

## EVALUATION AND ANALYSIS OF PERFORMANCE IN THE OPTIMIZATION OF PRODUCTION PROCESSES.

### EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN.

Chávez-Segoviano, S.S.<sup>1</sup>, Ayala-Alfaro, M.B.<sup>1</sup>, Aguirre-Figueroa, L.C.<sup>1</sup>, Chavira-Conejo, F.E.<sup>1</sup>, Rangel-Rosales K,<sup>1</sup>,  
Torres-Rodríguez, A.M.<sup>1</sup>, Villarreal-De-Aquino, M.A.<sup>1</sup>, Morales-Rodríguez, R.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato  
Ricardo.morales@ugto.mx

## Resumen

El presente artículo se centra en el desarrollo de una metodología para encontrar el punto óptimo de condiciones iniciales en simulaciones utilizando el método del hipercono latino. La investigación emplea el software de simulación de procesos industriales Aspen Plus, así como la plataforma de programación y análisis numérico MATLAB. El método del hipercono latino es una técnica robusta y eficiente para explorar el espacio de búsqueda multidimensional. Se utiliza para optimizar las condiciones iniciales de un proceso, lo que puede tener un impacto significativo en los costos operativos. Al encontrar las condiciones iniciales óptimas, se pueden lograr resultados más precisos y confiables en las simulaciones posteriores.

**Palabras clave:** Optimización; Hipercono latino;

## Introducción

La eficiencia de una industria depende de la calidad de sus procesos. Las plantas industriales operan bajo escenarios de cambio constante con base en regulaciones económicas y ambientales, así como el desarrollo tecnológico. Esto genera incertidumbres en el proceso, debido a ello, es vital para las industrias estén dispuestas a generar mejoras en el proceso empleando la optimización de estas.

La optimización de procesos surge debido al interés de mejorar, ajustar y proponer nuevos procedimientos, con el fin de incrementar la eficacia y eficiencia en un proceso. Sus principales objetivos están relacionados con la minimización costos de operación y consumo energético, maximización el rendimiento, al igual que la incrementación en la calidad de los productos; por ende, la optimización resulta una de las principales herramientas cuantitativas en la toma de decisiones industriales.

Recientes estudios han corroborado que la implementación de la optimización en procesos industriales de gran escala y de nuevos productos la complejidad de la solución podría aumentar, debido al modelo matemático. Con base en esto, rara vez este tipo de procesos son optimizados.

Optimizar este tipo de proceso de manera convencional, es una tarea que implica gran complejidad en la solución y recurso computacional, por lo cual el emplear la optimización estocástica es de gran ayuda debido a que para este tipo de optimización los parámetros del problema pueden o no ser conocidos con certeza, diferente a lo que ocurre en una optimización convencional. No se conocen sus valores, sólo sus distribuciones y habitualmente se supone que éstas son discretas con un número finito de estados posibles.

En este estudio, se emplea el método del hipercono latino (*Latin hypercube*, LH, por sus siglas en inglés), método que surge como una modificación al método de Monte Carlo, a través del cual es posible analizar la incertidumbre de las variables de entrada en modelos computacionales; el propósito de este método es la obtención de datos que permiten la estimación de un parámetro estadístico mediante un procedimiento aleatorio estratificado. Mediante la aplicación del método del hipercono latino se genera una matriz de casos aislados variando la distribución de los valores para simulación dentro de un intervalo establecido; el dominio de cada variable se divide en intervalos igualmente probables y se elige un valor aleatorio dentro de este, generando así casos independientes y diferentes entre sí. Para este trabajo se estableció 1000 muestras dentro de un rango de  $\pm 5$  % de variación con respecto al valor nominal de cada variable.

La aplicación de este proyecto de optimización se realizará en un caso de estudio la producción de esteroides y biodiesel a partir de aceites vegetales, debido a este proceso es nuevo y de grandes aplicaciones, además de ser económicamente de interés para las industrias Farmacéutica, Alimenticia y de Energías limpias. El proceso general consta de dos secciones: en la primera parte se separan los fitoesteroides de todos los triglicéridos y en la segunda parte se obtiene el biodiesel y glicerol. Este trabajo se centrará en la optimización la sección de producción de biodiesel para encontrar los mejores valores de estas variables para maximizar el rendimiento en las ganancias minimizando el costo de los servicios públicos; esto empleando la combinación de Aspen Plus® y Matlab®.

## Metodología

### CASO DE ESTUDIO

En el presente trabajo se analizó el proceso de producción de biodiesel y glicerol, así como la recuperación del metanol, a partir del aceite de palma, representado en la Figura 1. El proceso inicia con la destilación reactiva en la cual se introduce una corriente de triglicéridos (202, *Trioleína*) la cual reacciona con metanol (201) para producir glicerol y biodiesel (*Metil-palmitato*, *Metil-oleato*) en este mismo proceso los productos son separados y llevados a un proceso de decantación en el cual separa el biodiesel de la mezcla de glicerol y residuos de metanol, este último es separado por medio de una columna de destilación el cual separa por completo estos compuestos. La figura 2 describe la metodología propuesta e implementada en resumen.

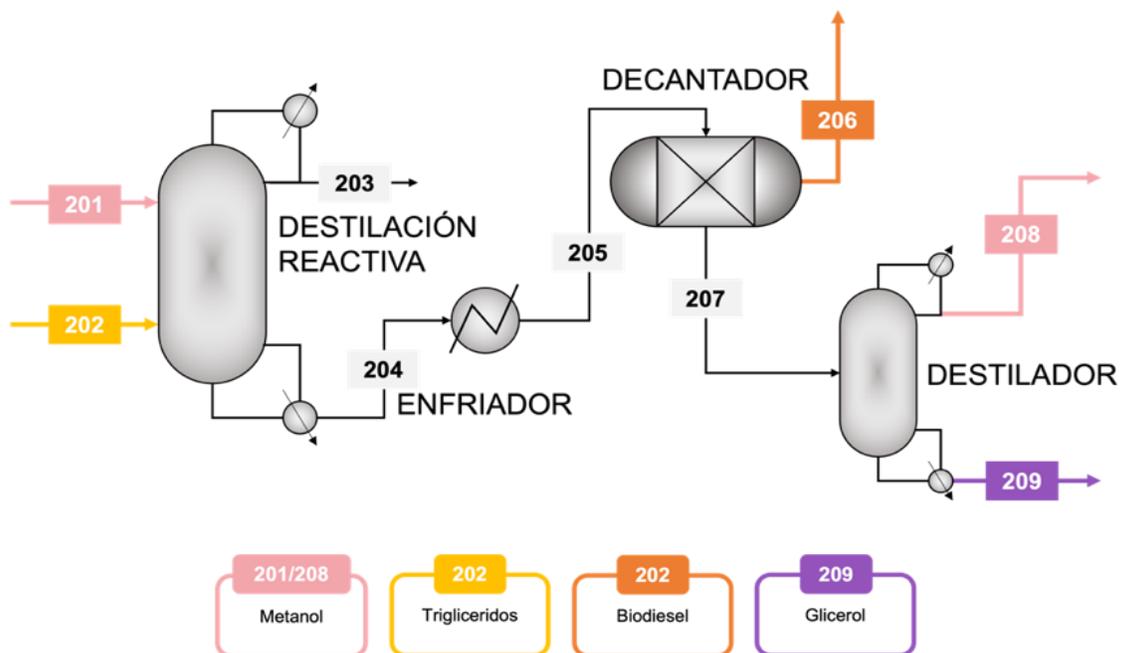


Figura 1 Diagrama de flujo de proceso

**Identificación de las variables de entrada:** Se identificaron y seleccionaron las variables de diseño y operación del proceso de estudio, recopilación y almacenamiento de datos de entrada (valores, unidades) y ubicación de nodos de las variables de entrada seleccionadas y variables de salida desde Aspen Plus®.

**Generación de matriz de incertidumbre de las variables de entrada:** Las variables seleccionadas del paso anterior fueron empleadas para la generación de una matriz de datos aleatorios (Variable x evento) utilizando el programa Matlab®, empleando el método de hipercubo latino en el cual se realizaron 1,000 muestras, con un intervalo de variación del  $\pm 5\%$  a partir del valor nominal de cada variable.

**Simulación de eventos aislados:** Empleando el comando COM, se estableció la conexión entre Matlab® y Aspen Plus®, posteriormente se simuló los eventos generados a partir del paso anterior usando los nodos

los cuales nos permiten escribir y encontrar información desde Aspen Plus® permitiendo así obtener resultados para cada uno de los eventos establecidos en la matriz.

**Recopilación, análisis de los resultados:** A partir de las simulaciones generadas, se realiza la recopilación de datos para generar gráficas, tablas de apoyo para buscar combinación óptima para la obtención del biodiesel y glicerol, la evaluación de resultados consideró no sólo los flujos máxicos de los productos y materias primas, sino que además se contempló la energía necesaria para la operación del proceso, así como sus condiciones, en dichos resultados se contemplan los costos como producto de la optimización, se seleccionó un evento que representase las condiciones que permitiesen una mayor ganancia anual (USD/Año) con el menos costo energético posible (USD/Año).



Figura 2 Metodología de desarrollo del proyecto

## Resultados y discusión

Habiendo analizado el proceso de producción de fitoesteroles, glicerol y biodiesel, en únicamente la sección que involucra la transesterificación del aceite de palma para la obtención de las últimas dos sustancias enlistadas, fueron seleccionadas 14 variables de diseño y operación para las simulaciones que nos llevarán a un proceso optimizado. Se presentan en la Tabla 1, las variables seleccionadas y sus valores nominales.

**Tabla 1.** Valores nominales para las variables seleccionadas

Número de variable	Nombre	Variable	Unidades	Valor nominal
1	T201	TEMPERATURA	°C	65
2	P201	PRESIÓN	Pa	130,000
3	F201	FLUJO	kg/hr	300
4	NEDS01	NÚMERO DE ETAPAS		20
5	RFLXDR01	RELACIÓN DE REFLUJO		1
6	RBLDR	RELACIÓN DE REBOILER		0.6
7	EADR01201	ETAPA DE ALIMENTACIÓN-201		4
8	EACDR01202	ETAPA DE ALIMENTACIÓN-202		8
9	PDR01	PRESIÓN	Pa	100,000
10	PDE	PRESIÓN	bar	1
11	NEDS02	NÚMERO DE ETAPAS		5
12	RFLXDR02	RELACIÓN DE REFLUJO		5
13	EADR02207	ETAPA DE ALIMENTACIÓN-207		3
14	PDR02	PRESIÓN	bar	1

La gráfica de la Figura 3 presenta el resultado de las simulaciones de la variación de valores realizada mediante el método de hipercubo latino, en dicha figura es posible observar que cada punto representa una combinación única de variables de entrada, aquellos recuadros de color gris presentan los eventos simulados mientras que el diamante en color verde representa los resultados a partir de los valores nominales de las variables seleccionadas. El método del hipercubo latino se caracteriza por distribuir estos puntos de manera uniforme y dispersa en el espacio de búsqueda, lo que garantiza una cobertura óptima de todo el dominio de las variables. Esto significa que las interacciones entre las variables son consideradas de manera independiente, lo que proporciona una visión más completa y precisa del comportamiento del sistema estudiado.

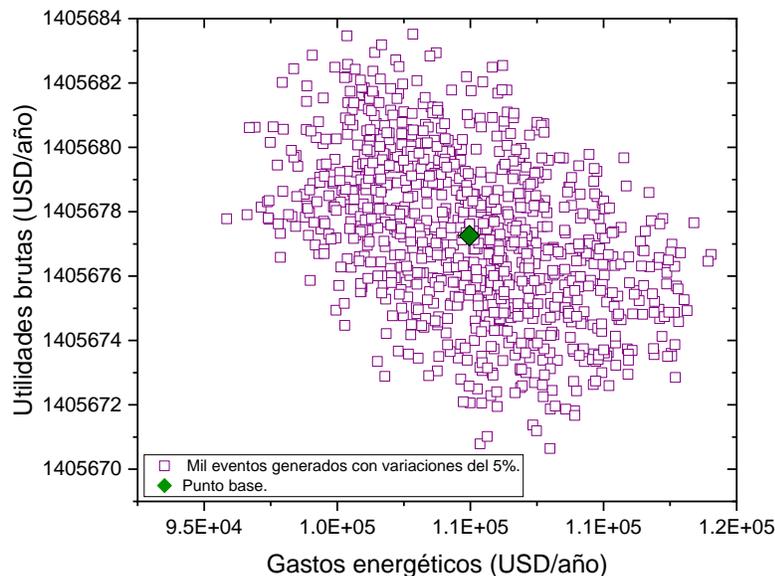


Figura 3 Distribución de datos simulados en comparación con los resultados nominales de simulación 1-1000 eventos

Finalmente, como resultado para la optimización del proceso de estudio se seleccionaron los valores que generan una reducción en el costo energético, así como la maximización de las ganancias, este punto ha sido representado en la Figura 4-5 como *punto óptimo* y los valores para las 14 variables de diseño y operación se presentan en la Tabla 2.

Los resultados arrojaron, en su mayoría, que el aumento de las ganancias no fue significativo, a diferencia de las reducciones de costos energéticos obtenidos, los cuales disminuían substancialmente. Bajo este criterio se eligieron los valores de simulación que generaban la mejor reducción de costos de operación como los óptimos. Para un análisis desarrollado, se compararon los valores nominales y los obtenidos como óptimos en la simulación evaluando no sólo los flujos máxicos de los productos y materias primas, sino que además se contempló la energía necesaria para la operación del proceso, así como sus condiciones de operación y algunas variables de diseño de los equipos utilizados para este proceso.

En la Figura 4 se expone aquellos eventos simulados con una utilidad bruta mayor a la generada por los valores nominales, en recuadros de color celeste se indican dichos eventos con mayor utilidad bruta, mientras que tanto en la Figura 4 como en la Figura 5 se presenta al punto base (diamante en color verde) y al punto óptimo (estrella en color rojo). Los eventos que presentan una mejoría en la utilidad bruta constituyen un 50.2 % de los eventos simulados; por otro lado, en la Figura 5 se estudian aquellos eventos que generan una minimización en los gastos energéticos del proceso comparados con los valores nominales, los eventos que cubren dicha restricción son el 49.9% de los eventos totales simulados y se indican en la Figura en color azul.

La variación de los valores nominales y óptimos se presenta en la Tabla 2, donde se pueden observar aumentos de temperatura para la entrada de metanol (+4.81 %), además de aumentos y disminuciones de presión para la corriente de metanol (+1.68 %), la primera columna de destilación reactiva (+2.36 %) y la

segunda columna de destilación (-2.17 %). Así mismo, se puede ver que las etapas de alimentación en ambas columnas permanecen constantes, a diferencia de los radios de reflujo y reboiler que para la primera columna aumentarán y disminuirán respectivamente (+4.10 % y -2.50 %) mientras que, para la segunda columna, sólo disminuye el radio de reflujo (-2.54 %) además de aumentar el número de etapas únicamente para la primera columna (+5.00 %).

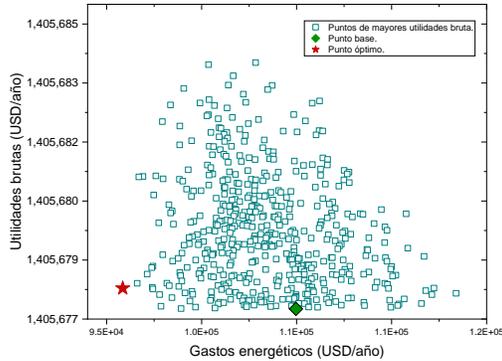


Figura 4 Gráfico de los eventos de mayor utilidad bruta comparado con el punto nominal original.

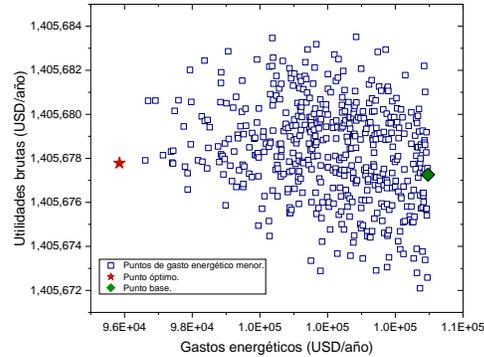


Figura 5 Gráfico de los eventos de menor gasto energético comparado con el punto nominal original.

**Tabla 2. Valor óptimo y su variación con respecto a los valores nominales**

Variable	Unidades	Valor nominal	Valor óptimo	Variación
TEMPERATURA-201	°C	65	61.88	4.81%
PRESIÓN-201	Pa	130,000	132,185.61	1.68 %
FLUJO-201	kg/hr	300	305.65	1.88 %
NÚMERO DE ETAPAS DR-01		20	21	5.00 %
RELACIÓN DE REFLUJO DR-01		1	1.04	4.10 %
RELACIÓN DE REHERVIDOR DR-01		0.6	0.59	2.50 %
ETAPA DE ALIMENTACIÓN-201		4	4	2.48 %
ETAPA DE ALIMENTACIÓN-202		8	8	1.93 %
PRESIÓN DR-01	Pa	100,000	102,357.57	2.36 %
PRESIÓN DE	bar	1	0.96	4.36 %
NÚMERO DE ETAPAS DR-02		5	5	0.00 %
RELACIÓN DE REFLUJO DR-02		5	4.87	2.54 %
ETAPA DE ALIMENTACIÓN-207		3	3	0.32 %
PRESIÓN DR-02	bar	1	0.98	2.17 %

**Tabla 3. Impacto sobre los costos y las ganancias.**

	Valor nominal	Valor óptimo	Variación
Costo energético \$	104,964.07 \$	95,848.17	8.685 %
Ganancia neta \$	1,405,677.26 \$	1,405,677.78	0.000 %

## CONCLUSIÓN

La optimización de procesos es una herramienta muy útil para la disminución de costos y aumento de ganancias, en este proyecto se puede observar cómo con ayuda de programas computacionales como Aspen Plus® y Matlab® es posible simular procesos para encontrar alternativas de operación que cumplan con los objetivos deseados de producción, costos de operación además de ganancias generadas. En futuros estudios, el intervalo de variación de cada variable podría modificarse para así crear una matriz de incertidumbre distinta que permita el análisis del comportamiento de los valores resultantes.

A pesar de que el intervalo de variación de los valores nominales no superó el 5.00 %, el impacto sobre los costos operativos por año superó una disminución del 8.00 %, que, si bien depende de la oferta de materias primas y costos energéticos, es una excelente proyección. Para encontrar nuestro punto óptimo, el cuál era el objetivo de este proyecto, se realizaron 1,000 iteraciones trabajando en conjunto con dos softwares, Aspen Plus® y Matlab®, dichas iteraciones tardaron alrededor de 2 horas.

Con los resultados obtenidos podemos apreciar una reducción considerable de los costos energéticos de aproximadamente el 8.00 %, y una variación cercana de ganancias del 0.00%, lo que nos indica que nuestra optimización funciona de mejor manera cumpliendo con los principios de ahorro energético, pues en la industria una de las mayores preocupaciones es el hecho de ahorrar energía pues actualmente el mercado de combustibles de donde se genera dicha energía, se ha disparado por la situación global actual, es necesario que la industria vele por optimizar y actualizar los procesos.

La metodología es innovadora y eficiente para la optimización de condiciones iniciales mediante el método del hipercubo latino, aplicado en simulaciones con Aspen Plus® y Matlab®. Los hallazgos ofrecen una valiosa herramienta para la mejora de la precisión y la eficiencia en la simulación de procesos industriales, lo que puede tener un impacto positivo en diversos campos de la ingeniería y la investigación.

## Bibliografía/Referencias

- Faurrieta Ortiz, N., Valdez Peña, S. I., & Botello Rionda, S. (2014). *Optimización Topológica de Estructuras con Algoritmo de Estimación de Distribución*.
- Huntington, D. E., & Lyrintzist, C. S. (1998). Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling. In *Prob. Engng. Mech* (Vol. 13, Issue 4).
- Luque Rodríguez, Susana., & Vega Granda, A. B. (2005). *Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos*. [Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, Universidad de Oviedo].
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers and Geosciences*, 32(9), 1378–1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>
- Puerres Tipas, J. F., Ibarguen Mondragón, E., & Cerón Gómez, M. (2021). Aplicaciones del método de hipercubo latino para la estimación de parámetros de modelos matemáticas desde una perspectiva pedagógica. *Revista Boletín Redipe*, 10(5), 208–219. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i5.1298>
- Pushkala, S. P., & Panda, R. C. (2023). Design and analysis of reactive distillation for the production of isopropyl myristate. *Cleaner Chemical Engineering*, 5, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100090>
- Wu, M., Pei, Z., Sun, W., Wu, H., Sun, Y., Wu, B., Zhou, W., Luo, F., & Lu, W. (2023). Age-related reference intervals for serum phytosterols in children by gas chromatography-mass spectrometry and its application in diagnosing sitosterolemia. *Clinica Chimica Acta*, 540. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2023.117234>