

Simulación en Aspen Hysys v10.0 de los procesos de destilación de aguardiente y concentración de vinazas

Arletis Cruz-Llerena^{1,2*}, Osney Pérez-Ones², Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas²,
José Luis Pérez-de los Ríos²

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).
Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* arletis.cruz@icidca.azcuba.cu

2. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría.
Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la simulación del proceso de destilación de aguardiente y concentración de vinazas de una ronera cubana. Para la elaboración del modelo de simulación se empleó el simulador Aspen Hysys v10.0. Se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para la estimación de las propiedades del equilibrio entre el agua y sustancias orgánicas a bajas presiones e IDEAL para la fase vapor. El modelo de simulación obtenido fue validado con los datos reales del proceso: para la etapa de destilación de aguardiente, el error relativo es menor al 4 % y en el caso de la concentración de vinazas, el error relativo es menor al 0.5 %. Se determinaron los perfiles de temperatura, flujos másicos de líquido y vapor y de composición molar en la columna de destilación de aguardiente.

Palabras clave: simulación, aguardiente, vinazas, concentración

ABSTRACT

The simulation of the spirit distillation process and vinasses concentration in a Cuban rum factory is carried out in this paper. For simulation model's elaboration Aspen Hysys v10.0 was used. The NRTL property package was selected for the estimation of the equilibrium properties between water and organic substances at low pressures and IDEAL for the vapor phase. The simulation model obtained was validated with the actual process data: for the distilled spirits stage the relative error is less than 4 % and in the case of the vinasses concentration the relative error is less than 0.5 %. Temperature, mass flows of liquid and vapor and molar composition profiles in the distilled spirits column were determined.

Key words: simulation, spirit, vinasses, concentration

INTRODUCCIÓN

De la fermentación de las mieles de caña de azúcar y posterior destilación se obtiene el aguardiente y como subproducto en la etapa de destilación, la vinaza, que se encuentra entre los residuos industriales orgánicos de mayor efecto contaminante (1). El proceso de destilación alcohólica se caracteriza por ser gran consumidor de agua y energía, de ahí la importancia desde el punto de vista medioambiental, contar con un modelo de simulación para el estudio del sistema.

La simulación es una herramienta básica en la ingeniería de procesos, esencial en la elaboración de mejores diseños, automatización, control y en la optimización; a partir de localizar los problemas de funcionamiento y predecir comportamientos (2). Si se dispone de datos termodinámicos fiables,

se conocen las condiciones de funcionamiento y modelos de los equipos, se puede simular el comportamiento real de la planta (3). Una vez desarrollado y validado un modelo de simulación, se pueden evaluar diferentes condiciones sin afectar al sistema real (4).

La ventaja más grande de la simulación de procesos es que proporciona una visión de la conducta del sistema de un proceso real, que resulta particularmente beneficioso en sistemas complejos, con interacción de varias variables. La simulación se puede definir como el uso de un modelo matemático para generar la descripción del estado de un sistema (5).

En el presente trabajo se desarrolla y valida un modelo de simulación del proceso de destilación de aguardiente y concentración de vinazas en una ronera cubana, que puede ser utilizado en estudios futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso tecnológico

Destilación de aguardiente

El sistema de destilación se alimenta del tanque de vino levurado procedente del área de fermentación. La batición fermentada entra al calentavinos (que funciona además como primer condensador), donde intercambia calor con los vapores alcohólicos procedentes del tope de la columna destiladora y aumenta su temperatura desde 30-33 °C hasta 70-80 °C.

El vino caliente entra al plato 20 de la columna de destilación principal, cuya alimentación de vapor proviene del primer evaporador del sistema de tratamiento de residuales a una temperatura de 104 °C.

La función de este vapor de agua es extraer del vino todos los componentes volátiles que posee: etanol, ésteres, aldehídos, ácidos grasos volátiles (como el ácido acético), alcoholes superiores, entre otros. Todos estos componentes llegan a la zona de enriquecimiento donde se ponen en contacto con el reflujo líquido que viene del sistema de condensación, por medio de cazoletas o campanas de burbujeo, donde se concentra dichos vapores y aumentan su grado alcohólico, abandonando posteriormente el tope de la columna hacia el sistema de condensación.

El líquido que ha sido despojado de volátiles y sale por el fondo o paila de la destiladora, está compuesto, en su mayor parte, por agua, restos de levaduras, sólidos disueltos, ácidos de alta masa molar, entre otros, y recibe el nombre de vinaza; abandona la columna a una temperatura de 104 °C, pasando al sistema de tratamiento de residuales.

El sistema de condensación está compuesto por un calentavinos parcial y dos condensadores, el primero parcial y el segundo total, conectados en serie. El calentavinos es un intercambiador horizontal de tubo y coraza, mientras que los condensadores son intercambiadores verticales de tubos y coraza.

El calentavinos y los dos condensadores tienen áreas de transferencia de calor diferentes, que van disminuyendo a medida que disminuye el flujo de vapores que va avanzando; los intervalos de puntos de ebullición varían para cada uno de ellos. Esto hace que sea diferente la composición de los vapores alcohólicos que condensan en cada condensador.

El agua de enfriamiento del sistema de condensación entra al enfriador de aguardiente y, a la salida de este, se hace la alimentación de agua de enfriamiento al resto de los condensadores.

Concentración de vinazas

El sistema de concentración de vinaza consta de tres efectos: EF-1, EF-2 y EF-3 evaporadores de películas descendentes, y el EF-4 un intercambiador de tubos y coraza. Se alimenta un flujo de

vapor de 4 400 kg/h a 1 500 kPa y 200 °C, 2 460 kg van hacia el EF-1 y 1 740 kg hacia el EF-2. El vapor a 1 370 kPa y 110 °C pasa por el termocompresor T1 junto a una parte del vapor que sale por el fondo del EF-1 producto del calentamiento de la vinaza; de este vapor producido por EF-1 se alimenta también la columna de destilación. El vapor de salida del termocompresor T1 entra al primer efecto lateralmente, por el tope y por la coraza a 129.4 kPa y 121 °C

La vinaza que entra al efecto EF-1 por el tope es el resultado de la mezcla de la vinaza que viene de C-10 (columna de destilación) a 104 °C y de una recirculación de la vinaza que sale por el fondo del efecto. El condensado que se produce en la coraza por el intercambio de calor, entre el vapor y la vinaza, sale lateralmente y entra al EF-2, también de forma lateral.

En EF-1 se logra concentrar la vinaza de 5.1 °Brix a 10.7 °Brix, que entra al EF-2 por el tope y una ducha la distribuye por los tubos para intercambiar calor de nuevo con vapor. Inicialmente entra vapor al termocompresor T2 a 185.5 °C y 1 000 kPa que proviene del generador de vapor y el aspirado por el eyector que succiona una parte del vapor que sale del fondo de este efecto producto del calentamiento de la vinaza. El vapor de salida del termocompresor T2 entra a este efecto lateralmente por el tope y por la coraza a 129.4 kPa y 106.8 °C .

Una parte del vapor producido por el calentamiento de la vinaza en EF-2 intercambia calor en el EF-3. El vapor que condensa en el EF-2 y los condensados del EF-1 van también a intercambiar calor en el EF-3. Es necesario tener en cuenta que a partir del EF-2 todos los equipos están conectados a una bomba de vacío de 43.5 kPa con el objetivo de reducir las temperaturas de ebullición.

El EF-3 está compuesto por un intercambiador horizontal de tubos y coraza y un tanque concentrador cuya función en la actualidad es solamente de depósito temporal de la vinaza concentrada. Este tanque en un principio se diseñó para otras funciones que en la práctica no se aplican. La vinaza concentrada final sale a 78 °C y con 35 °Brix y los condensados de este efecto salen a 70 °C y continúan su enfriamiento en el E-4, reduciendo su temperatura por el intercambio de calor con agua de proceso proveniente de la torre de enfriamiento del área de destilación. Los condensados finales salen a una temperatura de 65 °C y continúan de regreso hacia la torre de enfriamiento.

Obtención del modelo de simulación

Se empleó para la simulación del proceso de producción de aguardiente y concentración de vinazas el simulador Aspen Hysys v 10.0. De manera general para la realización de la simulación se siguió el procedimiento siguiente:

1. Configurar la simulación (unidades, opciones de informe, etc.).
2. Seleccionar o crear los componentes involucrados.
3. Elegir el método de cálculo de las propiedades físicas por componentes.
4. Elaborar el diagrama de flujo: módulos y corrientes (generalmente se hace en la hoja de trabajo).
5. Especificar los datos de las corrientes.
6. Especificar los datos de los módulos empleados.

En el caso de la selección de los componentes, para la simulación del vino fermentado, aunque es una mezcla multicomponente se consideraron componentes representativos: sacarosa, dextrosa, etanol y agua. Para la estimación de las propiedades, se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para el equilibrio entre el agua y sustancias orgánicas a bajas presiones e Ideal para la fase vapor (6).

Simulación de la destilación de aguardiente

Para la simulación de la columna de destilación de aguardiente se empleó el módulo Absorber (COL AGDT). En el caso de los condensadores parciales debido a que el simulador Aspen Hysys

v10.0 no dispone de módulos que representen este equipo, fue necesario centrarse en las operaciones unitarias que se llevan a cabo y adaptarlas al ambiente de simulación del programa.

Los dos condensadores parciales (CV y C1) del sistema de condensación se simularon utilizando la combinación de los módulos Heat exchanger y Separator. Con el primero se simuló la parte del equipo donde se cede calor y condensa el vapor y con el segundo se simuló el cuerpo del equipo, donde ocurre la separación de fases. En el caso del condensador total (C2) para su simulación se empleó el módulo Heat exchanger.

El módulo TEE permitió simular todas las divisiones de flujo: la distribución de condensados del sistema de condensación hacia la columna (Reflujo) y producto final (Aguardiente) y la distribución del agua de enfriamiento para el sistema de condensación y para el enfriador de aguardiente. El módulo Mixer se empleó para la simulación de los puntos de mezcla entre varias corrientes: los condensados para el aguardiente y el agua caliente de cada sistema de enfriamiento al agua caliente total a torre de enfriamiento. El módulo Air cooler se empleó para la simulación de la torre de enfriamiento (TE Dest).

En la tabla 1 se muestran los datos empleados para la simulación de la etapa de destilación de aguardiente. El modelo de simulación obtenido se muestra en la figura 1. Para el proceso de destilación de aguardiente se suministró como datos a los módulos COL AGDT, CV, C1, C2, SepFCV, SepFC1 y E-101, el valor $\Delta P = 0$ kPa. Para P-105 se suministró la información $\Delta P = 19.70$ kPa.

Tabla 1. Datos para las corrientes en la etapa de destilación de aguardiente

Corriente	Descripción	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fracción de vapor	Flujo (kg/h)	Composición másica
Vapor	Vapor de calentamiento alimentado a la columna	-	104	1	2 807	Agua 100 %
Vino F	Vino producido en la fermentación	101.3	33	-	16 160	Agua 93.00 % Etanol 4.80 % Sacarosa 0.50 % Dextrosa 1.70 %
Vino C	Vino fermentado alimentado a la columna	-	70	-	-	-
Flema 1	Vapores alcohólicos de salida del tope de la columna	101.3	91.93	-	2 799	Agua 49.96 % Etanol 50.04 %
Agua F1	Agua de enfriamiento al condensador 1	101.3	28	-	7 430	Agua 100 %
Agua F2	Agua de enfriamiento al condensador 2	101.3	28	-	3 090	Agua 100 %
Agua F3	Agua de enfriamiento al enfriador de aguardiente	101.3	28	-	3 300	Agua 100 %
Agua C1	Agua caliente que sale del condensador 1	-	80	-	-	-
Agua C2	Agua caliente que sale del condensador 1	-	50.8	-	-	-
Agua C3	Agua caliente que sale del enfriador de aguardiente	-	40	-	-	-
28	Condensado del calentavinos hacia aguardiente	-	-	-	0	-
29	Condensado 1 hacia aguardiente	-	-	-	916	-
37	Condensado 2 hacia aguardiente	-	-	-	189	-

Tabla 2. Datos para las corrientes en la etapa de concentración de vinazas

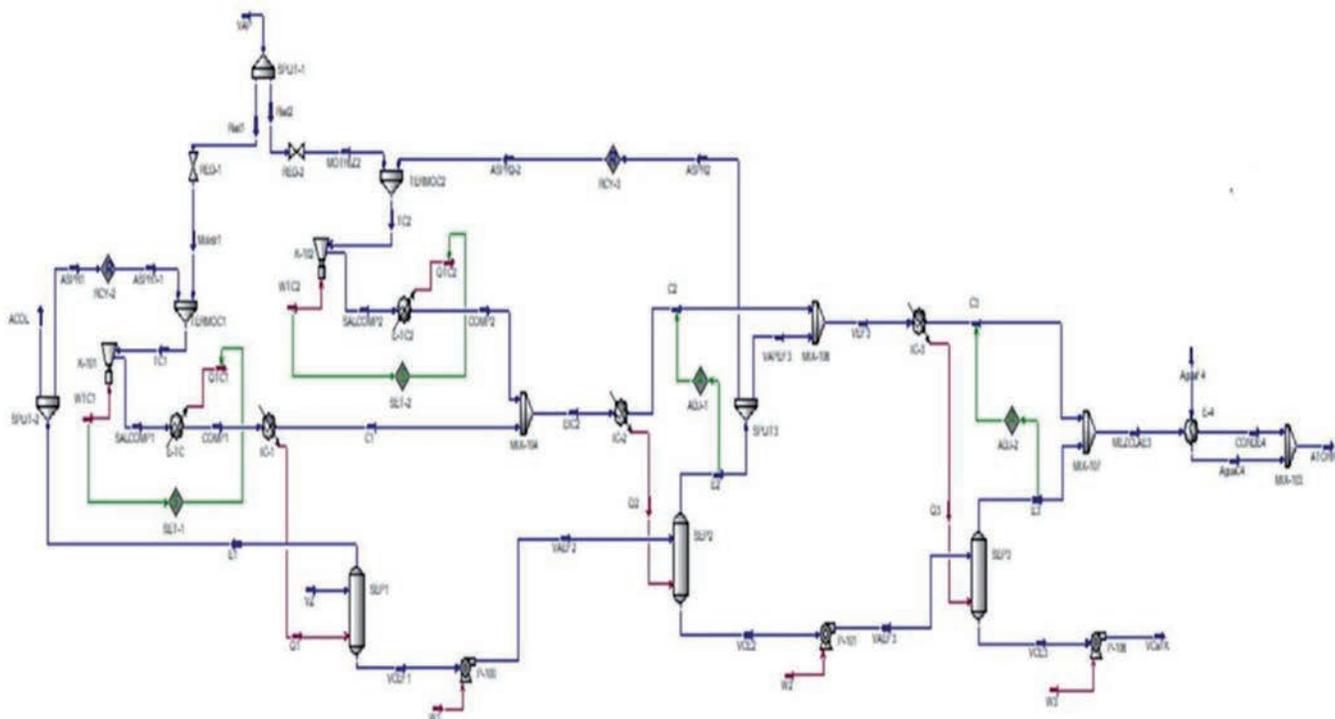
Corriente	Descripción	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fracción de vapor	Flujo (kg/h)	Composición másica	Flujo calor (kJ/h)
Vapor	Vapor directo para calentamiento en concentración de vinazas	1 500	-	1	4 200	Agua 100 %	-
VZ	Vinaza producto de la destilación de aguardiente	-	104	0	17 500	Etanol 0.95 % H ₂ O 96.52 % Sacarosa 0.83 %, Dextrosa 1.7 %	-
Motriz1	Vapor motriz del termocompresor 1	1 370	-	-	-	-	-
Motriz2	Vapor motriz del termocompresor 2	1 000	-	-	-	-	-
ACOL	Vapor a columna proveniente del evaporador 1	-	-	-	2 550	-	-
ASPR1-1	Vapor aspirado de evaporador 1	120.9	105	-	5 790	Agua 98.2 % Etanol 1.8 %	-
C1	Condensado de evaporador 1	-	-	0	-	-	-
C2	Condensado de evaporador 2	-	100.7	-	-	-	-
C3	Condensado de evaporador 3	-	58.71	-	-	-	-
ASPR2-2	Vapor aspirado de evaporador 2	55.86	129.3	-	2 377	Agua 99.87 % Etanol 0.13 %	-
SAL-COMP1	Vapor comprimido del termocompresor 1	129.4	-	-	-	-	-
SAL-COMP2	Vapor comprimido del termocompresor 2	129.4	-	-	-	-	-
AguaF4	Agua de enfriamiento del enfriador	101.3	30	-	19 200	Agua 100 %	-
AguaC4	Agua caliente del enfriador	60	-	-	-	-	-
W1	Potencia consumida por bomba P-100	-	-	-	-	-	3 960
W2	Potencia consumida por bomba P-101	-	-	-	-	-	3 960
W3	Potencia consumida por bomba P-106	-	-	-	-	-	19 800

Tabla 3. Datos para los módulos en la etapa de concentración de vinaza

Módulo	Presión (kPa)	Razón de separación	Flujo (kg/h)	Potencia (kW)
SPLIT1	-	Fracción de vapor a termocompresor 1: 0.5857	-	-
SPLIT3	-	Fracción de vapor a termocompresor 2: 0.6118	-	-
SEP2	ΔP vapor de salida: 377.5	-	-	-
SEP3	ΔP vapor de salida: 918.8	-	-	-
ADJ-1	-	-	De la variable manipulada (E2): 3 890	-
ADJ-2	-	-	De la variable manipulada (E3): 2 589	-
P-100	-	-	-	1.1
P-101	-	-	-	1.1
P-106	-	-	-	5.5

Se consideró que para los módulos IC-1, IC-2, IC-3, E-TC, E-TC2 y E-4, $\Delta P = 0$ kPa.

En la figura 2 se muestra el modelo de simulación para la etapa concentración de vinazas.

**Figura 2.** Modelo de simulación de la etapa concentración de vinazas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

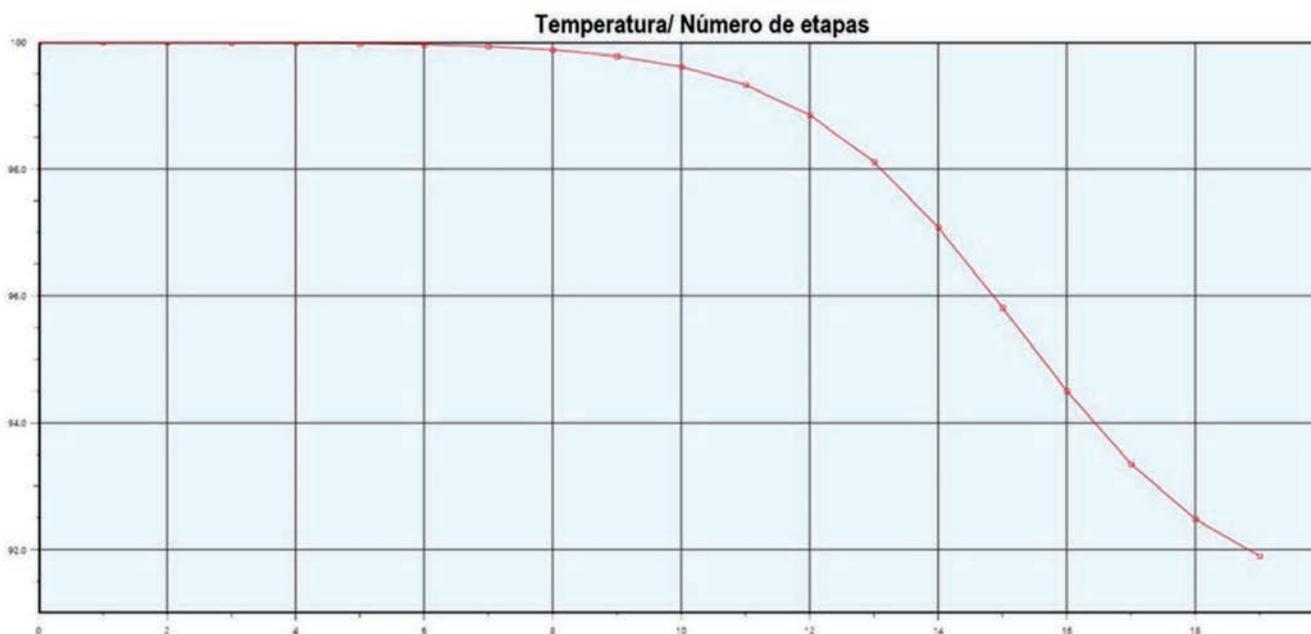
Los resultados de la simulación del proceso de destilación de aguardiente y su comparación con los datos reales de la planta se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de los resultados de la simulación de la destilación de aguardiente

Parámetro	Planta real	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Densidad del vino (kg/m ³)	1 010	995.3	1.46
Flujo másico de vapor de calentamiento (kg/h)	2 897	2 807	3.11
Flujo másico de flemas (kg/h)	2 760.2	2 797	1.33
Flujo másico de vapor de salida del calentavinos (kg/h)	1 490.4	1 500	0.64
Flujo másico de líquido de salida del calentavinos (kg/h)	1 269.7	1 299	2.31
Flujo másico de agua de enfriamiento al condensador primario (kg/h)	7 500	7 430	0.93
Flujo másico de vapor de salida del condensador primario (kg/h)	268.3	267	0.48
Flujo másico de líquido de salida del condensador primario (kg/h)	1 222.3	1 233	0.88
Flujo másico de reflujo del condensador primario a la columna (kg/h)	306.3	317.1	3.53
Flujo másico de agua de enfriamiento al condensador secundario (kg/h)	3 000	3 090	3.00
Flujo másico de reflujo del condensador secundario a la columna (kg/h)	79.3	77.99	1.65
Flujo másico de reflujo total a la columna (kg/h)	1 656.2	1 694	2.28
Razón de reflujo a la columna	1.5	1.53	2.20
Flujo másico de vinazas (kg/h)	17 459	17 860	2.30
Densidad del aguardiente (kg/m ³)	871.48	867	0.51
Grado alcohólico del aguardiente (°GL)	75.5	74.53	1.28
Flujo másico de aguardiente producido (kg/h)	1 104.1	1 105	0.08
Eficiencia de destilación (%)	99.1	99.76	0.67

A partir de esta comparación se determina que el modelo de simulación obtenido está verificado con un error relativo menor al 4 %, el error máximo relativo es de 3.53 %, el promedio de 1.59 % y el mínimo 0.08 %.

Mediante la simulación se puede observar el comportamiento de diferentes variables en la columna. En este caso se analizaron los perfiles de temperatura, flujos másicos de líquido y vapor y las composiciones en la columna de aguardiente (figuras 3-5).

**Figura 3.** Perfil de temperatura en la columna de aguardiente.

En la figura 3 se observa que a partir del plato 9 ocurre una ligera disminución de la temperatura, disminuyendo gradualmente hasta 91.9 °C en el plato 19 debido a la alimentación del vino (70 °C) y el reflujo en el plato 20 (83.2 °C).

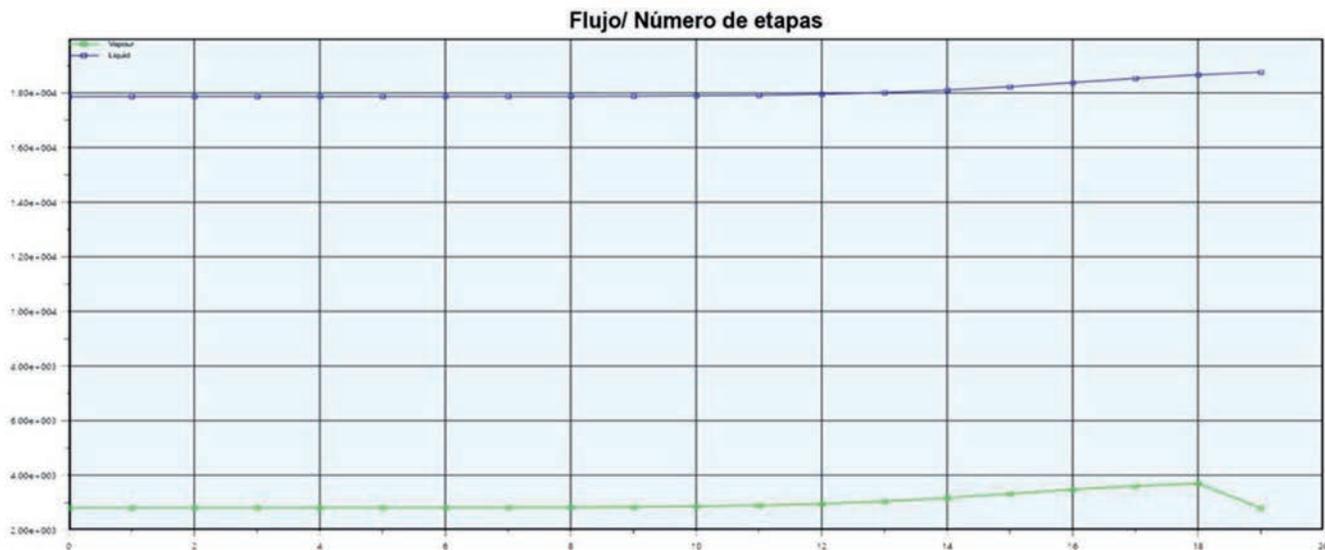


Figura 4. Perfil de flujos másicos de líquido y vapor en la columna de aguardiente.

En la figura 4 se observa en la zona de rectificación un incremento del flujo másico del líquido debido a la alimentación del vino y del reflujo y por esta razón se muestra un descenso del flujo másico de vapor en el plato 19.

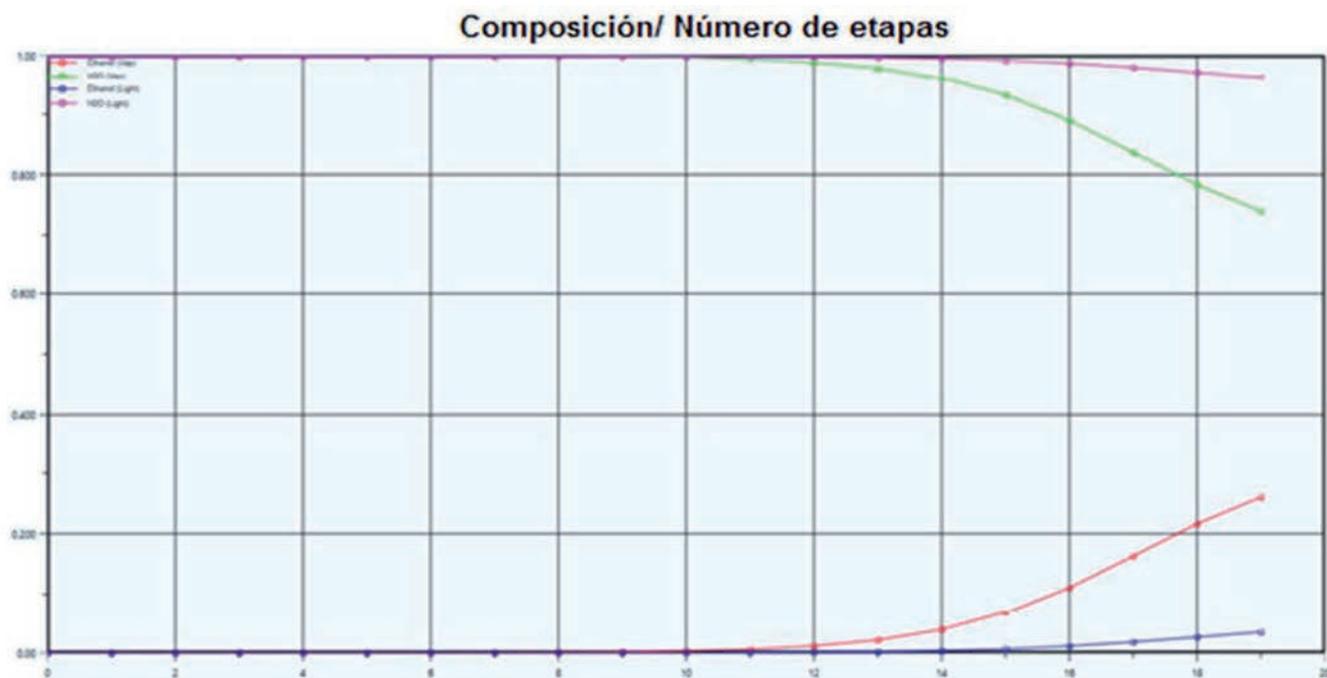


Figura 5. Perfil de composición en la columna de aguardiente.

En la figura 5 se puede observar el perfil de composición en la columna de aguardiente. Para la fase vapor, en la zona del tope de la columna, se aprecia un incremento de la composición molar de etanol y una disminución de la de agua, lo que se debe al contacto del vapor de calentamiento con el vino y el reflujo, producto de la transferencia de masa de los componentes más volátiles a la fase vapor.

En el caso de la fase líquida, la composición de etanol en el tope es superior debido a la alimentación del vino y el reflujo.

Mediante el simulador Aspen Hysys v.10.0 se calcularon algunas de sus propiedades para validar la vinaza simulada (tabla 5).

Tabla 5. Validación de la vinaza

Propiedad	Valor de la literatura (Fuente)	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Densidad (kg/m ³)	1 031 (7)	952.5	7.6
Capacidad calorífica (kJ/kg.°C)	3.91 (7). (8)	4.14	5.9

Como se observa en la tabla 5 las propiedades calculadas con el simulador en comparación con la reportada en la bibliografía presentan errores relativos menores del 8 %, por lo que se pudo continuar con la validación del modelo.

El modelo de simulación de concentración de vinazas se comparó con los valores reales de la planta. Se obtuvo un error relativo menor de 0.5 %, el error máximo relativo es de 0.41 %, el promedio de 0.17 % y el mínimo 0 %, por lo que el modelo de simulación obtenido está verificado (tabla 6).

Tabla 6. Comparación de los resultados de la simulación de la concentración de vinazas

Parámetro	Planta real	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Flujo másico de vapor aspirado en termocompresor 1 (kg/h)	5 790	5 811	0.36
Flujo másico de vapor comprimido en termocompresor 1 (kg/h)	8 250	8 250	0.00
Flujo másico de evaporación en el efecto 1 (kg/h)	8 340	8 361	0.25
Flujo másico de vinazas a la salida del efecto 1 (kg/h)	9 160	9 139	0.23
Flujo másico de vapor aspirado en termocompresor 2 (kg/h)	2 380	2 377	0.13
Flujo másico de vapor comprimido en termocompresor 2 (kg/h)	4 120	4 117	0.07
Flujo másico de evaporación en el efecto 2 (kg/h)	3 890	3 880	0.26
Flujo másico de evaporación del efecto 2 al efecto 3 (kg/h)	1 510	1 506	0.26
Flujo másico de vinazas a la salida del efecto 2 (kg/h)	5 270	5 259	0.21
Flujo másico de condensados del efecto 2 (kg/h)	12 370	12 370	0.00
Flujo másico de evaporación en el efecto 3 (kg/h)	2 589	2 589	0.00
Flujo másico de vinazas a la salida del efecto 3 (kg/h)	2 681	2 670	0.41
Flujo másico de condensados del efecto 3 (kg/h)	13 880	13 870	0.07
Flujo másico total de condensados (kg/h)	16 470	16 460	0.06

CONCLUSIONES

1. Se empleó el simulador Aspen Hysys v10.0 para la simulación del proceso de producción de aguardiente y concentración de vinazas de una ronera cubana. Se verificó que en comparación con los datos reales de la planta los errores relativos son menores que 4 % para el caso

de la etapa de destilación de aguardiente y menor al 0.5 % para la etapa de concentración de vinazas, por lo que los modelos de simulación representan adecuadamente los sistemas.

2. A partir del empleo de la simulación como herramienta, se logró obtener y validar un modelo de simulación para su uso en estudios futuros, con alto grado de confiabilidad en el análisis de alternativas de mejoras al proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Nakashima, R.N.; Oliveira, S.D. Comparative exergy assessment of vinasse disposal alternatives: Concentration, anaerobic digestion and fertirrigation. *Renewable Energy*. 2020;147:1969-78.
2. Valderrama, J.O.; Toselli, L.A.; Faúndez, C.A. Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 2: process simulation. *Food and Bioproducts Processing*. 2012;90:832-40.
3. Noa, A.; Pérez, O.; Zumalacárregui, L.; Pérez, J.L. Simulation of concentration and incineration as an alternative for vinasses' treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2020;19(3):1265-75.
4. Amin, R.; Hossain, S.; Sarker, M. Simulation of ethanol production by fermentation of molasses. *Journal of Engineering (JOE)*. 2013;1(4):69-73.
5. Ranjan, S. *Process modeling and simulation for chemical engineers*. USA: John Wiley & Sons; 2017.
6. Haydary, J. *Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys applications*. First ed. American Institute of Chemical Engineers I, editor. USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2019.
7. Parsaee, M.; Kiani, M.; Karimi, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*. 2019;122:117-25.
8. Zamora, G.; Mistretta, M.; Peralta, F.; Gutiérrez, C.; Golato, M.; Paz, D.; *et al.* Caracterización energética de vinazas de caña de azúcar como posible biocombustible para calderas de vapor bagaceras. XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente; 2016 11-17 Junio; Argentina.