

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA REDUCIR EL VOLUMEN DE LAS VINAZAS DE LA INDUSTRIA ALCOHOLERA Y SU TRATAMIENTO

TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES TO REDUCE THE VOLUME OF VINASSES FROM THE ALCOHOL INDUSTRY AND ITS TREATMENT

Dania Alonso Estrada^{1}, Norge Garrido Carralero¹, Osney Pérez Ones²
y Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas²*

¹ Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vía Blanca 804
Esq. Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana. Cuba.

² Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). Ave 114 #11901 e/Ciclovia y Rotonda,
La Habana, Cuba.

Recibido: Octubre 29, 2015; Revisado: Noviembre 17, 2015; Aceptado: Diciembre 14, 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan dos alternativas tecnológicas en la producción de etanol para disminuir el volumen de vinazas a la salida de la columna destiladora y sus efectos negativos al medio ambiente, realizando una propuesta para el tratamiento del residual. Se elaboró un modelo de simulación en Microsoft Excel haciendo uso de técnicas de análisis de procesos, en el que mediante balances de masa y energía se simula el comportamiento del proceso y los cambios tecnológicos propuestos. Las alternativas propuestas de adicionar un rehervidor de fondo a la columna destiladora y recircular vinazas al tanque de dilución de mieles disminuyen el flujo de vinazas obtenido al fondo de la columna destiladora, mostrándose el mejor resultado al combinar las alternativas. Las alternativas son económicamente factibles, se obtienen TIR (Tasa de retorno de la inversión) mayores que la tasa de interés utilizada y la inversión se recupera en un tiempo inferior a cuatro años, demostrando liquidez.

Palabras clave: etanol, vinazas, impacto ambiental

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Dania Alonso, Email: danialonso@icidca.azcuba.cu

ABSTRACT

In this paper, two technological alternatives were analyzed for the production of ethanol in order to diminish the vinasse volume at the exit of the distilling column. Also environmental effects and energy efficiency of the process were discussed, making a proposal for the treatment of residuals. A simulation model was elaborated in Microsoft Excel using process analysis techniques. By means of mass and energy balances, actual process behavior and its technological changes were simulated. The alternatives proposed of adding a bottom reboiler to the distilling column and to recirculate vinasses to the molasses dilution tank decrease the flow obtained at the bottom of the distilling column, showing the best results when combining the alternatives. The alternatives are economically feasible, they obtain higher IRR (Rate of return on investment) than the interest rate used, and the investment is recovered in less than four years, showing liquidity.

Key words: ethanol, vinasse, environmental impact

1. INTRODUCCIÓN

Las vinazas de destilería constituyen un residual de la industria alcoholera de gran potencialidad. Históricamente han sido consideradas como un subproducto indeseable de la destilación de alcohol etílico ya que es un residuo que genera un fuerte impacto ambiental (Pérez y Garrido, 2008). Es el residual de mayor contaminación que genera la industria azucarera y alcoholera por su bajo pH (4,0 - 4,60), alta temperatura (92 - 98 °C) y elevado contenido de materia orgánica; si el etanol es producido a partir de jugos la demanda química de oxígeno (DQO) de las vinazas se encuentra en el intervalo de 15-35 kg DQO/m³, y si es a partir de mieles la DQO aumenta entre 60 - 80 kg DQO/m³ (Pérez, 2011).

La recirculación de vinazas a la etapa de fermentación es una opción tecnológica que influye en el ahorro del agua para la dilución de la miel y en la reducción de grandes volúmenes de vinazas generados (Gumienna, 2011), (Gavilánez y Hernández, 2012).

Una alternativa a los grandes volúmenes de vinazas obtenidos, puede ser su recirculación a la etapa de fermentación como una opción tecnológica en el ahorro de agua para la dilución y al reducir el volumen de vinazas como efluentes se evita la conversión de las mismas en un residual líquido agresivo al medio ambiente (Gumienna, 2011), (Gavilánez y Hernández, 2012).

Es una alternativa que se aplica en diferentes lugares del mundo, teniendo siempre presente el porcentaje de vinazas que es posible recircular para mantener una adecuada operación en la etapa fermentativa y no afectar el rendimiento. Se logra un ahorro del agua para diluir la miel y se disminuye el impacto ambiental que tiene la misma (Martínez y col., 2013).

Es factible a partir de que el sustrato de caña utilizado sea de alta concentración, con jugos de caña no existe esta posibilidad al no requerir dilución. Es por ello que resulta aplicable en destilerías de etanol que fermenten melazas, mieles y/o meladura de caña (BPH-PRAJ, 2006).

Uno de los tratamientos que se ha comenzado a poner en práctica en algunos países como Colombia, Argentina e India es la concentración y posterior combustión de las vinazas para la obtención de energía. Con esta tecnología se obtienen cenizas potásicas comercializables como fertilizante, la generación de energía y la reducción de los residuales, aspecto que la convierte en una tecnología limpia (Perera, 2008).

Como ventajas de esta tecnología se puede mencionar:

- Reducción del impacto ambiental al disminuir el vertimiento de las vinazas después de su tratamiento.
- El vapor generado permite el autoabastecimiento de la destilería y la planta de concentración.
- La destilería y la planta de concentración se autoabastecen de energía eléctrica y la energía sobrante puede entregarse al sistema electro energético nacional (SEN).
- Las cenizas pueden utilizarse como fertilizantes o venderse en el mercado.
- Se obtiene un 72 % de ahorro en el consumo de combustible fósil y por consiguiente una reducción en las emisiones de CO₂ (Pérez y col., 2012).

En el presente trabajo se brinda, con la ayuda de la modelación matemática y la simulación de procesos, un análisis de la interrelación existente entre algunas consideraciones tecnológicas en la industria alcoholera y su influencia en la disminución del volumen de vinazas generado.

Se definen como objetivos:

1. Evaluar cambios tecnológicos en el proceso actual de la destilería.
2. Evaluar una alternativa para el tratamiento de las vinazas de la destilería.
3. Analizar la conveniencia de los cambios propuestos desde el punto de vista económico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo ha sido elaborado un simulador en Microsoft Excel, en el que se ejecutaron los balances de masa y energía asociados a la producción de etanol. El trabajo se realizó en una destilería que pertenece al grupo AZCUBA denominada caso base. Se identificaron los principales problemas que afectan la eficiencia en la fábrica, se validó el modelo de simulación comparando los resultados de algunas variables del caso base con respecto a los valores promedios reportados por la fábrica, determinando el error relativo y además se realizaron pruebas de hipótesis de media para cada una de las variables analizadas, haciendo uso de la herramienta Statgraphics Centurion XV. Bajo estas condiciones se emprendió a realizar un estudio de alternativas de solución para disminuir el flujo de vinazas obtenido al fondo de la columna destiladora y una propuesta para el tratamiento de los residuales.

Debido al elevado volumen de generación de vinazas y la elevada carga orgánica que poseen las destilerías cubanas actualmente, existe la necesidad de incidir sobre la disminución del índice de generación de vinazas por litro de alcohol producido, por lo que se estudian dos casos de tratamiento para reducir parcialmente el volumen de las vinazas y en el otro su disminución total. Para ello se evaluaron las siguientes alternativas:

Alternativa 1: Adicionar un rehervidor de fondo a la columna destiladora

Alternativa 2: Recircular vinazas al tanque de dilución de mieles

Alternativa 3: Tratar las vinazas mediante la concentración e incineración

Las condiciones de operación para el desarrollo del trabajo, son para una destilería con capacidad de producción de etanol hidratado de 500 hL/d considerando que opera 240 días al año, utilizando como materia prima miel final a 85 % Brix, 48 % de azúcares fermentables y una concentración alcohólica de 5,8 % (v/v) en el vino alimentado a la columna destiladora.

2.1. Premisas económicas

Para la evaluación económica se estableció el cálculo fundamentado en el método del flujo de caja. Para la determinación de los ingresos y egresos, se utilizaron los precios y costos del año 2014 reportados por el grupo AZCUBA. Se tuvieron en cuenta como consideraciones una tasa impositiva de 25 % y una tasa de interés de 12 %.

Las ganancias obtenidas en las alternativas se determinaron particularmente por las ventajas que se obtienen de cada una.

Alternativa 1: Adicionar un rehervidor de fondo a la columna destiladora

Las ganancias se obtuvieron sobre la base del cálculo asociado al ahorro por manipulación del volumen de vinazas.

Alternativa 2: Recircular vinazas al tanque de dilución de mieles

Las ganancias se obtuvieron sobre la base del cálculo asociado al ahorro por manipulación del volumen de vinazas y a la reducción del agua de dilución de la miel al sustituir parte de ésta por vinazas.

Alternativa 3: Tratar las vinazas mediante la concentración e incineración

Las ganancias se determinaron por el ahorro de petróleo, de electricidad y por las sales obtenidas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación con Microsoft Excel ha sido dirigida a estudiar el comportamiento de dos alternativas tecnológicas y su influencia en el flujo de vinazas a la salida de la columna destiladora, además de proponer un tratamiento al residual, las llamadas vinazas de destilerías. A continuación, se presentan los indicadores analizados:

- Flujo de vinazas (m^3/h)
- Índice de generación de vinazas ($L_{\text{vinaza}}/L_{\text{etanol}}$)
- Flujo de agua de dilución de mieles (m^3/h)
- DQO de las vinazas (kg/m^3)

3.1. Caso base (CB):

Con el caso base se realizó la simulación del proceso utilizando la herramienta Excel propuesta y se compararon los resultados con los reportados por la fábrica para validar el modelo. En la tabla 1 se muestran los resultados de la simulación y los reportados por la industria bajo las condiciones de operación del caso base, así como el error relativo (%) determinado.

Tabla 1. Resultados de la validación del modelo de simulación

<i>Indicador</i>	<i>Valor calculado</i>	<i>Valor promedio de fábrica</i>	<i>Error relativo (%)</i>
Flujo de vinazas (F_{VZ}); (m^3/h)	44,04	44,00	0,1
Índice de generación de vinazas (Índ. VZ); (L_{vinaza}/L_{etanol})	15,89	16,00	0,7
Flujo de agua de dilución de mieles (F_{ADM}); (m^3/h)	28,03	30,00	6,6
DQO (Demanda Química de Oxígeno) vinazas; (kg/m^3)	-	47,88	-

En todos los casos se observan valores de error relativo inferiores al 10 % que es considerado aceptable por muchos autores en problemas de ingeniería de bioprocesos (Atala, 2001), (Rivera and Costa, 2006). Se realizó una prueba de hipótesis para comparar los valores promedios de fábrica con respecto al valor calculado por la simulación, concluyéndose para cada uno de los indicadores, que no existen diferencias significativas entre ambos valores con un 5 % de significación, en el Anexo 1 se muestran las pruebas de hipótesis de comparación de medias para dos de los indicadores analizados. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo predice adecuadamente el comportamiento de la industria.

Alternativa 1: Adicionar un rehervidor de fondo a la columna destiladora

Esta variante se realiza con el objetivo de disminuir el volumen de vinazas obtenido al fondo de la columna destiladora y lograr de esta forma un ahorro en los costos de operación. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos al evaluar la *Alternativa 1* y la comparación de los parámetros con los determinados en el CB.

Tabla 2. Comparación de la alternativa 1 con el CB

<i>Indicador</i>	<i>CB</i>	<i>Alternativa 1</i>
Flujo de vinazas (m^3/h)	44,04	35,59
Índice de generación de vinazas (L_{vinaza}/L_{etanol})	15,89	12,84
Flujo de agua de dilución de mieles (m^3/h)	28,03	28,03
DQO vinazas (kg/m^3)	47,88	59,52

Con esta alternativa se logra una disminución del flujo de vinazas de un 19,2 % con respecto al CB. La DQO para este caso aumenta en un 24,25 % debido a que no existe el efecto de mezcla entre el vapor y el líquido que baja por la columna al incorporar un rehervidor al fondo de la columna destiladora y no se diluye el residual, incrementándose también el valor de temperatura de las vinazas para esta variante hasta un valor de 99 °C; estos resultados son positivos o no en dependencia del tratamiento a aplicar según los requerimientos que debe cumplir el residual para ser tratado.

Alternativa 2: Recircular vinazas al tanque de dilución de miel

Esta alternativa se basa en recircular vinazas al proceso de dilución de miel, sustituyendo del 10- 60% del agua de dilución de la miel por vinazas (PRAJ 2013). Tiene como objetivo ahorrar agua de proceso al sustituir el agua de dilución de miel por vinazas y disminuir el volumen de vinazas obtenido al fondo de la columna destiladora al ser reutilizadas en el proceso. Se logra de esta forma un ahorro económico en los costos, desde el punto de vista del volumen de vinazas a manipular y del ahorro de agua en el proceso de dilución de miel. Al recircular vinazas hasta sustituir el 60 % del agua de dilución de miel, el flujo de vinazas al fondo de la columna destiladora disminuye en 39 %. En la figura 1 y 2 se muestra cómo varían algunos parámetros estudiados en función del porcentaje de vinazas a recircular al proceso de dilución de miel.

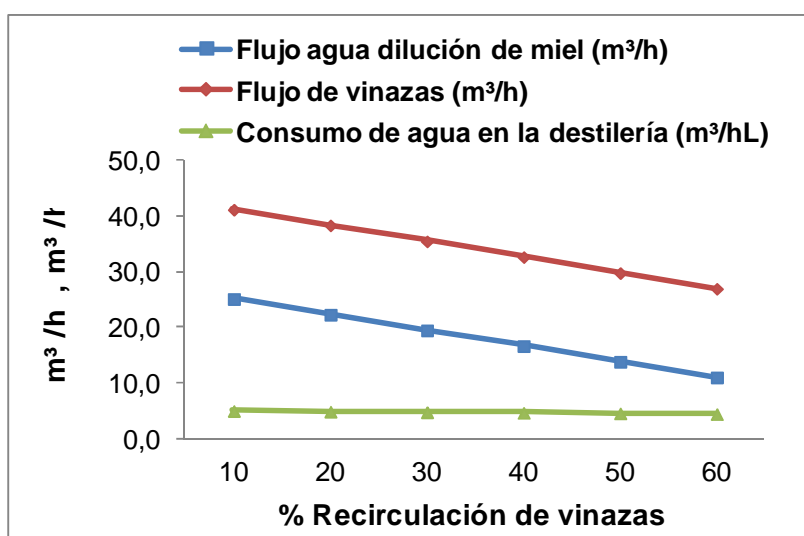


Figura 1. Variación del flujo de agua de dilución de miel, el flujo de vinazas y el consumo de agua en la destilería en función del % de recirculación de vinazas al proceso de dilución de miel

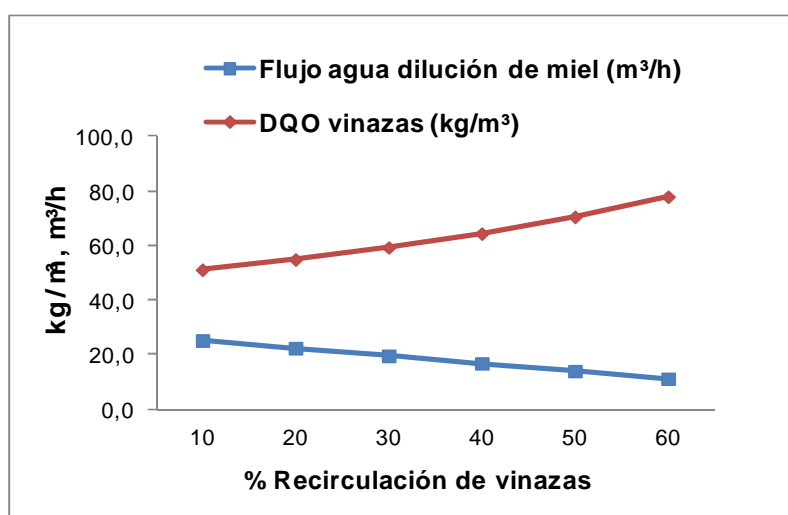


Figura 2. Variación del flujo de agua de dilución de miel y la DQO de las vinazas en función del % de recirculación de vinazas al proceso de dilución de miel

Se realizó un análisis sobre la influencia de la recirculación de vinazas en la concentración de sólidos, ya que al recircular vinazas al proceso de dilución de miel se incorporan al proceso sólidos que acompañan a las vinazas. Estos resultados se muestran en la figura 3.

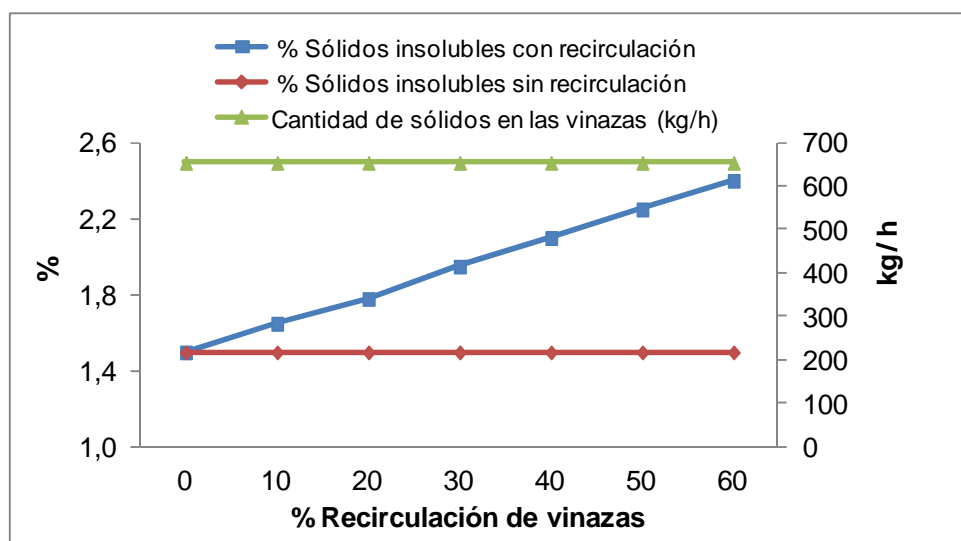


Figura 3. Sólidos insolubles % con y sin recirculación y cantidad de sólidos en las vinazas en función del % de recirculación de vinazas

En el estudio realizado se aprecia un incremento en la concentración de sólidos insolubles en las vinazas obtenidas en el fondo de la columna destiladora, al incrementarse el % de vinazas recirculadas se incorporan sólidos al proceso de dilución de la miel y pasan estos a la fermentación; el volumen de vinazas disminuye al ser reincorporadas al proceso pero la cantidad de sólidos en las vinazas a la salida de la columna destiladora no varían.

Alternativa 3: Tratar las vinazas mediante la concentración e incineración

Desde el punto de vista medio ambiental la alternativa que se recomienda implementar es la alternativa de tratar las vinazas mediante la concentración e incineración, debido a que se realiza el aprovechamiento integral del residual, tiene como ventajas la obtención de cenizas potásicas comercializable como fertilizante, la generación de energía y la reducción de los residuales.

En el caso de tratamiento de las vinazas el sistema consta de las etapas de evaporación, incineración y generación de electricidad. Las vinazas se concentran desde 7 °Bx hasta 60 °Bx, se obtienen 121,63 t/d de vinazas concentradas que se utilizarán como combustible en la caldera generando de 10 a 12 t/h de vapor. Este vapor pasa a un turbo que produce 1 490 kW.h de electricidad. La electricidad será utilizada para satisfacer la demanda de la instalación, aproximadamente 250 kW.h y el resto se venderá a la red nacional. Obteniendo

El vapor que sale del último efecto del proceso de concentración de vinazas es de 293,36 t/d a una temperatura de 117,7 °C se utiliza para alimentar el fondo de la columna de destilación, la que consume 204,21 t/d por lo que se obtiene un ahorro de petróleo de 22,03 t/d. El resto del vapor se empleará en la destilería para la esterilización, la limpieza del área de fermentación u otros usos.

Las sales obtenidas en el proceso de incineración de las vinazas, ricas en potasio, 17,49 t/d, se comercializarían para ser utilizadas como fertilizante en la agricultura cañera.

La tabla 3 muestra un resumen de los resultados obtenidos en la simulación de las alternativas estudiadas. Todas las alternativas tienen un impacto ambiental favorable con la disminución del volumen de generación de vinazas, se obtiene un ahorro del flujo de agua de dilución de miel en la alternativa 2, y la combinación de ambas alternativas 1 y 2 arrojan mejores resultados en los parámetros determinados; ambas alternativas incrementan el valor de DQO obtenido en las vinazas pero con el tratamiento propuesto a este residual mediante la concentración e incineración, este parámetro no tiene incidencia.

Tabla 3. Tabla resumen de alternativas estudiadas

<i>Alternativas</i>	$F_{vz}(m^3/h)$	$\dot{I}nd. vz (L_{vinaza}/L_{etanol})$	$F_{ADM}(m^3/h)$	$DQO_{vz}(kg/m^3)$
CB	44,04	15,89	28,03	47,88
1	35,59	12,84	28,03	59,52
2*	27,05	9,76	11,21	77,96
Combinación (1 – 2*)	18,53	6,69	11,21	114,32

*Los resultados son sobre la base de sustituir el 60 % del agua de dilución de miel por vinazas

La tabla 4 muestra un resumen de los resultados económicos obtenidos en la simulación de las alternativas estudiadas.

Tabla 4. Resultados económicos de alternativas estudiadas

<i>Alternativas</i>	<i>Ganancia anual (\$)</i>	<i>Inversión (\$)</i>	<i>VAN (\$)</i>	<i>TIR (%)</i>	<i>PRC (años)</i>
1	29 697,26	38 320,07	12 124,26	46,59	3,61
2*	86 010,96	186 835,42	30 032,45	40,06	3,79
Combinación (1 – 2* - 3)	2 189 881,20	3 074 136,25	628 251,90	57,77	3,10

PRC: Período de retorno con descuento

En la tabla 4 se observa que las alternativas son factibles económicamente, obteniéndose los mayores beneficios desde el punto de vista del VAN con la combinación de las alternativas incluyendo el tratamiento del residual. En todos los casos la TIR presenta valores por encima de la tasa de interés (12 %) y la inversión se recupera en un tiempo inferior a cuatro años, demostrando liquidez.

4. CONCLUSIONES

1. Con las alternativas analizadas se obtuvo que el flujo de vinazas a la salida del fondo de la columna destiladora y el índice de generación de vinazas disminuye en las dos alternativas estudiadas, el mejor resultado se alcanzó al combinar las alternativas tecnológicas.

2. Los cambios tecnológicos analizados son factibles económicamente, se obtienen TIR mayores que la tasa de interés utilizada y el PRC se encuentra entre 3,10 y 3,79 años.

REFERENCIAS

- Atala, D., Kinetics of ethanol fermentation with high biomass concentration considering the effect of temperature., Applied biochemistry and biotechnology, Vol. 10, 2001, pp. 91-93.
- BPH-PRAJ., Planta de 300 000 L/día de etanol combustible usando fermentación semicontinua, destilación multipresión y deshidratación por tamices moleculares., Intercontinental Infra-Project (P) Ltd India, 2006, pp.7.
- Gavilánez, N.,y Hernández M., Diseño y construcción de un evaporador de simple efecto para concentrar vinaza en la empresa SODERAL S.A., Proyecto de grado, Especialidad de Ingeniería Química en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Ecuador, 2012.
- Gumienna, M., Reduction of water consumption in bioethanol production from triticale by recycling the stillage liquid phase., Acta Sci. Pol., Technol. Aliment, Vol 10, 2011, pp. 467-474.
- Martínez, Y., Pérez, E., Morales, V., y Suárez, E., Estudio preliminar de la mezcla agua-vinazas flemazas y su impacto en la etapa de fermentación en la producción de etanol., Tecnología Química, Vol XXXIII, No. 3, 2013, pp. 206-211.
- Perera, J., Destilerías de alcohol de melaza con efluente cero y ganancia energética, mediante la concentración y combustión de vinazas., Mención de honor, Premio Mercosur de Ciencia y Tecnología, Provincia de Tucumán, 2008.
- Pérez, I.,y Garrido,N., Tratamiento de efluentes de la industria alcoholera. Ventajas y desventajas., Ingeniería Química, No. 455, 2008, pp.148 -157.
- Pérez, O., Modelación, simulación y análisis con fines energéticos de destilerías de etanol hidratado.,Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, 2011.
- Pérez, I., Garrido, N., Capote, O., Navarro, H., y Díez , F., Ventajas de la utilización de las vinazas de destilerías en la producción de energía, Ingeniería Química, No. 503, 2012, pp. 76-79.
- PRAJ, PRAJ's Answers to the questions from Staatsolie, Suriname on LGFL Plant designs, 2013.
- Rivera, E., y Costa, A., Evaluation of optimization techniques for parameter estimation: application to ethanol fermentation considering the effect of temperature., Process Biochemistry, No. 41, 2006, pp.1682-1687.

Anexo 1: Pruebas de hipótesis de comparación de medias

- **Flujo de vinazas (m^3/h)**

Pruebas de hipótesis

Media muestral = 44,0

Desviación estándar muestral = 3,5

Tamaño de muestra = 30

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 44,0 +/- 1,30692 [42,6931, 45,3069]

Hipótesis nula: media = 44,04

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = -0,0625969

Valor-P = 0,950517

No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Flujo de agua de dilución de mieles (m³/h)

Pruebas de hipótesis

Media muestral = 30,0

Desviación estándar muestral = 8,5

Tamaño de muestra = 30

Intervalos de confianza del 95,0 % para la media: 30,0 +/- 3,17396 [26,826, 33,174]

Hipótesis nula: media = 28,03

Alternativa: no igual

Estadístico t calculado = 1,26943

Valor-P = 0,214382

No rechazar la hipótesis nula para alfa = 0,05.