

Titulo

La consideración de los Fenómenos de Espera y la Incertidumbre en el Desarrollo de instalaciones de producción de etanol a partir de miel final.

Consideration of the delay phenomena and uncertainty in Developing Ethanol Production Facilities from molasses

Autores: Yaillet Albernas Carvajal¹; Dr. Julio Pedraza Gárciga; MSc. Víctor González Morales; DrSc. Erenio González Suárez;

Afiliación: ¹Centro de Análisis de Procesos (CAP). 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: yailletac@uclv.edu.cu

Fecha de presentación:

Resumen.

En el trabajo se presenta un análisis de las diferentes etapas del proceso de obtención de etanol a partir de sustratos azucarados, enfocados fundamentalmente en los fenómenos de espera o como también se le llama la teoría de colas. En el desarrollo de dicho proceso hay varias etapas que dada su larga duración se les debe mostrar un especial interés a la hora de realizar un diseño de la planta, con el objetivo fundamental de lograr que el proceso se pueda desarrollar en una forma continua, aunque también se involucren etapas discontinuas en el mismo. Otro aspecto de vital importancia es la organización o disponibilidad que exista en los equipos para cada una de las etapas, o dicho de otra manera la incertidumbre que pueda existir en la integración de los equipos.

Abstract

In present work an analysis of the different stages of bioethanol process from sugary substrate is present, with delay phenomenon focus. In this process are several stages that given their long duration a special interest should be shown when carrying out a design of the plant, with the main goal of achieving that the process you can develop in a continuous form, although discontinuous stages are also involved in this process. Another point of great importance is the organization or availability that it exists in the equipment for each one of the stages, or said the uncertainty that can exist in the integration of equipment.

Palabras clave: Fenómeno de Espera, equipos, etanol.

Key words: Delay phenomena, equipment, ethanol.

Introducción

El proceso de obtención de etanol a partir de sustratos azucarados tiene etapas de muy larga duración, pero decisivas en el proceso como tal; tal es el caso de la etapa de fermentación alcohólica, que es donde se forma el etanol que se quiere como producto. Esta etapa tiene en total una duración promedio de 24 horas y esto, si no se logra una configuración que garantice la continuidad del proceso, puede traer como consecuencia que la etapa siguiente, es decir la destilación se vea seriamente afectada por paradas, lo cual provoca serias pérdidas desde todos los puntos de vista, desde la eficiencia del proceso hasta los mismos costos. Aquí es donde también se aprecia el fenómeno de espera.

Uno de los aspectos que debe garantizar también la eficiencia de esta etapa, y con ello del proceso como tal es la utilización correcta del equipamiento, pues, muchas veces, los equipos no trabajan a su máxima capacidad de utilización y esto trae consigo que se estén desaprovechando los mismos, o lo que es lo mismo que estén subutilizados.

Todos estos aspectos fueron abordados de una forma u otra en el presente trabajo contribuyendo de esta manera a fomentar los estudios en aras de lograr una mayor eficiencia y aprovechamiento de los equipos.

Desarrollo

En el proceso de obtención de etanol a partir de miel final que se tomó como punto de partida para el estudio se tienen los tiempos medios de operación siguientes (tabla 1) para cada una de las etapas de acuerdo con,² lo cual permitió también la construcción del³ (Figura 1)

Tabla 1. Tiempos medios de cada una de las operaciones

<i>Operación</i>	<i>Duración (h)</i>
Crecimiento en la cuba madre	1
Siembra del fermentador	1
Llenado del fermentador	8
Agotamiento del fermentador	12
Destilación del fermentador	4
Limpieza del fermentador	1
Esterilización del fermentador	1
<i>Total</i>	<i>28</i>

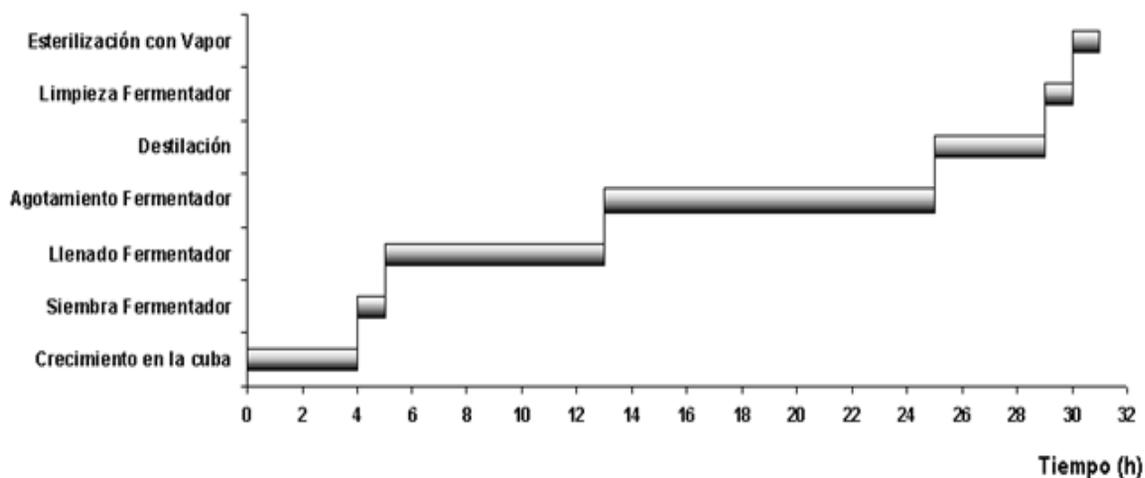
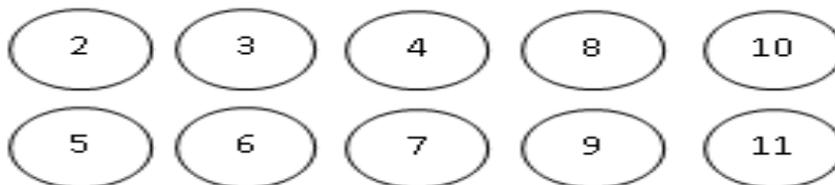


Figura 1. Diagrama de Gantt de las operaciones en la obtención de etanol

En la planta real existen 10 fermentadores que se encuentran ubicados de manera tal que garantice la continuidad del flujo que se alimenta a la etapa de destilación, logrando así una producción de manera continua.

La distribución que tienen estos fermentadores dentro de la sala es la siguiente:



Se parte del fermentador 2, al cual le sigue el 3, luego el 4, el 8 y por último el 10, seguidamente comienza la otra fila empezando por el 5, el 6, el 7, el 9, el 11 y se enlaza nuevamente para comenzar por el 2.

En la planta, en cada turno que dura 8 horas, se siembran 2 fermentadores para su posterior fermentación y se destilan otros 2 que ya se agotaron previamente.

Con este procedimiento se obtiene un tiempo total del proceso de aproximadamente 31 horas y un tiempo del ciclo de 4 horas, o sea cada 4 horas se comienza de nuevo, este número está determinado fundamentalmente por el tiempo que necesita la cuba madre para recuperar su población nuevamente.

Cuando a un fermentador ya se le hizo la etapa de siembra que dura 1 hora aproximadamente, se necesita que la cuba madre recupere nuevamente su microorganismo, lo cual se logra aproximadamente en 4 horas; y es cuando ya se puede hacer la siembra en el fermentador siguiente.

Todo este proceso se hace de forma sucesiva siguiendo la secuencia que se mostró en el diagrama de Gantt (figura 1).

En trabajos futuros se abordará la importancia de que cada una de las operaciones se cumplan en el tiempo establecido, (aspecto que en realidad no ocurre siempre así), pues de lo contrario se cae en el fenómeno de espera y no se logra por lo tanto la continuidad del proceso global. Este mismo fenómeno en caso de que termine alguna operación antes del tiempo estimado provoca la subutilización

de los equipos, pues el equipo permanece sin utilizarse un tiempo determinado, esperando que

culmine la operación que le precede. También se puede dar el fenómeno que la operación demore más del tiempo establecido y esto provoca entonces que la etapa siguiente sea la que tenga que esperar y también se pierde la continuidad del mismo.¹

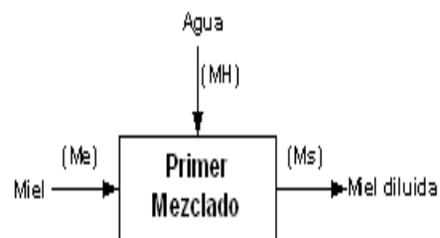
Balances de masa en la fermentación

Para la determinación de las capacidades de utilización de los fermentadores se parte de los balances de materiales y energía en una fábrica real. A continuación se muestran los balances de masa y energía realizados por etapas del proceso de Preparación de mosto y fermentación, los mismos son determinados mediante una programación realizada en el Microsoft Excel.

La materia prima utilizada es la miel de caña de azúcar ó melaza como también se conoce, con 85 °Bx y 48 % de azúcares fermentables.⁹

Se asume un rendimiento industrial de 44 %

Etapa de Preparación del Mosto



Primer Mezclador

Balance total

$$Me + MH = Ms$$

Balance parcial:

Para determinar el flujo de miel diluida a la salida del primer mezclador, la misma es diluida hasta 40°Brix.

$$Me * Bxe = Ms * Bxs$$

· **Depósito de Almacenamiento de Miel diluida D-302**

Balance total

Para determinar el flujo de miel diluida que sale del depósito D-302, una parte de este flujo de miel alimenta al 2^{do} mezclador, la otra parte pasa al tercer mezclador⁵.

$$Ms + A = MD$$



· **Segundo Mezclador**



· **Tercer Mezclador**

Balance total:

$$Ms_2 + MHx = Mx$$

Balance parcial:

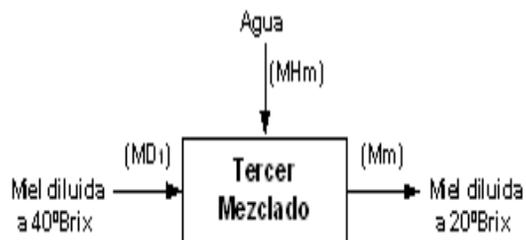
Para determinar el flujo de entrada de miel al segundo disolutor, el flujo de salida es controlado por un flujómetro y a su vez la entrada de mosto que alimenta a las cubas madres, dicha miel es diluida hasta 13°Brix y se establece un flujo de salida de 18 m³/h⁸

$$Ms_2 * Bs_2 = Mx * Bx$$

· **Del balance en el depósito D -302**

$$MD = MD_1 + Ms_2$$

De aquí se determina la miel MD₁ que pasa al tercer disolutor



Balance total:

Mediante este balance total se determina el flujo de agua que alimenta al mezclador.

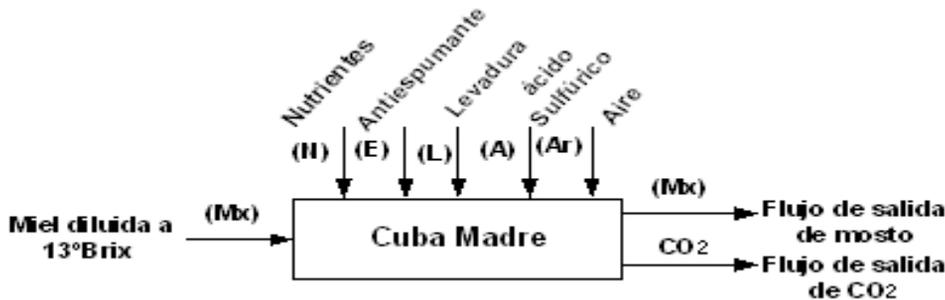
$$MD_1 + MHm = Mm$$

Balance parcial:

Para determinar el flujo de miel diluida que sale del mezclador, el mosto que sale de este disolutor es el que alimenta a los fermentadores.

$$MD_1 * Bx_{(MD1)} = Mm * Bx_{(Mm)}$$

Cuba Madre



Se determinó el consumo de Nutrientes(N) a partir de:

Balance de Nitrógeno.

Según lo referido por,⁶ teóricamente hay 360 mg/L de N_2 y 120 mg/L de P_2O_5 , con estas concentraciones y el flujo de entrada a fermentación se determinó la cantidad de N_2 y de P_2O_5 que aporta la Urea, la urea contiene un 46 % de N_2 , como se muestra a continuación:

$$\text{Flujo de entrada de Urea de fermentación} = \text{Flujo de la Cuba} + \text{Flujo de los fermentadores}$$

$$Qm = FF * 360$$

Por tanto $Qm = 0.46$ es la cantidad de N_2 que aporta la urea. El fosfato de amonio contiene el 50 % en forma de P_2O_5 y el 20 % de nitrógeno.

$$\text{Fosfato} = Qm / 0.50$$

Incógnita es la utilización de los fermentadores a partir de los resultados de los balances de materiales

Para un conjunto de datos tomados en la fábrica en 2 meses de trabajo, con un total de 56 días efectivos de trabajo, se hizo el planteamiento de los balances para de esta manera determinar la

capacidad de utilización de los fermentadores para cada uno de los días y compararlo con la capacidad real y el sobrediseño real de los fermentadores.

Cada uno de los fermentadores tiene una capacidad de diseño de 280 m³, de los cuales, teniendo en *hold up* y con ello la posible formación de espumas durante la fermentación, para ⁷ la capacidad de trabajo sería de 210 m³.

En la figura 2 se pueden apreciar los resultados fundamentales obtenidos del valor del por ciento de sobrediseño calculado para cada uno de los días.

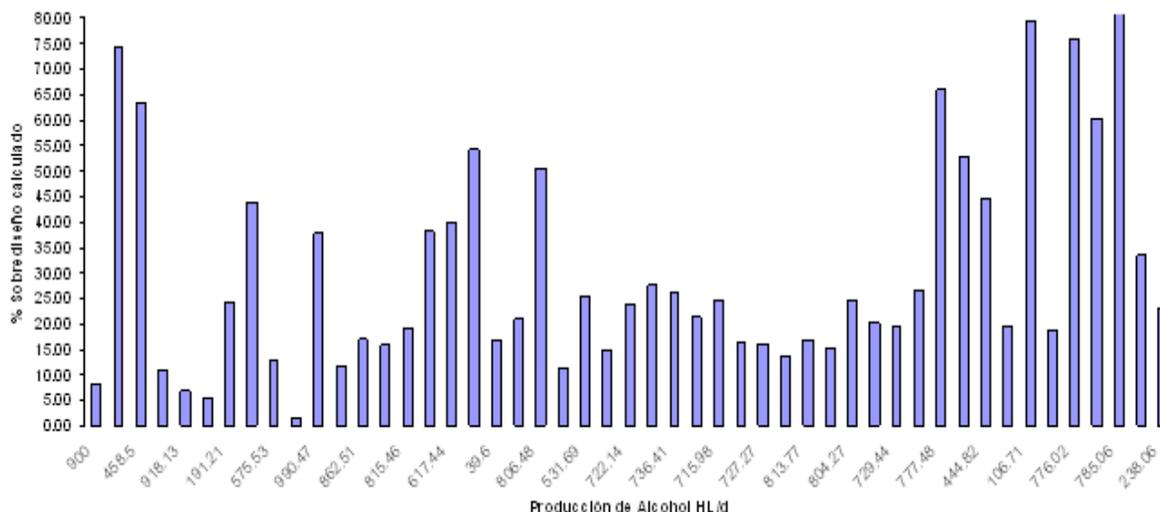
Como se puede apreciar en la figura 2 existen días en los cuales las producciones fueron muy bajas y con ello los fermentadores estuvieron muy subutilizados. Existen valores de sobrediseño tan críticos como solo 6,86 % y otros tan extremos como 87,15 %.

En estos dos meses la producción fue muy inestable, debido fundamentalmente a aspectos relacionados con la microbiología del proceso, pero el caso que se estudia en este trabajo relacionado con la utilización del equipamiento, se puede constatar que es inadecuado.

Análisis estadístico de los resultados obtenidos para el volumen del fermentador

Para los datos de volúmenes utilizados obtenidos a partir de los balances de masa se asume que tiene un comportamiento con una distribución normal,⁴ para lo cual se tiene en cuenta que la función densidad de probabilidad viene dada por:

Figura 2. Factor de sobrediseño calculado vs. producción



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

donde μ es la media y s es la desviación estándar. En los estudios de incertidumbre μ representa el valor nominal o de diseño de un parámetro dado; $|(x-\mu)|$ es la diferencia entre el valor nominal y el valor real de la variable para un momento dado, para el caso en estudio será el volumen del fermentador. La desviación estándar (s) es una medida de la dispersión (o incertidumbre de los valores individuales alrededor de la media).⁴

Todas las tablas en la literatura para la distribución normal son para la distribución con $\mu = 0$ y $s = 1$, y se le llama distribución normal estándar. A partir de la ecuación se puede llegar a la forma estandarizada:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

y de aquí,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{z^2}{2}}$$

$$\bar{x} - 1,96 \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + 1,96 \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Donde z es la desviación normal estándar. El intervalo de confianza (95 %) para un parámetro de población dado indica que en un muestreo repetido de una población conocida el 95 % de los intervalos calculados por el mismo método incluirá al valor del parámetro estimado. Al porcentaje (95 %) se le llama nivel de confianza y a los valores finales del intervalo se les llama límites del intervalo. Si una variable x se escoge de una distribución normal, la probabilidad es 0,95 que X cae en el intervalo $\mu - 1.96s$ a $\mu + 1.96s$. Este es llamado el intervalo de confianza del 95 % para X .⁴

La desviación normal estándar z para un nivel del 95 % de confianza es igual a 1,96 y la desviación estándar de la media es igual a s / \sqrt{N} donde s puede ser sustituido por s cuando éste no se conoce. Los límites de confianza para la estimación de la media (m) están dados por:

Al conjunto de datos obtenidos se le eliminaron puntos extremos por no ser representativos para el proceso estudiado.

Las ecuaciones del balance material se plantean simbólicamente (con posibilidad de variar las composiciones) dando como resultado un rango amplio de variación de las corrientes. Para un intervalo de confianza del 95 % en la distribución normal la $Z_c = m 1,96$. Al calcular los parámetros n

de diseño se tienen en cuenta estos elementos y se calcula el sobrediseño necesario para el fermentador. Los 54 valores de V obtenidos anteriormente oscilaron entre 149,61 y 276,27 m³ según lo reportado en el Software profesional Statgraphics Plus 4.1, con una media $V_M = 220,095$ m³ y desviación típica $s = 31,5593$, obteniéndose como valor final:

$$V = 220,095 + 1,96 (31,5593) = 281 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta que el valor del volumen nominal del fermentador es de 280 m³ y que el factor de sobrediseño nominal es de 25 %, entonces se puede apreciar que para los días tomados como dato el fermentador trabajó de acuerdo con los datos de diseño.

Conclusiones

1. Para la planta analizada el tiempo total del proceso es de 28 horas y el tiempo ciclo es de 4 horas.
2. En la etapa de fermentación se aprecia el fenómeno de espera que puede ser tanto afectando la utilización del equipamiento como afectando la etapa siguiente de destilación, lo cual debe ser estudiado a profundidad en trabajos posteriores. El conjunto de datos tomados para dos meses de producción demostró que los fermentadores se encuentran correctamente diseñados y trabajando dentro de sus parámetros de operación

Bibliografía

1. Acevedo, L. y E. González: “Diseño de Plantas Químicas Discontinuas para Instalaciones de la Industria Química y Fermentativas” en *Vías para el desarrollo de instalaciones de la industria química y fermentativa en condiciones de incertidumbre*, Ministerio de Educación Superior de Cuba, Ciudad de la Habana, 1999.
2. Albernas Carvajal, Y. y M. González Cortés: Análisis Preliminar de la Logística de la Producción de Etanol a partir de Mil Final, XVI Forum de Ciencia y Técnica, Julio de 2009.
3. Barrer, M. And J. Rawtani: *Practical Batch Process Management*. ISBN 0 7506 6277 8. Newnes. Elsevier, 2005.
4. Castellanos, E.; J. Pedraza y A. Zamora: *Balances de Masa y Energía. Métodos clásicos y técnicas no convencionales*, Editorial Feijóo, ISBN 959-250-014-2, 2001.
5. Hernández Vides, Y.: Análisis del proceso productivo de obtención de alcohol extrafino en la destilaría ALFICSA, Trabajo de Curso, 2009.
6. Nielsen, J. and J. Villadsen: *Bioreaction Engineering Principles*, Second Edition, Denmark. ISBN 0-306-47349-6, 2002.