

Evaluación de la concentración y desalinización como tratamiento a la vinaza producida en una destilería cubana

Claudia López-Pérez^{1*}, Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas², Osney Pérez-Ones², José Luis Pérez-de los Ríos²

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).
Via Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.
* claudia.lopez@icidca.azcuba.cu
2. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae).
Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba

RESUMEN

En este trabajo se presenta una alternativa para el tratamiento a la vinaza producida en el área de destilación de una destilería cubana, ya que debido a algunas de sus características como pH bajo, sólidos suspendidos totales y elevada demanda química de oxígeno (DQO), se considera un residuo líquido muy agresivo que provoca serios problemas ambientales en los recursos hídricos donde se descarga. La frecuente acumulación actual de vinazas en la ronera provoca la interrupción del proceso de producción de etanol. Para evitar esta acumulación, se evaluó la alternativa de concentrar y desalinizar la vinaza en la planta con el objetivo de utilizarla como alimento animal, ya que ella no presenta patógenos, ni metales pesados, ni componentes tóxicos. Se realizó la evaluación económica del sistema propuesto a partir del método de Peters resultando un costo de inversión de 6 633 232 CUC. Se calcularon además otros indicadores como el valor actual neto que resultó positivo, el plazo de recuperación del capital de 1.4 años, un plazo de recuperación del capital al descontado de 2.15 años, una tasa interna de rendimiento de 37 % y un retorno sobre la inversión de 71.5 %.

Palabras clave: destilación, desalinización, vinazas.

ABSTRACT

This work presents an alternative for the treatment of vinasses produced in the distillation area of a Cuban distillery, since due to some of its characteristics, such as low pH, total suspended solids, high chemical oxygen demand (COD) is considered a very aggressive liquid waste that causes serious environmental problems in the water resources where it is discharged. The existing accumulation of vinasses interrupts the ethanol's production. To avoid this accumulation, the alternative of desalinizing the vinasses in the plant was evaluated with the objective of being used as animal feeding since it does not contain pathogens, heavy metals or toxic components. The economic evaluation of the proposed system was carried out using the Peters method, resulting in an investment cost of 6 633 232 CUC. Other indicators were calculated, such as a net present value, the recovery period of the capital resulting 1.4 years, the recovery discounted period of the capital resulting 2.15 years, the internal rate of return resulting from 37 % and a return on the investment of 71.5 %.

Key words: distillation, desalination, vinasses.

INTRODUCCIÓN

Toda actividad productiva genera residuos (sólidos, líquidos, gaseosos o una combinación de estos) que se deben tratar y disponer de manera que su impacto negativo a la salud humana y al medio ambiente sea el menor posible. Si estos desechos

reciben determinados tratamientos, se podrían aprovechar, por lo cual, dejarían de ser contaminantes, y, por otro lado, los convertirían en una fuente adicional de recursos (1).

El proceso de producción de alcohol a partir de caña se caracteriza por la conversión de la melaza y/o jugo de caña en etanol liberando además dos

subproductos en el proceso: la vinaza y el dióxido de carbono (2).

La vinaza debido a algunas de sus características como pH bajo, sólidos suspendidos totales y elevada demanda química de oxígeno (DQO), se considera un residual líquido muy agresivo que provoca serios problemas ambientales en los recursos hídricos donde se descarga (3). Para su tratamiento se han ensayado métodos físico-químicos, químicos y biológicos siendo estos últimos los más apropiados por la gran cantidad de compuestos orgánicos biodegradables que presentan en su composición.

Debido a la naturaleza de la elevada carga orgánica que posee la vinaza, se ha facilitado su manejo y aprovechamiento. Además, todos los componentes de la misma provienen de la materia prima y pueden servir de abono o alimento animal. Las principales limitantes a su uso, tanto como abono como para alimento animal, son su alto contenido de potasio, del orden del 6 % de sus sólidos totales, así como el alto contenido de sulfuros (4).

La vinaza se puede utilizar en la fertilización, sustrato para compost, producción de biogás y biosólidos, medio de cultivo, como suplemento alimenticio, incineración, como agente plastificante de concretos reforzados, en la fabricación de ladrillos, entre otros (5).

Sin algún previo tratamiento el vertimiento de este desecho líquido constituye un serio problema de contaminación, al presentar una alta carga orgánica que se consume por las plantas y bacterias de los ríos (6). Esta sobrealimentación de nutrientes orgánicos genera un aumento en la población de estas especies y por lo tanto una alta demanda de oxígeno, consumiendo prácticamente todo el oxígeno disponible y por ende impidiendo la supervivencia de otras especies. Debido a lo antes planteado se restringe su vertimiento al medio ambiente sin un previo tratamiento. El problema principal radica en que, por cada litro de etanol producido a partir de miel final, se obtienen entre 10 y 15 litros de vinazas como residuales con un pH alrededor de cuatro. Esta problemática afecta gravemente en la producción de aguardiente, pues la vinaza producida se acumula en los tanques sin tener una solución viable para tratarla y se detiene la producción del mismo en la fábrica.

La destilería, desde enero de 2015 hasta enero de 2018, ha dejado de producir 5 608 m³ de aguardiente debido a la acumulación de vinaza, representando una pérdida económica de 3 363 150 CUC.

MATERIALES y MÉTODOS

Descripción del proceso tecnológico para las etapas de concentración y desalinización

En este proceso se concentran y desalan las

vinazas mediante tratamiento químico para que el producto final esté libre de sales, principalmente de potasio. Posteriormente, mediante la centrifugación, se obtienen dos fases: una sólida, que contiene sales ricas en potasio y sodio que se pueden emplear en la formulación de abonos como fertilizantes, y una líquida, que se utiliza como sustituto de la miel para la alimentación animal o para la producción de levadura forrajera (7).

Las vinazas, cuando salen del fondo de la columna destiladora, se almacenan en un tanque. Antes de iniciar el proceso se calientan en un intercambiador de tubos y coraza desde 70 °C hasta 110 °C para lograr un ahorro en el consumo de vapor en el evaporador. El vapor empleado en este proceso proviene de una extracción en el primer efecto del múltiple (8). Luego pasa al sistema de evaporadores a múltiple efecto. El primer efecto se alimenta con vapor de la caldera y los otros, en condiciones de vacío creciente, se alimentan con los vapores del efecto precedente. Comúnmente se usan sistemas de 4 a 6 efectos. La unidad se debe sobredimensionar en un 15 a 20 % para permitir las operaciones de limpieza (9).

El concentrado de vinazas producido tiene un contenido de sustancia seca del orden del 60 %. La circulación se efectúa con bombas centrifugas normalmente a temperaturas superiores a 40 °C. El condensado de proceso de la última etapa se emplea como agua de dilución de la melaza y la parte que queda se descarga sin ulteriores tratamientos. Si se requiere, se puede purificar posteriormente con tratamiento biológico.

Para que el concentrado de vinaza resulte apto para la producción de alimentos para animales, debe estar libre de sales, ya que el potasio en particular, es poco tolerado a causa de su efecto laxante. El concentrado se bombea al tanque agitado, donde se le adiciona ácido sulfúrico y según el destino del producto final, carbonato de calcio o amoníaco para mejorar la precipitación.

Posteriormente pasa a la centrifuga sedimentadora donde se separa el claro de las sales ricas en potasio que se pueden emplear como fertilizantes. El claro se destina a la fermentación para la producción de levadura torula o se envía directamente a alimento animal como sustituto de la miel (10).

Simulación del proceso

Para la simulación del proceso de concentración y desalinización a partir de la vinaza producida en la etapa de destilación se empleó el programa Aspen Plus, el cual está formado por un conjunto compacto de diferentes herramientas de simulación que usan la misma interfaz y sólo difieren en los modelos matemáticos o módulos de los equipos que caracterizan a cada rama industrial (11).

Como una de las cualidades de este simulador se puede mencionar, de forma general, que se puede usar tanto en procesos continuos como en procesos discontinuos, así como una mezcla de ambos; es versátil especialmente para las industrias de la biotecnología, de los productos farmacéuticos, de la producción de alimentos, el tratamiento de residuales, el control del medio ambiente, la purificación de agua y otras.

Selección de módulos y componentes de la simulación. Características

El esquema del proceso tecnológico se conforma seleccionando los módulos que representen las operaciones demandadas por la tecnología a simular. Para la selección de los módulos se va a la barra que se encuentra en la parte inferior del programa, y se escoge el módulo adecuado en dependencia de la operación. De esta forma el módulo se añade a la hoja de trabajo.

Los módulos utilizados en la simulación se muestran en la tabla 1.

Una vez seleccionados los módulos, se escogen los componentes a partir del banco de datos que ofrece el simulador. En caso de no aparecer, existe la opción de crear el componente o la mezcla como un compuesto hipotético, a partir de algunas de sus propiedades. Como la vinaza no aparece en la base de datos del programa, se creó el compuesto hipotético vinaza con la composición que se presenta en la tabla 2 que se tomó de la herramienta de simulación de procesos en destilerías (SIDEL), elaborado por el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) (12).

Simulación de la concentración de vinazas

El simulador Aspen Plus no dispone de módulos de evaporadores, por lo que, para simular este proceso fue necesario centrarse en las operaciones unitarias que se llevan a cabo en el proceso y adaptarlas al ambiente de simulación del programa.

Los tres vasos evaporadores se simularon utilizando la combinación de los módulos Heater y Flash2. Con el primero se simuló la calandria del

Tabla 1. Módulos utilizados en la simulación

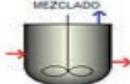
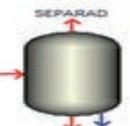
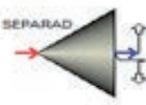
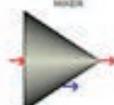
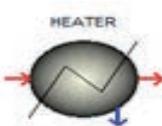
Operaciones	Módulos	Equipos
Transferencia de masa		Tanque de mezclado
Separaciones mecánicas		Centrífuga
Transferencia de masa		Separador
Transferencia de masa		Divisor de componentes
Transferencia de masa		Mezclador de componentes
Transferencia de calor		Intercambiador de calor

Tabla 2. Composición de la vinaza para la simulación

Componentes	Nombre en el simulador	Fracción másica
Agua	WATER	0.930000
Sacarosa	SUCROSE	0.008273
Ácido glutámico	GLUTAMIC	0.007636
Glicerol	GLYCEROL	0.014636
Ácido fumárico	FUMARIC	0.012727
Ácido láctico	LACTIC	0.012090
P ₂ O ₅	P2O5	2.2 E-05
K ₂ O	K2O	0.003332
CaO	CAO	0.000490
MgO	MGO	0.000529
Na ₂ SO ₄	NA2SO4	0.001131
Etanol	ETHANOL	0.009134

Tabla 4. Datos introducidos a los módulos en el proceso de concentración de vinaza

Separadores (FLASH2)	Temperatura (°C)
SEP1	100.6
SEP2	73.70
SEP3	42.24

Tabla 5. Datos introducidos al simulador

Corriente	Temperatura (°C)	Flujo (kg/h)
Vinaza concentrada	42	43590
Sulfato amonio	29	128
Ácido sulfúrico	29	156

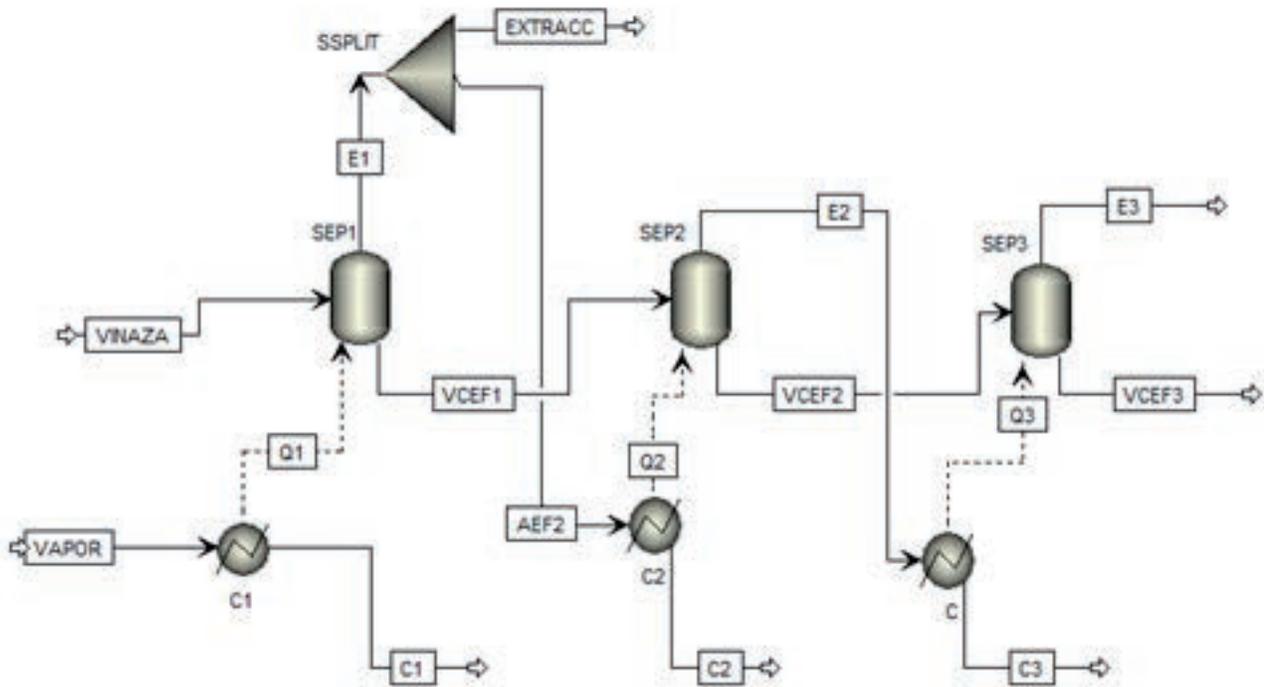


Figura 1. Esquema del proceso de concentración para la simulación.

Tabla 3. Datos introducidos a las corrientes en el proceso de concentración de vinaza

Corriente	Temperatura (°C)	Flujo (kg/h)
Vinaza entrada	110	43590
Vapor	123.58	11000
Extracción	-	1413

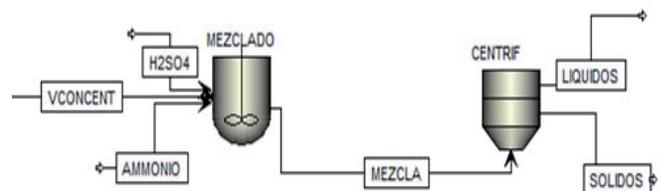


Figura 2. Esquema del proceso de desalinización para la simulación para la simulación

equipo donde se cede calor y condensa el vapor y con el segundo se simuló el cuerpo del equipo donde ocurre la separación de la evaporación y del fluido concentrado. Ambos módulos se conectaron mediante una corriente de calor (HEAT STREAM) que aporta el calor cedido por el vapor al condensar en el Heater, al módulo separador Flash2. El módulo FSplit (SSplit) permitió simular la extracción de vapor del primer efecto. En la figura 1 se presenta el esquema del proceso de concentración obtenido del Aspen.

En las tablas 3 y 4 se muestran los datos introducidos en el simulador para inicializar las corrientes y los módulos para el proceso de concentración de vinaza, utilizando los datos del cálculo presentado en SIDEL.

A todos los módulos HEATER, utilizados como intercambiadores de calor que simulan la calandria de cada evaporador, (IC1, IC2, IC3) se les introdujo como dato la fracción de vapor igual a cero, correspondiente a la salida de un líquido saturado; además se suministró también la caída de presión igual a cero en el equipo.

Simulación de la desalinización de vinazas

La simulación se realizó a partir de obtener una concentración de la vinaza a 60 °Brix. Se partió de un esquema de flujo tecnológico donde el flujo a procesar de vinaza concentrada es 43 590 kg/h. Esta vinaza concentrada pasa a un tanque con agitación (MEZCLADO) donde se le añade ácido sulfúrico para mantener el pH y sulfato de amonio para propiciar la precipitación. Posteriormente pasa a la centrífuga (CENTRIF) donde ocurre la separación de las sales y el líquido. En la figura 2 se presenta el esquema del proceso de desalinización.

Otros de los datos introducidos en el simulador se muestran en la tabla 5.

Análisis económico

Para que una planta de procesos pueda modificarse o construirse y comenzar a operar normalmente, se requiere disponer de una suma de dinero para garantizar la compra del equipamiento requerido, su instalación, la adquisición del terreno donde se construirá la planta, así como las tuberías de proceso, servicios, edificaciones, entre otras. Pero para ello, los ingenieros deberán estar seguros de que la propuesta que han realizado será factible desde el punto de vista económico, por lo que antes de la construcción se realizan análisis y se valora económicamente la inversión a realizar.

Para realizar el cálculo del costo de inversión se utilizó el método de Peters ya que se diseña una planta totalmente nueva. Este método requiere conocer el costo de adquisición del equipamiento tecnológico para el cálculo del capital fijo de inversión dependiendo del tipo de planta en cuestión.

Cuando se requiere estimar el costo de un equipo para una capacidad, dimensiones o potencia dadas y la información disponible es de un equipo similar, pero de diferente magnitud se puede determinar el costo de adquisición deseado, usando los índices de escalado y aplicando la denominada regla del factor 0.6 o fórmula de los 6 décimos o de Williams.

En la tabla 6 se presenta el costo encontrado del equipamiento principal que se requiere para calcular el costo de adquisición del equipamiento tecnológico.

Tabla 6. Costo de adquisición del equipamiento tecnológico

Equipo	Precio (USD)	Año de referencia	Fuente de información
Evaporadores	307 883	2017	(13)
Bombas	7 500	2014	(14)
Tanque con agitación	199 500	2014	(14)
Centrífuga	134 040	2012	(13)
Envasadora	20 000	2014	(14)

Otros parámetros de importancia en la evaluación económica de la alternativa estudiada son los consumos de agua, de combustible y de electricidad por cuanto constituyen egresos.

Para la determinación de estos egresos (agua y electricidad), se utilizaron los precios y costos obtenidos en la destilería, los cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Costos de los servicios auxiliares

Costo del agua clorada (CUC/m ³)	0.11
Costo de la electricidad (CUC/kW-h)	0.23

Para el cálculo de los ingresos se utilizaron los precios de venta de las sales y el alimento animal que se presentan en la tabla 8 (15, 16).

Tabla 8. Precios de las sales y alimento animal

Sulfato de potasio (CUC/kg)	5.00
Sulfato de calcio (CUC/kg)	7.00
Alimento animal (CUC/kg)	0.15

Para realizar la evaluación económica, se plantearon las consideraciones que se recogen en la tabla 9.

Tabla 9. Consideraciones para análisis económico

Tiempo de operación (h/día)	24
Tiempo de producción (d/año)	304
Tasa impositiva (t, fracción)	0.35
Tasa de interés (%)	12
Tiempo de vida económica (años)	5

También se calculó la relación beneficio-costos, la cual se obtiene dividiendo la ganancia neta entre el costo de inversión, esta es una medida de cuán económicamente factible es la alternativa seleccionada, ya que muestra la proporción que representan las ganancias de la inversión para un período de tiempo. Si esta relación toma valores mayores que uno, entonces las ganancias superan la inversión para el tiempo en que fue calculada la relación.

Para conocer si la alternativa es económicamente ventajosa, se realizaron cálculos de varios indicadores económicos como son: valor actual neto (VAN), plazo de recuperación del capital (PRC), plazo de recuperación del capital al descontado (PRCD), la tasa interna de rendimiento (TIR) y el retorno sobre la inversión (RSI), teniendo en cuenta las funciones financieras disponibles del Microsoft Excel 2010.

Análisis de los resultados

Resultados obtenidos a partir de la simulación

El esquema del proceso tecnológico obtenido en la simulación se presenta en la figura 3. En él se aprecian las dos etapas del proceso, la de concentración de vinazas integrada por los módulos SEP1, SEP2 y SEP3 y C1, C2 y C3 y la de desalinización

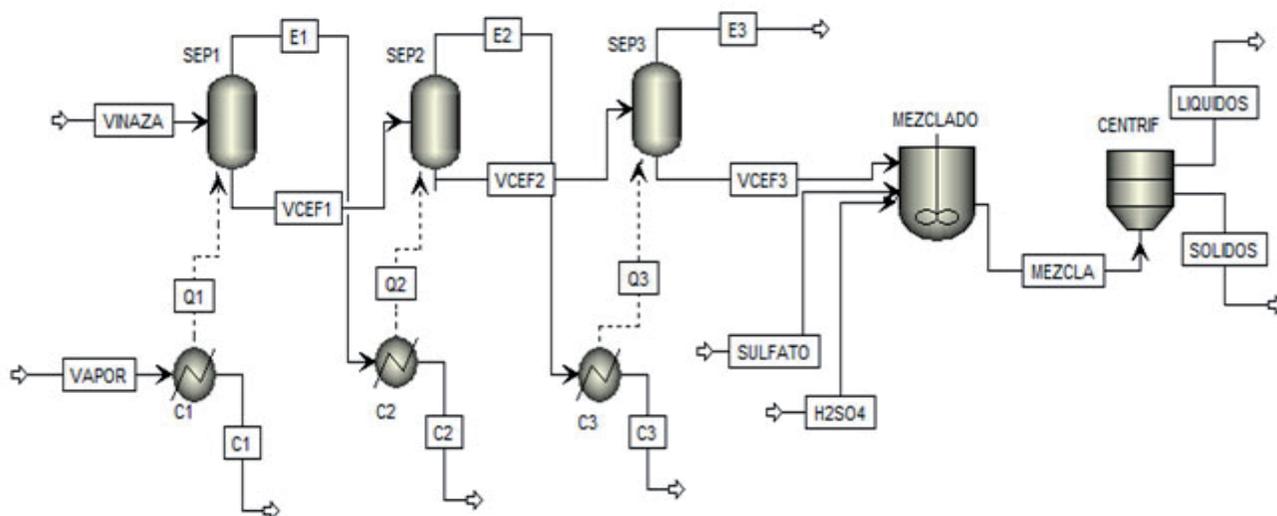


Figura 3. Esquema del proceso de concentración y desalinización para la simulación.

representada por los módulos MEZCLADO y CENTRIF.

Validación del modelo de simulación del proceso

El modelo se validó comparando los resultados obtenidos en la simulación realizada con Aspen Plus v7.2 con los obtenidos por la herramienta SIDEL del ICIDCA.

Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en detalle en las tablas 10, 11 y 12.

La tabla 10 muestra el resultado del balance de materiales en la etapa de concentración de la vinaza. Se observa que por la pequeña concentración de etanol y menor aún de sacarosa en los condensados estos podrían utilizarse en otras partes del proceso.

Se puede ver que la mayor evaporación se logra en E3, en donde el flujo de vapor que se obtiene es 11 814 kg/h que se pueden utilizar en alguna parte del proceso donde este se consuma.

La tabla 11 muestra el resultado del balance de energía en la etapa de concentración. El mayor calor intercambiado se evolucionó en el EF-3, justificando la mayor evaporación del equipo en el triple efecto.

La tabla 12 muestra los resultados del balance de masa en la etapa de desalinización.

En la tabla 13 se comparan los resultados obtenidos en la simulación de la desalinización con los mostrados por SIDEL.

Como se aprecia, los flujos comparados difieren en menos del 5 % de donde se puede considerar que el modelo de simulación reproduce el proceso de concentración y desalinización de vinaza por lo que su uso puede extenderse.

Ya validado el modelo se prosiguió a simular con las condiciones de operación de la destilería real, en la cual varía la composición de la vinaza (tabla 14) y su flujo, siendo este de 17 527 kg/h.

Tabla 10. Resultados obtenidos para las corrientes de materiales en la simulación de la concentración de vinaza

Corriente	Flujo másico (kg/h)	Composición				Temperatura (°C)	Fracción de vapor
		H ₂ O	Etanol	Sacarosa	K ₂ O		
VCEF1	31 952	0.8150	0.0020	0.0955	0.0874	101	0
VCEF2	20 694	0.7172	0.0003	0.1474	0.1350	74	0
VCEF3	8 880	0.3417	2.59e-05	0.3436	0.3147	42	0
E1	11 638	0.9719	0.0281	3.33e-07	-	101	1
E2	11 258	0.9949	0.0051	2.18e-07	-	74	1
E3	11 814	0.9994	0.0006	2.73e-07	-	42	1
EXTRACC	1 413	0.9719	0.0281	3.33e-07	-	101	1
C1	11 000	1	-	-	-	124	0
C2	10 225	0.9719	0.0281	3.33e-07	-	97	0
C3	11 258	0.9949	0.0051	2.18e-07	-	72	0

Tabla 11. Resultados obtenidos para las corrientes de energía en la simulación de la concentración de vinaza

Corriente	Energía intercambiada (kW)
Q1	6 726 027
Q2	6 363 955
Q3	7 284 582

Tabla 12. Resultados obtenidos para las corrientes de materiales en la simulación de la desalinización de vinaza

Corriente	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
Sólidos	1 360.62	42	101.325
Líquidos	3 001.71	42	101.325

Tabla 13. Comparación de los resultados obtenidos en la simulación de la desalinización con los mostrados por SIDEL

Parámetro	SIDEL	ASPEN	Error relativo (%)
Cantidad de sólidos obtenidos (kg/h)	1 296.8	1 360.62	4.7
Cantidad de alimento animal (kg/h)	2 905.9	3 001.71	3.2

Tabla 14. Composición de vinaza de la destilería estudiada

Componentes	Nombre en el simulador	Fracción másica
Agua	WATER	0.92720
Sacarosa	SUCROSE	0.00791
Ácido glutámico	GLUTAMIC	0.00659
Glicerol	GLYCEROL	0.01501
Ácido fumárico	FUMARIC	0.01190
Ácido láctico	LACTIC	0.01320
P ₂ O ₅	P2O5	1.9 E-05
K ₂ O	K2O	0.00528
CaO	CAO	0.00102
MgO	MGO	0.00071
Na ₂ SO ₄	NA2SO4	0.00137
Etanol	ETHANOL	0.00913

La tabla 15 muestra el resultado de la energía intercambiada en la etapa de concentración de vinaza. El mayor valor corresponde a EF-3, justificando la mayor evaporación del equipo en el triple efecto.

Tabla 15. Resultados obtenidos para las corrientes de energía en la simulación de la concentración de vinaza

Corriente	Energía intercambiada (kW)
Q1	2 712 103
Q2	2 566 110
Q3	2 937 331

En la tabla 16 se reporta la potencia consumida por el equipamiento asociado.

Tabla 16. Potencia consumida en los equipos del proceso

Equipo	Potencia consumida (kW)
Bomba	4
Evaporadores	21
Tanque mezclador	15
Centrífuga	20
Envasadora	5
Total (kW-h)	65
Gasto de electricidad (CUC/año)	75 816

En la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos con el simulador cuando se utilizan los datos de flujo y composición de vinaza de la destilería estudiada.

Tabla 17. Resultados obtenidos para la destilería estudiada

Corriente	Flujo másico (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
Sólidos	863.9	42	101.325
<i>De ellos:</i>			
<i>Sales de K</i>	<i>575.6</i>		
<i>Sales de Ca</i>	<i>288.3</i>		
Líquidos	1 904.13	42	101.325

Análisis económico

Para iniciar el análisis económico se actualizó el costo de todos los equipos al año 2018 ya que los precios reportados en la bibliografía no estaban actualizados. También fue necesario actualizar por

capacidad el precio de los evaporadores ya que las capacidades reportadas en la literatura (13, 14) difieren de las utilizadas en el proceso, que es de 100 m² para los evaporadores. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Costo de adquisición del equipamiento tecnológico y costo de inversión total

Equipo	Precio actualizado (CUC)
Evaporadores	1 306 925
Bombas	14 382
Tanques	4 794
Centrífuga	13 903
Condensador	19 177
Envasadora	2 876
CAET	1 362 060

Como se aprecia, la etapa de concentración es la que mayor costo aporta a la inversión por el alto costo de los evaporadores, debiendo destinar 1 306 925 CUC a ellos. Aunque no aparece en el esquema de simulación, en el costo se incluyen las bombas necesarias y la envasadora requerida para la disposición de las sales.

El método de Peters arrojó que el costo de inversión total necesario para aplicar el tratamiento de concentración y desalinización a la vinaza en la destilería estudiada es de 6 633 232 CUC.

El resultado obtenido demuestra que la alternativa evaluada necesita un gran capital para su implementación ya que este valor está asociado a los bienes que van a ser utilizados en el proceso productivo de la empresa.

Con esta alternativa se resuelve el problema medioambiental presentado en la fábrica ya que se elimina el vertimiento de este desecho tóxico en los ríos y mares cercanos. Además, se obtienen beneficios económicos porque al tratar este desecho se obtienen ganancias producto de la venta de alimento animal y la venta de sales para fertilizante, confiriéndole a la vinaza el valor de una materia prima siendo un residual. La principal ventaja de esta alternativa es que se eliminan las pérdidas económicas por paradas en la producción,

ya que al realizar el tratamiento a la vinaza producida se seguirá la producción de sales y alimento animal mediante su concentración y desalinización, evitando que se acumule en los tanques.

En la tabla 19 se muestran los ingresos obtenidos por concepto de la venta de sales como fertili-

zante y venta de alimento animal considerando un año de 304 días laborables, de jornadas de 24 h, para 7 296 horas laborables al año.

Tabla 19. Ingresos obtenidos

Concepto	Ingresos (CUC/año)
Venta de alimento animal	2 055 240
Venta de sales de K	20 721 240
Venta de sales de Ca	14 530 824
Ingresos totales	37 307 304

La tabla 19 muestra que el mayor beneficio obtenido fue por concepto de venta de sales, constituyendo el 95 % de los ingresos totales.

Los egresos asociados al proceso de concentración y desalinización de vinaza se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Egresos asociados a la producción

Concepto	Egresos (CUC/año)
Vinaza	31 384 800
Electricidad	75 816
Agua	11 880
Ácido sulfúrico	679 622
Sulfato de amonio	413 222
Egresos totales	32 565 340

La relación costo-beneficio se calculó resultando para un año de 6.93 y para 5 años de 34.65.

Los resultados para el cálculo del VAN se muestran resumidos en la tabla 21.

De la tabla 21 se evidencia que a partir del tercer año se obtienen ganancias, ya que el valor del

Tabla 21. Resumen del cálculo del VAN

Año	% cap	As	Acf	fd	VAN
0	100	0	-6 633 232,23	1	-6 633 232
1	100	1780282800	1 146 869 793	0.893	-3 884 848
2	100	1780282800	1 146 869 793	0.797	-1 430 934
3	100	1780282800	1 146 869 793	0.712	760 060
4	100	1780282800	1 146 869 793	0.635	2 716 305
5	100	1780282800	1 146 869 793	0.567	4 462 953

indicador del VAN es positivo, lo que afirma que la variante estudiada es económicamente ventajosa.

En la tabla 22 se muestra el resultado del cálculo de los indicadores económicos. Se aprecia que se obtiene un plazo de recuperación del capital de 1.4 años, un plazo de recuperación del capital al descontado de 2.15 años, una tasa interna de rendimiento de 37 % y un retorno sobre la inversión de 71.5 %.

Tabla 22. Indicadores económicos

(TIR, %)	37.0
(PRC, años)	1.4
(PRCD, años)	2.15
(RSI, %)	71.5

CONCLUSIONES

1. Se evaluó la alternativa de concentración y desalinización de la vinaza en una destilería cubana obteniendo como resultados una producción de sales de 863.9 kg/h y de alimento animal de 1 904.13 kg/h.
2. Se validó el modelo comparando los resultados obtenidos en la simulación realizada con Aspen Plus v7.2 con los resultados obtenidos por la herramienta SIDEL del ICIDCA, arrojando un error de 4.7 % para la producción de sales y 3.2 % para la producción de alimento animal.
3. El análisis económico de la alternativa propuesta arrojó un costo de inversión de \$ 6 633 232 y tiene como indicadores económicos: un VAN positivo, una tasa interna de rendimiento de 37 %, un plazo de recuperación del capital de 1.4 años, un plazo de recuperación del capital al descontado de 2.15 años y un retorno sobre la inversión de 71.5 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Houbron, E.; Sandoval, M.; Hernández, A.F. Tratamiento de vinazas en un reactor de lecho fluidizado inverso Rev. Int. Contam. Ambie. 32 (3) 255-266, 2016.
 2. Arteaga, L.; G. Carvajal, and O. Bolaños, Proceso de producción de etanol a partir de melazas, en Grupo de Investigación INMECNAR. 2016, Facultad de Ingeniería Química: Corporación Universitaria Autónoma de Nariño.
 3. Reis, C.R. Vinasse from sugarcane ethanol production: Better treatment or better utilization? 2017, University of Minnesota: Department of Bioproducts and Biosystems Engineering.
 4. Smith, C.B., Anaerobic digestion of vinasse for production of methane in the sugar cane distillery. Sugar Processing Research Conference, Aguas de São Pedro, 2006.
 5. Rocha, M.H.; E.S. Lora, and O.J. Venturini, Analysis of different alternatives for the treatment and disposal of ethanol vinasse. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 26, 2007 pp. 1075-1085.
 6. Gazzo, R.M. and V.G. Librandi, Tratamiento de desechos y aprovechamiento. 2014, Universidad de Palermo: Facultad de Ingeniería.
 7. Bermúdez, I.P. Tratamientos de efluentes de la industria alcoholera. Ventajas y desventajas, in Revista Ingeniería Química. 2008. p. 148-153.
 8. Carvalho, T.C. de and C.L. da Silva. Reduction of vinasse volume by the evaporation process, in 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering. October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil. 10 p.
 9. Larsson, E. and T. Tengberg. Evaporation of vinasse pilot plant investigation and preliminary process design, in Department of Energy and Environment. 2014, Chalmers University of Technology: Division of Heat and Power Technology.
 10. Conrado, A.S. Proyecto de desalinización de vinaza. Revista Internacional de Azúcar, 2016.
 11. Hernández, L. Laboratorio de simulación de procesos de la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. Simulación de procesos en ASPEN HYSYS, 2010.
 12. SIDEL. Herramienta para la simulación de destilerías: ICIDCA.
 13. Equipment costs for plant design and economics for chemical engineers. <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>, 2002.
 14. Matches' engineering to chemical energy manufacturing metallurgical industries. <http://www.matche.com/equipcost/Default.html>, 2017.
 15. Scull, I.; Savón, L.; Gutiérrez, O.; & Valiño, E. (2012). Composición físico química de mostos concentrados para su evaluación en dietas destinadas a animales. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, 46 (4) 385-389, 2012.
 16. Segura, Y. G. (2016). Viabilidad comercial de la producción de fertilizante potásico para el mercado chileno. (Tesis para optar por el título de ingeniero industrial), Universidad católica Santo Toribio de Mogrovejo, Escuela de Ingeniería Industrial.
-