

## ESTUDIO COMPARATIVO DEL DISEÑO DE COLUMNAS DE DESTILACIÓN BINARIAS: ENFOQUE INTEGRADO (DETERMINISTICO y ALGORITMO GENÉTICO)

**Jesús Ceballos, Carlos Segura, Irina B. León G.**

Escuela de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo Valencia Carabobo  
Correos: ceballos.jesus@gmail.com, seguraca@gmail.com, irinaleon\_uc@hotmail.com

**RESUMEN.** El propósito de este estudio es contribuir metodológicamente, mediante un estudio sistemático de la aplicación de diferentes técnicas de optimización al diseño integrado de columnas de destilación en sistemas binarios, para ello se establecieron dos técnicas de optimización, Estocástico (Algoritmo Genético), Determinístico, se optimizó la columna de destilación en estado estacionario. En ésta parte se usó una búsqueda tipo tabú para resolver el problema binario. Para cada escogencia de la búsqueda entera, se optimizó las variables continuas con el método determinístico, y en el diseño de procesos se aplica la perturbación a la fracción molar de la alimentación. Se desarrolla e implementa el algoritmo de cálculo y se valida la metodología propuesta para el diseño de torres de destilación binaria comparando la simulación dinámica del sistema con y sin control diseñado con ambos enfoques, sometiendo a una perturbación de 10%.

**Palabras claves:** Diseño Integrado, Diseño Tradicional, Perturbaciones, Optimización

---

## COMPARATIVE STUDY DESIGN BINARY DISTILLATION COLUMNS: INTEGRATED APPROACH (DETERMINISTIC AND GENETIC ALGORITHM)

**ABSTRACT.** The purpose of this study is to contribute methodologically, through a systematic study of the application of different optimization techniques to design integrated distillation columns in binary systems, for it established two optimization techniques, genetic algorithm, deterministic, was optimized distillation column at steady state. For this part was used tabu search to solve the type binary problem. For each choice of the search whole continuous variables were optimized with the deterministic method for process design perturbation is applied to the molar fraction of the feed. Develops and implements the algorithm of calculation and validated the proposed methodology for the design of binary distillation towers comparing the dynamic simulation of the system with and without control designed with both approaches, and subjected to different levels of disturbance. Undergoing a disturbance of 10%. There is seen as the dynamic response.

**Key words:** Integrated Design, Traditional Design and Optimization

## 1. INTRODUCCIÓN

La integración entre diseño y controlabilidad ha tomado una relevancia en el diseño de procesos reactivos, debido a la necesidad de evaluar las características de operación dinámica de los procesos durante las fases de diseño en cuanto a sus aproximaciones cuantitativas. Cabe mencionar que en las últimas cinco décadas, se ha venido realizando un esfuerzo significativo dirigido a los estudios algorítmicos y teorías de aplicaciones que surgen del problema de diseño de procesos y control. Los trabajos de [18] Nishida (1974), [19] Nishida e Ichikawa (1975) y [20] Nishida (1976) fueron de los primeros que estudiaron sistemáticamente el problema de incluir consideraciones dinámicas y de control dentro del problema de síntesis de procesos que contienen incertidumbres en los parámetros [13] Morari, 1983; [29] y [30] Skogestad y Morari (1987.a, 1987.b); [15] Morari y Zafiriou, (1989); [28] Skogestad, (1991); [31] Skogestad y Wolff (1992), han realizado contribuciones significantes en el análisis de la controlabilidad y en el estudio de la capacidad de adaptación dinámica de los sistemas. Ellos han introducido y analizado magnitudes de controlabilidad para la interacción de las variables y el rechazo de perturbaciones. También han investigado las características inherentes a un proceso que limitan su controlabilidad y han propuesto un procedimiento de síntesis de reguladores que consideran la estabilidad robusta en presencia de incertidumbres en los modelos y acciones en las perturbaciones. [26] Sheffield (1992) proporcionó una perspectiva industrial sobre la necesidad de integrar el diseño y el control de sistemas. Tanto [14] Morari (1992), realizó una recopilación de algunos de los resultados importantes y esfuerzos previos, concernientes a la interacción entre el diseño y el control. [1] Bansal y colaboradores (2000) y [24] Salkizli y colaboradores (2004), han centrado esfuerzos en el estudio y aplicación del diseño integrado y control de sistemas de destilación, utilizando programación dinámica bajo incertidumbres. Para el problema específico de Diseño Integrado de procesos del sistema descrito por [27] Schweiger y Floudas (1997) fue resuelto mediante métodos de optimización local. Los algoritmos desarrollados y la simulación implementada arrojan resultados que ponen de manifiesto las ventajas del enfoque simultáneo de diseño sobre el enfoque secuencial. Surge así el enfoque sobre el cual se basa el presente trabajo, el Diseño Integrado, denominado así por [6] Gutiérrez y Prada en el año 2003. El Diseño Integrado es la técnica de diseño de procesos mediante la cual se obtienen los parámetros físicos de la planta que minimicen el coste de operación y construcción, al mismo tiempo que cumplen con las características de controlabilidad que se imponen al proceso,

obteniendo de ésta manera diseños de planta flexibles capaces de mantener sus condiciones de controlabilidad frente a futuras perturbaciones que se puedan presentar.

Se espera que en un futuro, al determinarse los mejores métodos aplicados a sistemas industriales específicos, el Diseño Integrado sea la base al momento de diseñar nuevos procesos productivos. Como contribución a todas las investigaciones que se desarrollen en el marco del Diseño de Columnas de Destilación Binaria, surge el presente trabajo, el cual tiene como objetivo realizar el diseño integrado de columnas de destilación binarias mediante el uso de métodos de optimización híbridos (Métodos heurísticos, metaheurísticas más métodos clásicos), Existe una bibliografía muy extensa que versa sobre los diferentes algoritmos de optimización convencionales existentes para afrontar la optimización de funciones. Sin embargo, los métodos convencionales de optimización, entre los cuales destacan aquellos basados en la búsqueda del gradiente, se dirigen hacia la solución más próxima siguiendo la dirección en la que el gradiente disminuye o aumenta sin capacidad para discernir entre solución local y global. Como alternativa, durante las dos últimas décadas nuevos métodos heurísticos, entre los cuales destacan el recocido simulado (RS), los algoritmos genéticos (GA) y más recientemente la optimización con enjambre de partículas (PSO).

Los metaheurísticas está la Búsqueda Tabú (Tabu search), empleada en éste trabajo para el problema de Diseño Integrado de Columnas de Destilación Binarias. Otros autores [21] Pérez y Basterrechea, (2005), encuentran que la Búsqueda Tabú, puede pertenecer a Métodos Heurísticos Deterministas

Históricamente existen algunos ejemplos exitosos, como el caso de [22] Petcu y Faltings, (2007), quienes desarrollaron un algoritmo para optimización combinatoria basado en métodos de búsqueda locales (que solo toman decisiones basados en información local) y métodos completamente inferenciales.

[3] Elhossini (2010) y otros, presentaron una eficiente estrategia basada en PSO (particle swarm optimization) u optimización por enjambre de partículas y sobre el “frente de Pareto” que generalmente se ve en algoritmos evolutivos, para resolver problemas de optimización multiobjetivo.

[11] Martinez T. y Behar A. (2011), utilizaron una estrategia híbrida basada en algoritmos genéticos y en el método simplex para la identificación experimental de sistemas de lazo abierto, obteniendo resultados muy superiores a los obtenidos por métodos convencionales, una estrategia muy similar llamada Algoritmo Simplex Genético realizada por [7] Hongfeng, X (2009). Los Algoritmos Híbridos se han utilizado además para la reconstrucción de imágenes, de acuerdo con [9] Liu C y otros (2009), para el clásico problema del comerciante viajero de [33] Zhou, Q. y otros (2009).

Al exponer aquí los principales métodos de optimización, no se pretende hacer ver que los métodos que se esbozaran son los mejores para cualquier proceso. Todo lo contrario, depende del proceso y como se aborde el problema de optimización. Lo que si se quiere es dar una visión general sobre los métodos más explorados actualmente y que para el caso específico del problema de Diseño Integrado de Columnas de Destilación Binarias, se han aplicado tres de ellos para determinar cuál se adapta mejor y arroja la solución más óptima. Y es así que se determina que para un proceso muy particular, algún método o combinación de ellos, será la herramienta adecuada.

Con éste trabajo se pretende resolver dado el sistema particular, el Diseño Integrado de una Columna de Destilación binaria mediante un estudio sistemático de la aplicación de diferentes técnicas de optimización, clásicas y heurísticas.

## 2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

El enfoque esta propuesto para el diseño de una columna de destilación binaria, el objetivo es diseñar un proceso que separa una alimentación de líquido saturado en productos de fondos y destilados. Se calcula el número de platos, la ubicación de la alimentación, diámetro de la columna, caudales y composiciones.

Para el desarrollo del modelo matemático, se asume constante de volatilidad relativa ( $\alpha$ ), un calderin parcial y un condensador total. La estructura alternativas son representada por las variables binarias  $p_i$  y  $q_i$ , las cuales representan la residencia de la alimentación y el reflujo respectivamente para cada plato  $i$ .

Las variables de tiempo continuos invariantes en el modelo son: acumulación de líquido en el plato,  $M$ , constante de tiempo hidráulica en el plato,  $\beta$ , relación de reflujo en estado estacionario,  $R_{ss}$ , vapor en el calderin en estado estacionario,  $V_{ss}$ , diámetro de la columna,  $D_c$ , ganancias del controlador y constantes de tiempo,  $K_v$ ,  $K_R$ ,  $T_v$ ,  $T_R$ .

Las variables dinámicas en el modelo son las composiciones líquidas,  $x_i$ , composiciones de vapor,  $y_i$ , caudal de líquido por cada plato,  $L_i$ , flujo de fondo y destilado,  $B$  y  $D$ , vapor del calderin,  $V$ , y el reflujo,  $R$ .

El diseño que se propone obtener deberá ser óptimo tanto a los criterios económicos como a la controlabilidad del proceso garantizando una operación factible.

La finalidad es explorar algunas áreas definidas en el campo de la optimización, como lo son:

- (1) **Métodos Clásicos:** Se estudiarán los métodos de búsqueda local o determinísticos, específicamente la técnica de optimización basada en búsqueda de gradientes.
- (2) **Métodos Heurísticos o Estocásticos:** Se utilizará el método probabilístico basado en población: Algoritmos Genéticos, siendo a su vez un método global de optimización.

La Figura 1, representa un diagrama del sistema en estudio.

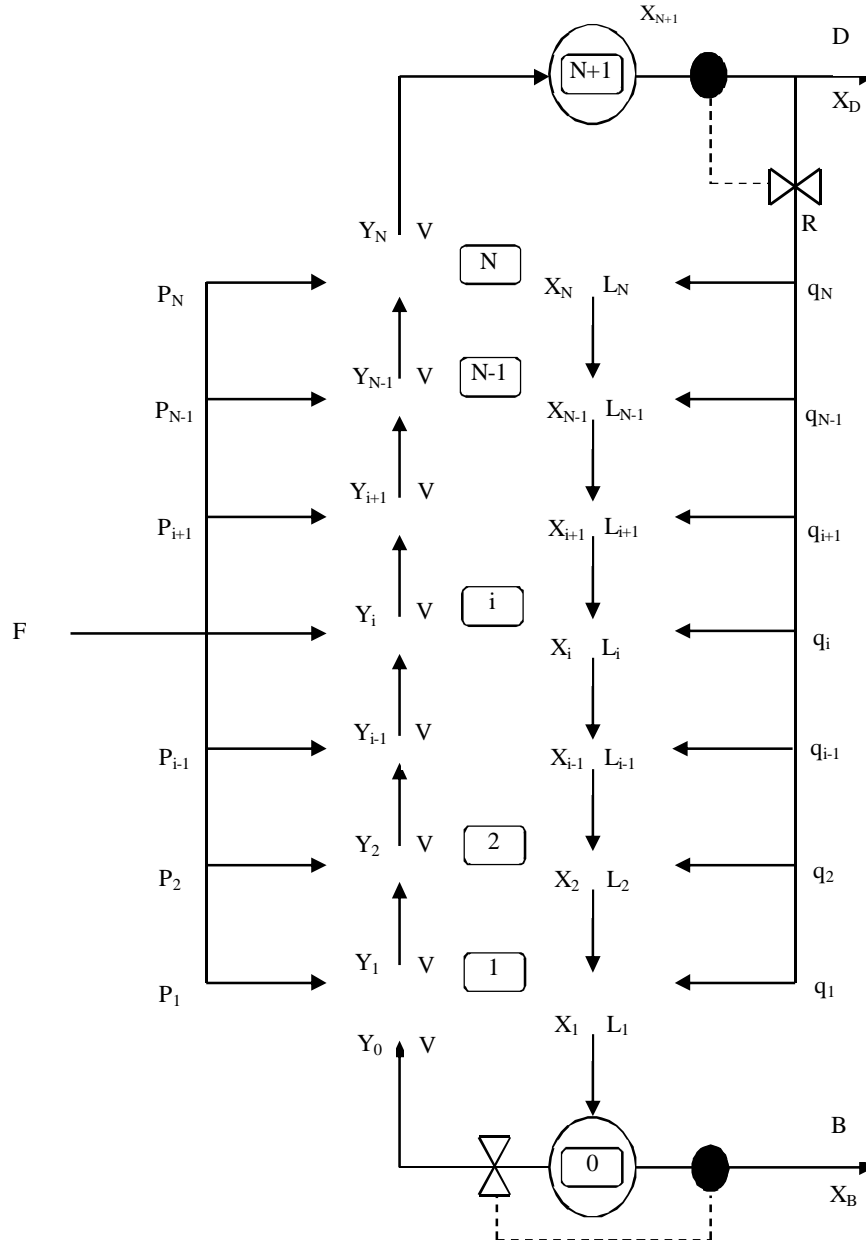


FIGURA 1. Diagrama del Proceso (Superestructura)

TABLA 1. Variables para la Formulación del Modelo Matemático

Descripción	Nomenclatura	Unidades	Tipo de Variable
Existencia de alimentación en la bandeja i	$p_i$	N/A	Entera
Existencia de reflujo en la bandeja i	$q_i$	N/A	Entera
Almacenamiento de líquido de la bandeja	M	kmol/min	Invariante en el tiempo
Constante de tiempo hidráulico de la bandejas	$\beta$	N/A	Invariante en el tiempo
Razón de reflujo en el estado estacionario	R <sub>ss</sub>	kmol/min	Invariante en el tiempo
Vaporizado en el estado estacionario	V <sub>ss</sub>	kmol/min	Invariante en el tiempo
Diámetro de la columna	D <sub>c</sub>	m	Invariante en el tiempo
Ganancia controlador vaporizado	K <sub>v</sub>	kmol/min	Invariante en el tiempo
Ganancia controlador reflujo	K <sub>R</sub>	kmol/min	Invariante en el tiempo
Constante de tiempo controlador vaporizado	$\tau_v$	min	Invariante en el tiempo
Constante de tiempo controlador reflujo	$\tau_R$	min	Invariante en el tiempo
Composición del líquido,	X <sub>i</sub>	N/A	Dinámica
Composición del vapor	y <sub>i</sub>	N/A	Dinámica
Caudal de flujo del líquido en cada bandeja	L <sub>i</sub>	kmol/min	Dinámica
Caudal de flujo de fondo	B	kmol/min	Dinámica
Caudal de flujo de destilado	D	kmol/min	Dinámica
Vaporizado o caudal de vapor	V	kmol/min)	Dinámica
Caudal de flujo del reflujo	R	kmol/min	Dinámica
Error cuadrático integral	$\mu$	min <sup>2</sup>	Dinámica
Número total de bandejas	N <sub>t</sub>	N/A	Entera
Término integral controlador reflujo destilado	I <sub>D</sub>	min <sup>2</sup>	Dinámica
Término integral controlador residuo	I <sub>R</sub>	min <sup>2</sup>	Dinámica

Fuente: Schweiger C., Floudas C.(1997)

TABLA 2. Parámetros que se Asumen Constantes en el Problema

Descripción	Parámetro	Valor
Flujo molar de alimentación	F	1kmol/min
Fracción molar de F	z	0,45
Volatilidad relativa	$\alpha$	2,5
Fracción molar destilado	$x_D$	$\geq 0,98$
Fracción molar residuo	$x_B$	$\leq 0,02$
Fugacidad	$ff$	0,8
Peso molecular	MW	92kg/kmol
Densidad del líquido	$\rho_L$	883 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del vapor	$\rho_V$	2,9 kg/m <sup>3</sup>
Calor latente de vaporización	$\Delta H_{vap}$	0,031 x 10 <sup>6</sup> kJ/kmol
Calor latente de condensación	$\Delta H_{cond}$	0,032 x 10 <sup>6</sup> kJ/kmol
Coefficiente de costo de utilidad	$c_{lps}$	6,1 x 10 <sup>5</sup> (\$/min)/(10 <sup>6</sup> kJ año)
Coefficiente de costo de utilidad	$c_{cw}$	1,5 x 10 <sup>4</sup> (\$/min)/(10 <sup>6</sup> kJ año)
Factor de impuesto	$\beta_{tax}$	0,4
Período de retorno de la inversión	$\beta_{pay}$	4 años
Altura sobre el vertedero	$h_{\ominus}$	0,0254 m

**Fuente:** Luyben, M., Floudas C.,(1996).

TABLA 3. Clasificación de las Variables del Proceso

Notación	Descripción
<b>V</b>	Variables de decisión invariantes en el tiempo
<b>Y</b>	Variables enteras
<b>z(t)</b>	Variables de estado dinámico
<b>u(t)</b>	Variables de control o variables de decisión dependientes
<b>t</b>	Tiempo
<b>ti</b>	Instante de tiempo

**Fuente:** Schweiger C., Floudas C.(1997)

El modelo completo de la columna de destilación binaria se describe a continuación:

- Balance por Componentes en el Calderin

$$M_R \frac{d_{XB}}{dt} = L_1(x_1 - x_B) + V(x_B - y_B) \quad (1)$$

- Balance por Componente en el Plato

$$M_R \frac{d_{Xi}}{dt} = L_{i+1}(x_{i+1} - x_i) + V(y_{i-1} - y_i) + p_i(z - x_i) + q_i r(x_D - x_i) \quad (2)$$

- Balance por Componente en el Condensador

$$M_C \frac{d_{XD}}{dt} = V(y_N - x_D) \quad (3)$$

- Balance Total en el Calderin

$$\beta \frac{dB}{dt} = L_1 - V - B \quad (4)$$

- Balance Total por Plato

$$\beta \frac{dL_i}{dt} = L_{i+1} - L_i + p_i F + q_i R \quad (5)$$

- Balance Total en el Condensador

$$\beta \frac{dD}{dt} = V - R - D \quad (6)$$

- Equilibrio en el Calderin

$$y_B = \frac{\alpha x_B}{1 + x_B(\alpha - 1)} \quad (7)$$

- Equilibrio por Plato

$$y_i = \frac{\alpha x_i}{1 + x_i(\alpha - 1)} \quad (8)$$



- Controladores PI, las expresiones matemáticas se muestran a continuación:

$$\frac{dI_B}{dt} = x_{B,m} - x_B^* \quad (9)$$

$$\frac{dI_D}{dt} = x_{D,m} - x_D^* \quad (10)$$

$$V_C = V_{SS} + K_V (x_{B,m} - x_B^*) - \frac{K_V}{\tau_V} I_B \quad (11)$$

$$R_C = R_{SS} + K_R (x_{D,m} - x_D^*) - \frac{K_R}{\tau_R} I_D \quad (12)$$

- Control Final Queda:

$$0,9 \frac{dV}{dt} = V_C - V \quad (13)$$

$$0,5 \frac{dR}{dt} = R_C - R \quad (14)$$

- Las siguientes expresiones se tomaron de la publicación de A. Floudas 1997 Interaction of Design and Control Optimization with Dynamic Models, las restricciones para el proceso establecido, primero la función objetivo se relaciona con los costos de diseño y utilidades a través de la siguiente expresión matemática:

$$\begin{aligned} \text{cost} &= \beta_{\text{tax}} \text{cost}_{\text{util}} + \text{cost}_{\text{cap}} / \beta_{\text{pay}} \\ \text{cost} &= 7756V_{SS} + 3,075(615 + 324D_C^2 + 486(6 + 0,76N_t)D_C) + 61,25N_t(0,7 + 1,5D_C^2) \end{aligned} \quad (15)$$

- La expresión matemática de la función objetivo que relaciona la controlabilidad del sistema es:

$$\frac{d\mu}{dt} = t(x_D - x_D^*)^2 + t(x_B - x_B^*)^2 \quad (16)$$

#### 4. RESULTADOS

El objetivo primordial que se persigue con el diseño del proceso objeto de estudio es determinar las dimensiones físicas óptimas (diámetro, número de bandejas y ubicación de la alimentación) de la columna de destilación binaria para el sistema descrito y los parámetros de entonación del controlador asociados al control de las composiciones de los productos de fondo y destilado de la columna para que se lleve a cabo efectivamente la separación de los componentes de la mezcla binaria. El diseño que se propone obtener deberá ser óptimo tanto a los criterios económicos como a la controlabilidad del proceso garantizando una operación factible.

Los objetivos están representados por “El Costo total” y “El error cuadrático integral” (ISE), denotado con la letra “ $\mu$ ”.

Al ser el Diseño Integrado, un problema de optimización, los objetivos se traducen en:

- Minimizar el costo total, que es el objetivo de diseño de procesos y simultáneamente,
- Minimizar el ISE, que es el objetivo de la controlabilidad dinámica.

Para resolver este problema multiobjetivo se convierte uno de los objetivos en restricción  $obj_j \leq \varepsilon$ , en este caso el error cuadrático integral pasa a formar parte de las restricciones no lineales del problema, lo que implica resolver el problema MINLP-DAE a diferentes valores de  $\varepsilon$  que van desde el óptimo controlable hasta el óptimo económico, en este punto el problema multiobjetivo se convierte en un problema de programación no lineal con ecuaciones algebraico diferenciales.

La restricción del control del sistema sería entonces:

$$\mu \leq \varepsilon \quad (17)$$

El problema de control óptimo entero mixto (MIOCP) se transforma hasta un problema de programación no-lineal con restricciones algebraicas y diferenciales (MINLP/DAE) por aplicación de una técnica de parametrización de control.

El algoritmo MINLP/DAE se implementa en una herramienta computacional para el análisis de la interacción entre el control y el diseño. La solución de los problemas MINLP/DAE son repetidos con valores diferentes de  $\varepsilon$ . Los resultados deberán mostrar cuantitativamente la interacción entre los objetivos económicos del estado estacionario y el objetivo de controlabilidad dinámica, en la Figura N° 2, se muestra el algoritmo para la resolución de este tipo de planteamiento matemático:

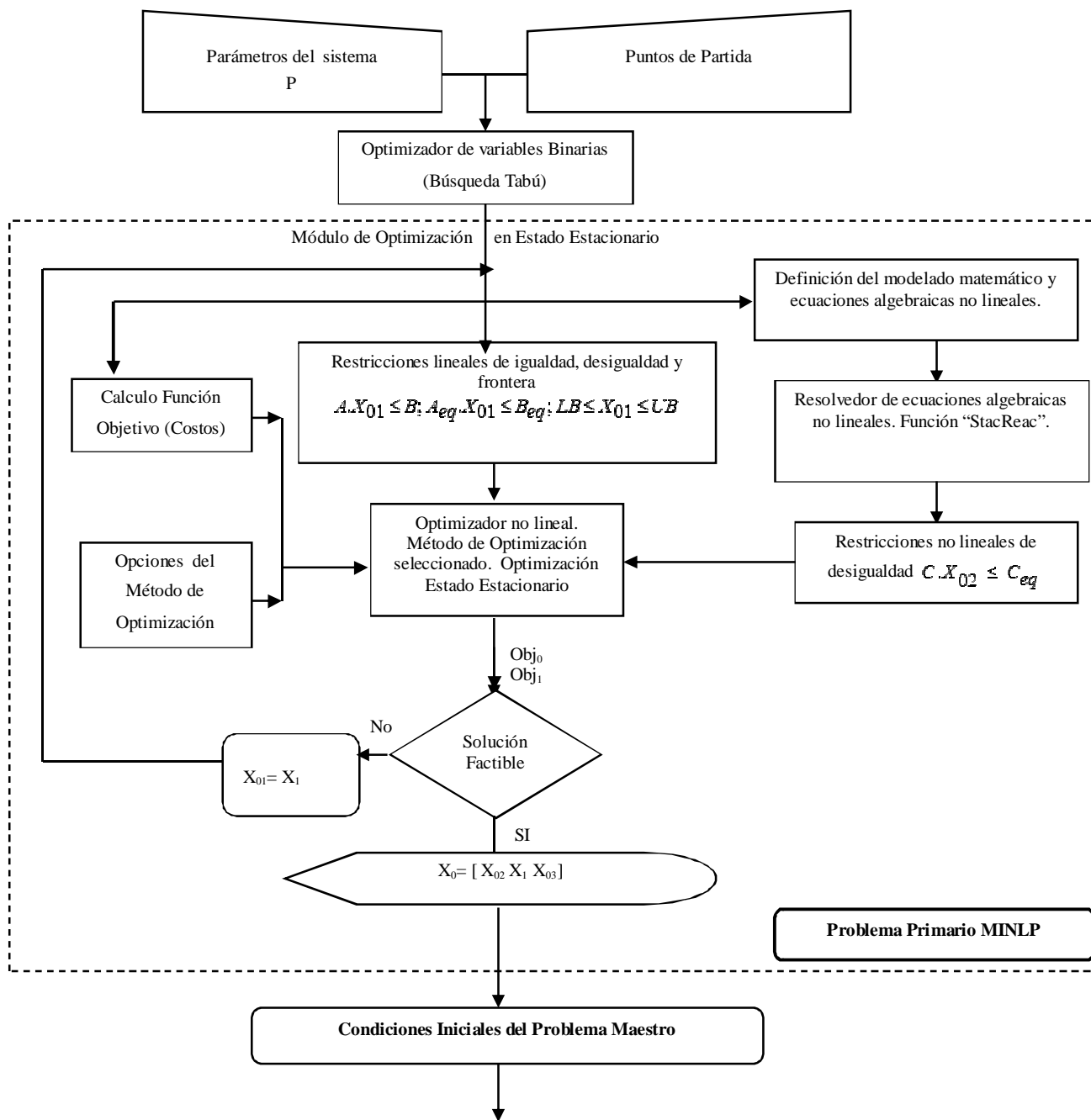


FIGURA 2. Algoritmo para resolver problemas NLP-DAE

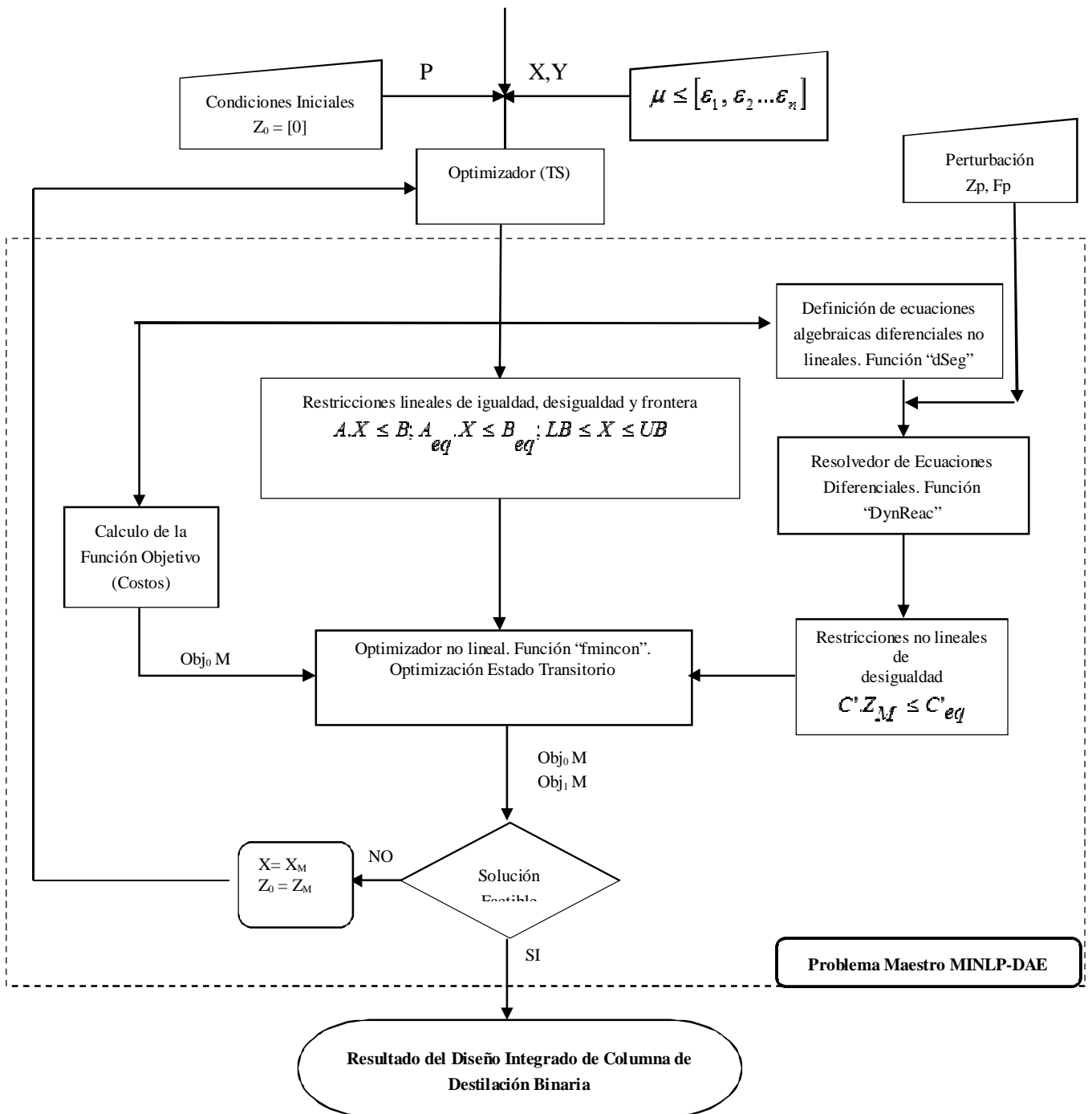
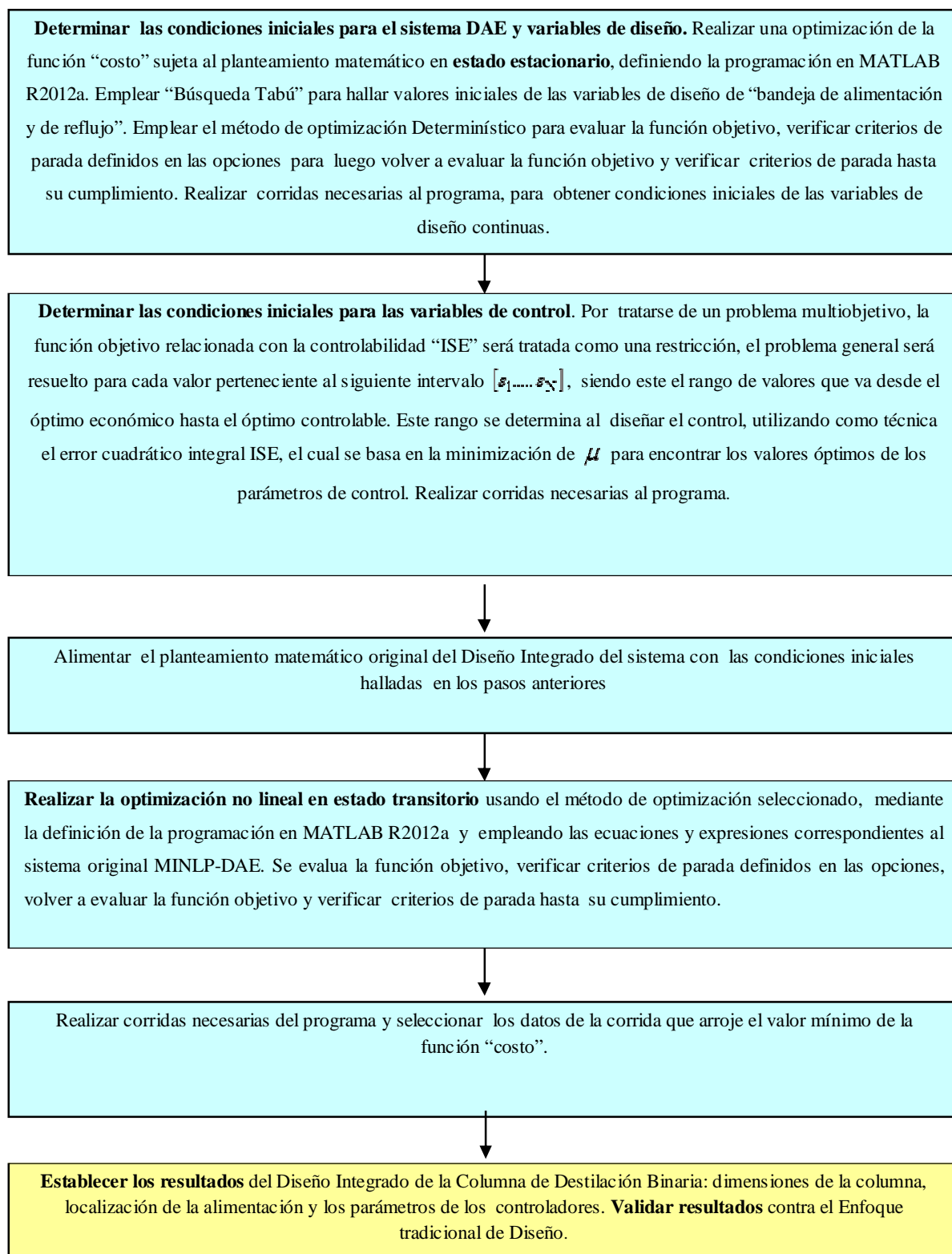


FIGURA 3. Continuación. Algoritmo para resolver problemas NLP-DAE

En la figura N° 4 se presenta la estructura algorítmica en forma de Diagrama de bloques para un mejor entendimiento del mismo:



**FIGURA 4.** Diagrama de Bloques de la estructura algorítmica para la resolución del problema de Diseño Integrado de columnas de destilación binaria

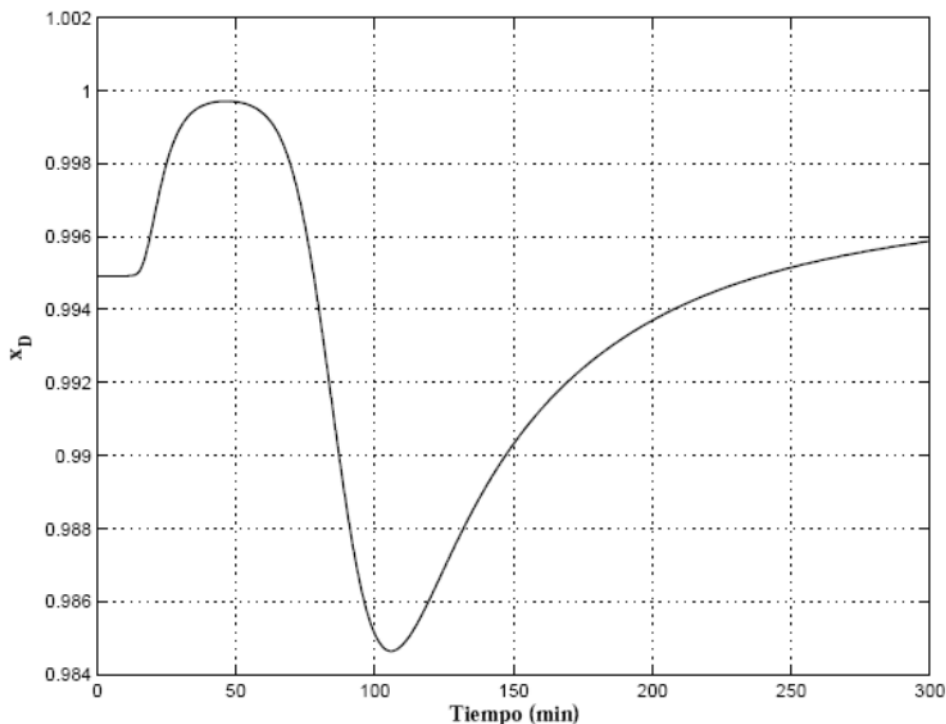


**TABLA 4.** Comparación de resultados del Diseño Integrado de una columna de destilación binaria obtenido mediante métodos de optimización determinístico y Algoritmo Genético.

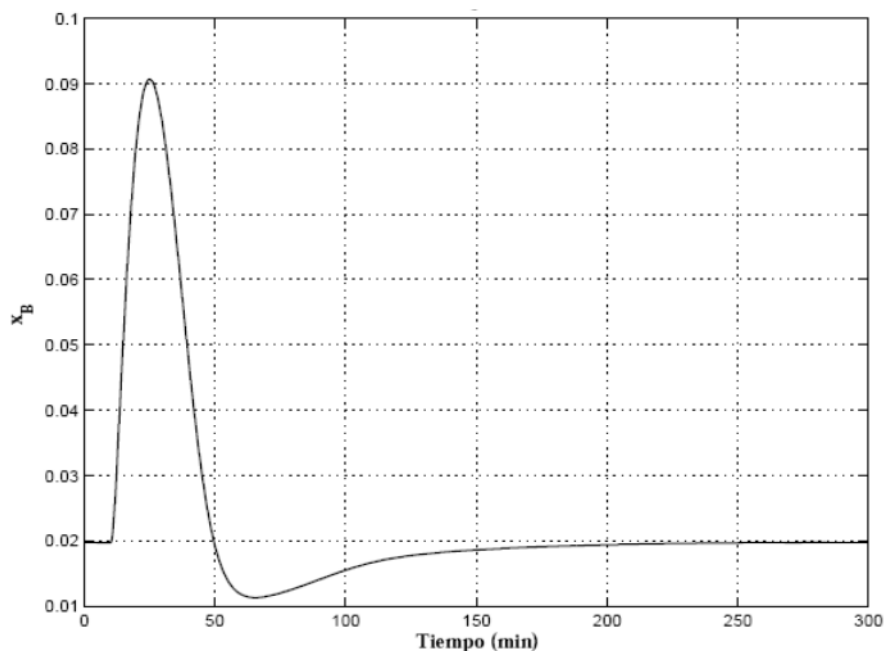
<b>VARIABLES DE DISEÑO</b>				
<b>Parámetro (unidades)</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Unidades</b>	<b>Determinístico</b>	<b>AG</b>
Numero total de platos	Nt	(N/A)	31	28
Plato de alimentacion	Tf	(N/A)	10	7
Diametro de la columna	Dc	(m)	0,7142	0,74393
Flujo de destilado	D	(kmol/min)	0,68401	0,78467
Flujo de Vapor	Vss	(kmol/min)	1,1299	1,2259
<b>VARIABLES DE CONTROL</b>				
<b>Controlador flujo de vapor</b>				
Ganancia	$k_v$	(kmol/min)	-0,0002163	-0,00056615
Constante de tiempo	$\tau_v$	min	0,0031379	0,0064452
<b>Controlador flujo de destilado</b>				
Ganancia	$k_R$	(kmol/min)	-0,19109	-0,1677
Constante de tiempo	$\tau_R$	min	14,5211	14,9725
<b>COSTOS DEL SISTEMA</b>				
Costo Capital	Cc	(\$)	36.731,7645	35.395,469
Costo Utilidad	Cu	(\$)	8.763,3532	9.507,9515
Costo Total	Cost	(\$)	45.495,1177	44.903,4205
<b>SIMULACION EN ESTADO ESTACIONARIO</b>				
Flujo de Destilado	D	(kmol/min)	0,44122	0,44122
Flujo de Residuo	Rss	(kmol/min)	0,55878	0,55878
Fraccion de A destilado	$x_D$	(N/A)	0,99494	0,99494
Fraccion de A Residuo	$x_B$	(N/A)	0,01972	0,01972
<b>SIMULACION EN ESTADO TRANSITORIO</b>				
Flujo de Destilado	D	(kmol/min)	0,44122	0,54258
Flujo de Residuo	Rss	(kmol/min)	0,55878	0,45741
Fraccion de A destilado (liquido)	$x_D$	(N/A)	0,99494	0,99587
Fraccion de A Residuo (liquido)	$x_B$	(N/A)	0,01972	0,01979
Termino-integral controlador residuo	$I_R$	(min <sup>2</sup> )	1,376	1,0983
Termino integral controlador reflujo destilado	$I_D$	(min <sup>2</sup> )	-0,39569	-0,42275
ISE	$\mathcal{E}$	(min <sup>2</sup> )	5,9473	3,0624

La primera diferencia en el empleo de ambos métodos se observa en los valores de las variables de diseño. Cuando se emplea “Determinístico” como función de optimización el número de platos totales es de 31 y el diámetro es 0,7142 m, mientras que al usar “AG” se obtiene un diseño de una columna con menor número de bandejas (28), pero de diámetro mayor (0,74393 m). Diseñando con AG, el costo total disminuye en unos \$591,7, atribuido a un menor valor en la inversión inicial, por presentar número de bandejas menor a pesar de una diferencia ligeramente superior en el diámetro de la columna.

Los flujos de vapor y destilado tienden a ser ligeramente mayores cuando el diseño integrado se hace mediante Algoritmos Genéticos, mientras que las diferencias para la composición de destilado y residuo son prácticamente despreciables.



**FIGURA 6.** Respuesta Dinámica de la composición del destilado. Diseño Integrado mediante Algoritmos Genéticos.

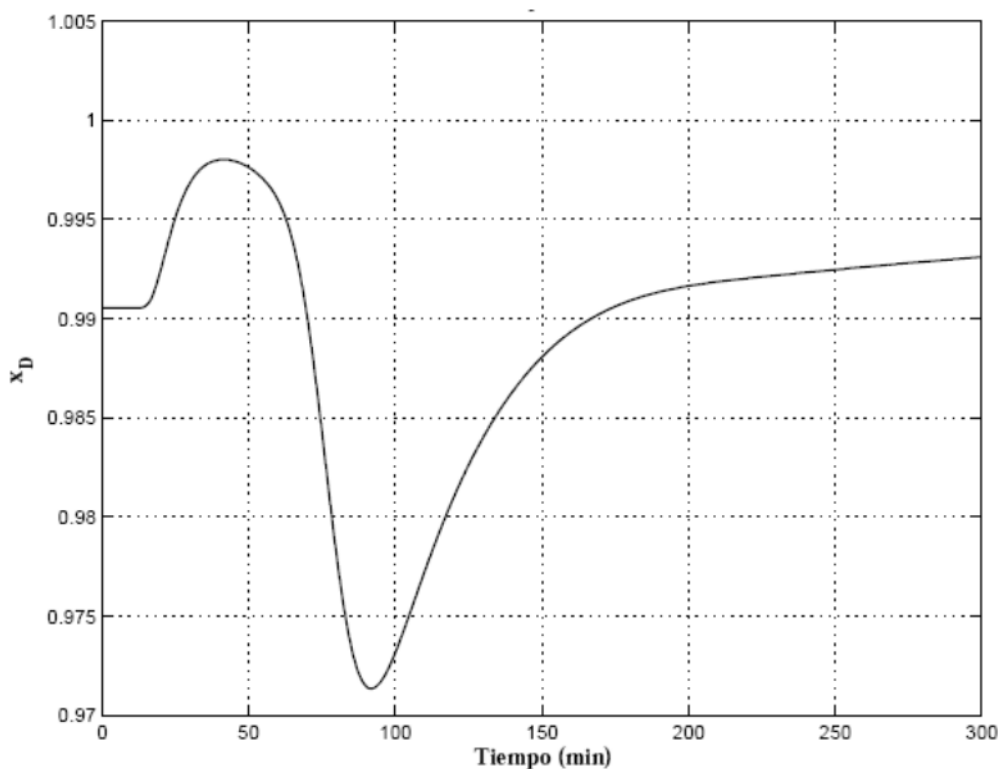


**FIGURA 7.** Respuesta Dinámica de la composición del residuo o fondo. Diseño Integrado mediante Algoritmos Genéticos.



La figura 6 muestra a lo largo del período de simulación de aproximadamente 5 horas, como se va estabilizando la composición del destilado cuando el sistema es sometido a una perturbación tanto del flujo como de la composición de la alimentación. El valor mínimo de la pureza de destilado se observa que alcanza un sobreimpulso al valor de 0,985, manteniéndose siempre por encima del valor de restricción. Similarmente ocurre en la curva de fracción molar de destilado mostrada en la figura 7. La composición del residuo se mantiene en 0,02 cuando para un tiempo de asentamiento de una (1) hora de operación.

El Diseño Integrado encontrado para la columna de destilación planteada, efectúa una separación idónea de los componentes y simultáneamente ejerce un control adecuado sobre la composición de los productos manteniendo la estabilidad y controlabilidad del sistema.



**FIGURA 8.** Respuesta Dinámica de la composición del destilado. Diseño Integrado mediante Determinístico.

## 5. CONCLUSIONES

- El estudio sistemático de la aplicación de diferentes técnicas de optimización al diseño integrado de columnas de destilación, ejecutado en éste trabajo proporciona dos estrategias metodológicas efectivas para obtener la solución óptima de una columna de destilación cuya alimentación es un líquido saturado de una mezcla binaria con un rehervidor del tipo parcial y un condensador total.
- La mejor solución al problema del Diseño Integrado de una columna de destilación binaria se obtiene mediante el uso de métodos de optimización metaheurísticos para resolver las variables binarias y los métodos estocásticos, explorando de forma exhaustiva el espacio de soluciones y minimizando los costos totales de diseño, control y operación del proceso.
- Las estrategias metodológicas aplicadas al Diseño Integrado de una columna de destilación binaria, involucran el uso de la Búsqueda tabú (TS), Método del Gradiente y Algoritmos Genéticos (AG).
- Cuando se emplea “*fmincon*” como función de optimización el número de platos totales es de 31 y el diámetro es 0,7142 m, mientras que al usar “*ga*” se obtiene un diseño de una columna con menor número de bandejas (28), pero de diámetro mayor (0,74393 m). Diseñando con AG, el costo total disminuye en unos \$591,7, atribuido a un menor valor en la inversión inicial, por presentar un número de bandejas menor.
- Los flujos de vapor y destilado tienden a ser ligeramente mayores cuando el diseño integrado se hace mediante Algoritmos Genéticos, mientras que las diferencias para la composición de destilado y residuo son prácticamente despreciables.
- El sobreimpulso en el comportamiento dinámico de las composiciones de destilado y residuo, cuando se efectúa el Diseño Integrado mediante Algoritmos Genéticos, es menor, observándose en ambos casos que el sistema nunca se desvía de los parámetros superiores e inferiores de control. De ésta manera, el diseño obtenido provee un sistema de separación de productos de alta calidad.
- El uso de Algoritmos Genéticos (AG), en el Diseño Integrado del Sistema presenta el costo total menor y a su vez mayor estabilidad frente a posibles perturbaciones, que el caso del diseño efectuado mediante el método del gradiente.

## 6. REFERENCIAS

- [1] BANSAL y colaboradores, (2000), Simultaneous design and control optimisation under uncertainty, *Computers and Chemical Engineering*, 24, 261-266, (2000).
- [2] Brengel DD, Sieder WD (1992) Coordinated design and control optimization of nonlinear processes. *Comp. Chem. Eng.* 16: 861-886.
- [3] Elhossini, A. y otros. (2010). Strength Pareto Particle Swarm Optimization and Hybrid EA-PSO for Multi-Objective Optimization. School of Engineering, University of Guelph, Guelph, ON, N1G 2W1. Canada. Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Elliot TR, Luyben WL (1995) Capacity-based approach for the quantitative assessment of process controllability during the conceptual design stage. *Ind. Eng. Chem. Res.* 34: 3907-3915.
- [5] Figueroa JL, Bahri PA, Bandoni JA, Romagnoli JA (1996) economic impact of disturbances and uncertain parameters in chemical processes-a dynamic back-off analysis. *Comp. Chem. Eng.* 20: 453-461.
- [6] Gutiérrez G, De Prada C (2003). Diseño Integrado y Síntesis de Procesos Químicos. Universidad de Valladolid. España. 1-6.
- [7] Hongfeng X, y otros. (2009). Large Scale Function Optimization or High-Dimension Function Optimization in Large Using Simplex-based Genetic Algorithm. School of Information Science and Engineering, Central South University, Shangai China.
- [8] Kirkpatrick, S. y otros (1983). Optimization by simulated annealing, Revista "Science", Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- [9] Liu C, y otros. (2009). Image based Reconstruction using Hybrid Optimization of Simulated Annealing and Genetic Algorithm. Shanghai University.
- [10] Luyben ML, Floudas CA (1994) Analyzing the interaction of design and control. *Comp. Chem. Eng.* 18, Nro. 10, 933-969.
- [11] Martínez T, Behar A (2011) Estrategia Híbrida AG-SIMPLEX para la identificación experimental de sistemas. Departamento de Control Automático, Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF) CIE. México.
- [12] Mohideen MJ, Perkins JD, Pistikopoulos EN (1996) Optimal design of dynamic systems under uncertainty. *AIChE J.* 42: 2251- 2272.
- [13] Morari M (1983) Design of resilient processing plants III, A general framework for the assessment of dynamic resilience. *Ind. Chem. Eng. Sci.* 38: 1881-1891.
- [14] Morari M. (1992). Effect of design on the controllability of chemical plants. In J. D. Perkins (Ed.). Preprints IFAC Workshop Interactions Between Process Design and Process Control. 3-16. Oxford: Pergamon Press.
- [15] Morari M, Zafiriou E (1989) Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 488.

- [16] Naraway LT, Perkins JD, Barton GW (1991) Interaction between process design and process control: economic analysis of process dynamics. *J. Proc. Cont.* 1: 243-250.
- [17] Naraway LT, Perkins JD (1993) Selection of control structure based on economics. *Comp. Chem. Eng.*, Vol. 18, 511-515.
- [18] Nishida N, Ichikawa A, Tazoki E (1974) Synthesis of Optimal Process Systems with Uncertainty. *Ind. Eng. Chem. Process.* 13: 209-214.
- [19] Nishida N, Ichikawa A (1975) Synthesis of Optimal Dynamic Process Systems by a Gradient Method. *Ind. Eng. Chem. Process.* 13: 236-242.
- [20] Nishida N, Liu Y, Ichikawa A (1976) Studies in Chemical Process Design and Síntesis II. Optimal Synthesis of Dynamic Process Systems with Uncertainty. *AIChE J.* 22: 539-549.
- [21] PÉREZ, J. y Basterrechea, J. (2005). Contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo. Universidad de Cantabria. Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la obtención del título de Doctor. Santander. España.
- [22] Petcu A, Faltings B (2007). A Hybrid of Inference and Local Search for Distributed Combinatorial Optimization. EPFL, Switzerland.
- [23] Quintana F (2003) Síntesis de Procesos, (Optimización del diseño de Plantas Químicas). Universidad Politécnica de Madrid. España. 184.
- [24] SAKIZLIS y colaboradores, (2004), "Recent advances in optimization-based simultaneous process and control design", *Computers and Chemical Engineering*, 28, 2069-2086, (2004).
- [25] Scenna NJ (1999) *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. Buenos Aires, Argentina. 840 pp.
- [26] Sheffield R (1992) Integrate process and control system design. *Ind. Chem. Eng. Prog.* 88: 30-35.
- [27] Schweiger C, Floudas C (1997), Interaction of Design and Control. Optimization with Dynamic Models. En Hager WW, Pardalos PM (Eds) *Optimal Control Theory, Algorithms and Applications*. Kluwer Princeton, EEUU. 1-2
- [28] Skogestad S (1991) Consistency of steady-state models using insight about extensive variables. *Ind. Eng. Chem. Res.* 30: 654-661.
- [29] Skogestad S, Morari M (1987a) Control Configurations for Distillation Columns. *AIChEJ.* 33: 1620-1635.
- [30] Skogestad S, Morari M (1987b) Design of resilient Processing Plants-IX. Effect of Model Uncertainty on Dynamic Resilience *Chem. Eng. Sci.* 42: 1765-1780.

- [31] Skogestad S, Wolff E (1992), Controllability Measures for Disturbance Rejection. Preprints IFAC-workshop on interactions between design and control. London. 127-132. Edited by Perkins S, Pergamon Press.
- [32] Walsh S, Perkins JD (1996) Operability and control and process synthesis and design. *Adv. Chem. Eng.* 23: 301-402.
- [33] Zhou, Q. y otros. (2009). A Hybrid Optimization Algorithm for the Job-shop Scheduling Problem. Department of Computer Science and Technology Chuzhou University. Chuzhou, China.