Métodos de solución para problemas de optimización multiobjetivo en refinerías de petróleo

Solution methods for multi-objective optimization problems in oil refineries

Roxana Cortés Martínez[1*] https://orcid.org/0000-0002-2040-6548

Fernando E. Ramos Miranda[1] https://orcid.org/0000-0002-0601-6228

Erenio González Suárez[2] https://orcid.org/0000-0001-5741-8959

[1]Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba

[2]Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas, Cuba

[*]Autor para correspondencia. correo electrónico:rcortes@ucf.edu.cu

RESUMEN

En este trabajo se aplican los métodos de solución para la optimización multiobjetivo para disminuir el consumo de la sosa cáustica en la etapa de tratamiento de la nafta inestable para la obtención de gas licuado del petróleo (GLP). Primeramente se conceptualizó sobre las ventajas y desventajas de los modelos y sobre los métodos de optimización. Con la cinética de las reacciones, datos del control operacional y datos económicos se obtuvieron tres funciones objetivos y sus respectivas restricciones para luego aplicar el método de optimización jerárquica. Se obtuvo que, con una concentración de sosa cáustica de 15 % peso y un tiempo de reacción de 15 min, en la mayoría de los casos se cumple con el parámetro de calidad de 140 ppm de azufre en el GLP y que en los casos donde no se cumple esta condición el producto debe ser recirculado para una nueva etapa de limpieza.

Palabras clave: optimización; modelos matemáticos; sosa cáustica.

ABSTRACT

In this work, the solution methods for multiobjective optimization are applied to reduce the consumption of caustic soda at the stage of treatment of unstable naphtha to obtain

liquefied petroleum gas (LPG). First, the advantages and disadvantages of the models and the optimization methods were conceptualized. With the kinetics of the reactions, operational control data and economic data, three objective functions and their respective restrictions were obtained and then applied the method of hierarchical optimization. It was obtained that, with a caustic soda concentration of 15 % weight and a reaction time of 15 min, in most cases the quality parameter of 140 ppm of sulfur in the LPG is met and that in cases where this condition is not met, the product must be recirculated for a new cleaning stage.
Keywords: optimization; mathematical models; caustic soda.

Recibido: 20/04/2020
Aceptado: 15/08/2020

Introducción

El análisis de procesos, como vía para lograr la intensificación de los procesos tecnológicos de la industria química consiste en un amplio análisis científico-técnico y técnico-económico de un proceso existente o concebido, en lo referente a las posibilidades de realización óptima de los objetivos previstos, por ello constituye un elemento importante para tomar decisiones más científicas y responsables.

El análisis de procesos sirve para descubrir las partes débiles en el proceso de producción correspondiente y para la creación de medidas para su eliminación parcial o completa lo que conduce a un aumento de su efectividad, permitiendo de esta forma un mejor aprovechamiento de las materias primas, la energía y los medios de trabajo, así como un aumento de los grados de eficiencia de la fuerza de trabajo y el mejoramiento de las condiciones materiales bajo las cuales ellos laboran. La intensificación de la producción mediante el análisis complejo de procesos, requiere la elaboración de objetivos económicos en cada industria de forma concreta, entre lo que se encuentra de acuerdo con la experiencia acumulada: [(1)]

- Aumento de la calidad y la cantidad de los productos elaborados.
- Disminución de los consumos específicos y absolutos de materiales y energía.
- Mejoramiento de las condiciones de trabajo.

- Ahorro de fuerza de trabajo.
- Disminución de la contaminación ambiental.

La función clave de la intensificación de procesos es su optimización, pero como se conoce, la optimización de procesos se hace con apoyo de modelos matemáticos de los procesos elaborados de los valores reales del comportamiento de los propios procesos[(2)] por lo que es adecuado conceptualizar sobre la modelación de proceso. Un modelo es una construcción mental o material que crea el investigador a partir de su conocimiento práctico y teórico del objeto de investigación y le sirve de guía y soporte para abordar el estudio de dicho objeto y su fenomenología.

Existen múltiples ventajas en el uso de modelos como herramientas poderosas para la toma de decisiones. Las principales son:

- Consideración de aspectos fundamentales del sistema que serían muy difíciles o imposibles de analizar sin la ayuda de los modelos.
- Definición precisa de los objetivos, estructura y restricciones del sistema.
- Definición de parámetros, costos e indicadores de eficiencia que recogen los aspectos más relevantes para el análisis del sistema bajo estudio.
- Evaluación sistemática de alternativas.
- Rápida respuesta de análisis de sensibilidad, los cuales de otra forma serían demasiado dificultosos o imposibles.

Por el contrario, existen también algunas desventajas que deben ser evaluadas antes de emprender la tarea de formulación de un modelo para la solución de un problema. Ellas son:

- Requerimiento y recolección de conjuntos de datos muy extensos y, en general, con altas exigencias en su grado de precisión.
- Requerimiento de conocimientos altamente especializados para su formulación, solución y análisis de resultados.
- Necesidad de disponer de sistemas de computación y programas complejos y costosos.

- Requerimiento de tiempos de solución muy largos, los cuales, en algunos casos, pueden resultar prohibitivos.

A pesar de estas desventajas potenciales, cuando se emprende la tarea de modelar una situación real y se identifican los aspectos básicos a ser involucrados en el modelo con la información requerida necesaria, las ventajas potenciales superan ampliamente cualquier dificultad que se encuentre.[3]

Por otro lado, la optimización es encontrar una alternativa de decisión con la propiedad de ser mejor que cualquier otra en algún sentido. Esta tiene tres componentes fundamentales:

- Función objetivo: medida cuantitativa del funcionamiento (de la bondad) de un sistema que se desea maximizar o minimizar.

- Variable: decisiones que afectan el valor de la función objetivo que pueden ser independientes o dependientes.

- Restricciones: conjunto de relaciones que las variables están obligadas a satisfacer.

Su resolución no es más que encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.[4]

La complejidad de las sociedades modernas y el progreso científico mundial han dado lugar al desarrollo y evolución de herramientas que contribuyan con el quehacer diario. El diseño, la implementación y la construcción de dichos instrumentos involucra elementos que envuelven la solución de problemas, basados en sistemas o modelos complejos y multifactoriales.

Esto ha llevado a la implementación de técnicas que optimizan la producción y eficiencia de las herramientas, como lo son los algoritmos creados para la simulación de circuitos y ejecución de cadenas completas de procesamiento de señales, los cuales evidencian la optimización de funciones objetivo con un número considerable de parámetros.[5]

En la búsqueda de estrategias que soporten la optimización simultánea de más de un criterio de costo o aptitud surge la optimización multiobjetivo.[6]Esta optimiza objetivos de manera conjunta, poniéndolos a competir entre sí, de modo que para cada valor de una función de aptitud o costo se obtiene lo mejor de los otros objetivos. Así, la solución del problema general es una combinación de las soluciones óptimas de cada objetivo, por lo que dicha solución no es única.[6, 7]

En particular, la comunidad científica que trabaja en la implementación de algoritmos para la resolución de problemas de optimización multiobjetivo se divide en dos categorías, definidas por el tipo de funciones objetivo utilizadas. El primer grupo supone funciones objetivo de bajo costo computacional, se preocupa por la eficiencia global de los algoritmos de optimización en sí. Por otro lado, el segundo grupo asume un alto costo computacional de las funciones objetivo, por lo que se interesa por un proceso de optimización que reduzca el número de evaluaciones de dicha función, pues esta última domina la duración total de la optimización. [8]

Este trabajo tiene como objetivo aplicar los métodos de solución de la optimización multiobjetivo para disminuir el consumo de sosa cáustica en la etapa de tratamiento de la nafta inestable en el proceso de obtención del gas licuado del petróleo (GLP).

Materiales y métodos

Las características del proceso estudiado requieren un enfoque de optimización considerando varios objetivos, por lo que su intensificación se debe considerar como una optimización multiobjetivo. Los principales métodos para resolver problemas de optimización multiobjetivo se clasifican en:

Métodos sin preferencias

El problema es resuelto mediante un método relativamente simple y solo se satisface con una solución óptima. Entre ellos se encuentran: método del criterio global o CompromiseProgramming, método del paquete proximal multiobjetivo,[9] modelos gaussianos estocásticos. [10, 11]

Métodos heurísticos

Las heurísticas o métodos heurísticos son algoritmos construidos de manera intuitiva. Algunos autores denominan metaheurística a aquellos casos en los que el algoritmo de optimización utiliza a su vez subprocesos heurísticos, pero esta es una distinción no generalizada.[12]Entre las heurísticas más populares están Colonia de Hormigas (AC por sus siglas en inglés), Recocido Simulado (SA por sus siglas en inglés), Búsqueda Tabú (TS por sus siglas en inglés), Enjambre de Partículas (PS por sus siglas en inglés) y los algoritmos evolutivos (EA por sus siglas en inglés). Los EA se inspiran en conceptos de la evolución biológica tales como la reproducción, mutación, recombinación y selección;[13]

además, balancean la exploración y explotación del espacio de búsqueda de manera exhaustiva con pocas evaluaciones. En contraste, AC, SA y TS son los métodos más antiguos y tienden a realizar más llamadas a la función evaluadora.[14]

Métodos a priori

En este caso, la persona que toma las decisiones debe especificar su o sus preferencias, esperanzas y opiniones antes de comenzar el proceso de solución. Sin embargo, no siempre se sabe de antemano lo que es posible alcanzar en el problema y el grado de realismo de las expectativas.[15]Entre los métodos más conocidos se encuentran: método de la función del valor, método de ordenamiento lexicográfico y método de programación por metas.[9]

Métodos a posteriori

Los métodos a posteriori, también son llamados métodos para generar soluciones óptimas de Pareto. Miettinen[9]plantea que una vez que la frontera de Pareto (o parte de ella) es generada, ésta se expone al tomador de decisiones, quien selecciona la solución más preferida. El principal inconveniente es que el proceso de generación es usualmente costoso desde el punto de vista computacional. Algunos de los métodos más usados son: el método de las ponderaciones [15] y el método de ε-constraint. [16]

Métodos interactivos

En los métodos interactivos, el tomador de decisiones trabaja en conjunto con un analista o un programa informático interactivo. Se puede decir que el analista trata de determinar la estructura de preferencias de la toma de decisiones de una manera interactiva, formando un patrón de solución y se repite varias veces. Después de cada iteración, se entrega información al tomador de decisiones y se le pide que responda a algunas preguntas o que dé algún otro tipo de información para que el modelo sea más representativo de la realidad. Algunos de los métodos utilizados son: método Interactivo del Sustituto Digno Trade-Off (ISWT por sus siglas en inglés), método de Geoffrion-Dyer-Freinberg (GDF), técnica de Optimización de Representación Secuencial (SPOT por sus siglas en inglés) y método de Tchebycheff, entre otros.[15]

Definición de las funciones objetivos

En el proceso objeto de estudio, las variables a optimizar son: la reducción de azufres totales en la corriente de entrada a la etapa de fraccionamiento, el consumo de sosa

cáustica y los costos operacionales. Se ha definido que el orden de prioridad de estas variables es:

1. Azufre total en el GLP. Como éste es un parámetro de calidad medido para su comercialización, los cambios que se hagan en el proceso no pueden afectar negativamente este aspecto por lo que es considerado como el principal objetivo a cumplir.

2. Consumo de sosa. La sosa cáustica, como se ha mencionado anteriormente, es la solución que se utiliza para neutralizar los compuestos sulfurosos presentes en la nafta inestable, sin embargo, es un producto costoso y que genera grandes cantidades de agua sulfurosas alcalinas las cuales no son tratadas correctamente en la actualidad por lo que es necesario disminuir su consumo.

3. El costo total de producción unitario (CTPu). Todo proceso industrial lleva consigo un costo de operación, éste está constituido por, entre otras cosas, el consumo de materiales e insumos y en este caso, los materiales e insumos en los que se puede influir son el agua utilizada en la preparación de la solución alcalina y la sosa cáustica.

Definido el orden de prioridad o jerarquía se procede a obtener las funciones objetivos y sus restricciones.

Reducción de azufres totales

La cantidad de azufre presente en el producto final ($Azufre_{final}$) de la unidad de fraccionamiento de gases es un parámetro que está regulado por los estándares de calidad: para el GLP regular hasta 140 ppm de azufres totales y para el GLP despentanizado hasta 5 ppm debido al alto poder corrosivo del azufre. En consecuencia, se hace necesario eliminar la mayor cantidad de compuestos sulfurosos en la etapa de neutralización. La función definida para la reducción de azufres totales,partiendo de la expresión cinética de las reacciones que tienen lugar en este proceso,es la siguiente:

$$\mathrm{Azufre_{final}} = \left(\frac{10^6}{\mathrm{m_{GLP}}}\right)\left[\left(\mathrm{C_{H_2S_o}} - \mathrm{t} * \mathrm{C_{H_2S_{reac}}}\right) + \left(\mathrm{C_{R-SH_o}} - \mathrm{t} * \mathrm{C_{R-SH_{reac}}}\right)\right] \quad (1)$$

$$\mathrm{C_{H_2S_{reac}}} = 0{,}0002\mathrm{e}^{(0{,}33/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{H_2S_o}}^{0{,}32} * \mathrm{C_{NaOH\ o}}^{-1{,}46}(\mathrm{kg}) \quad (2)$$

$$\mathrm{C_{R-SH_{reac}}} = 1{,}2862\mathrm{e}^{(1{,}9/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{R-SH_o}}^{0{,}97} * \mathrm{C_{NaOH\ o}}^{4{,}59} \quad (\mathrm{kg}) \quad (3)$$

donde

$\mathbf{C_{H_2S_{reac}}}$ y $\mathbf{C_{R-SH_{reac}}}$ son las concentraciones de H_2S y R-SH que reaccionan con la sosa cáustica, T la temperatura de reacción y tes el tiempo de reacción. Sustituyendo las ecuaciones 2 y 3 en la 1 se obtiene la siguiente función:

$$\mathrm{Azufre_{final}} = (10^6/\mathrm{m_{GLP}})\left[\left(\mathrm{C_{H_2S_0}} - \mathrm{t} * 0{,}0002\mathrm{e}^{(0{,}33/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{H_2S_o}}^{0{,}32} * \mathrm{C_{NaOH\ o}}^{-1{,}46}\right) + \left(\mathrm{C_{R-SH_0}} - \mathrm{t} * 1{,}2862\mathrm{e}^{(1{,}9/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{R-SH_o}}^{0{,}97} * \mathrm{C_{NaOH\ o}}^{4{,}59}\right)\right] \quad (4)$$

$$\text{Restricción: } \mathrm{Azufre_{final}} \leq 140\ \mathrm{ppm}$$

Por consiguiente, esta función se convierte en una restricción del sistema siendo la principal meta de este estudio.

Consumo de sosa cáustica

El tratamiento cáustico simple es un proceso de extracción (desulfuración), donde compuestos de azufre y fenoles son retirados de la nafta y se quedan en la sosa cáustica, disminuyendo su concentración, siendo posteriormente necesario su cambio. Debido a esto es necesario conocer la concentración óptima de sosa que permita una correcta desulfuración y que a su vez disminuya la frecuencia de cambio.

Según la literatura, [17] los volúmenes de los tambores se dimensionan frecuentemente para proporcionar un tiempo de espera de 30 min a 1 h (ver tabla 1). Para hidrocarburos de baja viscosidad como el propano y el butano, 5 a 10 min son más que suficientes.

Tabla 1-Criterios de diseño típicos[17]

	Lavado de propano	**Lavado de nafta**	**Lavado viscoso**
Tiempo típico de residencia de hidrocarburos (minutos)	5 – 10	15 – 30	20 – 60
Circulación acuosa / relación de alimentación de hidrocarburos	0,15 – 0,25	0,20 – 0,30	0,25 – 0,45

Por tanto, la función objetivo definida para el consumo de sosa cáustica es la siguiente:

$$\mathrm{Cons.}_{\mathrm{NaOH}} = 40\mathrm{t}\left(5{,}01\mathrm{e}^{(0{,}33/\mathrm{T})} * \mathrm{C}_{\mathrm{H_2S_o}}{}^{0{,}32} * \mathrm{C}_{\mathrm{NaOH\ o}}{}^{-1{,}46} + 8038{,}7\mathrm{e}^{(1{,}9/\mathrm{T})} * \mathrm{C}_{\mathrm{R-SH_o}}{}^{0{,}97} * \mathrm{C}_{\mathrm{NaOH\ o}}{}^{4{,}59}\right) \quad (5)$$

$$\text{Restricciones: } \mathrm{C}_{\mathrm{NaOH}\ o} \leq 4{,}14\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}};\ 15\ \mathrm{min} \leq \mathrm{t} \leq 30\ \mathrm{min}$$

Costo total de producción

Para determinar los costos operacionales es factible el procedimiento recomendado por algunos autores. [18,19] Según los datos disponibles en la empresa, no fue necesario estimar todos los componentes de la metodología utilizada y se llegó a una estimación directa del capital fijo invertido de $\mathbf{CFI = 669\,104{,}8\ CUC}$ y del capital total invertido de $\mathbf{CTI = 736\,015{,}28\ CUC}$ (1 CUC = 1 USD). Igualmente, para estimar un modelo de los costos total de producción (CTP) se procede a utilizar la tabla 27 de la literatura [19] que es como se representa en la tabla 2, en la cual algunos valores pueden ser determinados directamente de los controles del proceso tecnológico y otros estimados por varias vías. Siendo el precio de:agua: 1,55 CUC/m^3[20]y sosa cáustica: 0,7956 CUC/kg.[21]

Según Peters y Timmerhaus (1991) el costo de fabricación (Cf) se determina como sigue:

$$\mathrm{Cf} = \text{Costos directos (CD)} + \text{Cargos Fijos (CF)} + \text{Costos Indirectos (CI)}$$
$$\mathrm{Cf} = 0{,}62\ \mathrm{CTP} + 116\,424{,}24 + 1{,}55 * \mathrm{V}_{\text{soluciôn}} + 0{,}7956 * \mathrm{m}_{\mathrm{NaOH}} \quad (6)$$

Tabla 2- Estimación de los costos de fabricación

Costos Directos				
Componentes		**Composición**	**Precio Unitario**	**Costo (CUC)**
Materia prima		20 % del CTP		
Mano de obra		10 % del CTP		
Supervisión		15 % del CTP		
Requerimientos		1 % del CTP		
Mantenimiento y reparación		6 % del CFI		40 146.29
Suministro	Agua	$1{,}55 * V_{soluci\,ôn}$	1,55 CUC/m^3	
	NaOH	$0{,}7956 * m_{NaOH}$	0,7956 CUC/kg	
	Electricidad	10 % del CTP		
Gastos de laboratorio		1 % del CTP		
$CD = 0{,}57\,CTP + 40\,146.29 + 1{,}55 * V_{soluci\,ôn} + 0{,}7956 * m_{NaOH}$				
Cargos Fijos				
Componentes		**Composición**	**Precio Unitario**	**Costo (CUC)**
Depreciación		10 % del CFI		66 910,48
Impuestos		1 % del CFI		6 691,05
Seguros		0,4 % del CFI		2 676.42
$CF = 76\,277{,}95$				
Costos Indirectos				
Otros costos		5 % del CTP		
$CI = 0{,}05\,CTP$				

Según algunos autores (1991),[19] el costo total de producción se determina por la ecuación 7

$$\mathrm{CTP} = \text{Costo de fabricación (Cf)} + \text{Gastos Generales (GG)} \qquad (7)$$

Para el cálculo de los gastos generales (GG) se tuvo en cuenta solo con los gastos administrativos pues en el caso de estudio no tienen incidencia los aspectos restantes:

$$\mathrm{GG} = \text{Distribución y venta (D)} + \text{Admón. (A)} + \text{Investig. y Des. (ID)}$$
$$\mathrm{GG} = 0{,}04\ \mathrm{CTP} \qquad (8)$$

Sustituyendo las ecuaciones 6 y 8 en la 7 se obtiene un costo anual de:

$$\mathrm{CTP_A} = 342\,424{,}22 + 4{,}56\ \mathrm{V_{solución}} + 2{,}34\ \mathrm{m_{NaOH}} \qquad (9)$$

$$\mathrm{V_{solución}} = 475\,200t\left(5{,}01\mathrm{e}^{(0{,}33/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{H_2S_o}}^{0{,}32} * \mathrm{C_{NaOH\,o}}^{-2{,}46} + 8038{,}7\mathrm{e}^{(1{,}9/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{R-SH\,o}}^{0{,}97} * \mathrm{C_{NaOH\,o}}^{3{,}59}\right) \qquad (10)$$

$$\mathrm{m_{NaOH}} = 19\,008\,000t\left(5{,}01\mathrm{e}^{(0{,}33/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{H_2S_o}}^{0{,}32} * \mathrm{C_{NaOH\,o}}^{-1{,}46} + 8038{,}7\mathrm{e}^{(1{,}9/\mathrm{T})} * \mathrm{C_{R-SH\,o}}^{0{,}97} * \mathrm{C_{NaOH\,o}}^{4{,}59}\right) \qquad (11)$$

Por definición el costo de producción unitario (CTP_U) es el costo de producción anual entre el volumen de producción y el valor de la producción anual dependerá de variables que deciden el proceso y su productividad como son: el tiempo de reacción y concentración, lo que nos permite obtener una expresión de la forma siguiente:

$$\mathrm{CTP_U} = \frac{\text{Costo anual}}{\text{Volumen de producción}} \tag{12}$$

Siendo el volumen de producción anual:

$$\text{Volumen de producción} = \frac{475\,200\ \mathrm{V_{T-401}}}{\mathrm{t}} = \frac{63\,439\,200}{\mathrm{t}} \tag{13}$$

Siendo $V_{T\text{-}401}$el volumen de la torre de fraccionamiento

Sustituyendo las ecuaciones 9 - 11 y 13 en la 12 se obtiene que:

$$\mathrm{CTP_U} = 0{,}0054\mathrm{t} + 7{,}19 * 10^{-8}\mathrm{V_{solución}}\ \mathrm{t} + 3{,}69 * 10^{-8}\mathrm{m_{NaOH}}\ \mathrm{t} \tag{14}$$

Para realizar la optimización se utilizó el software MATLAB® pues este contiene un conjunto de herramientas que te permiten optimizar todo tipo de ecuaciones. Se utilizó la función fmincon pues las funciones objetivos determinadas anteriormente son funciones no lineales y el sistema tiene restricciones de igualdad y desigualdad. Para esto se introdujo en el software MATLAB® el código de programación que aparece en la figura1 para determinar los puntos óptimos en cada mezcla estudiada.

```
function [c, ceq] = k( x )
ceq=[];
c=(10^6/32830,1)*(6.45-0,0002*x(1)*(3.70*10^-10)^0,32*x(2)^-1.46-
1.2862*x(1)*(5.49*10^-12)^0,97*x(2)^4.59)-140
end

fun=@(x)(5.01*x(1)*(3.70*10^-10)^0,32*x(2)^-1.46+8038,7*x(1)*(5.49*10^-
12)^0,97*x(2)^4.59)*40+(0,0054*x(1)+0,034*x(1)^2*(5.01*(3.70*10^-
10)^0,32*x(2)^-2.46+8,04*10^3*(5.49*10^-
12)^0,97*x(2)^3.59)+0,701*x(1)^2*(5.01*(3.70*10^-10)^0,32*x(2)^-
1.46+8,04*10^3*(5.49*10^-12)^0,97*x(2)^4.59));
x0 = [0,0];
lb = [15 0,38];
ub = [30 4.14];
A = [];
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
nonlcon = @k;
[x] = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)
```

Fig.1- Código implementado en MATLAB® para optimizar

Esta función (fmincon) utiliza el método numérico cuasi-Newton. Los métodos cuasi-Newton, o métodos de métrica variable, buscan estimar el camino directo hacia el óptimo en forma similar al método de Newton. Estos métodos se llaman de cuasi-Newton porque no usan el hessiano verdadero, sino más bien una aproximación. Así, se tienen dos aproximaciones simultáneas: 1) la aproximación original de la serie de Taylor y 2) la aproximación del hessiano. Hay dos métodos principales de este tipo: los algoritmos de Davidon-Fletcher-Powell (DFP) y de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS). Estos son similares excepto en detalles concernientes a cómo manejan los errores de redondeo y su convergencia. BFGS es, por lo general, reconocido como superior en la mayoría de los casos.[22]

Discusión de los resultados

Definidas las funciones objetivos con sus restricciones se aplicó el método de optimización definido anteriormente. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en la optimización para cada mezcla estudiada.

Tabla 3- Resultados de la optimización para cada mezcla

Mezcla	$C_{H_2S_o}(mol/L)$	$C_{R-SH_o}(mol/L)$	$C_{NaOH_o}(mol/L)$	Tiempo (t)
M1	4,07E-10		4,14	15
M2	3,67E-10	3,81E-10	4,14	15
M3	3,52E-10	1,54E-10	2,8983	15
M4	3,29E-10		4,14	15
M5	2,12E-10	1,74E-11	3,9995	15
M6	3,27E-10		4,14	15
M7	2,50E-10		4,14	15
M8	3,13E-10		4,14	15
M9	3,70E-10	5,49E-12	4,14	15
M10	4,02E-10		4,14	15

Los resultados de la evaluación de los puntos óptimos en las ecuaciones 4 y 14 se muestran en la tabla 4 que sigue a continuación:

Tabla 4- Resultados de la evaluación en la primera función objetivo

Mezcla	$C_{H_2S_o}(mol/L)$	$C_{R-SH_o}(mol/L)$	$Azufre_{final}\ (ppm)$	CTPu (CUC)
M1	4,07E-10		111,34	0,09
M2	3,67E-10	3,81E-10	267,01	1,77
M3	3,52E-10	1,54E-10	105,19	0,14
M4	3,29E-10		89,91	0,09
M5	2,12E-10	1,74E-11	97,81	0,11
M6	3,27E-10		118,82	0,09
M7	2,50E-10		91,88	0,09
M8	3,13E-10		157,59	1,69
M9	3,70E-10	5,49E-12	196,32	1,77
M10	4,02E-10		84,22	0,09

Como se puede observar en la tabla 4 la mayoría de las mezclas analizadas cumplen con la principal meta, y por tanto restricción, que es el contenido de azufre en el GLP regular por debajo de 140 ppm. También se observa que, aunque se utilice la máxima concentración de sosa cáustica, hay mezclas que no cumplen con las especificaciones de calidad del producto final por lo que este producto debe ser recirculado al proceso de neutralización para una segunda etapa de limpieza. De la tabla anterior se observa que las mezclas que necesitan de una segunda etapa de limpieza el costo unitario supera el CUC al año pues necesitarán de un mayor consumo de sosa cáustica.

Evaluando los puntos óptimos en la función de consumo de sosa se puede determinar la cantidad de sosa cáustica que se consumirá y pronosticar cada cuántos días se debe cambiar. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5- Consumo de sosa

Mezcla	Sosa consumida (kg)	Frecuencia de cambio (días)	No. de cambios al año
M1	22,40	3	107
M2	1 417,0	0	6 777
M3	47,60	1	325
M4	20,90	3	100
M5	25,30	3	125
M6	20,90	3	100
M7	19,20	4	92
M8	1 346,7	0	6 441
M9	1 420,7	0	6 795
M10	22,30	3	107

Si se analiza la tabla anterior se observa que la frecuencia de cambio de la sosa cáustica se mantiene prácticamente igual que en las condiciones actuales y que en los casos en que no se logra cumplir con el parámetro de calidad establecido hay un mayor consumo de sosa.

Conclusiones

- Es factible determinar las condiciones óptimas de conducción del proceso en correspondencia con el objetivo de intensificación mediante un proceso de optimización multiobjetivos.

- La modelación matemática multiobjetivo puede ser utilizada en el control del proceso en refinerías de petróleo pues permite pronosticar el comportamiento de las variables controladas.

- Se obtuvo que el tiempo de reacción óptimo es de 15 min con una concentración máxima de sosa cáustica de 15 ppm, es decir, 4,14 mol/L, lográndose definir el período de cambio de la sosa cáustica para cada mezcla estudiada.+

Referencias bibliográficas

1. GONZÁLEZ SUÁREZ, E.*Utilización del análisis de procesos en la intensificación de la producción en distintas industrias de Cuba.*, Tesis doctoralinédita.Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 1991.

2. GONZÁLEZ SUÁREZ, E., QUEZADAMORENO, W., PERALTASUÁREZ, L. M.Y CONCEPCIÓNTOLEDO, D. N. “Modelación y optimización de procesos: impacto científico en la Industria Química y Fermentativa”.Ecuador: Editorial UTC,2016.

3. VIDAL HOLGUÍN, C. J. “Introducción a la modelación matemática y optimización., Programación lineal, Programación No Lineal y Teoría de Redes: Formulación y solución de modelos, teoría de dualidad, análisis de sensibilidad, problema del transporte y problemas seleccionados de redes”. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, 2011. Informe inédito.

4. RAMOS, A. Y VITORIANO, B. “Modelos matemáticos de optimización”. Madrid: Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.

5. PEREIRA, R., ALVARADO, P. AND KRAWTSCHNEIDER, H. “Desing of a MCML Gate Library Applying Multiobjective Optimization.”IEEE Computer Society Symposium. VLSI,2007.

6. DEB, K. “Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms”. Chichester, England, 2001

7. MARLER, R. T. AND ARORA, J. S. “Survey of multi-objective optimization methods for engineering.” *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2004, **26**, p.369-395.

8. CALDERON ARCE, C. AND ALVARADOMOYA, P. “Optimización multiobjetivo con funciones de alto costo computacional. Revisión del estado del arte”. *Tecnología en Marcha. Edición especial. Matemática aplicada*. 2016,pp. 16-24. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/303922517.

9. MIETTINEN, K. “Nonlinear Multiobjective Optimization”. Vol. I, II. Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers, 1998.

10. ONG, Y., NAIR, P. AND KEANE, A. “Evolutionary Optimization of Computationally Expensive Problems via Surrogate Modeling”. *AIAA Journal.* 2003,**41**(4), pp. 687-696.

11. ZHANG, Q., LIU, W., TSANG, E. AND VIRGINIAS, B.“Expensive Mutiobjective Optimization by MOEA/D with Gaussian Process Model.”School of Computer Science & Electronic Engineering, University of Essex, 2009.Informe inédito.

12. SCHWEICKARDT, G. “Metaheurística FPSO-X multiobjetivo. Una aplicación para la planificación de la expansión de mediano/largo plazo de un sistema de distribución eléctrica”. *Energética.* 2009,(42), pp. 73-88.

13. VANSUNDHARA, R., SIVA, S. AND SELVARAJ, M. “Evolutionary algorithms for de novo drug design.”*A survey. Applied Soft Computing.*2015,**27**, pp. 543-552.

14. ESKANDARI, H. AND GEIGER, C. “A fast Pareto genetic algorithm approach for solving expensive multiobjective optimization problems”. *Journal Heuristics, Springer Science.*2008, **14**, pp. 203-241.

15. CIATERADÍAZ, D. “Modelo de optimización multiobjetivo para la evaluación de eficiencia en una empresa de servicios eléctricos”. Tesis de grado inédita, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, 2015.

16. CRISTOBALGARCÍA, J. “Optimización multiobjetivo para la evaluación de la sostenibilidad de tecnologías de generación de electricidad a partir de carbón”. Tesis Doctoral inédita, Universidad de Cantabria, Santander, 2013.

17. LUDWIG, E. E. Chapter 4: “Mechanical Separations. Liquid/liquid, liquid/solid gravity separations, decanters and sedimentation equipment”. En*Applied process*

desing for chemical and petrochemical plants. Third Edition, Vol. 1. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 1999.

18. GONZÁLEZ SUÁREZ, E. Y CASTROGALIANO, E. “Aspectos técnico-económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol caña de azúcar”. España: Universidad de Jaén y Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2011.

Documento inédito.

19. PETERS, M. S. AND TIMMERHAUS, K. D. “Plant design and economics for chemical engineers.”4th edition. United States: Advisory Board, 1991.

20. LOBELLES, G. O. “Metodología para la gestión tecnológica integral de aguas sulfurosas en la refinería de cienfuegos con enfoque de economía ecológica”. Tesis doctoralinédita. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, 2016.

21. CUPET.Precios de insumos y reactivos para la oganización del petróleo. La Habana, Cuba: CUPET,2013.

22. CHAPRA, S. C. AND CANALE, R. P. Capítulo 14: “Optimización *multidimensional sin restricciones. Epígrafe 14.2 Métodos con gradiente. En Métodos numéricos para ingenieros*.Sexta edición. México: Mc. Graw-Hill. 2011, pp. 353-354. ISBN 978-607-315-0499-0499.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Roxana Cortés Martínez.Procesamiento de los datos y elaboración final del informe

Fernando E. Ramos Miranda. Proceso asistencial, revisión y corrección del informe final.

Erenio González Suárez. Proceso asistencial, revisión y corrección del informe final.