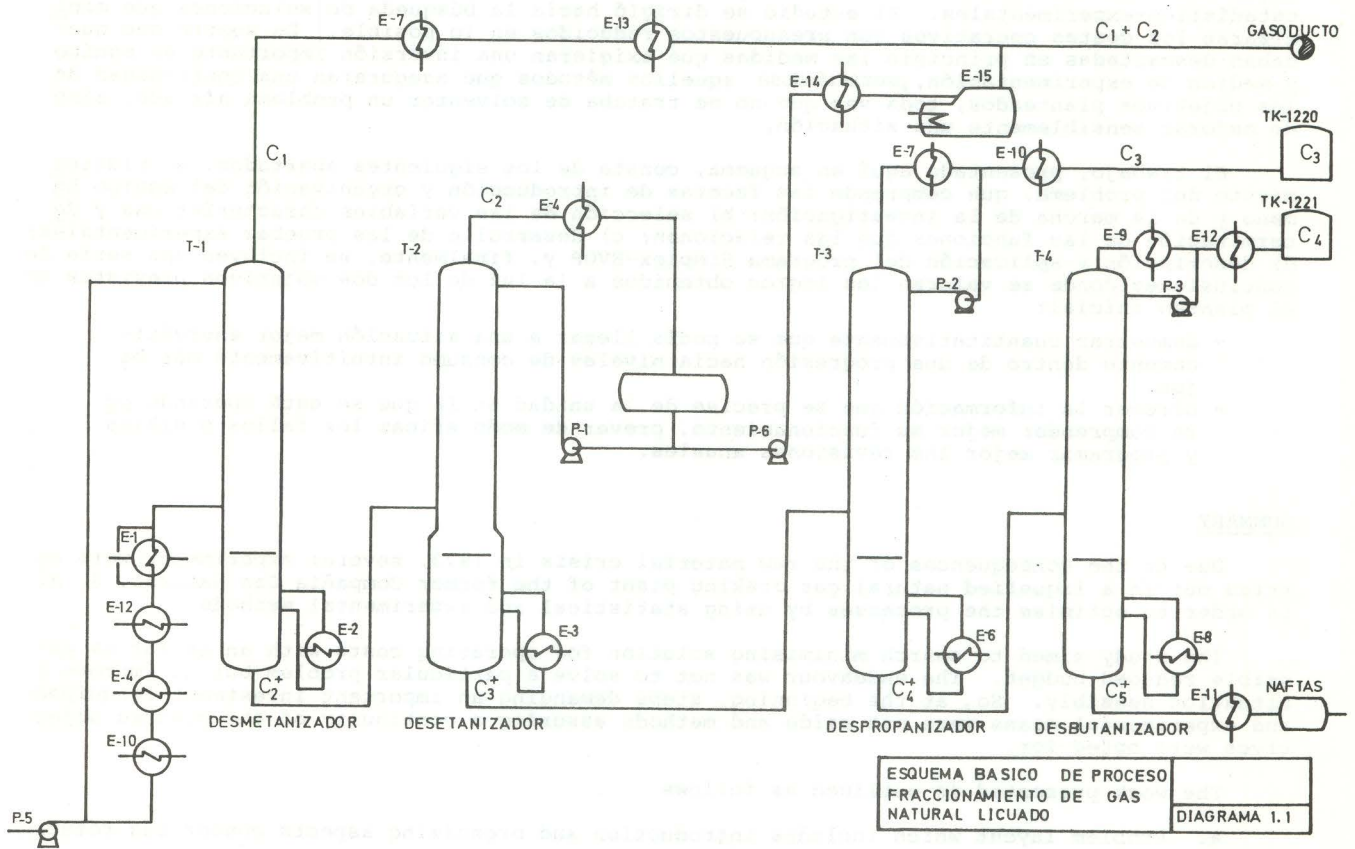


FIG. 1. ESQUEMA BASICO DE PROCESO DE FRACCIONAMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO.

El aporte de calor a los fondos de las torres de destilación así como a diversos intercambios térmicos, que mas adelante detallaré, se realizaba mediante la inyección de vapor de agua a baja presión procedente del acondicionamiento del vapor sobrecalentado a media presión que suministraban los generadores acotubulares convencionales, y para cuya combustión se utilizaba el mismo gas producido por la Unidad.

Como una de las acciones a tomar frente al empeoramiento de la crisis de materias primas, se planteaba el estudio profundo de la Unidad para poder aplicar sobre su funcionamiento aquellos métodos o medidas de tipo funcional que redujeran sus costos operativos representados en su 90 % por el consumo de fluido calefactor, o sea de gas propio empleado en el aporte energético a la misma. Una de las limitaciones de este estudio era la inmanente a su propio origen,

es decir la economía del proceso productivo de la Planta. Por ellos se dirigió el estudio hacia la búsqueda de soluciones que minimizaran esos costes operativos, y cuyos presupuestos fueran al propio tiempo lo mas reducidos posible. De esta suerte quedaban descartadas en principio aquellas medidas que supusieran una fuerte inversión en equipo o en medios de experimentación, señalándose una preferencia por aquellos métodos que aseguraran una continuidad de los objetivos planteados, toda vez que no se trataba de solventar un problema aislado, sino de mejorar sensiblemente una situación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Es convenido que la optimación de procesos puede adoptar una variada gama de planteamientos segun el propósito y objeto a los cuales van dirigidos.

Su exponente más elaborado lo constituyen los programas para ordenador basados en la simulación numérica de procesos, asistida por subrutinas tan conocidas como la integración de Runge-Kutta, el Predictor-Corrector, etc, y cuyo planteo general para el caso que nos ocupa queda detallado en las secciones 2.5 y 2.6 de la tesis, cuyo resumen constituye este trabajo, a título meramente ilustrativo de las posibilidades que pueden ofrecer, por ejemplo, programas como en PACER (desarrollado por la Purdue University, pero cuya puesta en ejecución no responde al objetivo primordial de nuestro trabajo) es decir: EL COSTE DE LA EXPERIMENTACION. A este respecto, todo el proyecto de investigación experimental, antes enunciado, responde a la idea de elaborar el máximo número de datos experimentales que la unidad puede ofrecer para que, sin modificar absolutamente nada del proceso o efectuar inversiones de equipo, ajustar permanente y asintoticamente las variables operativas de la Unidad alrededor de un optimo prefijado y deseable al mínimo coste posible de esta experimentación.

Este planteamiento nos llevó a considerar el campo de los métodos de optimación experimental ajenos a la informática.

Investigamos en una primera etapa de los trabajos las posibilidades que podían ofrecer los diversos métodos disponibles en la bibliografía, comenzando por los antiguos planteamientos de Box-Wilson, y continuando por las modernas versiones del Evolutionary Operation, ensayando el método factorial e incluso el Simplex primitivo. Todo lo cual nos llevó a programar definitivamente la aplicación de la estrategia del Simplex-EVOP a nuestro problema, por tratarse de un método que puede trabajar con un número ilimitado de variables, contrariamente a lo que ocurre con el método original de Box-Wilson y de la estrategia EVOP, y presenta períodos de experimentación mucho mas reducidos que el algoritmo factorial. (Recuérdese que en este caso el número de experimentos es de 2^n , lo que teniendo en cuenta, como se verá, que se necesitan 8 variables en juego como mínimo, arroja un total de 256 experimentos frente a 40 que nos fueron suficientes).

Se trata pues de un método experimental, de aplicación totalmente generalizada, extremadamente rápido y capaz de trabajar con un número elevado de variables, cumpliendo, además la premisa inicial de un reducido coste de experimentación, por requerir, únicamente un mínimo de horas/hombre de personal de cualificación media, una vez establecidas las directrices por el correspondiente Supervisor de producción y obtenida cierta y elemental ayuda por parte de Ingeniero de Proceso.

Hemos de resaltar aqui, antes de seguir adelante, que, aunque naturalmente puede tener este objetivo, no se trataba nuestro proyecto de hacer salir a la unidad de una situación de derroche energético o de mal funcionamiento, y en la que se estuvieran obteniendo los productos acabados fuera de especificaciones o sujetos a grandes anomalías; sino simplemente de, dada la situación de funcionamiento normal, según lo prescrito en las especificaciones de operación y mejorado con la experiencia de varios años de funcionamiento industrial satisfactorio, obtener el máximo de información de las variables operatorias con las que trabajaban los distintos elementos de la Unidad para cumplir dos objetivos básicos: Situar primeramente estas variables

en un óptimo real y mantenerlas lo mas fielmente posible a pesar de las periódicas variaciones horarias de carga que debe sufrir la Unidad para atender la modulación propia de la demanda diaria de gas. Y en segundo lugar proporcionar de forma continua la suficiente información a los responsables directos de la operación para facilitar la capacidad de interpretación de anomalías o previsión de defectos y, a las secciones indirectamente involucradas, como la de ingeniería y diseño, los suficientes cuadros de valores con que establecer los balances másico y energético o proceder a una más sutil previsión de inversiones.

ORGANIZACION DEL EQUIPO HUMANO.

Antes de exponer y explicar la presente aplicación del método, creo interesante comentar la organización del equipo humano necesario para una eficiente consecución de los objetivos enunciados.

En primer lugar han de determinarse las funciones del equipo de producción, o personal operador, que es el encargado de mantener el funcionamiento de la Unidad a la carga y especificaciones necesarias de cada momento, y el cual será el que haga equilibrar las variables operatorias a cada uno de los valores deseados según el programa de experimentación, y transmita además la información que vaya obteniendo.

Existirá así mismo un reducido grupo de personas de cualificación meramente administrativa que recoja los datos enviados por la Sala de Mandos y elabore con ellos la continuación día a día del programa, devolviendo los nuevos valores de las variables a las que tiene que marchar la unidad para acercarse al óptimo deseado.

Por encima de estos dos grupos de personas ha de existir el elemento coordinador: que puede ser perfectamente el mismo Supervisor o Jefe de Producción, quien interprete en cada momento el desarrollo de las variaciones habidas y manipule la matemática de los programas y comente de ello con el Ingeniero de Procesos que es la persona encargada de estos cometidos en toda planta industrial.

FASES DE TRABAJO REALIZADO.

A continuación damos una idea de las fases en que se ha dividido este trabajo:

Primera fase:

- a) Recálculos termodinámicos de todos los elementos de la Unidad, cuyos resultados son muy necesarios aunque no imprescindibles, para acotar los órdenes de magnitud teóricos con que deberían moverse cada una de las variables con las que se va a trabajar.
- b) Elaboración de balances másicos y energéticos y cálculo de etapas teóricas y eficiencia de fraccionamiento.
- c) Simultanear la presentación del proyecto con las necesarias sesiones de formación y planificación del personal que va a estar directamente vinculado a él, haciendo especial énfasis en una previsión estimativa del ahorro energético que puede conseguirse y de la obtención de la máxima cantidad de información a aquellos que están manejando la unidad.

La discusión extensa del concepto contenido en "c" motiva buena predisposición por parte del personal a colaborar activamente en el desarrollo del proyecto.

Segunda fase:

Simultanear la investigación y análisis de los distintos métodos, su viabilidad y el aporte de resultados previsibles para nuestro caso, con un programa de tanteos y toma de datos para la verificación de aquellos recálculos termodinámicos realizados en la fase anterior.

En la realización de esta segunda fase se encontraron las primeras explicaciones de algunos defectos que presentaba la unidad y se procedió a una primera fase de análisis de mejoras.

Se instalaron así mismo más indicadores como resultado del estudio de elección de las variables de trabajo y la idónea ubicación de los puntos de toma de datos, sin que ello representara más gasto que el previsto dentro de los planes de mantenimiento preventivo.

Se detectaron también en esta etapa los órdenes de magnitud de los errores de medición de los distintos aparatos y se estimaron los correspondientes factores de corrección para la aplicación de los valores experimentales en las evaluaciones de rendimiento del programa.

En realidad esta segunda fase constituye la preparación de la Unidad para el desarrollo del proyecto.

ELECCION DE LAS VARIABLES.

Vamos a describir a continuación el esquema de proceso para luego esbozar el razonamiento de la elección de las variables.

Una vez conocidos los órdenes de magnitud de las variables de trabajo elegidas y las influencias relativas entre cada una de ellas, y preparado el equipo humano, se puso en marcha el programa Simplex-EVOP.

En cuanto a las variables operatorias con que el programa debía trabajar, a pesar de poder hacerlo con un número ilimitado de ellas, se plantea reducir su número con el objeto de operar con periodos de experimentación más cortos y llegar más rápidamente al óptimo. Todo esto supuso el establecimiento de hipótesis de partida.

Como información diremos que en los límites de la unidad se tienen las siguientes variables y su posible variación:

ALIMENTACION	Composición conocida. (Tabla 1.3) Temperatura -160 ± 2 °C Caudal 25 a 124 Tm/h
PRODUCTOS	Composiciones prefijadas (Tabla 1.2) Temperaturas T_{fi} $T_{f1} = T_{f2} = 30$ °C $T_{f3} = -60$ °C $T_{f4} = -40$ °C

Por otra parte, y en cuanto a los elementos de la unidad, toda columna de destilación puede definirse mediante 7 variables independientes con el número de componentes de la mezcla a fraccionar. En este caso hemos escogido como independientes:

1. CAUDAL DE ALIMENTACION: F_i , (i=1, 4)
2. TEMPERATURA DE ALIMENTACION: T_i , (i=1, 4)
3. COMPOSICION ALIMENTACION: C_{ri} , (r=1, 8) (i=1, 4)
4. PRESION DE TRABAJO DE LA TORRE: P_i , (i=1, 4)
5. TEMPERATURA ZONA DE AGOTAMIENTO: T'_i , (i=1, 4)
6. RELACION DE REFLUJO: R_i , (i=1, 4)
7. NUMERO DE ETAPAS REALES DE CADA TORRE: (invariable)

y como dependientes:

8. CALOR INTERCAMBIADO EN EL CALDERIN: Q_i , (i=1, 4)

9. COMPOSICIONES DE LOS DESTILADOS: C_{di} , (i=1, 4)
 10. CALOR INTERCAMBIADO EN EL CONDENSADOR. Q_i , (i=1, 4)

Tabla 1.2

Especificaciones de composición de los gases combustibles y horquilla de variación en la alimentación de Gas Natural Licuado. (Productos)

		Limites Máximo	Minimo
Fracción Metano	N2	1.00	0.10
	C1	98.80	95.33
	C2	3.40	1.05
	C3	0,30	0.05
	C4+	trazas	
Fracción Etano	C1	1.50	1.30
	C2	99.50	98.50
	C3	0.05	0.15
	C4+	trazas	
Fracción Propano	C2	2.00	1.00
	C3	96.00	80.00
	C4	17.00	3.00
	C5	trazas	1.00
Fracción Butano	C2	1.00	1.00
	C3	20.00	10.00
	C4	85.00	75.00
	C5	1.00	1.00

Tabla 1.3

Composición de la mezcla de Gas Natural Licuado procedente de Libia. (Alimentación)

N2	0,70	0.07
C1	78.00	60.09
C2	19.00	9.86
C3	13.00	5.00
iC4	2.30	1.30
nC4	3.90	1.90
iC5	0.35	0.15
nC5	0.20	0.06

RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES.

Para relacionar estas variables pueden escribirse las siguientes expresiones empíricas:

- a). Explicitando la composición de los destilados, y tomando el número de etapas reales constante:

$$C_{di} = f (F_i, T_i, C_{fi}, P_i, T'_i, R_i)$$

- b). Y análogamente el calor intercambiado en el calderín:

$$Q_i = f_1 (T_i, F_i, C_{di}, P_i, T'_i, R_i)$$

c). Expresando además el calor de intercambio en el condensador como función de las anteriores:

$$Q_1' = f_2 (Q_i, C_{di})$$

Con lo que a continuación pueden comenzarse a fijar las hipótesis, que para nuestro caso fueron en cuanto a límites de unidad:

1. CAUDAL DE ALIMENTACION CONSTANTE: $F_o = \text{cte.}$
2. TEMPERATURA DE ALIMENTACION CONSTANTE: $T_o = \text{cte.}$
3. COMPOSICION DE LA ALIMENTACION CONSTANTE: $C_{do} = \text{cte.}$

En otras palabras, deben realizarse series de experimentos para unas mismas condiciones de carga a la Unidad, con el objeto de trabajar con las variables propias de cada columna de destilación, o sea el elemento específico de la Unidad.

Entonces para cada torre de destilación se procedió al siguiente análisis; comenzando por la primer torre:

- a). Siendo F_1, C_{fi}, T_i constantes, la composición del destilado y los calores de intercambio en el calderín y en el condensador pueden expresarse como:

$$C_{d1} = f (P_1, T_1', R_1)$$

$$Q_1 = f_1 (P_1, T_1', R_1)$$

En este momento pueden utilizarse las relaciones cuantitativas entre las variables que se encontraron durante la fase de recálculo termodinámico de la Unidad, para obtener una importante reducción en el número de variables en juego suponiendo que, en primera aproximación, van a cumplirse con un error menor del 1% los valores de cálculo de las temperaturas de las zonas de agotamiento para cada composición molar de cabeza de torre habiéndose fijado la presión de trabajo. Es decir, que, para cada rendimiento en la separación existe un solo perfil de temperaturas de la torre que cumple con la composición molar de la mezcla alimentada, la presión de trabajo, y, por supuesto, el balance térmico de la torre cerrado con el calor aportado en el calderín y el cedido en el condensador.

En este orden de supuestos, podemos considerar T_1' como parámetro conocido para cada experimento y que, recíprocamente se dará un experimento como válido cuando T_1' tome el valor prefijado con un error no superior al 1%.

Finalmente, como la alimentación a la primera torre se descompone en dos, una que entra en la torre en el plato de la alimentación propiamente dicha, y la segunda que entra como reflujo, es necesario establecer como variable, no el reflujo únicamente sino una relación entre el reflujo y la alimentación propiamente dicha.

De esta forma tenemos finalmente como variables independientes mínimas a considerar:

$$C_{d1} = f (P_1, R_1/F_1)$$

$$Q_1 = f_1 (P_1, R_1/F_1)$$

Ahora bien, en lo que respecta a las otras tres torres, la situación es ligeramente distinta por cuanto a que el reflujo es efectivamente el condensado de los destilados reintroducido en la cabeza de la torre, pero como necesitamos un grupo de variables coherente y homogéneo vamos a tomar también en estos casos la relación de REFLUJOS/ALIMENTACIONES a cada torre como segunda variable. Esto presenta, además de la evidente ventaja operativa dado el número de personas involucradas en el proyecto, una obvia relación con el elemento, la torre anterior, toda vez que el residuo de una torre es la alimentación de la siguiente. De esta

forma estamos relacionando flujos internos al sistema en vez de hacerlo con las verdaderas relaciones de reflujo que toman en cuenta la cantidad de destilado que, en este caso, constituyen flujos másicos que salen íntegros por los límites de la unidad.

Con lo que, finalmente, las variables independientes con las que se trabajó en el programa Simplex respondieron a las siguientes relaciones empíricas y explícitas respecto a las variables dependientes que se necesitaba para fijar la optimización:

El caudal total de energía inyectado,

Y las composiciones molares de los destilados, o sea las especificaciones de calidad de los productos:

$$C_{di} = f(P_i, R_i/F_i)$$

$$P_i = f_i(P_i, R_i/F_i)$$

Para $i = 1$ a 4

DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

De aquí se deduce que la experimentación ha de basarse en las siguientes premisas:

1. Todos los experimentos se realizan a la misma carga.
2. Un experimento será válido para su tratamiento matemático si, prefijados unos valores por calculo y especificación:
 - a). Las temperaturas de las zonas de agotamiento y alimentación se estabilizan dentro de los valores deseados.
 - b). Las composiciones de los destilados se estabilizan dentro de los límites establecidos.
3. Variación programada de las variables según el diseño Simplex, de:
 - a). Presión de trabajo.
 - b). Relación Reflujo/Alimentación.
4. Realización de los experimentos durante un período de disponibilidad de crudo de Gas Natural de composición constante.

Esta hipótesis implica un conocimiento previo y programático de las especificaciones de materia prima a procesar por la unidad con antelación a un cierto número de experimentos, ó la introducción de los consiguientes factores de corrección en los consumos de fluido calefactor por variación en aquellas especificaciones. Factores que se calcularon durante la etapa de recálculo de la unidad.

Con lo que las variables independientes o factores fueron 8: las cuatro presiones de las cuatro torres de destilación, y las cuatro relaciones Reflujo/Alimentación. Y como variables independientes, 9: Cuatro composiciones molares de los cuatro destilados expresados en el componente clave ligero de cada torre, y cinco consumos de fluido calefactor, los cuatro calderines y el calentador de la fracción Metano. No puede emplearse a este objetivo el calentador de la fracción de Etano debido a una anomalía de tipo funcional que hacía desestimable todo intento de optimización.

Una vez establecidos los factores y las respuestas, se puso en marcha el programa Simplex.

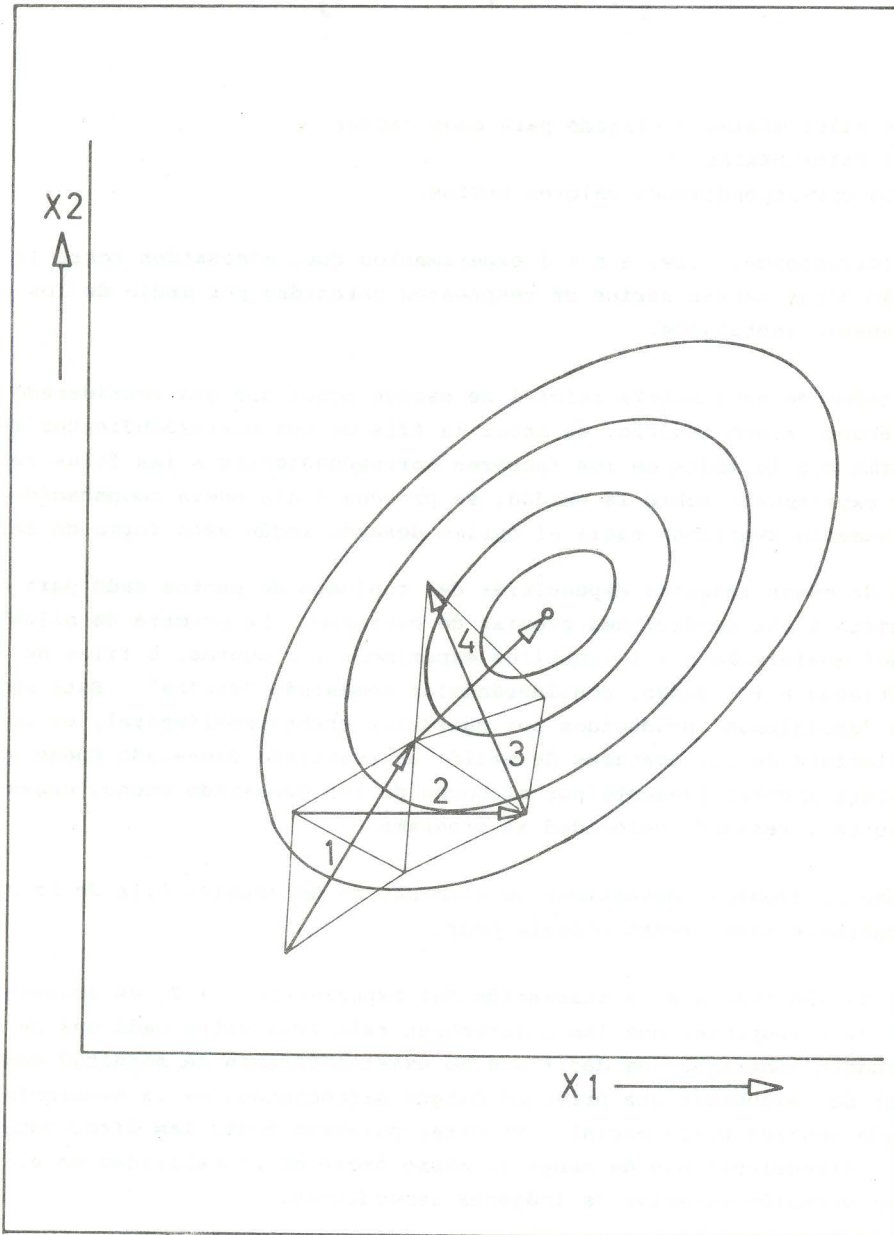


FIG. 2. DECISIONES EN SISTEMA SIMPLEX-EVOP CURVAS DE NIVEL DE OPTIMIZACION EN UN ESPACIO DE DOS - DIMENSIONES (2 VARIABLES O FACTORES A OPTIMIZAR).

- 1,2,3: experimentos realizados.
- 4: imagen especular del experimento descartado.

Como ustedes saben, la estrategia Simplex-EVOP inicia sus movimientos formando una matriz de $n + 1$ filas por n columnas, siendo n el número de variables independientes o factores, de la forma

$$\begin{bmatrix} m & m & m & m & . & . & . & m \\ M & m & m & m & . & . & . & m \\ A_1 & M & m & m & . & . & . & m \\ A_1 & A_2 & M & m & . & . & . & m \\ A_1 & A_2 & A_3 & M & . & . & . & m \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & . & . & . & M \end{bmatrix}$$

siendo

- m un valor mínimo prefijado para cada factor
- M el valor máximo, y
- A₁ sus correspondientes valores medios.

Esta matriz corresponde, pues, a n + 1 experimentos que, ejecutados sobre la unidad a optimizar arrojarán otras tantas series de respuestas obtenidas por medio de los aparatos de medida convenientemente instalados.

De los resultados de esta matriz inicial se escoge aquel que sea considerado como el peor de todos, procediéndose a sustituirlo, es decir la fila de sus correspondientes factores por aquella que se forme con la media de los factores correspondientes a las filas restantes. Realizado este nuevo experimento sobre la unidad, se procede a una nueva comparación y sustitución y así sucesivamente avanzando hacia el óptimo deseado según esta forma de selección.

La obtención de estas imágenes especulares del conjunto de puntos dado para cada movimiento ha de estar sujeta a dos condiciones previas de contorno. La primera de ellas aconseja eliminar, a partir del movimiento n + 1, aquellos experimentos o puntos, o filas de la matriz que se hayan ido repitiendo n + 1 veces, considerándolos demasiado "viejos". Esta medida tiene por objeto evitar "espejismos" producidos por cualquier error experimental, es decir, que se hubiera obtenido por lectura de los aparatos de medida un resultado demasiado bueno que no fuera real, y que estuviera siempre presente por el hecho de ser demasiado bueno, enmascarando la resultante del conjunto y restando velocidad al programa.

La segunda medida aconseja desestimar la eliminación de aquella fila de la matriz que produzca el correspondiente experimento todavía peor.

Y como comprobación previa a la iniciación del experimento n + 2, es aconsejable reducir la matriz inicial para comprobar que las diferencias relativas entre cada una de las respuestas presenta un cuadro coherente, es decir que no existan órdenes de magnitud demasiado distantes para algún par de respuestas que provoque ningún direccionado de la secuencia de experimentación hacia ningún sentido preferencial. En otras palabras todas las direcciones de avance en el espacio de n dimensiones han de tener el mismo orden de probabilidad en el momento de iniciar el avance por obtención sucesiva de imágenes especulares.

Para ilustrar esta estrategia podemos referirnos al espacio vectorial de dos dimensiones en el que suponemos representadas las curvas isopropiedades como superficies cerradas de segundo orden concéntricas respecto del óptimo deseado y por consiguiente desconocido. Comenzamos partiendo de un triángulo equilátero que no es mas que el conjunto de n + 1 puntos de la matriz inicial de que hablábamos arriba, para este espacio de dos dimensiones. La obtención de las sucesivas imágenes especulares de los puntos desechados irá trazando el camino hacia el centro de esas superficies o situaciones desechadas progresivamente. En el vocabulario propio de esta técnica de optimización a este camino se le ha dado en llamar "stipest ascent path", o camino de ascensión mas directa. En el presente informe que estamos resumiendo incluimos algunas de las deducciones matemáticas correspondientes a la aparición de este "camino" según diferentes interpretaciones.

En esta fase de la experimentación nos interesó comprobar la diferencia de velocidad que se produciría eliminando o no experimentos de edad $n + 1$, o sea los que, según esta estrategia, considera anormalmente buenos y los elimina cuando han aparecido demasiadas veces, pensando que si realmente fueran buenos, ya volverán a aparecer mas adelante.

Por lo tanto la primera parte del programa Simplex adolece, a propósito, de la aplicación de la estrategia de eliminar a los experimentos que se han venido repitiendo con demasiada frecuencia, normalizándose esta situación a partir del experimento 20. Sobre la figura 3 puede comprobarse directamente el efecto de esta medida en el transcurso de los experimentos, encontrándose claramente una diferencia en cuanto a minimizar el consumo de fluido calefactor.

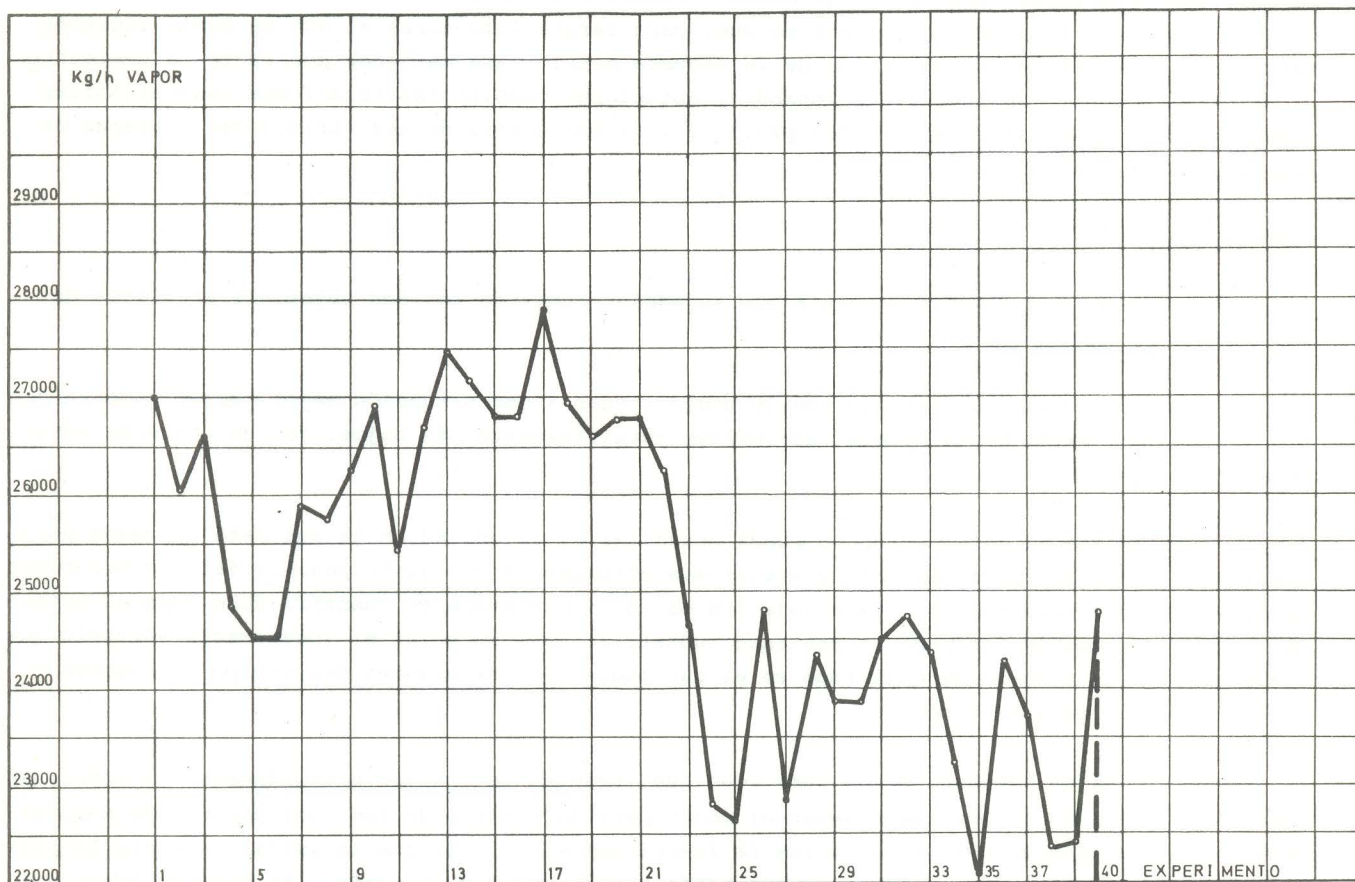


FIG. 3. ESTRATEGIA DE ELIMINACIÓN DE EXPERIMENTOS REPETIDOS CON DEMASIADA FRECUENCIA.

Llegados al experimento número 40, y por otras causas de tipo operativo, nos creímos en la necesidad de recapitular los hechos hasta aquel momento y evaluar el rendimiento de toda la operación. Para ello escogimos como extremos de comparación, la media de los 9 primeros experimentos, o sea los de la matriz de partida, y el mejor de todos los demás, o sea el 35, afectándolo de un factor relativo del 7% que fué el orden de magnitud de ellos encontrado en los aparatos de medida.

Obtenida una diferencia de 3 toneladas hora de vapor saturado de baja presión se cifró el fluido calefactor en términos de precio de combustible para nuestro caso particular, en un ahorro de 3 millones de ptas. anuales. Téngase en cuenta que este precio de combustible, para nuestro caso, representa solamente el precio de materia prima más los costes de explotación y estructura, puesto que, como es natural, se utilizaba nuestro propio combustible manufacturado. Quiero decir con ello que debería hacerse el cálculo económico correspondiente al caso de una planta industrial que comprase combustible en el mercado.

En cifras relativas el rendimiento de la operación supuso, incluidos los errores mencionados, un 11,6%, en reducción de consumo de combustible.

Vistas estas cifras, se trataba entonces de comprobar la veracidad de su procedencia, para lo cual se preparó un programa de varios días de duración, con las correspondientes variaciones de carga que debía soportar la unidad y demás eventualidades, con las variables del experimento 35 como valores a estabilizar en cuanto a presiones de las torres, y relaciones de reflujo/alimentación. A estas cuatro variables se refirieron las restantes que les correspondían y se anotaron los consumos de vapor que se iban necesitando.

El resultado de todo lo cual representó una desviación no superior al 4%, teniendo en cuenta que, como era lógico esperar, no se habían estabilizado en todo momento las variables a los valores deseados. Igualmente se comprobó que, para cargas inferiores al 405 se debía incrementar la relación reflujo/alimentación de la segunda torre, para mantener constante la temperatura de alimentación. Se fueron comprobando y obteniendo también las relaciones termodinámicas presentadas en la etapa de recálculos previos, y la incidencia de las variaciones de carga en cada una de las variables.

CONCLUSIONES.

Todo lo cual nos llevó a concluir que se habían cumplido los dos objetivos previstos en el planteo inicial:

- Demostrar cuantitativamente que se podía llegar a una situación mejor energéticamente dentro de una progresión hacia niveles de consumo intuitivamente más bajos, con un coste de recursos irrisorio.

- Ofrecer cuanta información se pueda necesitar de la unidad en la que está operando para comprender mejor su funcionamiento y prever más eficazmente cualquier posible fallo o programar mejor las revisiones anuales. Este objetivo es tan inmediatamente cuantificable como el primero, pero basta conocer un poco la realidad industrial para apreciar el inestimable servicio que puede prestar un programa de este tipo en el que todos los integrantes del equipo se sientan identificados y motivados por él.

En realidad no habíamos hecho otra cosa que, después de conocer profundamente la teoría de nuestra unidad, en primer lugar sacar el mejor partido posible de los coeficientes de sobredimensionado (en nuestro caso eficiencias de fraccionamiento), con que la unidad, que era la primera que se calculaba de su género, y que había tenido que ser afectada. En segundo lugar evitar el lógico defecto que se produce en toda planta industrial en la que va a asegurarse un suministro o una calidad de producto, relegándose a segundo término un más riguroso ajuste de las condiciones operatorias para mejorar su rendimiento. Por ejemplo el operar con relaciones de reflujo demasiado elevadas para garantizar un buen fraccionamiento frente a variaciones de alimentación, como ocurre en el caso de los generadores de vapor con el exceso de aire, etc. O bien en otro orden de cosas, emplear presiones excesivas en las torres, cuando el nivel térmico de los fluidos condensadores puede permitir una reducción, con el consiguiente ahorro de caudal de calor inyectado en los fondos de la torre.

Por último se intuye el acercamiento y permanencia asintótica alrededor del óptimo, a que hace referencia la bibliografía, y es por lo que, después de dar por finalizado este proyecto de presentación del tema, recomendamos vivamente la continuación de toda la mecánica expuesta como rutina normal de operación, introduciendo tal vez un noveno factor, que no es otro que el caudal de alimentación general a la unidad, ya que no se tiene actuación, ni sobre la composición del crudo ni sobre su temperatura. Estas dos últimas variables pueden ser objeto de factor de corrección a la hora de evaluar los rendimientos marginales que se vayan obteniendo, pe

ro en modo alguno supone un defecto el no ser consideradas toda vez que lo que se pretende con la optimización, se va poniendo de manifiesto mediante cada decisión que se toma a lo largo del programa.

Como indicación adicional he de añadir que durante la continuación del programa, y como consecuencia de la variación de las presiones de las torres, se podrán ir encontrando temperaturas de equilibrio en las zonas de agotamiento ligeramente distintas a las previstas; pero que corresponden exactamente a las temperaturas de rocío de la mezcla en el plato de la toma de temperaturas para cada rendimiento de fraccionamiento, es decir para cada composición molar que vaya obteniéndose por cabeza y colas.

NOMENCLATURA

A_i	valor medio.	P_i	presión de trabajo de la torres.
C_{di}	composiciones de los destilados.	Q_i	calor intercambiado en el calderín.
C_{ri}	composición alimentación.	Q_i	id. en el condensador.
C_{fi}	composición condiciones prefijadas.	R_i	relación de flujo.
T_i	caudal de alimentación.	T_i, T_{fi}	temperatura.
f, f_1, f_2	funciones.	T_i	temperatura zona de agotamiento.
M	valor máximo.	X_1, X_2	factores a optimizar.
m	valor mínimo prefijado para cada factor.		
n	número de variables independientes o factores.		

BIBLIOGRAFIA

En la Tesis Doctoral, cuyo resumen constituye este artículo, se incluyen 93 citas bibliográficas sobre optimización general o aplicada a procesos químicos de destilación. Quienes deseen más información sobre este tema, pueden solicitarla a la Redacción de ésta Revista.