

Propuestas de mejora en la columna de rectificación de alcohol en la Ronera Santa Cruz del Norte

Lídice Fernández-Hernández^{1,2*}, Simara González-Pérez¹, Saydi Borrego-Barrionuevo², Guido Riera-González^{2**}

1. Ronera Santa Cruz del Norte

Calle Cuba Libre, No.1, Santa Cruz del Norte. Mayabeque, Cuba

2. Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE)

Calle 114, No. 11901, Marianao. La Habana, Cuba

* lidice.fernandez@cubaron.co.cu

** guido@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Introducción. La destilería de la Ronera Santa Cruz del Norte tiene como propósito mejorar el proceso de rectificación de alcohol flema, para incrementar su eficiencia y productividad.

Objetivo. Establecer, mediante análisis de procesos, una alternativa tecnológica en la columna rectificadora de alcohol en la Ronera Santa Cruz del Norte, que permita aumentar la producción.

Materiales y métodos. El estudio se realizó en un intercambiador de calor que calienta la extracción de una corriente de alcohol, extraída del plato 15 y reincorporada al plato 13, de la columna rectificadora. Se analizaron dos variantes y se optó por la segunda, en la que se evaluó el intercambiador utilizado para el calentamiento de la corriente que se extrae y se reincorpora a la misma columna, se simuló con el programa Hysys v10.0 y se seleccionaron los módulos de cálculo que representan las operaciones involucradas en el proceso.

Resultados y discusión. Por una parte, la metodología aplicada para la evaluación del intercambiador, la comparación entre los cálculos manuales y los resultados obtenidos de la simulación para comprobar el ajuste del modelo a los balances de masa y energía y su posterior validación, por otra parte, permitieron demostrar los beneficios de la modificación propuesta en la columna rectificadora, al incrementar la alimentación al sistema y su productividad, con un coeficiente de variación menor al 5 %, además de mostrar la confiabilidad de los cálculos.

Conclusiones. Se obtuvo el esquema de simulación del intercambiador de calor, como modificación propuesta en la columna rectificadora. Se comprobó con cálculos manuales y, posteriormente, se validó con datos reales, con error menor al 5 %. Se demostró un aumento en el flujo de alimentación al proceso y se cumplió con el índice de consumo de alcohol flema, siempre por debajo de 1.1050, valor establecido, y con una eficiencia por encima del 94 %.

Palabras clave. Columna rectificadora, simulación, intercambiador de calor.

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the research carried out at the Ronera Santa Cruz is to improve the phlegm alcohol rectification process carried out in the distillery, in order to increase its efficiency and productivity.

Objective. To establish, through process analysis, a technological alternative in the alcohol rectifying column at the Santa Cruz Rum Factory that will allow for increased production.

Materials and methods. The study is carried out in a heat exchanger that heats an extraction of an alcohol stream extracted from plate 15 and reincorporated into plate 13 of the rectifying column. Two variants were analyzed, choosing as possible to apply the second one, in which the exchanger used for heating the stream

that is extracted and reincorporated into the same column was evaluated and simulated using the Hysys v10.0 program, selecting the calculation modules that represent the operations involved in the process.

Results and discussion. The methodology applied for the evaluation of the exchanger and the comparison between the manual calculations and the results obtained from the simulation to check the adjustment of the model to the mass and energy balances and its subsequent validation, allowed to demonstrate the benefits of the proposed modification in the rectifying column, by increasing the feed to the system and its productivity, with a coefficient of variation less than 5 % demonstrating the reliability of the calculations.

Conclusions. In the investigation, the simulation scheme of the heat exchanger was obtained as a proposed modification in the rectifying column. Checked with manual calculations and subsequently validated with real data, obtaining errors less than 5 % and demonstrating an increase in the feed flow to the process, complying with the phlegm alcohol consumption index always remaining below 1,1050 which is established and reaching an efficiency above 94 %.

Keywords. Rectifying column, simulation, heat exchanger

INTRODUCCIÓN

El etanol es un líquido de origen natural, que se obtiene de la fermentación de los azúcares naturales (1, 2, 3) o, al hidratar el etileno, que es un compuesto orgánico formado por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno. Se caracteriza por ser totalmente transparente, un rasgo que le permite disolverse en agua. Fue el primer derivado obtenido industrialmente, a partir de un subproducto de la agroindustria cañera: miel de caña o melaza. Su tecnología de producción es muy conocida y casi todos los países cultivadores de caña lo producen, en mayor o menor escala (4). En Cuba, los mayores esfuerzos se centran en la producción de alcohol para la industria farmacéutica y alimentaria.

El empleo de alcohol para estas actividades impone normas de calidad muy rigurosas, por lo que el control de la calidad de los insumos y los alcoholes finales toma especial relevancia. Obtener alcoholes competitivos para el mercado mundial impone un control exigente sobre los parámetros de producción que incluyen, principalmente, los procesos de fermentación (5, 6), destilación y almacenamiento de las producciones; e, incluso, con el aumento de la tecnificación en el cultivo de la caña podrían existir factores inhibidores que dañaran la calidad del producto terminado, como: herbicidas, fertilizantes, fango y otros, de ahí que se deba estar atento a cualquier eventual deterioro de las producciones finales (7).

El sistema de producción de alcohol en la destilería de la Ronera Santa Cruz del Norte, Corporación Cuba Ron fue concebido, integralmente, a partir de miel fermentada y contaba con un gran número de medidas de ahorro de energía, así operó de 1982 a 2001, momento en que la corporación decidió concentrar, en esta destilería, toda la producción de aguardiente fresco y en otras destilerías del sistema se realizó la producción de alcohol fino. Durante ese período de paralización (hasta 2018) el sistema de alcohol sufrió un gran deterioro; pues, por necesidades de la producción, muchas partes y equipos fueron usados como piezas de repuesto en otros sistemas productivos.

En 2018 se retomó la producción de alcohol en esta destilería, debido a la necesidad de incrementar su disponibilidad, tuvo que realizarse una inversión para poner en funcionamiento el sistema de rectificación de alcohol. Como fluido de calentamiento en cada columna se empleaba vapor saturado, procedente del área energética; pero, en la columna rectificadora, por problemas de altura dividida en dos, (columna LK y RK) se produjeron frecuentes inundaciones, además de un aumento del grado alcohólico en el fondo de la columna RK, que conllevó a altas presiones en la columna rectificadora; por lo que el sistema de rectificación, en general, se desestabilizaba y se desconcentraba (8), de ahí el objetivo de aplicar herramientas de análisis de procesos en la operación, para obtener una propuesta tecnológica que permita aumentar la producción en un 10 %.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso

El calentamiento de las distintas columnas se planificó con vapor saturado procedente de las calderas, como es normal y, así, se realizó la nueva puesta en marcha; durante esta operación y en la posterior, se observó que el tope de la columna LK (zona de agotamiento de la columna rectificadora) se inundaba con frecuencia, esto conlleva un aumento de la presión en la paila de dicha columna, disminución de la temperatura y, como consecuencia, pérdidas de alcohol por el fondo. El análisis del problema llevo a la conclusión de que la condensación del vapor directo en el fondo de RK (zona de concentración de la rectificadora, desde la cual se envía el líquido del fondo al tope de LK) implica un incremento de la cantidad de líquido en el tope de LK, que se hace más significativo cuando la calidad del vapor se ve afectada, por diferentes causas:

- columnas y tuberías de conducción de vapor sin aislamiento térmico.
- el diámetro de la tubería principal para vapor, desde del área energética hasta Destilería está sobredimensionado, pues está calculado para el suministro simultáneo de vapor en la producción de alcohol y aguardiente, aunque solo se realiza una de ellas, por déficits de generación de vapor y de materias primas para la destilería, lo que produce pérdidas de calor y caída de la presión de vapor y condensación,
- frecuentes caídas de la presión de vapor, por consumos bruscos de la fábrica de levaduras Lefersa,
- caídas de la presión de vapor por mala combustión del crudo cubano en las calderas, que implica paradas de estas, para eliminar el crudo derramado no quemado.

En función de lo expuesto, se decidió sustituir el suministro de vapor directo al fondo de la columna RK y para ello se tienen dos alternativas:

1. construir un rehervidor en el fondo de la columna RK,
2. tomar una corriente de alcohol líquido y calentarlo indirectamente, mediante un intercambiador de calor con vapor saturado de calderas.

La alternativa 1 se desecha por su complejidad y no contar con los materiales para su ejecución ni el espacio físico necesario en la instalación. Para la alternativa 2, los equipos se encuentran disponibles, por ello se evalúa mediante simulación. Dadas las facilidades que existen en la columna, en cuanto a instalaciones, se extrae una corriente de alcohol del plato 15, se calienta en el intercambiador de calor y se reincorpora a la columna en el plato 13.

Las características técnicas del intercambiador de calor se presentan en la tabla 1 y en la 2 se presentan las del vapor de calentamiento y las de la corriente de alcohol extraída en el plato 15.

Tabla 1 Datos técnicos del intercambiador de calor

Parámetros	Intercambiador	Parámetros	Intercambiador
Tipo de intercambiador de calor	Tubos y coraza	Espesor de los tubos (mm)	1
Cantidad de tubos	70	Área de transferencia de calor (m ²)	61.48
Longitud de los tubos (mm)	6300	Material	Acero inoxidable
Diámetro de los tubos (mm)	44.4		

Tabla 2 Características y propiedades físicas del vapor saturado y del flujo del plato 15 de la torre rectificadora

Vapor saturado	Valor	Flujo del plato 15	Valor
ti (°C)	111.3	P15 (kg/h)	5004
tf (°C)	111.3	ti (°C)	82
Hvs (kJ/kg)	2693.03	tf (°C)	83.2
Hvs (kJ/kg)	466.92	Cp (kcal/kg°C)	3.63

Algunas propiedades físicas como la capacidad calórica del flujo del plato 15 y las entalpías de evaporación del vapor saturado fueron determinadas por Pérez *et al.* (9, 10); el resto fueron de los reportes diarios de la destilería de la Ronera Santa Cruz del Norte.

Balance de energía

Los balances de masa para flujo total, como por componentes se basaron en que el proceso se encuentra en estado estacionario, por lo que toda la masa que entra es igual a la que sale, como se muestra en la ecuación 1.

$$m_{entra} = m_{sale} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para el cálculo del calor que es capaz de transferir el intercambiador de calor se utilizaron las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$Q = U * A * MLDT \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Q : Calor intercambiado (kJ/h)

U : Coeficiente global de transferencia de calor (kJ/m²h°C)

A : Área de transferencia de calor (m²)

$MLDT$: Media logarítmica de la diferencia de temperatura

Para ello se necesitaba conocer el área de transferencia de calor, que se calcula mediante la ecuación 3.

$$A = \pi * d * L * Nt \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

A : Área de transferencia de calor (m²)

d : Diámetro de los tubos (m)

L : Longitud de los tubos (m)

Nt : Número de tubos

El calor sensible se calcula mediante la ecuación 4.

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Q : Flujo de calor sensible (kJ/h)

m : Flujo (kg/h)

Cp : Capacidad calorífica específica (kJ/kg °C)

ΔT : Diferencia de temperatura (°C)

Con la ecuación 5 se obtiene el calor total que transfiere el intercambiador de calor bajo estas condiciones:

$$Q_{Total} = Q * pérdidas \quad (Ec. 5)$$

Simulación del proceso

La simulación de procesos es una herramienta de análisis muy poderosa para el ingeniero químico, permite realizar estudios y tomar decisiones. En la simulación es vital que el software empleado cuente con modelos que describan, adecuadamente, la operación unitaria productiva bajo estudio (11).

En el desarrollo del estudio se empleó el simulador Aspen Hysys v 10.0 (12) y se siguieron los pasos:

1. se seleccionaron los componentes involucrados,
2. se eligió el paquete para el cálculo de las propiedades físicas por componentes,
3. se elaboró el diagrama de flujo: módulos y corrientes,
4. se definieron los datos de las corrientes,
5. se definieron los datos correspondientes de cada módulo empleado.

Selección de componentes y paquete de propiedades

Para que una simulación sea eficiente y sus resultados confiables, es preciso hacer una buena selección del paquete de propiedades físicas. Por otro lado, es imprescindible definir correctamente los componentes de cada corriente del proceso (13). En el presente caso los componentes se definieron a partir de los reportes de análisis de laboratorio, realizados en la empresa a las diferentes corrientes del proceso. En la tabla 3 se muestra la composición másica seleccionada de la corriente de vapor de agua y de la corriente proveniente del plato 15.

Tabla 3. Composición másica de las corrientes


	Plato 15	Vapor
Componente	Composición (%)	Composición (%)
Agua	12.30	100
Etanol	87.70	-

Para la simulación de las corrientes alcohólicas se empleó el paquete NRTL y para el vapor de agua el ASME Steam.

HERRAMIENTAS DE LA SIMULACIÓN

Para la conformación del modelo de simulación se realizó la selección de los módulos de cálculos, que representan las operaciones involucradas en el proceso. En la tabla 4 se describe el módulo empleado en la simulación.

Tabla 4. Módulo de cálculo utilizado para la simulación del intercambiador

Nombre del módulo	Módulo	Identificación	Descripción
Heat Exchange		Intercambiador	Modela el intercambio de calor entre las dos corrientes

Simulación del intercambiador de calor

Para la simulación del intercambiador de calor se empleó el módulo *Heat Exchange*. Con este módulo se logró simular el proceso de calentamiento por vapor de agua, del flujo proveniente del plato 15, de la torre rectificadora. De esa forma quedó conformado el modelo de simulación. En la figura 1 se muestra el modelo de simulación del intercambiador instalado en el proceso de rectificación de alcohol.

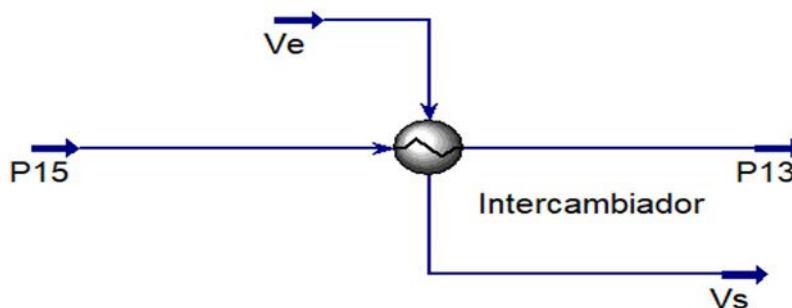


Figura 1. Modelo de simulación obtenido en el intercambiador.

Validación de los modelos de simulación

Esta es una etapa de gran importancia en la simulación de procesos, primeramente, se comprueba que el modelo se ajuste a las condiciones del proceso, al comparar cálculos manuales con resultados de la simulación; posteriormente, se comparan los resultados de la simulación con resultados reales del proceso de producción. En el presente trabajo, en ambos casos, se determinó el error relativo para conocer en qué medida son diferentes los valores comparados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primeramente, se realiza una comparación entre los cálculos manuales y los resultados obtenidos de la simulación, para comprobar si el modelo se ajusta a los balances de masa y energía. Para ello se tomaron 10 juegos de datos. Los resultados se presentan en la tabla 5, se tomó la masa de vapor saturado empleado para calentar el flujo de alcohol.

Tabla 5. Comparación de la masa de vapor entre cálculos manuales y simulación

Cálculos manuales mv (kJ/h)	Simulación mv (kJ/h)	ER %	Cálculos manuales mv (kJ/h)	Simulación mv (kJ/h)	ER %
36.25	36.43	0.505	23.07	23.18	0.494
32.98	33.15	0.522	19.77	19.87	0.501
32.95	33.12	0.511	19.77	19.79	0.096
29.66	29.81	0.518	19.77	19.87	0.501
26.36	26.50	0.526	19.77	19.87	0.501

Como se puede ver en la tabla 5, el error relativo es menor que el 1 % en todos los casos, por lo que se demuestra que la simulación describe correctamente el proceso de intercambio de calor en estudio.

Otro factor a tener en cuenta es el área de transferencia de calor que, por diseño, se calculó mediante la ecuación 3 y arrojó 61.48 m². En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en la simulación del área de transferencia de calor y es comparada con la obtenida por diseño.

Tabla 6. Comparación del área de transferencia de calor entre la simulación y la obtenida por diseño

Área de transferencia de calor por diseño	61.48 m ²	Área de transferencia de calor por diseño	61.48 m ²
Área de transferencia de calor por simulación	ER %	Área de transferencia de calor por simulación	ER %
60.31	1.91	60.31	1.90
60.32	1.89	60.35	1.85
60.31	1.90	60.35	1.85
60.31	1.90	60.35	1.85
60.34	1.86	60.35	1.85

Como se puede observar, el error relativo presente en los resultados de la simulación con Aspen Hysys mostró valores que se encuentran por debajo del 2 %, lo que corrobora los resultados obtenidos anteriormente; además, fundamentan que el módulo seleccionado es capaz de describir correctamente el proceso de intercambio de calor que se está estudiando.

Validación del modelo de simulación

La validación del modelo de simulación se realizó a partir de la comparación de los resultados de la simulación con los datos reales de la planta. Para aceptar un modelo, como válido, el error de validación debe ser menor del 5 %.

Para la validación del modelo de simulación se realizó, en la planta, una corrida de diez días. En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en la simulación del intercambiador de calor.

Tabla 7. Comparación de los resultados para la validación de la simulación del intercambiador de calor

Corridas	Datos reales en planta			Simulación	ER %
	P15 (kg/h)	ti (°C)	tf (°C)	tf (°C)	
1	5250	75	83.00	84.36	1.64
2	5010	75	83.80	84.80	1.19
3	5200	75	83.60	84.46	1.03
4	5300	75	83.20	84.29	1.31
5	5020	75	83.80	84.81	1.21
6	5010	75	83.80	84.66	1.03
7	5010	75	83.00	84.86	2.24
8	5200	75	83.20	84.44	1.49
9	5200	75	83.30	84.44	1.37
10	5200	75	83.25	84.54	1.55

En función de los resultados obtenidos en esta comparación se concluye que, el modelo de simulación obtenido queda validado con un error relativo menor al 2.5 %, en solo un caso el error superó el 2 %, en el resto fue menor.

Con los resultados se comprueba, en la práctica, cómo se desarrolla el proceso en la actualidad, con respecto a etapas anteriores, en las que se había realizado la modificación. Para la comparación se tomaron los resultados de los dos meses anteriores a la instalación del intercambiador y los dos meses posteriores a esta y se analizaron algunos parámetros fundamentales del proceso.

En la tabla 8 se compara la alimentación al proceso. Se puede observar que en los meses posteriores a la instalación del intercambiador, la alimentación aumentó y su coeficiente de variación disminuyó a menos de un 2 %.

Tabla 8. Comparación en la alimentación (kg/h) del proceso

Indicadores	Antes del IC		Después del IC	
	Junio	Julio	Septiembre	Noviembre
Muestras	10	10	10	10
Promedio	2216.6	2133.6	2892.4	2998.0
Coeficiente de variación (%)	6.1	6.4	1.8	1.3

En correspondencia con este incremento hay un aumento en la producción. Los resultados se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación de la producción (kg/h)

Indicadores	Antes del IC		Después del IC	
	Junio	Julio	Septiembre	Noviembre
Muestras	10	10	10	10
Promedio	1988.3	1911.4	2353.8	2744.0
Coeficiente de variación (%)	5.5	6.4	2.5	2.6

En este caso se observa un incremento y mayor estabilidad en los meses posteriores a la realización de la modificación.

Un parámetro importante en el proceso es el índice de consumo. Desde el año 2021 la empresa tiene establecido como índice de consumo 1.1050 hL Alc.Flema 93 °GL/hL de Alc.Fino 95.5 °GL, que estaba afectado por inestabilidades en el proceso. En la tabla 10 se presenta la comparación de este parámetro.

Tabla 10. Comparación de los índices de consumo (hL Alc.Flema 93 °GL/hL de Alc.Fino 95.5 °GL)

Indicadores	Antes del IC		Después del IC	
	Junio	Julio	Septiembre	Noviembre
Muestras	10	10	10	10
Promedio	1.1169	1.1203	1.1020	1.0947
Coeficiente de variación (%)	0.6141	1.3848	0.2421	0.5922

En ambas etapas, la variabilidad es pequeña, pues el coeficiente de variación está por debajo de 1.5 %, la diferencia radica en que, al instalar el intercambiador, se cumple con el índice de consumo establecido, lo que demuestra la estabilidad de la modificación realizada.

Por último, se analiza la eficiencia del proceso, los resultados se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Eficiencia del proceso (%)

Indicadores	Antes del IC		Después del IC	
	Junio	Julio	Septiembre	Noviembre
Muestras	10	10	10	10
Promedio	93.911	93.587	94.352	95.060
Coeficiente de variación (%)	2.169	2.076	0.526	0.774

Según los parámetros mostrados en la tabla 11, con la modificación se produjo una mayor eficiencia en los meses posteriores; además de lograr su estabilidad con coeficientes de variación menores al 1 %.

Análisis económico

Se realiza un análisis económico sencillo, sobre la base de un posible ahorro o sobreconsumo de alcohol flema, en función de los índices determinados. Para los cálculos se utilizó el precio de 13.62 CUP/L para el alcohol flema, valor empleado en la empresa durante los meses en que se realizó el estudio. En la tabla 12 se presentan los resultados.

Tabla 12. Resultados económicos

Mes	Sobreconsumo de alcohol flema (L)	Costos de alcohol flema (CUP)
Septiembre-22	162.00	2207.16
Noviembre-22	680.00	9263.43
Octubre-23	153.00	2080.54
Noviembre-23	168.00	2283.73

Los años 2022 y 2023 se destacan por el ahorro en el consumo, con respecto al índice, este ascendió a 1 5834.86 CUP en los meses analizados. Este resultado muestra que la modificación realizada influyó directamente en la economía de la empresa, pues al obtener una mayor estabilidad productiva se pudieron mejorar los índices de consumo y, por tanto, se logró un ahorro significativo para la planta, desde el punto de vista económico.

CONCLUSIONES

1. Con la simulación en Aspen Plus v10.0 de un intercambiador de calor, modificación propuesta en la columna rectificadora, se demostró que su instalación ofrece beneficios, al aumentar la alimentación del proceso por encima de los 2500 kg/; ya que aumenta la producción y cumple con el índice de consumo de alcohol flema, siempre por debajo de 1.1050 hL Alc.Flema 93°GL/hL de Alc.Fino 95.5 °GL, valor establecido.
2. La eficiencia del proceso aumentó y se mantuvo por encima del 94 %. El análisis económico brindó un ahorro de 1 5834.86 CUP de alcohol flema, entre los meses de septiembre y noviembre de 2022 y de octubre y noviembre de 2023.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albernas, Y.; *et al.* Obtaining superfine ethanol in a Cuban distillery. *Ingeniería e Investigación Journal*. Vol. 32. No. 3. 2012. pp. 47-52. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092012000300010.
2. Suárez, C. *et al.* (2016). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. ICIDCA.
3. Vázquez, H.; Dacosta, O. (2007). Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. VIII (4). 249- 259.

4. Vuong, M. D. (2021). Simultaneous Liquefaction. Saccharification and Fermentation process at Very High Gravity using Cassava flour for ethanol production; Valorization of distillery by-product by Solid State Fermentation for animal feeds [Université de Bourgogne Franche-Comté].
5. Bello, D. *et al.* Fermentación alcohólica con jugo de caña mezclado en “Heriberto Duquesne”. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*. La Habana. 39 (2): p. 29-34. 2005.
6. Tulcán, J. K. C.; Rosero. J. C. T. (2011). Obtención de Alcohol a partir de Jugo de Caña. Cachaza y Melaza. mediante la incorporación de dos Niveles de Fermento. Universidad Técnica del Norte. Ibarra. Ecuador.
7. Díaz, M.; Alonso, D. Estudio sobre la interrelación etanol. levadura torula y producción de biogás. XIV Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados; Junio 26-30; La Habana. Cuba. 2017. <https://www.researchgate.net/publication/318153180>.
8. González, S. Evaluación técnico – económica de la columna de rectificación de alcohol. Trabajo de diploma. Habana. Cuba: Universidad politécnica “José A. Echeverría” de La Habana; 2023.
9. Pérez, O. *et al.* Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (I). Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 52 pp. 47-61. Marzo. 2010.
10. Pérez, O. *et al.* Evaluación de propiedades físicas de mezclas etanol-agua (II). Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 52 pp. 62-74. Marzo. 2010.
11. Carvalho, N. Modelización y simulación de una columna de destilación utilizando nuevos modelos predictivos. Director: Díaz Ismael. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 2017.
12. González, C.; González, M. Simulación de procesos en ASPEN HYSYS®. Curso electivo. In: UN Cuyo. editor. Mendoza. Argentina. 2010. p. 77.
13. Cruz, A. Propuestas de mejoras en la Ronera San José basadas en simulación de procesos. Memoria escrita para optar por el título de Máster en Análisis y Control de Procesos. Universidad politécnica José A. Echeverría, La Habana; 2020.