VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Análisis Operativo, de Instrumentación y de Control de un Proceso de Purificación de la Industria Tequilera basado en un Estrategia Sistemática Empleando Herramientas Computacionales.

Operational, Instrumentation and Control Analysis for a Purification Process in the Tequila Industry based on a Systematic Strategy Using Computational Tools.

Leonardo Arturo Hernandez-Patlan, Sandra Vanessa Martinez-Gutierrez, Maria José Dominguez-Gómez, Giussepi Alí Jhonatan Mamani Paco, Ricardo Morales-Rodriguez*.

[1]SYNAPSE, Systematic Novel Approaches for Process Systems Engineering, Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.
*ricardo.morales@ugto.mx

Resumen

La producción de tequila requiere procesos de destilación eficientes para garantizar la calidad del producto y optimizar el consumo de recursos. En este estudio se desarrolló la combinación de herramientas computacionales mediante la integración de Aspen Plus V15 y MATLAB para el análisis de un proceso de purificación de tequila. A través de un algoritmo de simulación se modificaron automáticamente las variables de operación, se evaluaron múltiples escenarios y se obtuvieron las principales variables de salida del proceso. Los resultados evidenciaron que el flujo de alimentación, el flujo de vapor y la fracción de recirculación constituyen las variables con mayor influencia sobre el desempeño de la columna de destilación. Estos hallazgos proporcionan información útil para el diseño de estrategias de operación, instrumentación y control orientadas a incrementar la eficiencia del proceso de purificación.

Palabras clave: Tequila; Aspen Plus V15; Matlab; Simulación; Análisis de sensibilidad.

Introducción

El tequila es un símbolo de identidad cultural profundamente ligado a la historia, tradición y orgullo nacional mexicano. El Tequila es una bebida destilada elaborada a partir de la fermentación y posterior destilación de azúcares de Agave *tequilana Weber* variedad azul. Para que un producto pueda llevar legalmente el nombre "Tequila", su elaboración debe cumplir estrictamente con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012. *(Cámara Nacional de La Industria Tequilera, s. f.)*. El tequila constituye un pilar de la industria agroalimentaria, con una producción nacional de agave cercana a 1.6 millones de toneladas anuales, donde Jalisco aporta aproximadamente el 75% de la producción nacional, lo que trajo una ganancia en el estado de 24.6 mil millones de pesos. (*Importancia de La Industria Tequilera En México | HSBC México*, 2023)

Dentro del proceso de producción, la destilación constituye una de las operaciones más importantes, ya que permite la separación y purificación del alcohol etílico y de los compuestos responsables de las características sensoriales del tequila. El desempeño de esta etapa depende de diversas variables de operación, como el flujo de alimentación, la cantidad de vapor suministrado al rehervidor y la fracción de recirculación, las cuales influyen directamente en la pureza del destilado, el rendimiento del proceso y el consumo energético.

En los últimos años, el empleo de simuladores de procesos ha adquirido gran importancia en la ingeniería química, ya que permiten analizar y optimizar procesos industriales sin intervenir directamente en la planta. Entre estas herramientas destaca Aspen Plus, ampliamente utilizado para modelar operaciones de separación y evaluar el comportamiento de procesos bajo diferentes condiciones de operación. Asimismo, la integración de Aspen Plus con MATLAB permite automatizar simulaciones, ejecutar análisis de sensibilidad y procesar grandes cantidades de información de manera eficiente mediante el uso de algoritmos computacionales.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

El empleo de este tipo de herramientas computacionales permite proponer escenarios de mejora en la operación y diseño de los procesos. Por lo tanto, en este trabajo tiene como objetivo desarrollar una estrategia computacional basada en la integración de Aspen Plus V15 y MATLAB para el análisis de operación de una columna de destilación usada en la producción de tequila, evaluando el efecto de las principales variables de operación en el desempeño del proceso, propuesta de instrumentación y control en el proceso.

Metodología

La estrategia metodológica propuesta se organizó en cinco etapas principales, como se observa y detalla en la Figura 1.



Figura 1 – Metodología propuesta e implementada en la investigación.

Resultados

Recopilación y procesamiento de información Experimental.

La primera etapa de la metodología consistió en recopilar, organizar y analizar la información necesaria para desarrollar un esquema de simulación confiable de la columna de destilación. Esta fase fue fundamental, ya que la calidad de la simulación depende de la precisión de los datos de entrada.

Como referencia se utilizó el reporte final de estancia profesional: Flores Ferreira, J. J. (2025). Reporte de estancia profesional en la empresa Tequilera Corralejo S.A. de C.V. durante el periodo julio–diciembre 2025 [Reporte de estancia profesional, Universidad de Guanajuato].

Durante esta etapa se recopilaron las condiciones reales de operación de la columna de destilación, incluyendo variables de proceso, condiciones de alimentación (ver Figura 2), flujo de vapor de calentamiento y productos obtenidos.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx



Figura 2 - Composición general de componentes presentes en el mosto para la elaboración de tequila.

El mosto es la mezcla líquida obtenida a partir del agave cocido, la cual constituye la materia prima del proceso de fermentación para la producción de tequila. Durante esta etapa se desarrollan las transformaciones bioquímicas que permiten la formación de etanol y de diversos compuestos responsables de las características finales del destilado.

Desarrollo y validación de la simulación en Aspen Plus
Se desarrolló del modelo del proceso en Aspen Plus V15, donde se realizó la definición de los componentes presentes en la mezcla de alimentación, corrientes del proceso, equipos y condiciones reales de operación. Se empleó el modelo termodinámico NRTL para representar el equilibrio líquido-vapor debido a los componentes presentes en el proceso y el bloque RadFrac para la simulación de la columna de destilación en Aspen Plus V15. Para mejorar la estabilidad numérica y asegurar la convergencia de la simulación, se utilizó el método de Broyden como algoritmo de resolución de las ecuaciones no lineales del proceso. La validación se realizó comparando composiciones, flujos y variables operativas con los datos experimentales del proceso. La Figura 3 muestra el diagrama del proceso en Aspen Plus V15.

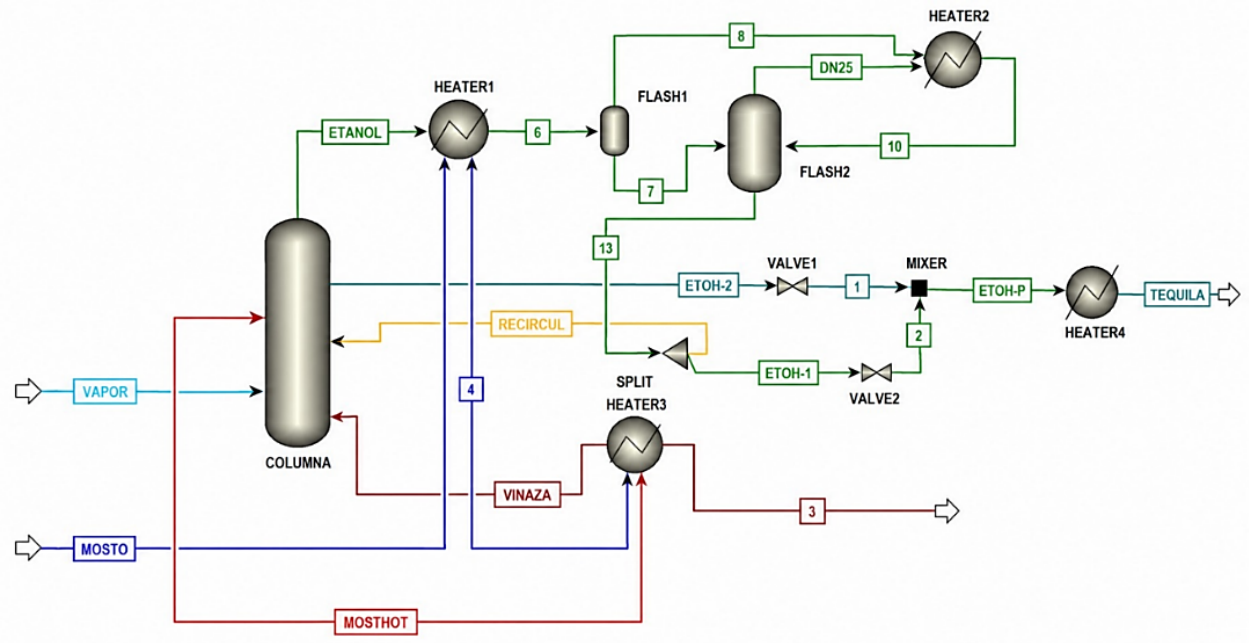


Figura 3 - Diagrama del proceso desarrollado en Aspen Plus.

Integración Aspen Plus–MATLAB

Una vez validado el modelo de simulación en Aspen Plus, se desarrolló un código en MATLAB para automatizar la ejecución de simulaciones mediante una interfaz COM (*Component Object Model*), la cual permitió establecer una comunicación directa entre ambos programas. Esta integración hizo posible modificar automáticamente las variables de entrada del modelo, ejecutar la simulación en Aspen Plus y almacenar los resultados obtenidos para cada escenario.

El algoritmo fue diseñado para generar 1,000 escenarios de operación, realizando variaciones sistemáticas en las principales variables de entrada del proceso: el flujo de alimentación de mosto, el flujo de vapor de calentamiento y la corriente FRAC-ETOH-1 (relación de reflujo). Para cada combinación de estas variables, MATLAB actualizaba los valores correspondientes en Aspen Plus y ejecutaba automáticamente la simulación.

Como variables de respuesta se obtuvieron el flujo volumétrico de tequila producido, su composición en fracciones másicas, con especial interés en la fracción másica de etanol, así como el flujo de la corriente de recirculación hacia la columna de destilación. Todos los datos generados fueron almacenados automáticamente para conformar una base de datos con los 1,000 escenarios simulados.

La automatización del proceso permitió reducir significativamente el tiempo de simulación, además de generar una cantidad suficiente de información para analizar el comportamiento de la columna de destilación, bajo diferentes condiciones de operación y emplear estos datos en las etapas posteriores.

Análisis de sensibilidad

A través del modelo validado en Aspen Plus y automatizado mediante MATLAB, se realizó un análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar el efecto de las principales variables de operación sobre el desempeño de la columna de destilación. Para ello, se generaron 1,000 escenarios de simulación, modificando de manera sistemática el flujo de alimentación del mosto, el flujo de vapor suministrado al rehervidor y la fracción de recirculación mediante el método de muestreo por hipercubo latino. La implementación de esta estrategia de muestreo se realizó tomando como referencia la metodología propuesta por Ponce-Rocha et al. (2023).

Los resultados obtenidos mostraron que el flujo de vapor constituye una de las variables con mayor influencia sobre la concentración de etanol en el destilado.

La Figura 4, presenta la matriz de correlación obtenida a partir de los 1,000 escenarios simulados en Aspen Plus y procesados mediante MATLAB. Esta matriz permite identificar el grado de influencia de las variables de operación sobre las principales variables de respuesta del proceso.

Por lo que el flujo de vapor presenta la mayor correlación positiva con el volumen de tequila producido ($r = 0.89$), indicando que el incremento del suministro de vapor favorece la producción del destilado.

Así mismo, el flujo de alimentación de mosto presenta una correlación positiva importante con las concentraciones de acetaldehído, acetato de etilo y otros alcoholes superiores, lo que indica que las variaciones en la alimentación modifican significativamente la composición del destilado.

En cuanto a la fracción de recirculación, mostró una fuerte correlación positiva con la concentración de etil lactato y una correlación negativa con la fracción másica de etanol.

En conjunto, estos resultados permitieron identificar que el flujo de vapor, el flujo de alimentación del mosto y la fracción de recirculación son las variables críticas del proceso.

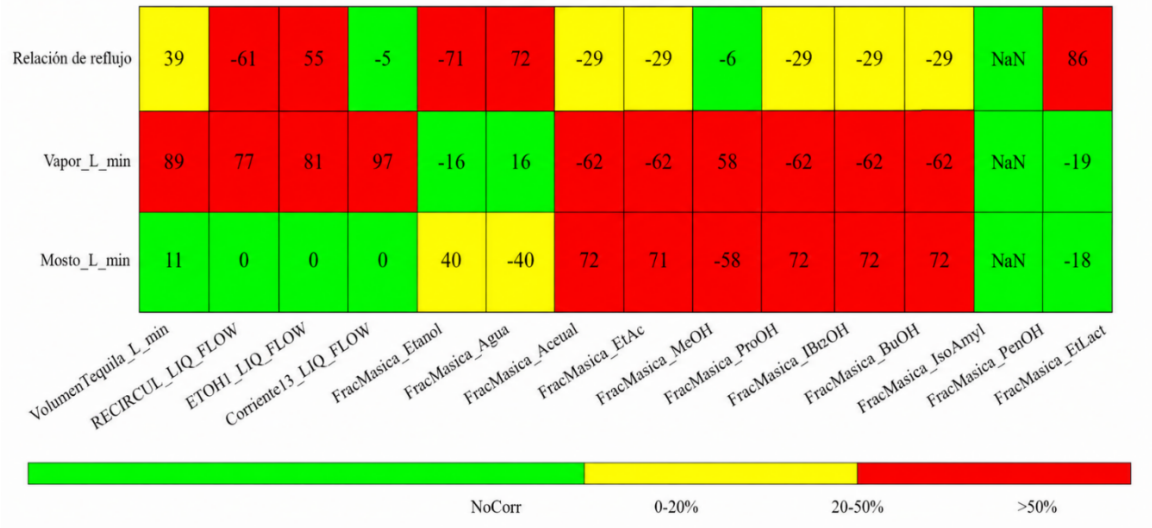


Figura 4 – Matriz de correlación del análisis de sensibilidad de las variables de alto impacto.

Determinación de instrumentación mínima

El análisis de sensibilidad realizado mediante Aspen Plus permitió identificar que las variables con mayor influencia sobre la concentración y el flujo de etanol son el flujo de vapor, el flujo de alimentación de mosto y la fracción de recirculación. Estas variables modifican directamente el equilibrio líquido-vapor y, por tanto, la eficiencia de separación de la columna. Debido a ello, se propone la instalación de válvulas automáticas de control de flujo en estas tres corrientes, con el objetivo de mantener las condiciones óptimas de operación identificadas durante la simulación. Esta estrategia permitirá reducir la variabilidad del proceso, evitar condiciones de inundación de la columna, mejorar la estabilidad del reflujo y del suministro de energía, incrementar la recuperación de etanol y producir un destilado con mayor concentración alcohólica y una calidad más uniforme, además de disminuir el consumo energético y facilitar la operación continua de la columna. Como se muestra en la Tabla 1.

Optimización multiobjetivo mediante frente de Pareto

Con el fin de identificar las condiciones de operación que ofrecen el mejor compromiso entre productividad, pureza del producto y consumo de vapor, se realizó un análisis a partir de las 1,000 simulaciones obtenidas mediante Aspen Plus y MATLAB. Los objetivos considerados fueron maximizar el flujo de tequila y la fracción másica de etanol, así como minimizar el flujo de vapor requerido por la columna de destilación. Las soluciones no dominadas fueron identificadas mediante el criterio de dominancia de Pareto.

La Figura 5 muestra el conjunto de soluciones no dominadas obtenidas durante el proceso de optimización. Cada punto representa una condición de operación para la cual no es posible mejorar simultáneamente los tres objetivos considerados sin deteriorar al menos uno de ellos. Se observa que las soluciones óptimas se concentran en una región caracterizada por altas fracciones másicas de etanol y flujos de tequila relativamente elevados, mientras que el consumo de vapor permanece dentro de un intervalo reducido.

La escala de color corresponde a la relación de reflujo utilizada en cada simulación. Se aprecia que las soluciones con mayor pureza de etanol se obtienen para relaciones de reflujo intermedias, indicando que incrementos adicionales en este parámetro no producen mejoras significativas en el desempeño global del proceso.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 1 - Propuesta de instrumentación mediante válvulas de control de flujo para las variables críticas del proceso de destilación.

CORRIENTE	INSTRUMENTO PROPUESTO	JUSTIFICACIÓN	BENEFICIO ESPERADO	REFERENCIA
VAPOR	Válvula de control de flujo (FCV)	Regula el suministro de energía al rehervidor, manteniendo estable el perfil térmico y el equilibrio líquido-vapor de la columna.	• Mayor recuperación de etanol. • Menor consumo de vapor. • Operación estable y segura.	• Kister (1992). • Perry et al. (2019).
MOSTO (ALIMENTACIÓN)	Válvula de control de flujo (FCV)	Mantiene constante el caudal de alimentación, evitando variaciones en la carga hidráulica y en la eficiencia de separación.	• Mayor estabilidad del proceso. • Uniformidad en la composición del destilado. • Mejor aprovechamiento de la capacidad de la columna.	• Kister (1992). • Luyben (1992).
RECIRCULACIÓN (REFLUJO)	Válvula de control de flujo (FCV)	Controla la relación de reflujo, favoreciendo el contacto líquido-vapor y mejorando la eficiencia de separación.	• Incremento de la pureza del etanol. • Estabilidad en la calidad del producto. • Operación cercana al punto óptimo.	• Skogestad (1997). • Luyben (2006).

La solución resaltada en la Figura 5 corresponde a la condición con la mayor fracción másica de etanol dentro del frente de Pareto. Esta condición presentó una pureza de 0.6446, un flujo de tequila de 6.23 L/min, un flujo de vapor de 2,670.39 L/min y una relación de reflujo de 0.403, representando una de las alternativas más favorables para la operación de la columna.

Optimización multiobjetivo mediante algoritmo genético

Se implementó una estrategia de optimización multiobjetivo mediante el algoritmo genético *gamultiobj* de MATLAB, acoplado con Aspen Plus mediante la interfaz *COM Automation*. Este acoplamiento permitió automatizar completamente el proceso de optimización, de modo que MATLAB modificó las variables de operación directamente en Aspen Plus, ejecutó la simulación, verificó la convergencia del modelo y recuperó las variables de respuesta necesarias para evaluar las funciones objetivo en cada iteración.

El algoritmo genético representa cada solución mediante un individuo, cuyo cromosoma está conformado por las cuatro variables de decisión del proceso (flujo de mosto, flujo de vapor, Prod_ETOH2 y Frac_ETOH1). A partir de una población inicial generada aleatoriamente dentro de los límites establecidos por el análisis de sensibilidad, cada individuo fue evaluado mediante una simulación completa del proceso en Aspen Plus. Los individuos con mejor desempeño presentaron una mayor probabilidad de ser seleccionados para formar la siguiente generación mediante operadores de selección por torneo, cruce intermedio y mutación adaptativa factible, permitiendo explorar continuamente nuevas regiones del espacio de búsqueda sin violar las restricciones impuestas al proceso.

Durante la optimización se empleó una población de 40 individuos y un máximo de 50 generaciones, lo que representó aproximadamente 2,000 simulaciones del modelo de Aspen Plus. En cada evaluación, el algoritmo buscó maximizar simultáneamente el volumen de tequila producido y la fracción másica de etanol. Debido a que la función *gamultiobj* está formulada como un problema de minimización, ambas funciones objetivo fueron transformadas mediante su valor negativo antes de ser evaluadas por el algoritmo. Asimismo, las simulaciones que no alcanzaron convergencia fueron penalizadas asignándoles valores elevados en la función objetivo, evitando que dichas soluciones fueran consideradas durante el proceso evolutivo.

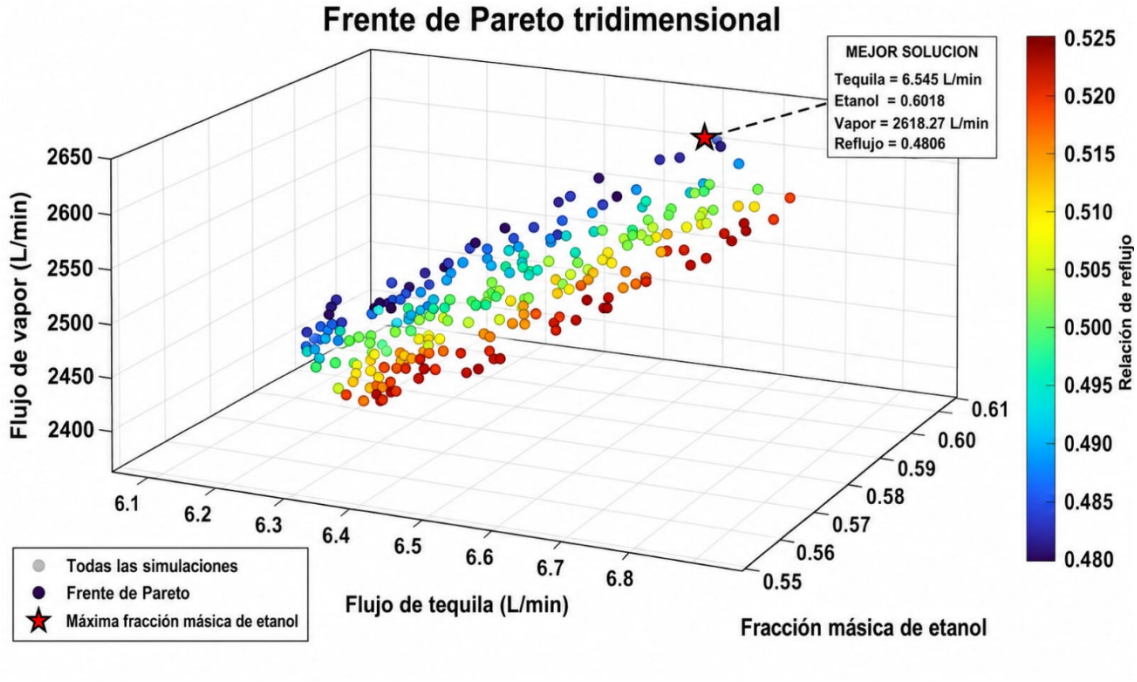


Figura 5 - Frente de Pareto tridimensional obtenido a partir de las simulaciones del proceso.

La evolución del algoritmo mostró una mejora progresiva de las soluciones a lo largo de las generaciones, incrementando tanto la producción de tequila como la fracción másica de etanol respecto al caso base y al escenario seleccionado mediante el análisis de sensibilidad.

Al finalizar la optimización, el algoritmo generó un nuevo frente de Pareto como se muestra en la Figura 6 y Figura 7, integrado por las soluciones no dominadas encontradas durante la búsqueda evolutiva, proporcionando diferentes alternativas de operación entre las cuales fue posible seleccionar la condición óptima de acuerdo con el compromiso deseado entre productividad y calidad del producto.

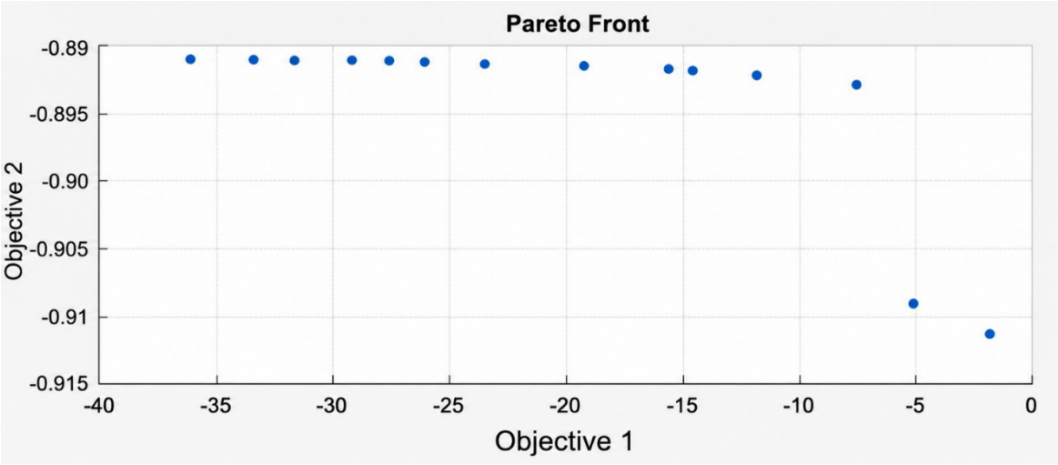


Figura 6 - Caso base, utilizando optimización multiobjetivo con código genético

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

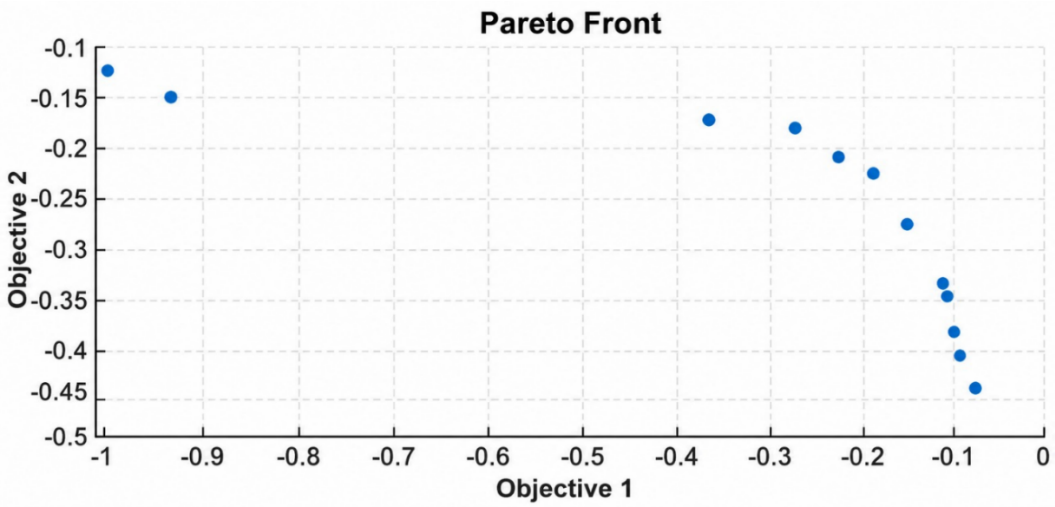


Figura 7 - Mejor escenario del análisis de sensibilidad, utilizando optimización multiobjetivo con código genético.

Con el fin de comparar el desempeño del proceso bajo diferentes condiciones iniciales, el algoritmo genético se ejecutó en dos procesos de optimización independientes: el primero utilizando el caso base y el segundo empleando el mejor escenario obtenido a partir del análisis de sensibilidad como punto de partida. En ambos casos se mantuvo la misma configuración del algoritmo genético, con una población de 40 individuos y un máximo de 50 generaciones, lo que representó aproximadamente 2000 simulaciones del proceso en Aspen Plus por cada ejecución. El tiempo requerido para completar la optimización del caso base fue de 38144.90 s (equivalente a 10 h 35 min 44.90 s), mientras que la optimización iniciada a partir del mejor escenario del análisis de sensibilidad requirió 38304.01 s (equivalente a 10 h 38 min 24.01 s). La comparación entre ambas optimizaciones permitió evaluar la influencia de las condiciones iniciales sobre la convergencia del algoritmo y sobre las soluciones obtenidas, verificando la capacidad del algoritmo genético para explorar el espacio de búsqueda e identificar condiciones de operación con un mejor compromiso entre la producción de tequila y la pureza del etanol.

Tabla 2 - Resultados comparativos de las variables de operación y la recuperación de etanol en los diferentes escenarios de estudio.

Escenario	Flujo de vapor (L/min)	Relación de reflujo (Frac_ETOH1)	Flujo del mosto (L/min)	Flujo de tequila (L/min)	Fracción másica de etanol	Recuperación de etanol (%)
Variables I/O	Input	Input	Input	Output	Output	Output
Caso base	2500.0	0.5	50.0	6.4046	0.5872	98.4900
Mejor escenario del análisis de sensibilidad	2619.3	0.4806	52.4	6.5453	0.6018	98.4400
Óptimo empleando valores del caso base como valores iniciales	2665.8	0.4318	52.7	6.4050	0.6262	98.9100
Óptimo empleando valores del mejor escenario del análisis de sensibilidad como valores iniciales	2670.4	0.4029	53.0	6.2354	0.6445	99.0000

La recuperación de etanol fue superior al 98 % en todos los escenarios evaluados, lo que evidencia una alta eficiencia del proceso de destilación. El escenario óptimo obtenido a partir del mejor resultado del análisis de sensibilidad presentó la mayor recuperación (99 %) y la mayor composición másica de etanol (0.6446), mientras que el escenario óptimo con valores iniciales del caso base alcanzó una recuperación de 98.9 %.

Aunque las diferencias en recuperación fueron menores al 1 %, la optimización permitió incrementar la pureza del etanol sin comprometer significativamente su recuperación, lo que confirma la efectividad de la estrategia de optimización para mejorar el desempeño global del proceso.

Filosofía de control e instrumentación propuesta

Con base en el análisis de sensibilidad realizado y en la identificación de las variables críticas del proceso, se desarrolló una propuesta de filosofía de control para garantizar la operación estable de la columna de destilación y mantener la calidad del tequila producido. La estrategia considera la implementación de controladores de flujo (FIC) en las corrientes de alimentación de mosto, suministro de vapor y recirculación de etanol, debido a que estas variables presentan la mayor influencia sobre la pureza del destilado y el rendimiento del proceso. De manera complementaria, se incorporaron controladores de nivel (LIC) en la columna y en los recipientes de acumulación con el propósito de mantener el nivel de líquido, evitar condiciones de sobrellenado o vaciado y asegurar un suministro continuo hacia las etapas posteriores del proceso. La Figura 8 presenta la filosofía de control propuesta, la cual constituye una estrategia de instrumentación mínima orientada a mejorar la estabilidad operativa, incrementar la recuperación de etanol, reducir la variabilidad del proceso y garantizar una producción continua de tequila con las especificaciones de calidad requeridas.

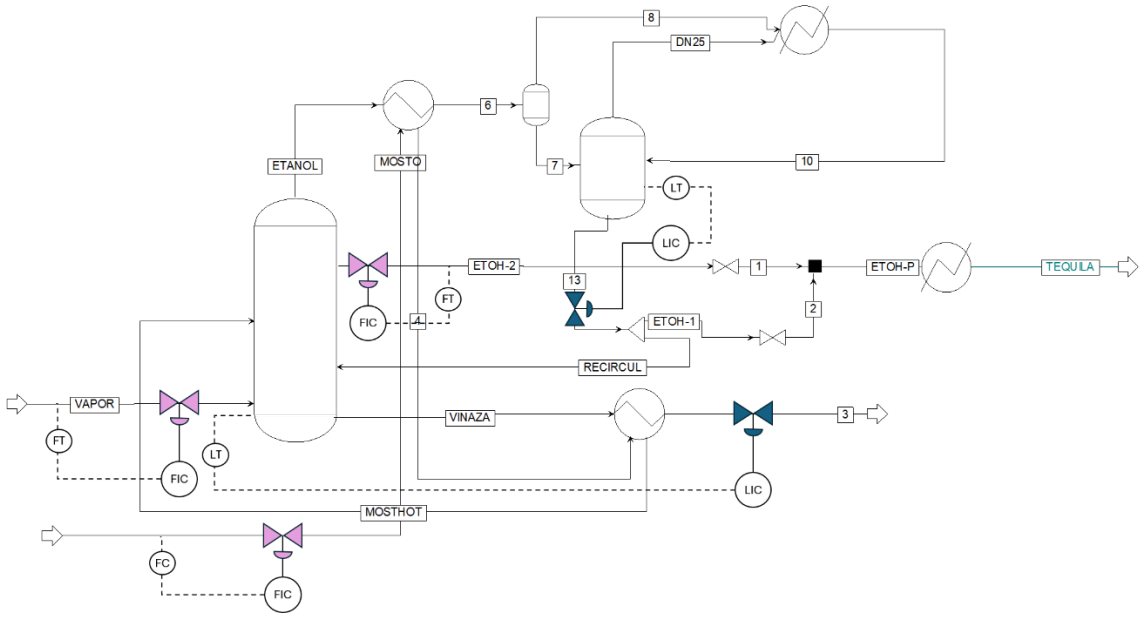


Figura 8 - Filosofía de control propuesta para la columna de destilación del proceso de obtención de tequila.

Conclusión

La estrategia desarrollada mediante la integración de Aspen Plus V15 y MATLAB permitió evaluar de forma sistemática 1,000 escenarios de operación, identificando las variables con mayor influencia sobre el desempeño de la columna de destilación. Los resultados mostraron que el flujo de vapor al rehervidor, el flujo de alimentación de mosto y la relación de reflujo son las variables de operación más importantes, ya que afectan directamente la producción de tequila, la fracción másica de etanol y la composición del destilado.

El análisis de sensibilidad evidenció que el incremento del flujo de vapor favorece la producción de tequila, mientras que las variaciones en el flujo de alimentación modifican la concentración de compuestos como acetaldehído, acetato de etilo, alcoholes superiores y etil lactato. Asimismo, la relación de reflujo mostró una

influencia significativa sobre la pureza del etanol, convirtiéndose en una variable clave para controlar la calidad del producto.

Con base en estos resultados, se propuso la instalación de válvulas automáticas de control de flujo en las corrientes de alimentación de mosto, suministro de vapor y reflujo, al ser las variables críticas identificadas durante el análisis. Esta propuesta busca mantener las condiciones óptimas de operación, reducir las perturbaciones del proceso, mejorar la estabilidad de la columna y facilitar la implementación de estrategias de control orientadas a obtener una mayor uniformidad en la calidad del destilado y un uso más eficiente de la energía.

Finalmente, la optimización permitió obtener una condición de operación con una fracción másica de etanol de 0.6446, una producción de tequila de 6.24 L/min y una recuperación de etanol del 99 %, manteniendo recuperaciones superiores al 98 % en todos los escenarios evaluados. En conjunto, estos resultados demuestran que la metodología propuesta constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones en la operación, instrumentación y optimización de procesos de destilación en la industria tequilera.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Universidad de Guanajuato por el apoyo institucional y el soporte económico otorgado mediante la beca del programa Verano de la Ciencia, el cual hizo posible el desarrollo de esta investigación.

Referencias

1. *Cámara Nacional de la Industria Tequilera. (s. f.). CNIT. https://cnit.org.mx/*
2. *Diagrama de flujo tequila | Diagramas / Diseños aportados por usuarios de Visual Paradigm. (2024, 11 abril). Visual Paradigm Online. https://online.visual-paradigm.com/es/community/share/diagrama-de-flujo-tequila-1q017idlw4*
3. *Flores Ferreira, J. J. (2025). Reporte de estancia profesional en la empresa Tequilera Corralejo S.A. de C.V. durante el periodo julio–diciembre 2025 [Reporte de estancia profesional, Universidad de Guanajuato].*
4. *Importancia de la industria tequilera en México. (2023, 22 septiembre). HSBC México. https://www.empresas.hsbc.com.mx/es-mx/insights/innovation-and-transformation/importancia-de-la-industria-tequilera-en-mexico*
5. *Ponce-Rocha, J. D., Ramírez Márquez, C., & Morales-Rodriguez, R. (2023). Performance analysis of virtual platforms focused on multi-objective process optimization. Computer Aided Chemical Engineering, 52, 843–848. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50135-9*
6. *Mamani-Paco, G. A., Prado-Rubio, O. A., Grisales-Díaz, V. H., Rodríguez-Gómez, D., & Morales-Rodríguez, R. (2026). Method and tool integration for rigorous design and optimization of multiunit processes. Industrial & Engineering Chemistry Research, 65(3), 1268–1276. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c03370*