

Estudio del precalentamiento de la alimentación a la columna destiladora en la Ronera Santa Cruz del Norte

Marí Fernández-Águila^{1, 2 *}, Hansel Riera-Suárez¹, Guido Riera-González²

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, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba

*mfernandez@ronstacruz.co.cu

RESUMEN

Introducción. En la Ronera Santa Cruz del Norte se realizó un estudio en el proceso de aguardiente, ya que en la destilería, la temperatura de precalentamiento del vino fermentado, para alimentar la columna, se encuentra por debajo de la requerida, debido al mal estado del calentavinos, por los años que lleva en explotación.

Objetivo. Proponer una modificación tecnológica para elevar la temperatura de precalentamiento del vino fermentado, que alimenta a la columna destiladora de aguardiente.

Materiales y métodos. El estudio se realiza en los dos intercambiadores de calor, instalados en el lado este del área de destilación, cercanos a la columna destiladora y a ambos equipos, estos presentan las mismas características técnicas. Se analizaron dos variantes, con 10 corridas para cada una, se evaluaron los intercambiadores y se simuló con el empleo del programa Hysys v10.0 y se seleccionaron los módulos de cálculo que representan las operaciones involucradas en el proceso.

Resultados y discusión. La metodología aplicada para la evaluación de los intercambiadores y 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 permitieron seleccionar la variante en la que, aún sin lograr los 80 °C requeridos por diseño, se aumenta en más de 15 °C la temperatura, con la que se trabaja en la actualidad (50 °C), con un coeficiente de variación menor al 1 %, lo que demuestra la confiabilidad de los cálculos.

Conclusiones. En la investigación se obtuvo el esquema de simulación del sistema de intercambiadores de calor, para su uso en el análisis de alternativas en el proceso de precalentamiento de la batición, comprobado con cálculos manuales y, posteriormente, validado con datos reales; se obtuvieron errores menores al 1 % y se demostró un aumento de la temperatura de la batición, antes de ser alimentada a la columna destiladora y del agua de alimentación a calderas, así como la disminución de la temperatura del mosto, que lo hace más amigable con el medioambiente.

Palabras clave. Vino fermentado, mosto, simulación, intercambiador de calor.

ABSTRACT

Introduction. A study was conducted on the liquor process at the Santa Cruz del Norte Rum Factory. The preheating temperature of the fermented wine to feed the column is below the required temperature at the distillery due to the poor condition of the wine heater, which has been in operation for many years.

Objective. To propose a technological modification to raise the preheating temperature of the fermented wine, which feeds the liquor distillation column.

Materials and methods. The study is carried out on the two heat exchangers installed on the east side of the distillation area, close to the distillation column and both pieces of equipment. These have the same technical characteristics. Two variants were analyzed, with 10 runs for each. The exchangers were evaluated and simulated using Hysys v10.0 software, and the calculation modules that represent the operations involved in the process were selected as well.

Results and discussion. The methodology applied for the evaluation of the exchangers 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 the selection of the variant in which, even without achieving the 80 °C required by design, the temperature is increased by more than 15 °C, with which the current work is done (50 °C), with a coefficient of variation less than 1%, that demonstrates the reliability of the calculations.

Conclusions. The research developed a simulation scheme for the heat exchanger system, which was used to analyze alternatives for the preheating process of the beating process. This was verified with manual calculations and subsequently validated with real data. Errors of less than 1% were obtained and an increase in the beating temperature before being fed to the distillation column and the feed water to the boilers was demonstrated, as well as a decrease in the temperature of the must, making it more environmentally friendly.

Keywords. Fermented wine, must, simulation, heat exchanger.

INTRODUCCIÓN

La producción de alcohol, a partir de las melazas (miel B o miel final, como también se le conoce) en la industria, abarca dos aspectos básicos: fermentación y destilación. el primero parte de las características que tienen algunos microorganismos de desintegrar azúcares y generar como residuo alcohol etílico, anhídrido carbónico y otros productos secundarios; y, el segundo, es la etapa en la que el alcohol es separado de la mezcla fermentada. El proceso de producción de alcohol abarca, de forma general, tres grandes etapas: preparación del mosto, fermentación y destilación-rectificación (1, 2).

La fermentación es una etapa principal del proceso, pues en ella se logra el alcohol deseado; por tanto, el logro del rendimiento en esta etapa es de gran importancia, es el aspecto en que se debe realizar mayor énfasis. Esto se logra a través de un conjunto de parámetros que van desde la propia preparación de la materia prima hasta el vital punto del cultivo del microorganismo, que será el encargado de la conversión de los azúcares en etanol (3).

La destilación es la operación unitaria más importante en el proceso de obtención de alcohol etílico, fundamentalmente para la separación de la inmensa cantidad de componentes que acompañan la mezcla obtenida en la fermentación y obtener un líquido lo más homogéneo y con el mayor nivel de pureza posible, lo cual es independiente de la forma en que se lleva a cabo la fermentación. Los tipos y calidades de alcohol dependen de las características y ordenamiento de los equipos de destilación, denominados sistemas, según los cuales se pueden obtener diferentes tipos, desde alcohol crudo hasta alcoholes extrarefinados (4).

En Cuba la mayor utilización de alcohol es en la industria farmacéutica y alimentaria. El empleo del 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. Para obtener alcoholes competitivos en el mercado mundial se debe tener un control exigente sobre los parámetros de producción (5).

El sistema de destilación de aguardiente de la Ronera Santa Cruz del Norte se compone de una columna destiladora, un calentavinos (compuesto por dos intercambiadores de calor), tres condensadores y un sistema de eyectores-tanque expensor. Los años de explotación, las limpiezas químicas que se realizan en el sistema semestralmente y el trabajo diario han provocado el deterioro del calentavinos, que presenta incrustaciones y tubos ponchados; por ello, su estado actual no garan-

tiza la temperatura de precalentamiento que requiere el vino fermentado antes de ser alimentada a la columna destiladora de aguardiente (6). Al principio, el sistema garantizaba una temperatura de alimentación en la batición de 80 °C; actualmente, solo alcanza los 52 °C, lo que provoca mayor consumo de vapor por parte de la columna, para alcanzar el cambio de fase de los componentes volátiles presentes en el vino fermentado.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el empleo de dos intercambiadores de calor, como modificación tecnológica para elevar la temperatura de precalentamiento del vino fermentado (batición) que alimenta a la columna destiladora de aguardiente y disminuir la temperatura del mosto que se vierte al mar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso

El estudio se realiza en los dos intercambiadores de calor (IC), instalados en el lado este del área de destilación cercanos a la columna destiladora, ambos equipos presentan las mismas características técnicas, las que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Datos técnicos de los intercambiadores de calor

Parámetros	IC 1-2	Parámetros	IC 1-2
Superficie del intercambio de calor (m ²)	93,42	Disposición de los tubos	Arreglo en cuadro
Longitud de tubos (mm)	5960	Espaciado de los tubos (mm)	99
Diámetro externo de tubos (mm)	78	Material de los tubos	Cobre
Diámetro interno de tubos (mm)	74	Material de la coraza	Cobre
Espesor de los tubos (mm)	2	Largo del intercambiador (mm)	6000
Número de tubos (-)	64	Número de pases por la coraza	1
Diámetro del intercambiador (mm)	1000	Número de pases por los tubos	8

Los intercambiadores de calor se encuentran instalados en serie. El fluido caliente que se empleará es el mosto (vinaza), para disminuir su temperatura antes de que se vierta al mar, hacerlo menos agresivo al medioambiente y cumplir con la NC 521:2007 (7), y los fluidos fríos son agua de alimentar las calderas de vapor y el vino fermentado para elevar su temperatura antes de entrar a la torre de destilación. Por la coraza circula el fluido caliente y por los tubos los fluidos fríos.

En la tabla 2 se presentan las características de los fluidos que circulan por la coraza y por los tubos, en cada condensador.

Tabla 2. Características y propiedades físicas en el primer condensador (parcial)

Variable	Fluido frío		Fluido caliente
	Agua	Batición	Mosto
Flujo másico (kg/h)	1700-1790	30000-35000	42600
Temperatura de entrada (°C)	25-30	29-34	90-92
Temperatura de salida (°C)	60-69	61-64	50-78

Los cálculos primarios se realizaron mediante balances de masa y energía (8).

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.

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

Balance de energía

Para el balance de energía se emplearon las ecuaciones 2,3,4,5 (9) y (10).

Para el cálculo del calor, que es capaz de transferir el intercambiador de calor, se utilizó la siguiente ecuación:

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

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

Para calcular el calor sensible se hace uso de 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)

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

$$Q_{Total} = Q * p\acute{e}rdidas \quad (\text{Ec.5})$$

Para la solución de estas ecuaciones se empleó el Microsoft Excel.

En el estudio se analizaron dos variantes, con 10 corridas cada una, que se describen aquí.

- Variante 1.** Se denomina AB, en el primer intercambiador se alimenta, por los tubos, agua y por la coraza el mosto. En el segundo intercambiador por los tubos se hace pasar la batición y por la coraza continúa el mosto.
- Variante 2.** Se denomina BA, en ella se intercambia el orden de los fluidos fríos; en el primer intercambiador se alimenta, por los tubos, la batición y por la coraza el mosto. En el segundo intercambiador, por los tubos, se hace pasar agua y por la coraza continúa el mosto.

La simulación, desde el punto de vista de la ingeniería química, es la solución de las ecuaciones de balance de materia y energía para procesos químicos en estado estacionario o dinámico, así como del dimensionamiento de los equipos involucrados en un proceso. La simulación de procesos conlleva la solución mediante software de los modelos que describen los procesos químicos, físicos, biológicos, así como otros procesos técnicos y operaciones unitarias (11). La modelación del intercambiador de calor se realizó en el simulador Aspen Plus v10.0 (12).

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 3 se describe el módulo empleado en la simulación.

Tabla 3. Descripción del 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. En la figura 1 se muestra el modelo de simulación para la primera variante (AB); y, en la figura 2, se muestra el modelo de simulación para la segunda variante (BA).

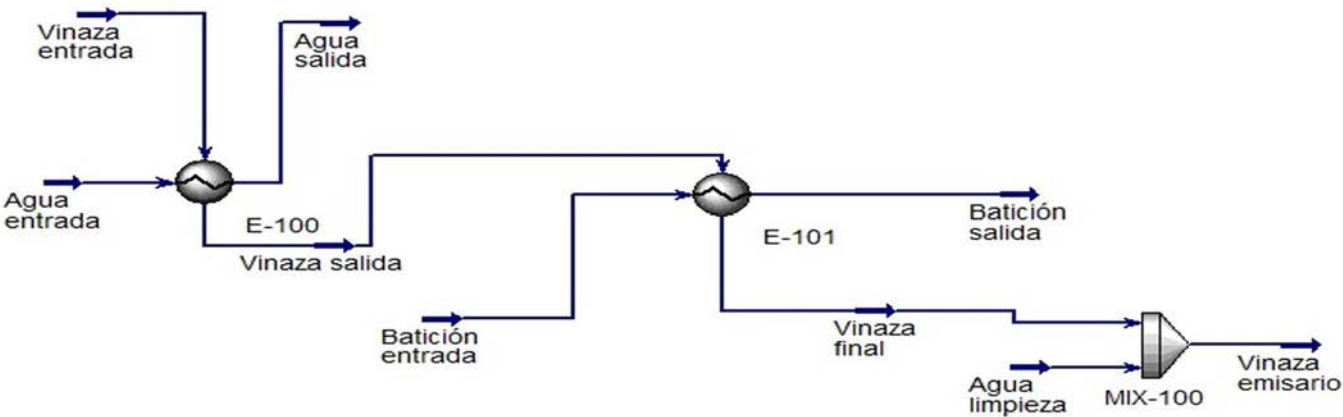


Figura 1. Modelo de simulación obtenido para la variante 1.

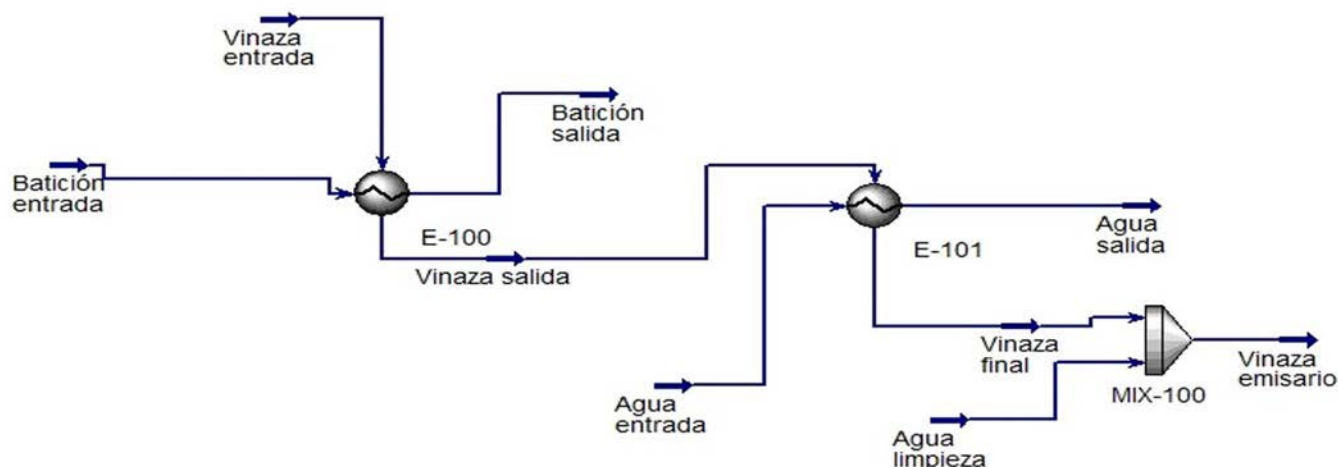


Figura 2. Modelo de simulación obtenido para la variante 2.

Validación de los modelos de simulación

La validación de los modelos de simulación es una etapa de gran importancia para comprobar la certeza de los resultados obtenidos. En el presente trabajo se compararon los resultados obtenidos mediante el simulador Aspen Hysys v10.0 con datos reales, 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 5 juegos de datos. Los resultados se presentan en la tabla 4, se tomaron como referencia la temperatura de salida del agua en el primer intercambiador y la temperatura de salida de la batición y del mosto en el segundo intercambiador.

Tabla 4. Comparación de la masa de vapor entre cálculos manuales y simulación

IC 1			IC 2					
Temperatura de salida del agua (°C)			Temperatura de salida de la batición (°C)			Temperatura del mosto (°C)		
Manuales	Simulación	ER %	Manuales	Simulación	ER %	Manuales	Simulación	ER %
65.00	64.65	0.54	60.20	60.56	-0.60	50.00	50.36	-0.72
66.00	65.70	0.45	60.00	60.48	-0.80	50.00	50.48	-0.96
67.00	66.90	0.15	59.30	59.85	-0.93	51.00	51.48	-0.94
68.00	67.68	0.47	60.50	60.85	-0.58	52.00	52.35	-0.67
69.00	68.84	0.23	59.40	59.93	-0.89	50.00	50.48	-0.96

Como se puede ver en la tabla 4 el error relativo, en todos los casos, es menor al 1 %, por lo que se demuestra que la simulación describe correctamente el proceso de intercambio de calor en el proceso bajo estudio.

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 emplearon 10 corridas. En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la simulación de los dos intercambiadores de calor, para las mismas variables comparadas en los cálculos manuales.

Tabla 5. Comparación de los resultados para la validación de la simulación

IC 1			IC 2					
Temperatura de salida del agua (°C)			Temperatura de salida de la batición (°C)			Temperatura del mosto (°C)		
Reales	Simulación	ER %	Manuales	Simulación	ER %	Reales	Simulación	ER %
65.10	64.65	0.69	60.30	60.56	-0.43	50.20	50.36	-0.32
66.20	65.70	0.76	60.20	60.48	-0.47	50.20	50.48	-0.56
67.40	66.90	0.74	59.40	59.85	-0.76	51.30	51.48	-0.35
68.20	67.68	0.76	60.40	60.85	-0.75	52.10	52.35	-0.48
69.30	68.84	0.66	59.40	59.93	-0.89	50.20	50.48	-0.56
60.00	59.86	0.23	59.20	59.64	-0.74	50.20	50.35	-0.30
61.00	60.75	0.41	60.00	60.51	-0.85	50.10	50.35	-0.50
62.00	61.78	0.35	60.20	60.46	-0.43	50.00	50.26	-0.52
63.00	62.83	0.27	60.40	60.59	-0.31	50.30	50.42	-0.24
64.00	63.79	0.33	60.10	60.30	-0.33	50.10	50.32	-0.44

A partir de esta comparación se concluye que el modelo de simulación obtenido queda validado con un error relativo menor al 1 %, para todas las variables analizadas.

Con los resultados obtenidos anteriormente se simuló ambas variantes y se compararon los resultados obtenidos en cada caso. Se toman para la comparación 15 corridas. La comparación se continúa realizando con las mismas variables analizadas en los casos anteriores.

Primeramente, se analizará la temperatura de salida del agua que en la variante AB es del primer intercambiador y en la variante BA es del segundo intercambiador. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Comparación en la temperatura de salida del agua

	Temperatura (°C)	
	Variante AB	Variante BA
Muestras	15	15
Promedio	69.82	60.54
Coeficiente de variación	0.63 %	0.69 %

En la tabla anterior (tabla 6) se observa que el coeficiente de variación se mantiene por debajo del 1 %, lo que demuestra poca variabilidad en los cálculos realizados. La temperatura de salida del agua para la variante AB es de 69.82 °C, superior a la variante BA que es de 60.54 °C, resultado esperado ya que en la primera variante el agua intercambia con el mosto, con una temperatura superior a la de la segunda variante. En ambos casos el resultado es positivo, ya que permite dis-

minuir los consumos en el área de generación de vapor, al alimentarse el agua 30 °C por encima de lo habitual.

Tabla 7. Comparación en la temperatura de salida de la batición

	Temperatura (°C)	
	Variante AB	Variante BA
Muestras	15	15
Promedio	65.88	69.95
Coeficiente de variación	0.62 %	0.55 %

Se demuestra en los resultados en la tabla 7, que en la variante AB, en la batición, para ser alimentada a la columna destiladora, aún no se logran los 80 °C requeridos por diseño, pero sí se alcanza aumentar en más de 15 °C la temperatura con la que se trabaja en la actualidad (50 °C). En ambos casos se logra un aumento, pero los mejores resultados se alcanzan en la variante AB. Su coeficiente de variación es menor al 1 %, lo que demuestra la confiabilidad de los cálculos.

Por último, en la tabla 8 se presentan los resultados de la comparación de la temperatura de salida del primer intercambiador del mosto entre ambas variantes. La temperatura final del mosto para la simulación se fijó en 50 °C.

Tabla 8. Comparación en la temperatura de salida del mosto

	Temperatura (°C)	
	Variante AB	Variante BA
Muestras	15	15
Promedio	71.75	61.18
Coeficiente de variación	0.53 %	0.58 %

En la tabla 9 se presenta información sobre los flujos y temperaturas de los fluidos que se calientan en el primer intercambiador en cada variante.

Tabla 9. Comparación entre los fluidos que absorben calor en el intercambiador 1

	Variante AB	Variante BA
	agua	batición
Flujo (kg/h)	18000	34000
Temperatura de entrada (°C)	34	34
Temperatura de salida (°C)	71.5	69.95

Los resultados de la tabla 8 demuestran que en ambos casos hay poca variabilidad en los resultados, al presentar coeficientes de variación menores al 1 %. También se observa que hay una diferencia de más de 10 °C en la temperatura de salida del mosto, fluido que cede calor debido a que, como se observa en la tabla 9, el flujo de batición es 1.88 veces superior al flujo de agua.

Existe diferencia en la temperatura de salida en cada variante y está en correspondencia con los flujos de los fluidos que se calientan en ambos casos, como se muestra en la tabla 9.

También se comprobó que la variante BA es la que, en conjunto, ofrece mejores resultados en el área, al lograr elevar la temperatura de la batición hasta 69.95 °C y el mosto salir a 49.75 °C.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo el esquema de simulación del sistema de intercambiadores de calor, con el simulador comercial Aspen Plus v10.0, para su uso en el análisis de alternativas en el proceso de precalentamiento de la batición. Para la simulación del intercambiador de calor se empleó el módulo *Heat Exchange*, con este se logró simular el proceso. Primeramente, fue comprobado con cálculos manuales y, posteriormente, validado con datos reales y se obtuvieron, en ambos casos, errores menores al 1 %.
2. Se demostró que, en ambas variantes, se logra aumentar la temperatura de la batición (variante AB 65.88 °C; variante BA 69.95 °C) antes de ser alimentada a la columna destiladora y del agua de alimentación a calderas (variante AB 71.75 °C; variante BA 60.54 °C) y, a su vez, disminuir la temperatura del mosto a 49.75 °C en ambas variantes y disminuir, de esa forma, el impacto al medioambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Santorin, A. Destilación y conceptos. Destilación del Bioetanol a partir de la caña de azúcar, La Habana, Cuba, 2015.
2. Donaires, L. Fermentación del mosto de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con uso de catalizadores naturales y comerciales para obtener aguardiente. Trabajo de diploma, Pachachaca – Abancay-, 2018.
3. López, A. F. Estudio sobre alternativa de mejoras tecnológicas en la destilería ALFIC S.A. Universidad Central Marta Abreu, Villa Clara, Cuba, 2013.
4. Pérez, O. *et al.* Simplificaciones en el cálculo de columnas de destilación alcohólica. *Información Tecnológica*, 2010, vol 21, núm 6, pp: 103-112.
5. Riera, H. Evaluación del sistema de precalentamiento de la batición para alimentar a la columna destiladora de aguardiente. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, 2023.
6. Rodríguez, Z. Nuevo calentavinos para el sistema de producción de aguardiente. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, 2012. Recuperado 5 de julio de 2024, a partir: http://tesis.cujae.edu.cu/bitstream/handle/123456789/3951/rodriguez_cabrera_zuanchyt.pdf
7. ININ/Oficina Nacional de Normalización. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-especificaciones. NC 521:2007. ICS: 13.060.30, pp: 1-15, La Habana, Cuba.
8. Borrego, S. Propuestas de mejoras en la columna de rectificación de alcohol de la Ronera Santa Cruz del Norte. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, 2024.
9. Morales, V. *et al.* Diseño, construcción y validación de un equipo de destilación de alcohol etílico. Tesis para optar por el grado de máster. Universidad de El Salvador, 2009.
10. González, S. Evaluación técnico – económica de la columna de rectificación de alcohol. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, 2023.
11. Carvalho, N. Modelización y simulación de una columna de destilación utilizando nuevos modelos predictivos. Director: Díaz Ismael. Trabajo de diploma, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
12. González, C.; González; M. Simulación de procesos en ASPEN HYSYS®. Curso electivo. En: UN Cuyo, editor. Mendoza, Argentina, 2010. p. 77.