

REDUCCIÓN DE CONSUMO DE AGUA EN EL PROCESO DE ETANOL CARBURANTE APLICANDO TECNOLOGÍA PINCH

R. Erazo E.¹, J. Woolcott H.², F. Anaya M.³, H. Gómez R.⁴, E. Calvo B.⁵

RESUMEN

Se aplica el análisis Pinch para la reducción de consumo de energía y agua en el proceso de producción de etanol carburante y se demuestra la viabilidad técnica, económica y ambiental. Se reducen los consumos de calor, agua y costo total de proceso hasta 50, 40 y 25%, respectivamente.

Palabras clave: Tecnología Pinch, etanol carburante, integración de procesos.

REDUCTION OF WATER CONSUMPTION IN THE PROCESS OF ETHANOL FUEL APPLYING PINCH TECHNOLOGY

ABSTRACT

Pinch analysis is applied to reduce energy and water consumption in the process of fuel ethanol production so the technical, economic and environmental feasibility is demonstrated. The consumption of heat, water and total cost of process is reduced to 50, 40 and 25% respectively.

Key words: Pinch technology, ethanol fuel, process integration.

INTRODUCCIÓN

El agua se utiliza ampliamente en los procesos industriales para diversos propósitos, tales como solvente, sistemas de refrigeración, limpieza, servicios varios, entre otros. Existen algunas alternativas para la reducción de su uso, de los cuales 3 son los más importantes: 1) eliminar pérdidas, 2) optimizar sus aplicaciones y 3) reutilizar o reciclar. Las diferentes calidades requeridas, cuyos parámetros están contemplados en las diferentes normatividades vigentes en cada país, permiten realizar tratamientos y su uso en cascada. Antes de su disposición

final, es importante caracterizar las aguas residuales para su tratamiento y/o destino específico, esta actividad debe contemplar la posibilidad de recuperar el contaminante.

La Tecnología Pinch es un método de optimización de procesos basado en la termodinámica. Esta ha sido aplicada con éxito en diferentes industrias como la petroquímica, la química alimentaria, la papelera, entre otras. La aplicación de esta técnica potencia el diseño ingenieril del proceso y facilita la optimización del consumo total de energía y de masa.

1 Departamento Académico de Procesos, FQIQ – UNMSM, ray2erazo@yahoo.es

2 Departamento Académico de Química Orgánica, FQIQ – UNMSM, juancawoolcott@yahoo.es

3 Departamento Académico de Química Analítica, FQIQ – UNMSM, fanayamel@yahoo.com

4 Departamento Académico de Química Analítica, FQIQ – UNMSM, hgomezr6@hotmail.com

5 Departamento Académico de Procesos, FQIQ – UNMSM, e13calvo@gmail.com

En la Facultad de Química e Ingeniería Química de la UNMSM se viene desarrollando un programa de investigación en el área de los procesos más limpios de etanol carburante identificando diversos sustratos como materia prima. Se cuenta con una base de datos para etanol carburante de almidón de camote y de melaza de caña de azúcar, así como la información tecnológica de las actuales plantas de producción de etanol industrial de 95% v/v en el Perú, de los cuales se debe resaltar que parte del costo total del proceso está fuertemente determinado por los altos consumos de energía y agua en el proceso y en los sistemas de enfriamiento.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es: desarrollar un proceso que permita reducir el consumo de energía y agua en la producción de etanol carburante y aplicar el análisis Pinch para producir un paquete tecnológico para el desarrollo sostenible de este sector industrial en el Perú.

MARCO TEÓRICO

Tecnología para producción de etanol

La etapa de la fermentación alcohólica de las plantas industriales en el Perú es discontinua, el cual se alimenta con reactivación y

reciclo del fermento. El contenido final de etanol en esta etapa es de 8 a 9,5% v/v. La concentración de fermento varía entre 10 a 12% v/v; y el tiempo de fermentación es de 10 a 14 horas. El rendimiento (estequiométrico) varía entre 89 a 91%; La temperatura de fermentación es de 28 a 30 °C; En estas condiciones, la productividad es de 0,15 a 0,17 m³ etanol/m³/día. En la Figura N.º 1 se puede observar la cadena productiva de etanol carburante.

Sistemas de recuperación de etanol

La separación y recuperación de etanol producido por fermentación de diferentes materias primas se desarrolla de la misma forma. El etanol se debe concentrar desde 8 a 9,5% v/v en los mostos hasta 99,5% v/v, que es la concentración del etanol carburante utilizado para las mezclas con gasolina. Por destilación a presión atmosférica se logra una máxima concentración de etanol de 96% v/v, por lo que para obtener la concentración de etanol carburante se requiere aplicar otras operaciones no convencionales de separación como la destilación a bajas presiones, la destilación azeotrópica, la destilación extractiva, la adsorción, la per-vaporación, entre otros^[1,2,3].

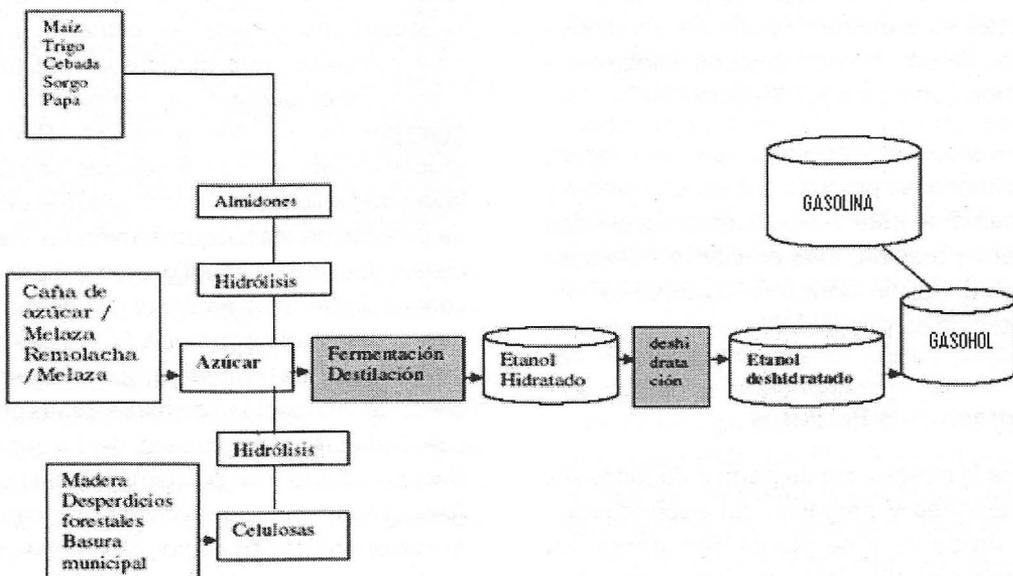


Figura N.º 1. Cadena productiva del etanol carburante.

La destilación a vacío se lleva a cabo a presiones inferiores a la atmosférica, 6 kPa, lo que elimina el azeótropo. Sin embargo, se requiere columna de gran número de etapas, mayor a 40, y alta relación de reflujo, esto eleva los costos de capital y operación por el mantenimiento del vacío en la columna de gran número de platos^[18].

La destilación azeotrópica consiste en agregar a la mezcla etanol-agua un tercer componente como el benceno, tolueno o n-pentano, lo que genera un sistema de destilación con tres columnas. Esta operación ha perdido interés por la presión de control ambiental respecto de los solventes que han demostrado ser agresivos para la salud humana. Fueron reemplazados por etilenglicol, pero los costos energéticos son mayores comparados con la destilación azeotrópica con benceno^[4,5,6].

La destilación extractiva se realiza con agentes másicos salinos como el acetato de potasio. La recuperación del agente másico se realiza por evaporación y secado por aspersión^[16]. Se utilizan también polímeros hiper-ramificados como poliesteramida y poliglicerol hiper-ramificado^[22].

La adsorción de agua con tamices moleculares es otra operación que se aplica para la recuperación de alcohol carburante. Estos tamices se preparan a partir de aluminosilicatos de potasio dando poros selectivos a las moléculas de agua y etanol^[17].

Otro método es la aplicación de membranas, inicialmente se propuso la ósmosis inversa y actualmente está dando buenos resultados la pervaporación, evaporación a través de membranas, en donde la corriente de alimentación es gaseosa^[14].

Integración de Procesos

Busca la integración de parte o de todas las operaciones y procesos correspondientes a la producción de etanol carburante. La síntesis y análisis del proceso es más versátil aplicando ciertas reglas heurísticas, las

cuales si son potenciadas con un enfoque sistémico del proceso global el resultado es exitoso. En esta fase es fundamental la simulación para evaluar un gran número de diagramas de procesos alternativos. Desde este punto de vista, se tienen varias alternativas de integración de procesos: la integración reacción – reacción, la integración reacción – separación y la integración separación – separación^[7,8,13].

Integración reacción-reacción

Los procesos simultáneos que se desarrollan en una misma unidad, permiten una intensificación mutua y el desarrollo de diagramas de procesos más compactos. El punto de partida es el proceso no integrado de hidrólisis y fermentación separadas, a partir del cual se pueden formular varios tipos de integración reacción-reacción. La literatura reporta varios trabajos realizados en este sentido, los mismos que consisten en el uso de varios microorganismos en forma simultánea actuando sobre un complejo sustrato, mejoramientos genéticos de las células productoras de etanol, fermentación conjunta de pentosa y glucosa entre otros^[14,15,17].

El uso de cepas genéticamente mejoradas, recombinantes, integra a nivel celular y/o molecular una serie de reacciones químicas muy complejas que permite la realización a nivel macroscópico de varios procesos químicos en una misma unidad. Por este procedimiento se han producido cepas de levadura amilolíticas, favoreciendo el diseño de proceso de etanol que elimina las etapas de licuefacción y sacarificación del proceso convencional, con enzimas exógenas. Se han desarrollado cepas de *S. cerevisiae* a las cuales se les ha incorporado un plásmido que le da la capacidad de expresar los genes que codifican la α -amilasa de la bacteria *Bacillus subtilis* y la glucoamilasa del hongo *Aspergillus awamori*, convirtiendo directamente el almidón en etanol, obteniendo 47,5 g·L⁻¹ de etanol en cultivo por lote alimentado, contra 15,6 g·L⁻¹ en cultivos por lote^[21].

Integración reacción-separación

El objetivo está dirigido a incrementar la productividad de la etapa de fermentación. Esto es factible por varias alternativas que van desde integrar la fermentación y separación por remoción directa del etanol a través de membranas, pervaporación, hasta el uso un agente másico de extracción que tenga naturaleza biocompatible, fermentación extractiva, que combina la extracción líquido-líquido con el cultivo de microorganismos^[21].

Los resultados de modelar el proceso de fermentación extractiva por lotes de biomasa lignocelulósico, utilizando n-dodecanol como solvente, por su alta selectividad al etanol y mínima toxicidad para el microorganismo, demostró la posibilidad de disminuir el consumo de energía e incrementar la productividad comparado con el proceso convencional de producción de etanol^[11].

Integración separación-separación

La integración separación-separación en la producción de etanol se complementa con los nuevos enfoques de intensificación de procesos. La simulación de los esquemas de deshidratación de etanol complementada con la evaluación de los costos energéticos y de capital, muestra que aun cuando la deshidratación con tamices moleculares incurre en elevados costos por la complejidad del sistema de automatización y control que implica el manejo alternado de diferentes regímenes de presión, este método de deshidratación presenta los menores costos de operación de los esquemas analizados^[18].

Otro proceso obtenido por simulación para la deshidratación de alcohol etílico mediante propano, en condiciones cercanas a la supercrítica, muestra que el esquema de recompresión del vapor con enfriamiento del extracto y eliminación del agua y la preconcentración de la alimentación, es la mejor alternativa frente a la destilación azeotrópica^[10].

Otros estudios en planta piloto han demostrado la integración del proceso de

destilación de etanol con la pervaporación, obteniéndose buenos resultados en relación al ahorro de energía por los bajos costos de operación de la pervaporación y al alto rendimiento de etanol carburante. La comparación entre la destilación azeotrópica con benceno y el sistema de pervaporación con múltiples módulos de membranas, muestra que para una misma tasa de producción de etanol e idéntica calidad del producto, 99 % p/p, los costos energéticos son aproximadamente 1/5 de los correspondientes para la destilación azeotrópica^[20].

Integración energética

El objetivo de esta integración es la mejor utilización de los flujos de energía generados y consumidos en el proceso de etanol carburante orientados a reducir el consumo de fuentes externas de energía, servicios, como la electricidad, los combustibles fósiles utilizados para la generación de vapor y el consumo de agua de enfriamiento^[21].

La tecnología Pinch suministra las herramientas necesarias para diseñar la red de intercambiadores de calor y de servicios del proceso de etanol carburante. La ventaja de este procedimiento es que permite calcular los requerimientos de energía para el proceso sin tener que desarrollar un diseño detallado. La integración térmica de procesos se ha perfilado como una de las directrices de la integración de procesos que más puede aportar en la síntesis de esquemas tecnológicos de diversa índole^[22].

La simulación y optimización de producción de etanol a partir de melaza de caña produce el diagrama de proceso a través de su integración térmica, enfatizando en el esquema de separación de etanol por destilación^[19]. Empleando el mismo enfoque de la integración térmica para el análisis de las etapas de fermentación, destilación y evaporación del proceso de etanol carburante a partir de biomasa lignocelulósica que utiliza la destilación azeotrópica para la deshidratación de etanol, se obtuvo el diagrama de proceso optimizado^[9].

Integración másica

El proceso de etanol carburante consume grandes niveles de agua tanto en el proceso mismo como en las tareas diversas relacionadas de limpieza. Para complementar un enfoque sistémico del proceso, es conveniente focalizar el agua destinada a la limpieza, para ello se deben identificar las distintas operaciones y procesos unitarios que utilizan agua para limpieza. Los parámetros seleccionados para cuantificar la contaminación de las corrientes de agua son: la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST), medidos en ppm y sus valores, altos o bajos según el origen del efluente, se deben a los contaminantes transferidos a las corrientes de agua en las diferentes actividades del proceso.

Los datos se deben obtener por mediciones de consumo y análisis de efluentes de las diferentes operaciones y procesos, así como las concentraciones límite de entrada y salida de cada corriente, para lo cual debe tomarse en cuenta la normatividad ambiental en relación a los LMPs o ECAs correspondientes y vigentes en el país. Se debe determinar el punto Pinch que limita las alimentaciones requeridas de agua para dichas actividades. El costo de tratamiento disminuye conforme disminuye el caudal de efluente, por lo tanto el objetivo es minimizar el caudal de entrada al proceso de tratamiento.

En el caso de múltiples contaminantes y múltiples procesos de tratamiento, todos los contaminantes están presentes en las corrientes de efluente en forma simultánea.

MÉTODOS Y RESULTADOS

Sobre la base de los resultados de los proyectos de investigación en la Facultad y que están relacionados a los biocombustibles, la primera fase consiste en definir las corrientes del proceso productivo que aportan información relevante para el análisis Pinch. Luego, se procede a la caracterización de las corrientes de efluentes. La etapa final consiste en el diseño del sistema de reduc-

ción de consumo de energía y agua para el proceso aplicando el análisis Pinch.

En la Figura N.º 2 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al sistema de destilación de etanol industrial base para el análisis Pinch de calor y masa, en donde se observa que el lanzamiento de las vinazas para tratamiento, previamente debe concentrarse con vapor de baja presión, VBP, que genera una corriente de condensado de baja presión, CBP.

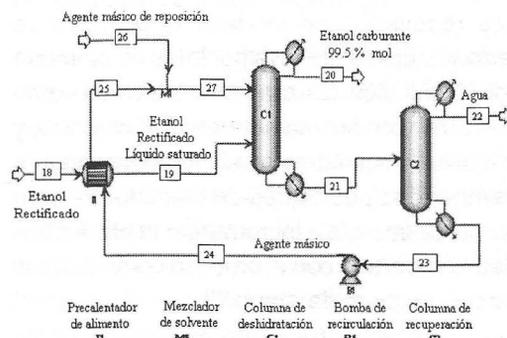


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención de etanol rectificado.

En la figura 3 se muestra el diagrama de proceso para la deshidratación de etanol rectificado proveniente de la primera instalación mostrado en la figura 2 y en donde se aplica un agente másico para la separación de la mezcla azeotrópica. El sistema está constituido de una etapa de recuperación y recirculación del agente másico, de manera que se cumple con los parámetros de regulación ambiental y en la tabla 1 se presentan los datos de corrientes de proceso para análisis.

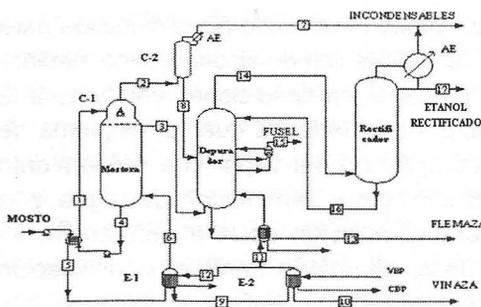


Tabla 1. Datos de corrientes de proceso de etanol carburante para análisis Pinch.

Nº	DESCRIPCIÓN	T _{ent} , °C	T _{sal} , °C	CP, kW/°C
1	Mosto de la columna despojadora	105	40	27,90
2	Mosto de la columna rectificadora	96	40	1,46
3	Vapor que sale de la columna rectificadora	83	79	0,31
4	Condensado al 1er condensador de la columna rectificadora	79	74	0,14
5	Condensado al 2do condensador de la columna rectificadora	74	34	0,12
6	Mosto de la columna purificadora	93	40	0,015
7	Condensado al 2do condensador de la columna purificadora	79	677	0,072
8	Condensado al 2do condensador de la columna despojadora	77	40	0,047
9	Mezclador y clarificador	34	95	22,60

Aplicando el análisis Pinch para transferencia de masa entre las corrientes ricas y pobres del proceso de etanol carburante, se han determinado los puntos Pinch, los cuales se muestran en las figuras 4 y 5, los mismos que corresponden al análisis para los casos de los contaminantes del agua expresados como demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), respectivamente.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La reducción de consumo de agua en el proceso de etanol carburante debe enfocarse a través de dos aspectos, el consumo de agua para proceso propiamente y que compromete la generación de grandes efluentes y, por otro lado, agua destinada para todas las operaciones de limpieza de las actividades

relacionadas a las distintas operaciones y procesos unitarios.

Con relación a las vinazas del proceso de etanol carburante, éstas contienen tanto material soluble como suspendido y tiene altos valores de contaminantes expresados como demanda bioquímica de oxígeno, DBO₅ = 30 000 a 60 000 ppm, y una demanda química de oxígeno, DQO = 2 000 a 12 000 ppm, mientras que los sólidos suspendidos totales, SST = 500 a 3 000 ppm, tal como se observan en los gráficos 4 y 5. Esta es la mayor fuente de contaminación ambiental del proceso, por cuanto en una instalación de etanol industrial que utiliza melaza de caña como materia prima, se producen más de 20 litros de vinazas ligeras por cada litro de etanol producido. Para minimizar los costos de tratamiento, se recicla una fracción de las vinazas luego de tamizarlas o centrifu-

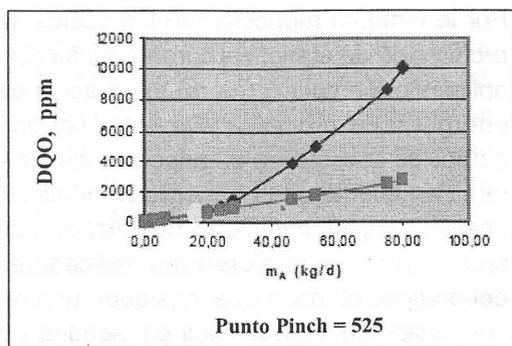


Figura 4. Determinación del punto Pinch para demanda química de oxígeno (DQO).

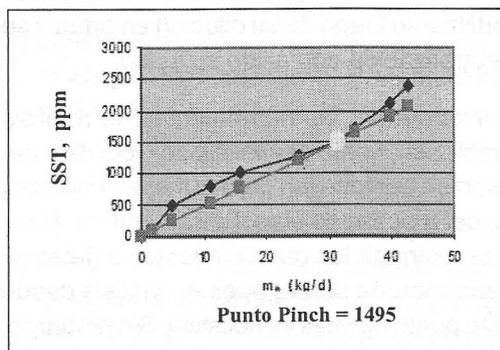


Figura 5. Determinación del punto Pinch para sólidos suspendidos totales (SST).

garlas, los cuales puede servir para nuevos preparados de cultivo de microorganismos para fermentación.

La caracterización de esta vinaza, luego que es centrifugada para recuperar los sólidos orgánicos, especialmente las levaduras, muestra que contienen hasta un 1,1% de potasio y 3,1% de cenizas. La disposición final de gran parte de estas vinazas es en los campos de plantaciones de caña de azúcar, en donde se aplican considerando la viabilidad económica. Las vinazas ayudan a la formación de un buffer inicial del suelo con Ca y Mg, lo que eleva el pH, mejoran las propiedades físicas del suelo y aumentan la retención de agua y sales, sin embargo, producen olores fuertes, vectores de insectos, aumentos de la acidez del suelo, la lixiviación de sales, la putrescibilidad, la deficiencia de Mn y la inhibición de la germinación de las semillas^[19,20,22].

Otros tratamientos de las vinazas de caña con altos valores de DBO o DQO y SST se realizan por fermentación anaeróbica a través de un cultivo mixto de bacterias y por incineración. Por el primero se obtiene una reducción de la DQO del 94% y por incineración se logra una recuperación efectiva de energía y de minerales. Antes de su incineración, las vinazas se concentran por evaporación hasta cerca del 50-60% en sólidos en evaporadores de 4 ó 5 efectos. La combustión de las vinazas produce la energía necesaria para este proceso de concentración. Las cenizas de la incineración tienen cerca de un 30 a 40% de K_2O y 2 a 3% de P_2O_5 , lo que las convierte en fertilizante luego de su dilución en agua y su neutralización con ácido sulfúrico.

Por otro lado, las herramientas de análisis ambiental, como el análisis de ciclo de vida, también contribuyen para el mejor desempeño del proceso de etanol carburante sin tener que restringir los procedimientos a determinada materia prima, pues el análisis desde este punto de vista es holístico. Sin embargo, debido a los numerosos y diversos enfoques metodológicos que dificultan el uso y valora-

ción de los distintos indicadores ambientales, se requiere la unificación de los diferentes criterios de evaluación ambiental.

En cuanto a requerimientos de agua para sistemas de enfriamiento y limpieza en general en el proceso, el análisis Pinch es la herramienta apropiada para la determinación de estos requisitos reales, y es a través de las redes de transferencia de calor y masa para proceso, que es posible cuantificar los niveles de ahorro en el uso de energía y agua. A partir de los datos de proceso dados por la Tabla N.º 1 y el análisis Pinch mostrado en las figuras 4 y 5, se determinan que el consumo de agua y energía se reducen hasta en un 40% y 50%, respectivamente, determinándose por este trabajo que el impacto es significativo en el costo total de producción de etanol carburante, reduciéndolo hasta en un 25% respecto de los procesos convencionales.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado el proceso productivo de etanol carburante que reduce los consumos de energía y agua tanto para el proceso como para los sistemas de enfriamiento y limpieza de las distintas unidades de operaciones y procesos unitarios.

Aplicando el análisis Pinch se ha determinado una reducción de consumo de energía, agua y costo total de producción para proceso de etanol carburante a partir de melaza de caña de azúcar hasta en un 50, 40 y 25%, respectivamente, respecto de los procesos convencionales.

Por lo tanto, la reducción de los costos de producción de etanol carburante es factible aplicando los conceptos de integración de energía y de procesos. De esta manera, ambos se constituyen en aspectos claves a tener en cuenta en la generación, síntesis, análisis, implementación y optimización de tecnologías que mejoren los indicadores del proceso global o que impliquen una reconversión de los procesos empleados y/o el diseño de nuevos procesos competitivos y sostenibles.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Superior de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el financiamiento de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Budich M, Brunner G. (2003). Supercritical fluid extraction of ethanol from aqueous solutions. *J. Supercrit. Fluid* 25: 45-55.
- [2] Cardona C, Sánchez O. (2004). Analysis of integrated flow sheets for biotechnological production of fuel ethanol. En PRES (2004) - 16th Internat. Cong. Chemical and Process Engineering (CHISA2004). Praga, República Checa. (Formato CD).
- [3] Cardona C. A, Sánchez O. J, Montoya M. I, Quintero J. A. (2005). Analysis of fuel ethanol production processes using lignocellulosic biomass and starch as feedstocks. En 7th World Congress of Chemical Engineering. Glasgow, Escocia, RU. (Formato CD).
- [4] Chianese A, Zinamosca F. (1990). Ethanol dehydration by azeotropic distillation with a mixed-solvent entrainer. *Chem. Eng. J.* 43: 59-65.
- [5] Chin P. M, Ingledew W. M. (1994). Effect of lactic acid bacteria on wheat mash fermentations prepared with laboratory backset. *Enzyme Microb. Technol.* 16: 311-317.
- [6] Chotani G, Dodge T, Hsu A, Kumar M, LaDuca R, Trimbur D, Weyler W, Sanford K (2000). The commercial production of chemicals using pathway engineering. *Biochim. Biophys. Acta* 1543: 434-455.
- [7] Dominic Chwan Yee Foo, Zainuddin Abdul Manan, Yin Ling Tan. Synthesis of maximum water recovery network for batch process systems. *Journal Cleaner Production* 13 (2005).
- [8] Foo Chwan Yee, Zainuddin Abdul Manan, Rosli Mohd Yunus, Ramlan Abdul Aziz, Tan Yin Ling. Water minimization for batch process systems – A Pinch Technology Approach. 2nd World Engineering Congress, Sarawak, Malaysia, 22-25 July (2002).
- [9] Grisales R, Cardona C. A, Sánchez O. J, Gutiérrez L. F. (2005). Heat integration of fermentation and recovery steps for fuel ethanol production from lignocellulosic biomass. En 2nd Mercosur Cong. Chemical Engineering and 4th Mercosur Cong. Process Systems Engineering. Río de Janeiro, Brasil. (Formato CD).
- [10] Gros H. P, Díaz S, Brignole E. A. (1998). Near-critical separation of aqueous azeotropic mixtures: process synthesis and optimization. *J. Supercrit. Fluid* 12: 69-84.
- [11] Gutiérrez L. F, Sánchez O. J, Cardona CA. (2005). Modeling of batch extractive fermentation for the fuel ethanol production. En 8th Conf. Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2005. Giardini Naxos, Italia. (Formato CD).
- [12] Gyamerah M, Glover J. (1996). Production of ethanol by continuous fermentation and liquid-liquid extraction. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 67: 145.
- [13] Hallale N. A new graphical targeting method for water minimisation. *Advances in Environmental Research* 6, p. 377-390, (2002).
- [14] Jansen A. E, Versteeg W. F, van Engelenburg B, Hanemaaijer J- H, ter Meulen B. Ph (1992) Methods to improve flux during alcohol/water azeotrope separation by vapor permeation. *J. Membrane Sci.* 68: 229-239.
- [15] Kim J.; Smith R. Cooling System Design for Water and Wastewater Minimization. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, p. 608-613, (2004).

- [16] Ligeró E, Ravagnani T. (2003). Dehydration of ethanol with salt extractive distillation - a comparative analysis between processes with salt recovery. *Chem. Eng. Process.* 42: 543-552.
- [17] Meirelles A, Weiss S, Herfurth H (1992) Ethanol dehydration by extractive distillation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 53: 181-188.
- [18] Montoya M. I, Quintero J. A, Sánchez O. J, Cardona C. A. (2005). Efecto del esquema de separación del producto en la producción biotecnológica de alcohol carburante. En II Simposio Sobre Biofábricas. Avances de la Biotecnología en Colombia. Medellín, Colombia. (Formato CD).
- [19] Navarro A. R, Sepúlveda M del C, Rubio M. C. (2000). Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses. *Waste Manag.* 20: 581-585.
- [20] O'Brien D, Roth L, Mc Aloon A. (2000). Ethanol production by continuous fermentation-pervaporation: A preliminary economic analysis. *J. Membrane Sci.* 166: 105-111.
- [21] Prakotpol D., Srinophakun T. G. A. Pinch: genetic algorithm toolbox for water Pinch technology. *Chemical Engineering and Processing* 43, p. 203-217, (2004).
- [22] Ríos C. M, Grisales R, Cardona C. A (2004) Integración térmica de procesos a través de tecnología Pinch. *Rev. Noos* 18: 25-32.