

## **Alternativas Tecnológicas para la Etapa de Destilación en la Obtención de Bioetanol a partir de Bagazo.**

### **Technological Alternatives for Distillation Stage in the Bioethanol Production from Bagasse.**

**Autores:** Dra. Irenia Gallardo Aguilar\*; MSc. Yaillet Albornos Carvajal\*\*; Ing. Lismary Rosa Delgado\*\*\*, Dr. Néstor Ley Chong\*.

**Afiliación:**\* Departamento de Ingeniería Química. \*\*Centro de Análisis de Procesos (CAP). \*\*\* Empresa CUPET Villa Clara.

Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. Código Postal 54830. Tel: 211825-211826-281164.

e-mail: irenia@uclv.edu.cu

**Fecha de presentación:** Octubre/2008.

#### **Resumen:**

En el presente trabajo se analizan alternativas de diseño para la etapa de destilación, para una planta piloto de producción de bioetanol con capacidad de 1,5 Hl/día, con el objetivo de buscar variantes para disminuir el consumo energético de esta operación. Se diseñan los equipos necesarios (columnas rellenas, columnas de platos, condensadores, calentadores, enfriadores y reevaporadores) de cada alternativa, los cuales fueron programados en software Excel y PSI. Se pudo determinar la variante más idónea desde el punto de vista técnico-económico a utilizar. Finalmente se concluye según el análisis de los resultados que la mejor alternativa es la que emplea una columna destiladora de platos, una columna rectificadora empacada con monturas intalox y con reuso de corrientes para el ahorro energético.

**Palabras claves:** Análisis de Alternativas, Destilación, Bioetanol, Diseño de plantas.

#### **Abstract.**

In the present work are analyzed alternatives of design for the distillation stage, for a pilot plant of bioethanol production with a capacity of 1.5 Hl/day, with the aim of looking for variants to reduce the energy consumption of this operation. The necessary equipment of each alternative is designed (packed columns, sieve tray, condensers, heaters, coolers and reboilers), which was programmed in Excel and PSI software. The most suitable variant could be determined from the technical-economic

view point to use. Finally one concludes, according to the analysis of the results that the best alternative is the one than it uses a tray distillation columns, a packed rectification columns with Intalox Saddles and with reuse of currents for the energy saving.

**Key words:** Alternative Analysis, Distillation, Bioethanol, Plant Design.

## **Introducción.**

El aumento de la producción de alcohol etílico en el mundo se ha perfeccionado con el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten obtener bioetanol a partir de residuos de madera, bagazo, desechos sólidos y de otros materiales que presenten celulosa y hemicelulosa disponible, permitiendo revalorizar los desechos de varias industrias para convertirlos en materia prima aprovechable en la obtención de este producto <sup>(1, 2)</sup>.

En el proceso de obtención de alcohol etílico una de las operaciones unitarias más importantes es la operación de destilación, fundamentalmente para la separación de la inmensa cantidad de componentes que acompañan la mezcla obtenida en la fermentación y obtener una mezcla líquida lo mas homogénea y con el mayor nivel de pureza posible, pero tiene como aspecto negativo el alto consumo energético debido a su baja eficiencia termodinámica. Este trabajo trata sobre esta etapa por lo que los objetivos están dirigidos a:

- Analizar algunas alternativas para la concentración del bioetanol, haciendo más eficiente esta operación.
- Seleccionar la variante que sea factible técnica y económicamente para esta etapa de producción de bioetanol a nivel de planta piloto.

## **Desarrollo.**

### **Esquemas para la etapa de destilación de etanol.**

Al efectuarse la destilación de los vinos fermentados por los distintos procedimientos, de acuerdo a la materia prima, se obtienen flemas alcohólicas de diferentes grados, que se caracterizan por contener todas las impurezas volátiles que tenían los vinos, como alcoholes superiores, aldehídos, ésteres, ácidos, etc., las cuales resultan inadecuadas para la preparación de productos de alta calidad como esencias, perfumes, rones clase A y otros usos industriales <sup>(5)</sup>. Para obtener el alcohol puro exigido para los usos citados es preciso realizar una depuración de las flemas, operación que se denomina rectificación que no es más que una destilación fraccionada realizada en una forma especial. En ella se consigue un alcohol de máxima concentración y la extracción de impurezas. Todos los esquemas de

rectificación se basan en los mismos principios y todos incluyen de una manera u otra las siguientes columnas:

- Columna Destiladora/Destrozadora: Elimina la mayor parte del agua del vino de la fermentación, junto con los sólidos suspendidos y sales minerales disueltas.
- Columna Depuradora/Hidroseladora/Extractiva/ de alto grado: Concentra el alcohol desde 45° hasta el 93 % peso, elimina toda la acidez y parte de los aceites que venían de la destiladora, reduciendo el porcentaje de alcoholes de mal gusto.
- Columna Rectificadora: Su principal función es alcanzar el grado alcohólico deseado, y eliminar a su vez productos de cola.
- Columna Repasadora/Pasteurizadora/Desmetilizadora: Actúa solo sobre el alcohol concentrado, completando la separación de impurezas de cabeza principalmente.

Como fue señalado, una de las desventajas de esta operación es su alto consumo energético, por lo que se han analizado una serie de esquemas que conlleven a disminuir estos consumos los cuáles se analizan en dos grupos <sup>(3)</sup>:

- Los que introducen mejoras en los procesos de separación. (Operaciones impracticables)
- Los que introducen mejoras en la transferencia de calor: En este caso casi siempre se requiere del uso de múltiples columnas (dos como mínimo) conocido como efectos múltiples y son los más empleados en la práctica.

De acuerdo a los esquemas anteriores y teniendo en cuenta los empleados en nuestras destilerías, se analizaron diferentes alternativas, que contemplan emplear dos columnas, una destiladora (CD) y una rectificadora o de alto grado (CR), que concentra los vapores alcohólicos (VA) que salen de la destiladora, para obtener un alcohol de 95° GL, considerando las dos columnas de platos, considerando la destiladora de platos, por traer la batición algunas partículas en suspensión y para la rectificadora, por la pequeña capacidad, una columna rellena, empleando empaques de anillos Rasching cerámicos de ¾ pulgada y monturas Intalox de 1 pulgada. Para hacer un aprovechamiento del calor se precalienta la batición con los vapores de la rectificadora y posteriormente en una variante se calienta hasta el punto de ebullición en un calentador con vapor y en otras aprovechando el calor de las vinazas de la destiladora la cual se enfría hasta 84 ° C.

Los datos seleccionados para el diseño fueron obtenidos mediante balances en toda la planta de producción de alcohol <sup>(4)</sup>, los que para esta etapa se reflejan a continuación:

Para la columna Destiladora:

Composición de la alimentación:  $X_F = 5^\circ\text{GL} = 3,9\%$  masa

Alimentación de vapor vivo con presión de 1,4 Kg/cm<sup>2</sup>

Composición del vapor del tope:  $X_{VA} = 60^\circ\text{GL} = 53,7\%$  masa

Composición del residuo o vinaza:  $2 \cdot 10^{-3}$  % masa.

Del balance de materiales los flujos fueron los siguientes:

Flujo de Batición F: 133,41 Kg/h

Flujo de vapor de alcohol VA: 8,235 Kg/h

Flujo de Vinaza: 188,6 Kg/h

Para la columna Rectificadora:

Composición de la alimentación en forma de vapor: 60°GL= 53,7% masa

Composición del destilado en el tope: 95°GL= 93,6% masa

Composición del residuo o cola: 30°GL =25% masa

Flujo de Alcohol Destilado: 4,5312 Kg/h

Flujo de Cola en la rectificadora: 3,70 Kg/h

Relación de reflujo R: 1,5  $R_{\min} = 4,88$

En el diseño se hará referencia a los equipos fundamentales de esta etapa las columnas de destilación. Para el cálculo del diámetro de las columnas se emplearon los métodos tradicionales reportados en la bibliografía <sup>(6,9)</sup>.

Para la altura de las columnas de platos, en el cálculo de las etapas teóricas se emplearon métodos no muy usados tradicionalmente, por ejemplo en la destiladora, se aplicó el método de las ecuaciones de Kremser, ya que se tiene que concentrar mucho el alcohol, partiendo de una baja concentración, se aplicó la ecuación reportada por <sup>(9)</sup>.

$$N_p = \frac{\log \left[ \frac{x_m - \frac{x_w}{\alpha}}{x_w - \frac{x_w}{\alpha}} (1 - A) + A \right]}{\log \frac{1}{A}}$$

Donde:  $N_p$  es el número de etapas teóricas,  $x_m$  es la composición de la alimentación  $x_F$ ,  $x_w$  composición de la vinaza y  $A = L/\alpha V$ , siendo  $\alpha$  la volatilidad relativa de la mezcla a destilar.

Para la columna rectificadora se empleó el método de Sorel-Lewis el cual fue programado en *Software Profesional Microsoft Excel* que es un método analítico. Para su aplicación hay que conocer las ecuaciones que relacionan los datos de equilibrio (CE) y conocer las líneas de operación (LO) de cada sección por balances de materiales. Estas serán:

$$y^* = -7.4256 * x^4 + 17.843 * x^3 - 14.79 * x^2 + 5.2004x + 0.0862 \quad (\text{CE Etanol-Agua})$$

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1} \quad (\text{LO de la sección enriquecedora})$$

$$y_m = \frac{L}{L-W} X_m - \frac{W}{L-W} X_w \quad (\text{LO de la sección empobrecedora})$$

Donde: R es la relación de reflujo,  $x_D$  y  $x_w$  composición del destilado y residuo y L y W flujos de líquido en la sección de agotamiento y residuo respectivamente

Para determinar la altura de la rectificadora rellena, se aplicó el método de la altura equivalente al plato teórico (HETP), no tan usado en el diseño de estas columnas

$$Z = N_p * HETP$$

$$HETP = 5.2 \frac{4V_{lib}}{\sigma} \left( \frac{4w \rho_{vap}}{\sigma \mu_{vap}} \right)^{0.2} \left( \frac{R+1}{R} \right)^{0.35} \left( \frac{\rho_{liq}}{\rho_{vap}} \right)^{0.2} \frac{\log \frac{R}{m(R+1)}}{1 - \frac{m(R+1)}{R}}$$

Los parámetros de la ecuación son las características del empaque y las propiedades de los fluidos tratados<sup>6</sup>

### **Alternativas analizadas.**

Alternativa I: Compuesta por la CD de platos perforados y CR rellena con anillos Rasching de  $\frac{3}{4}$  pulgada de diámetro nominal. Calentamiento de la alimentación con vapores de la rectificadora y con vapor de agua en un calentador a la entrada de la columna.

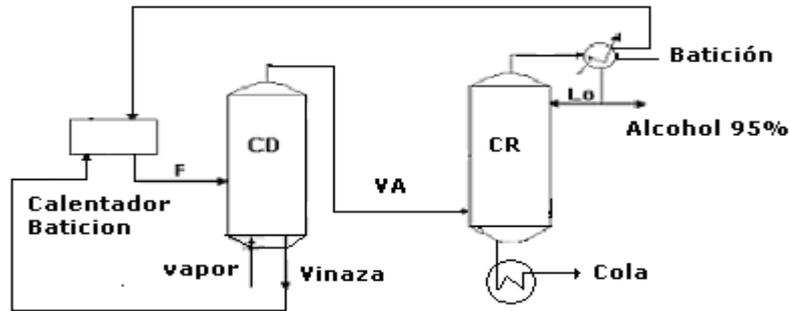
Alternativa II: El esquema de esta alternativa coincide con el anterior, pero con la variación de que en la columna rectificadora el empaque es con Monturas Intalox de 1 pulgada. Calentamiento de la alimentación con vapores de la rectificadora y con vapor en el calentador a la entrada de la columna.

Alternativa III: Compuesta por ambas columnas de platos perforados. Calentamiento de la alimentación con vapores de la rectificadora y con vapor en el calentador

Alternativa IV: Alternativa I con calentamiento de la alimentación con vapores de la rectificadora y empleando las vinazas como medio de calentamiento en el calentador.

Alternativa V: Alternativa II con calentamiento de la alimentación con vapores de la rectificadora y empleando las vinazas como medio de calentamiento en el calentador.

Un esquema de esta última alternativa aparece reflejado en la figura 1



**Figura 1. Esquema de flujo de la alternativa V.**

En las tablas 1, 2 y 3 aparecen los resultados del diseño de las columnas de las diferentes alternativas.

**Tabla 1. Datos de diseño de la Columna Destiladora.**

<i>Parámetro</i>	<i>Resultados</i>	<i>UM</i>
Número de Platos teóricos	6.16	-
Eficiencia de plato	0,4	-
Número de Platos reales	16	-
Distancia entre platos	0,25	m
Altura	3.75	m
Diámetro	0,22	m
Material de Construcción	Acero Inoxidable	-
Caída de presión	1130.065	Pa

**Tabla 2. Datos de diseño de las Columnas Rectificadoras Rellenas.**

<i>Parámetro</i>	<i>Alternativas I y IV</i>	<i>Alternativas II y V</i>	<i>UM</i>
Empaque de anillos Rasching	$\frac{3}{4}$ "	1"	Pulgada
Diámetro	0.10	0.06	m
Np teóricos sección enriquecedora.	8.37	11.13	-
HETP en la sección enriquecedora	0.4789	0.27	m
Altura de la sección enriquecedora	4.12	3.014	m
Np teóricos sección empobrecedora	2	2	-
HETP en la sección empobrecedora	0.5866	0.28	m
Altura de la sección empobrecedora	0.1173	0.577	m
Altura total de empaque en la torre	4.626	3.59	m
Caída de presión/altura de empaque	490.2	612	Pa/m
Caída de presión	2022.74	2199.78	Pa

**Tabla 3. Columna rectificadora de platos.**

<i>Parámetro</i>	<i>Alternativas III</i>	<i>UM</i>
Número de Platos teóricos	6.29	-
Eficiencia de plato	0.52	-
Número de Platos reales	15	-
Distancia entre platos	0,25 m	m
Altura	3.5 m	m
Diámetro	0,12 m	m
Material de Construcción	Acero Inoxidable	-
Caída de presión/Plato	1447.44 Pa	Pa
Caída de presión total	21711.6 Pa	Pa

Al hacer un análisis de estas alternativas en cuanto a las ventajas desde el punto de vista tecnológico, se puede apreciar que el empleo de la columna rellena con monturas, en la rectificación, es la de menores dimensiones (menor diámetro y altura). En esta se necesita una menor área de transferencia, debido a la eficiencia reportada para este tipo de empaque, pues aunque la superficie específica de los anillos y monturas para estas dimensiones son similares al ser el volumen libre o porosidad de la cama de las monturas, mayor que el de anillos permite el manejo de los flujos con diámetros menores.

Los costos fueron determinados empleando datos de Peters <sup>(7)</sup>. En la tabla 4 se presenta un resumen de los costos de inversión y de producción de las diferentes alternativas.

**Tabla 4 Costos de Inversión y de producción de las alternativas**

<i>Alternativa</i>	<i>CTI (\$)</i>	<i>CTP (\$/a)</i>	<i>TR</i>
I	28114,8	68337,52	0,379
II	25832,8	68147,16	0,4259
III	35324,8	68938,97	0,4114
IV	29374,8	64447,31	0,4557
V	27372,8	64269,67	0,5124

Los resultados del diseño de la planta completa, así como de los costos de inversión y de producción de cada alternativa aparecen reportados por Rosa <sup>(8)</sup>.

### **Resultados y discusión.**

En la tabla 4 se puede apreciar que la alternativa de mayor costo total de inversión es la alternativa III puesto que la misma esta compuesta por dos columnas de platos y estas son más costosas que las rellenas, sin embargo las restantes alternativas presentan inversiones similares. En cuanto al costo total

de producción existen marcadas diferencias entre las alternativas I, II y III con respecto a la IV y V debido a que en estas dos últimas no se necesita de vapor en el intercambiador de calor, que es lo que hace de esta operación una de las más costosas dentro de las operaciones de separación, sino que las vinazas sirven como medio de calentamiento de la batición lográndose así un menor consumo de energía y por tanto un menor costo de producción. En cuanto al tiempo de recuperación de la inversión todas las alternativas se recuperan en un tiempo menor que el tiempo mínimo. Se realizó el análisis comparativo de las alternativas y se pudo apreciar que la alternativa V es la que presenta menores costos de inversión y de producción, por lo que se puede concluir que esta es la mejor alternativa

### **Conclusiones.**

1. El empleo de ecuaciones y métodos de cálculo no convencionales para el diseño de las columnas de destilación fue efectivo, dada la facilidad de los mismos y los resultados obtenidos para el equipamiento.
2. Para el montaje de destilerías de alcohol de pequeñas capacidades, es ventajoso el empleo de columnas rectificadoras rellenas, por la facilidad de su construcción, su economía; si se emplean empaques eficientes, y su resistencia a la corrosión.
3. El análisis de diferentes alternativas, teniendo en cuenta esquemas de destilerías, con aprovechamiento de corrientes del propio proceso, como la reutilización de las vinazas permiten el aprovechamiento energético de las mismas a la vez que disminuye el efecto nocivo al medio ambiente de este residuo.
4. La mejor variante técnica, económica y ambiental es la variante V, la cual esta compuesta por columna destiladora de platos, columna rectificadora de monturas Intalox de 1 pulgada y recirculación de las vinazas.

### **Bibliografía.**

1. Cunnigham E. R, López,D,G “ Etanol de Lignocelulósicos. Tecnología y Perspectivas” Universidad de Santiago de Compostela.1994.
2. González S, E.y col. La transferencia de tecnología para el desarrollo diversificado de la industria de la caña de azúcar. Revista Centro Azúcar #1 2003.
3. Holland Ch. D. “Fundamentos de destilación de mezclas multicomponentes”. México 1988.
4. Ley Chong, N. “Contribución a los métodos de asimilar tecnologías, aplicado a un caso de producción de Biocombustibles”. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Julio 2006.

5. López B, N. "Alternativas para la obtención de productos de alto valor agregado a partir de bioetanol mediante técnicas de destilación". Tesis en opción al grado científico de Doctor en CT. Cuba 2005.
6. Pavlov, K. F: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química, Cap. 7. Editorial MIR, Moscú, 1981 pp.340-344.
7. Peters, Max. S; Timmerhaus, Klaus D and West, Ronald E. "Plant Design and Economics for Chemical Engineers". Fifth Edition. McGraw-Hill. 2003.
8. Rosa, D.L "Alternativas de la etapa de destilación de una planta piloto para la obtención de bioetanol" Trabajo de Diploma. UCLV. Cuba 2006.
9. Treybal, R. E Operaciones con transferencia de masa, 2<sup>da</sup> edición, Mc Graw Hill, 1981.pp186-190, 414.