

**Reingeniería de una fábrica de ron
de Juan José Font Parducci**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

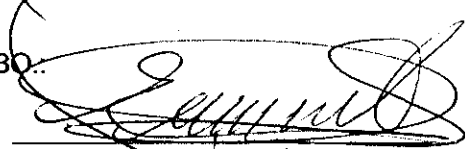
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

Reingeniería de una fábrica de ron

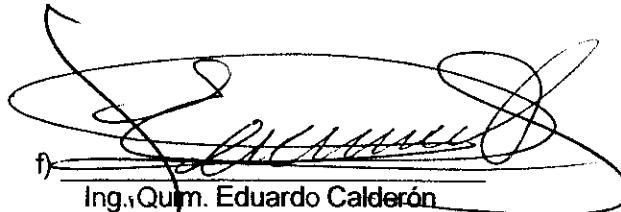
**Trabajo de investigación presentado por Juan José Font
Parducci para optar al grado académico de Licenciado
en Ingeniería Química.**

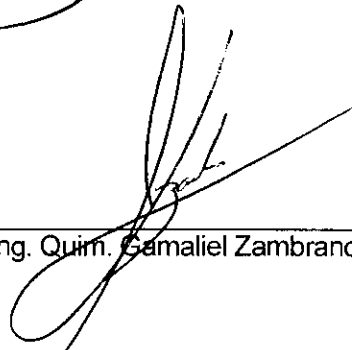
GUATEMALA
2005

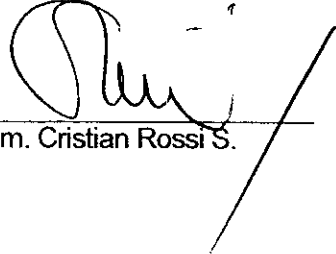
**BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

VO. BO.:
f) 
Ing. Quim. Eduardo Calderón

TRIBUNAL EXAMINADOR

VO. BO.:
f) 
Ing. Quim. Eduardo Calderón

f) 
ing. Quim. Gamaliel Zambrano

f) 
Ing. Quim. Cristian Rossi S.

Fecha de Aprobación: 31 de octubre de 2003

Contenido

Índice General

	Resumen	IX
I.	Introducción	1
	A. Perspectiva histórica de la reingeniería	1
	B. Definiciones de reingeniería	2
	C. Estudio de los procesos del fabricante de ron	3
II.	Antecedentes	6
	A. Esquemas de manufactura de etanol	6
	B. Preparación de la melaza	8
	C. Fermentación	8
	D. Composición y destilación	11
	E. Purificación	12
	F. Costo	13
III.	Justificaciones	15
IV.	Objetivos	16
V.	Problema a resolver	17
VI.	Metodología	20
VII.	Resultados	21
	A. Fermentación	21

	B. Destilación, rectificación y purificación	26
	C. Presentación de estándares internacionales de la composición de etanol para bebidas alcohólicas	33
	D. Costo estándar de la manufactura de etanol a partir de melaza	35
VIII.	Discusión	39
	A. Preparación de la melaza	39
	B. Fermentación	39
	C. Destilación, rectificación y purificación	40
	D. Costo estándar de la manufactura de etanol a partir de melaza	41
IX.	Conclusiones	42
X.	Recomendaciones	44
XI.	Bibliografía	45

Índice de tablas

No. 1	Compuestos que se remueven completa o parcialmente del etanol acuoso impuro por medio de la corriente de gas.	26
No. 2	Análisis de preferencia de sabor.	32
No. 3	Impurezas presentes en el etanol.	33
No.4	Características del etanol de origen agrícola.	34

Índice de gráficas

No. 1	Concentración de azúcares y etanol en cada etapa del proceso	22
No. 2	Relación de requerimiento de flujo gaseoso vrs. temperatura	24
No. 3	Análisis gráfico de las variaciones del costo estándar	38

Índice de figuras

No. 1	Cuadro de determinación de los objetivos primarios de la reingeniería	2
No. 2	Asignación de valores a los procesos fundamentales	3
No. 3	Cuadro de determinación de los objetivos primarios para la fábrica de ron	4
No. 4	Combinación de ingenio y destilería	6
No. 5	Destilerías bien establecida en Centro América.	6
No. 6	Destilerías pequeñas	7
No. 7	Destilerías sin trapiche	7
No. 8a	Fermentadores de tipo Tanda	9
No. 8b	Fermentadores de tipo Tanda	10
No. 9	Reactor sencillo de melaza	10
No. 10	Rectificación continua de soluciones fermentadas	12
No. 11	Esquema actual	17
No. 12	Diagrama de operación de problema a resolver	18
No. 13	Reactor separador (MSRS)	23
No. 14	MSRS con purificación de etanol	28
No. 15	Balance de masa del problema a resolver con 100% en las fermentaciones	29
No. 16	Balance de masa del problema a resolver con 60% en las fermentaciones	30
No. 17	Balance de masa del MSRS	31

Resumen

Esta tesis se enfoca en la solución del problema de producción de etanol (**alcohol etílico**) en una planta de Ron, la cual produce ineficientemente etanol de muy mala calidad, a partir de panela. La panela es comprada a agricultores locales, los cuales la obtienen al extraer el jugo de la caña por medio de un molino muy rudimentario (trapiche).

El trapiche difícilmente extrae más de un 55% del total de los azúcares fermentables, lo que es un rendimiento muy bajo comparado con el 95% de extracción que ya se logra en algunos ingenios de azúcar. Esto lo convierte en una materia prima sumamente cara, siendo en ocasiones tan caro como el azúcar mismo. Además la panela es higroscópica lo que la convierte en un producto perecedero, siendo su almacenamiento un proceso delicado.

La acumulación de los desechos sólidos en los tanques de fermentación es de carácter obligatorio, ya que estos producen lo que se conoce como una cama, cama que ayuda a que las consiguientes fermentaciones ocurran más rápidamente. Sin embargo la permanencia de esta cama acarrea el problema de la descomposición aun mayor de los desechos sólidos, por lo que en algunos casos la solución producida con aproximadamente un 9% de etanol, posee un insoportable olor a cloaca, lo que lo convierte en un producto inaceptable para comercializar.

La capacidad de producción requerida es de 10,000 litros de etanol al 94% m/m al mes, por lo que debía de recomendarse un proceso que sea económicamente factible, debido a lo pequeño de la instalación. Para resolver el problema anteriormente descrito se utilizó el concepto de reingeniería, el cual consiste en el rediseño rápido y radical de los procesos estratégicos de valor agregado para optimizar los flujos del trabajo y la productividad de una organización. Los procesos estratégicos son los más importantes e indispensables para los objetivos, las metas, el posicionamiento y la estrategia declarada de una compañía. Los procesos de valor agregado son los procesos indispensables para satisfacer los deseos y las necesidades del cliente, y por los cuales éste está dispuesto a pagar. Por lo tanto, el objetivo primario de la Reingeniería de procesos lo constituyen aquellos procesos que son a la vez estratégicos y de valor agregado.

La aplicación del análisis anterior dio como resultado que el fabricante necesita:

- Tecnología de fermentación de melaza por medio de levaduras de cerveza.
- Recibir una recomendación de que tecnología debe aplicar a la destilación y rectificación del etanol
- Recibir un informe de estándar internacional de etanol para consumo humano, sus análisis y el equipo necesario para poder efectuar el control de calidad.
- Además necesita el costo estándar de producir 1 litro de etanol, para poder implementar sus controles cortables.

Para mejorar la tecnología de fermentación de melaza por medio de levaduras de cerveza se recomienda el uso de un reactor separador continuo de múltiples etapas, (Cuyas siglas en inglés son MSRS, que se utilizara para describir el mismo en el resto del trabajo). Para mejorar la recuperación y rectificación del etanol se debe aprovechar que el etanol se encuentra absorbido en una corriente gaseosa dentro del MSRS, lo que permite ser filtrado

en columnas de carbón activado en fase gaseosa. El estándar de etanol para consumo humano se obtuvo de la legislación de la comunidad económica europea. Para poder efectuar el control de calidad se recomienda un cromatógrafo de gases este método permite la separación de la mayoría de las impurezas presentes en el etanol, siendo un beneficio adicional, que estas pueden ser identificadas y cuantificadas.

El costo estándar de producir un litro de etanol, para poder implementar sus controles contables, se definió de acuerdo a los estándares de precio y eficiencia en la producción de etanol de la industria. El precio estándar de la melaza es de Q 0.64 l. La eficiencia estándar de conversión de melaza a etanol es de 0.4 litros de etanol por litro de melaza. Habiéndose obtenido en la práctica con el modelo propuesto 0.39 litros de etanol por litro de melaza.

I. Introducción

En esta época de creciente globalización, la competencia por mercados tradicionales suele ser más dura cada día; sin embargo también son más las oportunidades que se abren debido al desarrollo tecnológico que la competencia produce. Esto es resaltado por técnicas que ayudan al desarrollo de procesos innovadores, como lo es la Reingeniería; de la cual se da un marco histórico a continuación, para luego dar su definición formal.

A. Perspectiva histórica de la reingeniería

En el año de 1898 los Estados Unidos libró una guerra con España. La Marina de los Estados Unidos disparó un total de 9 500 proyectiles, de los cuales 121 hicieron impacto, un 1.3 por ciento de eficiencia. Este porcentaje parece desastroso, pero en 1898 representaba la máxima eficiencia mundial; y en efecto, Estado Unidos ganó la guerra. En 1902 la marina de los Estados Unidos podía dar en el blanco - un barco que estuviese a 1 milla de distancia - cuantas veces disparaba un cañón; la mitad de las balas podían hacer impacto dentro de un cuadrado de 50 pulgadas por lado.

El desarrollo se debió a un joven oficial de artillería naval llamado William Sowden Sims. Hace un siglo apuntar un cañón en alta mar era un proceso muy aleatorio. El cañón, el blanco y los mares se hallaban en movimiento continuo. Los héroes de los combates eran los navegantes que maniobraban los buques para colocarlo en una posición que permitiera a los artilleros lograr su difícil cometido. Sin embargo, en unas maniobras realizadas en el Mar de la China, Sims observó los avances que los artilleros ingleses habían empezado a lograr en la precisión del tiro, con sólo ligeras modificaciones en la manera de apuntar y disparar. Sims se preguntó qué ocurriría si esas innovaciones se mejoraran más aún.

Hace un siglo un cañón contaba con una manivela para levantarlo al ángulo de la trayectoria deseada para un alcance normal de una milla, y un anteojo de larga vista montado sobre el cañón mismo a fin de mantener el blanco en la mira hasta un instante después del disparo, cuando retrocedía la pieza. Sims sugirió configurar la relación de los engranajes de tal manera que el artillero pudiera elevar o bajar fácilmente el cañón siguiendo el blanco en los balanceos del buque. En segundo lugar propuso cambiar de sitio la mira del cañón para que el artillero no fuera afectado por el retroceso al disparar. Esta innovación le permitiría conservar el blanco en la mira durante todo el acto del disparo. El resultado sería fuego de puntería continua. Basándose en extensos cálculos, Sims predijo que sus modificaciones al proceso tenían el potencial de aumentar su precisión en más del 3 000 por ciento, sin costos adicionales, sin usar tecnología adicional, y sin necesidad de aumentar el personal de maniobra.

Entusiasmado con la perspectiva de proporcionar a la Marina tan importante mejora de su rendimiento, escribió una carta a sus superiores. Las respuestas básicas que estos formularon fueron: Si se pudiera hacer, alguien ya lo habría hecho; si alguien ya lo hubiera hecho, sería algo tan ventajoso que ya alguien lo habría sufrido; y la otra reacción institucional: si se hacía, ¿cuál sería el impacto en la estructura organizacional de la Marina?

Sims perseveró y remitió su decimotercera carta al comandante en jefe del ejército, el presidente Teodoro Roosevelt. Roosevelt era hombre que entendía muy

bien las cuestiones militares, y vio el poderoso potencial de la idea de Sims. No vaciló e implementó vigorosamente el cambio. Los consiguientes avances en productividad fueron enormes, alcanzando el 3 000 por ciento que había profetizado Sims.

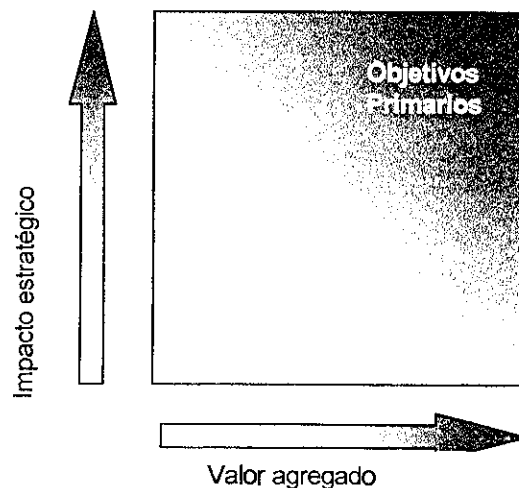
B. Definiciones de Reingeniería

Reingeniería es el rediseño rápido y radical de los procesos estratégicos de valor agregado – y de los sistemas, las políticas y las estructuras organizacionales que los sustentan – para optimizar los flujos del trabajo y la productividad de una organización.

Los procesos pueden ser estratégicos o de valor agregado. Los estratégicos son los más importantes e indispensables para los objetivos, las metas, el posicionamiento y la estrategia declarada de una compañía; los procesos estratégicos son una parte integral de la manera como la compañía se define a sí misma. Los de valor agregado son los procesos indispensables para satisfacer los deseos y las necesidades del cliente, y por los cuales éste está dispuesto a pagar.

Como se muestra en la siguiente figura, el objetivo primario de la Reingeniería de procesos los constituyen aquellos procesos que son a la vez estratégicos y de valor agregado. ⁽¹⁾

Figura No. 1 : Cuadro de determinación de los objetivos primarios de la Reingeniería



C. Estudio de los procesos del fabricante de ron

En este caso el problema principal radica en el hecho que el proceso actual es obsoleto, produciendo ineficientemente etanol de muy mala calidad, a partir de panela. A continuación se muestra un análisis de los procedimientos normales para obtener el producto final, Ron.

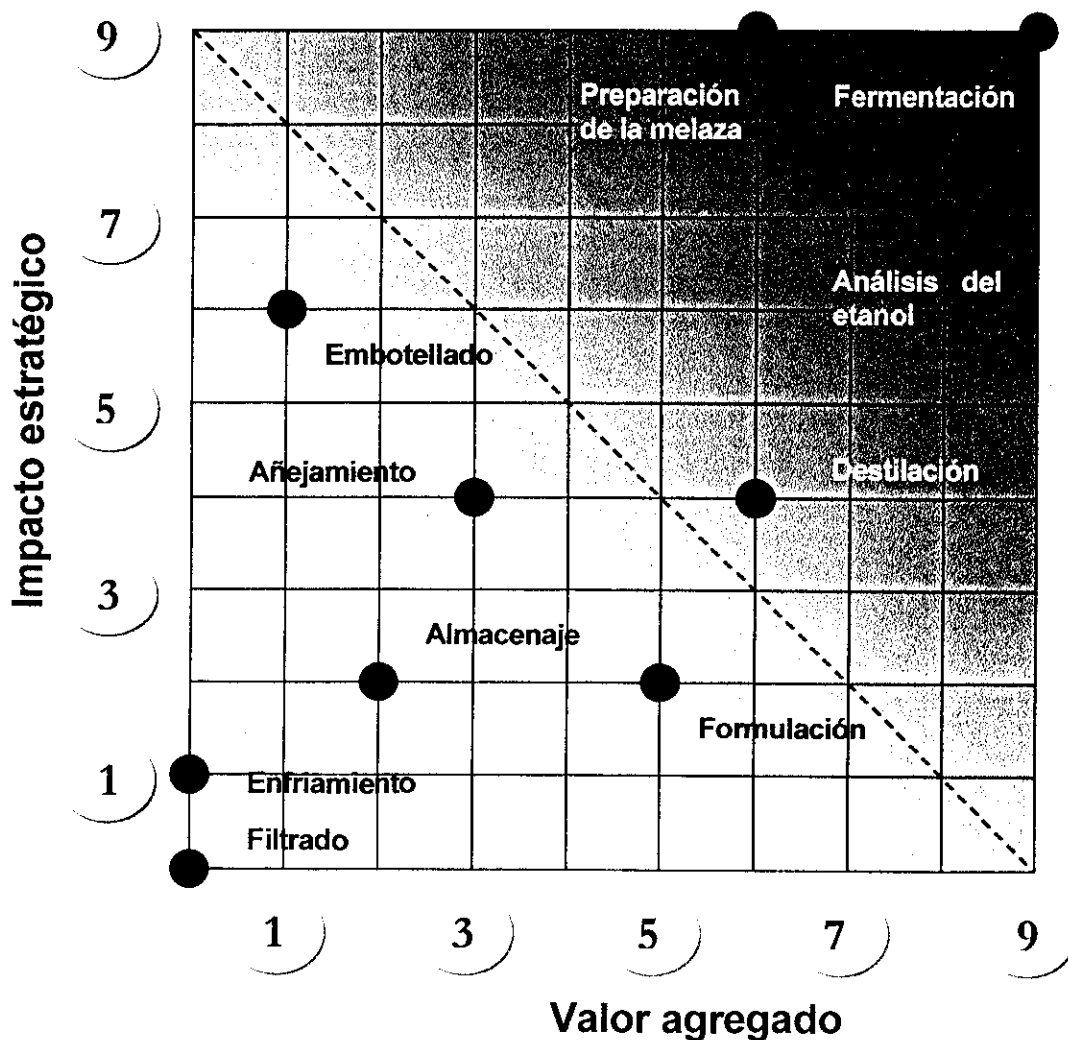
Figura No. 2 : Asignación de valores a los procesos fundamentales

Proceso	Situación actual	Impacto estratégico	Valor agregado
Preparación de la melaza	Tecnología desconocida	9	6
Fermentación	Produce mala calidad	9	9
Destilación	Torres de bronce	4	6
Análisis del etanol	Tecnología desconocida	7	8
Enfriamiento	Intercambiadores de bronce	1	0
Añejamiento	Barriles de cedro	4	3
Almacenaje	Pipas de cedro	2	2
Formulación	Adecuada al mercado	2	5
Filtrado	Filtro de acero inoxidable	0	0
Embotellado	Mesa de embotellado	6	1

Los datos anteriores representan el resultado de los juicios de valor de todas las personas involucradas, Gerente General, Departamento de Ventas, Departamento de Producción y Socios; que luego fue discutido con los puestos claves para llegar a los resultados aquí descritos.

A simple vista se puede observar que actualmente el proceso de fermentación es el de mayor impacto estratégico y valor agregado, a continuación se presenta una figura de acuerdo a la metodología de la Reingeniería.

Figura No. 3 : Cuadro de determinación de los objetivos primarios para la fábrica de ron



El fabricante necesita desarrollar tecnología de fermentación de melaza por medio de levaduras de cerveza; recibir un informe de la tecnología que se aplica actualmente en la destilación y rectificación del etanol, así como los estándares internacionales de etanol para consumo humano, los análisis y el equipo necesario para poder efectuar el control de calidad. Además necesita el costo estándar de producir 1 litro de etanol, para poder implementar sus controles contables.

Los demás procesos, aunque son de algún grado de importancia, no fueron considerados de alto impacto en la situación actual, por lo que se dejó para poder ser desarrollados en estudios posteriores.

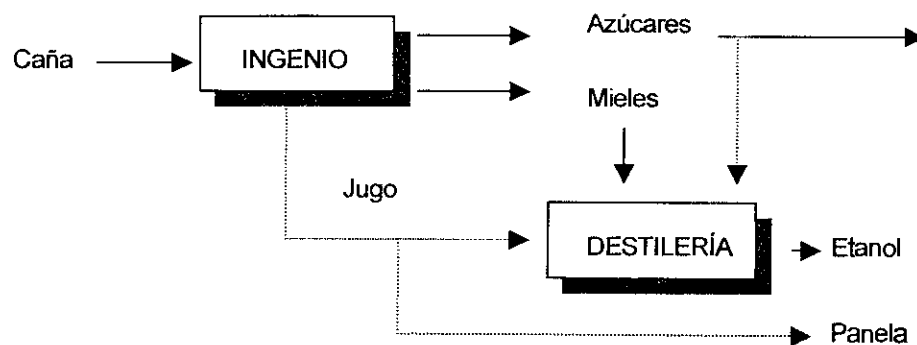
II. Antecedentes

El etanol ha sido producido desde tiempos prehistóricos por la fermentación de azúcares, utilizando levaduras que los convierten en etanol y dióxido de carbono. En Centro América la fuente más económica de materia prima es la caña de azúcar.

A. Esquemas de manufactura de etanol

- *La integración vertical más común que se ha dado en la producción de etanol, es como el subproducto de la manufactura de azúcar, en estos casos el etanol es principalmente utilizado como componente de carburantes, especialmente en Brasil.*

Figura No. 4 : Combinación de ingenio y destilería



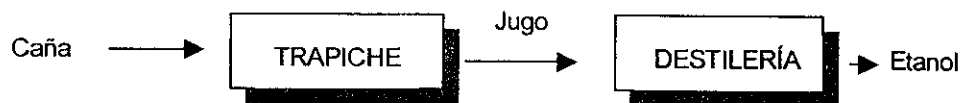
- Las destilerías grandes instaladas en Centroamérica utilizan generalmente melazas diluidas.

Figura No. 5 : Destilerías bien establecidas en Centroamérica



- Las destilerías pequeñas instaladas en Centroamérica utilizan generalmente panela, al igual que los fabricantes clandestinos de bebidas alcohólicas.

Figura No. 6 : Destilerías pequeñas ⁽¹⁾



- En los países centroamericanos la producción de Etanol a partir directamente de la caña de azúcar es una opción agro industrial que cada día se hace más atractiva. Este sistema ofrece la ventaja de desarrollar nuevas áreas cañeras o la de industrializar aquellas zonas cañeras actuales lejos de ingenios de azúcar. Existe una alternativa para fábricas independientes, en las que no hay necesidad de instalar un trapiche para extraer el jugo de la caña. En su lugar se extrae y fermenta simultáneamente; por eso la técnica se denomina EX-FERM.

Figura No. 7 : Destilería sin trapiche



B. Etapas del proceso de producción de etanol

1. Preparación de la melaza

a. **Suministro de carbohidratos.** Actualmente las melazas derivadas del proceso de azúcar son la fuente de azúcar fermentable más económica para la producción de etanol. Además la melaza posee cierto número de nutrientes de crecimiento que ayudan al crecimiento y desarrollo de la levadura.

La melaza que se compra puede tener un contenido de azúcar que varía entre 50-55% m/m. En algunas ocasiones las melazas no son adecuadas para la producción de etanol y la razón no ha podido ser siempre establecida. Puede deberse a la ausencia o concentración insuficiente de nutrientes o a la presencia de inhibidores de crecimiento. Algunos de los compuestos conocidos que pertenecen a la última categoría puede incluir ácidos grasos, nitritos, varios tipos de insecticidas o herbicidas utilizados en la plantación o bactericidas utilizados en el ingenio (Notkina et al., 1975).

b. **Nitrógeno.** El nitrógeno es esencial para el crecimiento de la levadura; existe un considerable incremento en la población de levaduras durante el proceso de fermentación; generalmente se incrementa la población 10 veces. El factor crítico para el crecimiento celular es el suministro de nutrientes nitrogenados. Es recomendable agregar 30 gramos de fosfato de amonio por cada 100 litros de medio. La urea es utilizada como una fuente de nitrógeno, especialmente en países en desarrollo.

c. **Minerales.** Las melazas son deficientes en fósforo, factor que es corregido agregando ácido fosfórico o su sal, fosfato de amonio. Otros minerales que pueden ser añadidos al medio son el magnesio y el zinc; aunque no todos los autores coinciden en esto.

d. **Vitaminas.** Aunque la mayoría de especies de levaduras requieren de vitaminas, la melaza generalmente provee de los requerimientos necesarios.

e. **Oxígeno.** El estimulante efecto de la aireación en el crecimiento de levaduras es bien conocido hacia finales del siglo XIX. Alrededor de 1886, Britania llevó a cabo la primera propagación de levaduras utilizando un proceso continuo de aireación. Bajo condiciones anaerobias, la levadura lleva a cabo una fermentación alcohólica produciendo no más de 7.5 kilos de sólidos de levadura por 100 kilos de glucosa. Teóricamente, y bajo condiciones aeróbicas estrictas, la correspondiente producción sube a 54 kilos.

2. Fermentación. Es un principio generalmente aceptado que para formulación de bebidas los alcoholes derivados del jugo virgen de la caña, son de mejor calidad que los derivados de las melazas.

En fermentaciones para producciones de etanol industrial, otras especies además de *S. cerevisiae* pueden jugar un papel importante. Esto se da en fermentaciones espontáneas que son llevadas a cabo por una sucesión de levaduras cada vez más tolerantes al etanol. Esta sucesión generalmente muestra

la presencia de especies de *Kloeckera*, *Hansenula*, *Hanseniaspora*, *Candida* y *Pichia*. *Torulaspora* también es encontrada con frecuencia. Cuando *S. cerevisiae* es inoculada al medio a niveles de 10^6 y 10^7 células por mililitro, se transforma en la especie de levadura dominante en todas las fermentaciones. La fermentación de los azúcares en Etanol puede ser descrita como la de un proceso auto inhibido, debido a que el Etanol es tóxico para las levaduras que lo producen. Durante el transcurso de la fermentación las velocidades de reacción disminuyen lentamente y finalmente las células mueren intoxicadas. Durante el transcurso de la fermentación las velocidades de reacción disminuyen lentamente y finalmente las células mueren intoxicadas. Así la fermentación de etanol es una reacción auto inhibida con una tolerancia final máxima en concentración de etanol, que varía entre el 6 y el 15% (m / m) dependiendo del micro organismo. Si el etanol se remueve tan pronto como se forma, entonces la velocidad de reacción se mantiene, y garantiza la supervivencia de las células

A continuación se muestran las formas más comunes de configurar el proceso de fermentación:

- Las unidades instaladas en Centroamérica todavía usan los fermentadores de tipo tanda, utilizándose generalmente melazas diluidas.

Figura No. 8a : Fermentadores de tipo Tanda

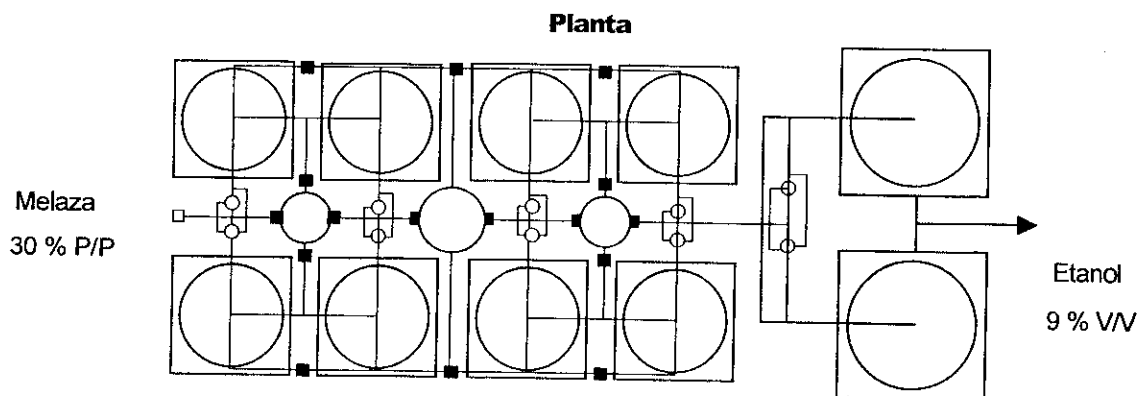
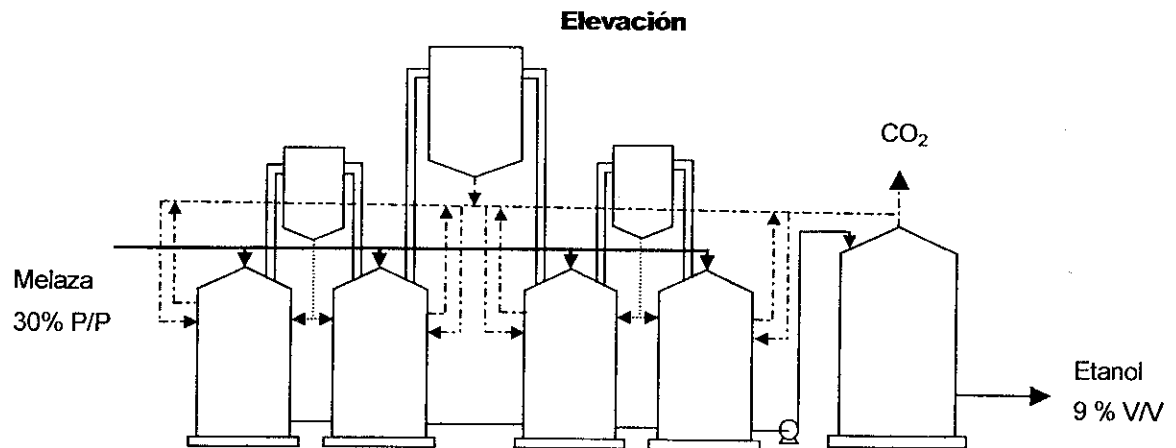
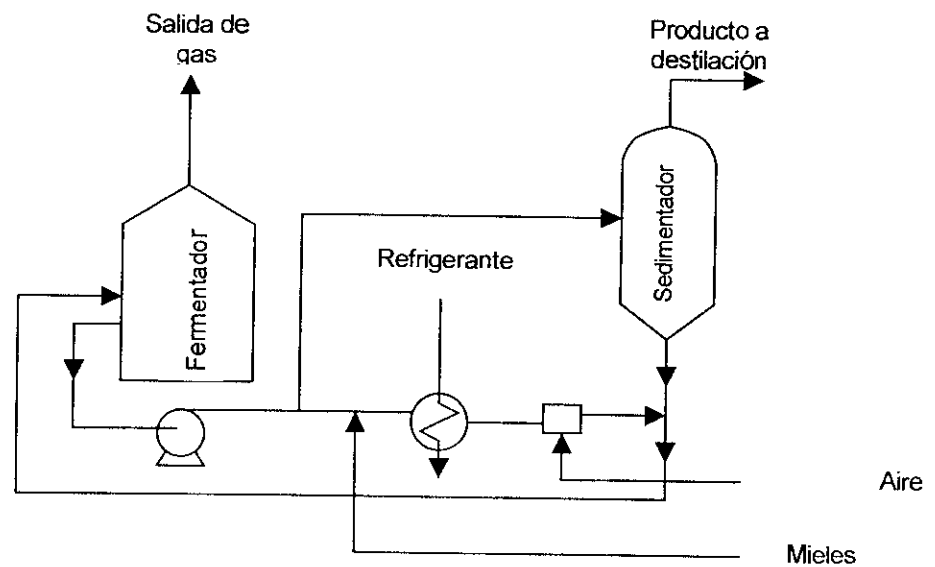


Figura No. 8b : Fermentadores de tipo Tanda



- Las instalaciones más recientes comprenden sistemas continuos de fermentación, como una unidad estándar en el diagrama de flujo del proceso, que pueden ser:

Figura No. 9 : Reactor sencillo de mezcla



- Tanques múltiples conectados en serie comúnmente denominado visto como un híbrido entre el proceso tradicional batch y un verdadero proceso de fermentación continuo. La planta de fermentación contiene entre cinco y siete fermentadores conectados en serie. El primer tanque es aireado y los otros poseen dispositivos de mezclado de dióxido de carbono. Cuando se van a utilizar melazas (mieles) generalmente deben de ser previamente tratadas y pasterizadas en una unidad separada, antes de ser diluidas. Las melazas diluidas. Son agregadas a los primeros tres o cuatro fermentadores. El agua de proceso se agrega en el primer fermentado, con un agente antiespumante. La temperatura del fermentador es controlada por camisas de enfriamiento o serpentín cuando el flujo es de tanque a tanque por gravedad. Cuando la solución es bombeada de tanque a tanque, es apropiado pasar a través de un intercambiador de calor tradicional, con alguna recirculación al fermentador original para control de temperatura. El fermento del último fermentador pasa a través de una separación de levaduras en una centrifuga. La crema de levadura es recolectada y tratada ácidamente antes de ser reciclada al primer fermentador de la serie. Esta recirculación junto a algún crecimiento de levaduras en los primeros dos fermentadores, mantiene la concentración de levaduras activas en el sistema entre 15 y 25 gramos por litro. Cuando este sistema de reciclado es utilizado el tiempo de residencia total es del orden de 10 – 14 horas.

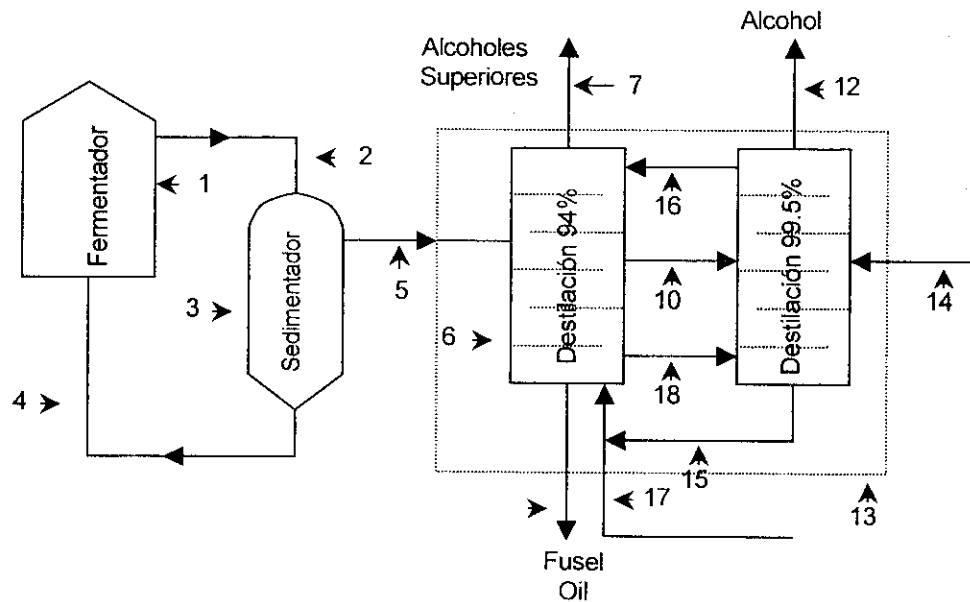
C. Composición y destilación

La fermentación de los azúcares no produce solamente etanol y dióxido de carbono – reacción que se produce en un 94% m/m- en adición se producen otras sustancias como los “fusel oils” (que consisten en varios compuestos de esterés, pero particularmente en alcoholes amílicos y butílicos, siendo el componente principal en m/m el alcohol amílico, glicerina y varios ácidos orgánicos). El líquido fermentado contiene entre 7 y 12 % de etanol, siendo la parte restante principalmente agua, el etanol es concentrado por destilación. Los “fusel oils” son ingredientes indeseables que son arrastrados durante la destilación a pesar de tener puntos de ebullición más altos que los del etanol.

La siguiente figura muestra un flujo del proceso para la rectificación continua de soluciones fermentadas. La masa fermentada fluye del fermentador (1) a través de la línea (2) al sedimentador (3), en el cual la levadura de fermentación de fondo sedimenta rápidamente y es reciclada al fermentador (1) como una fase rica en sólidos a través de la línea (4).

La fase clara con un bajo contenido de sólidos que se forma en la parte superior del sedimentador (3) para ser alimentada a través de la línea (5) a la sección de concentración del etanol (6), donde se obtiene por medio de una destilación de etapa múltiple un etanol con una concentración aproximada del 94% peso sobre peso. Al mismo tiempo componentes de bajo punto de ebullición son removidos por medio de la línea (7), y los fusel oils por medio de la línea (8) y las colas de la destilación, con un contenido menor a las 1,000 ppm. en peso sobre peso de etanol, por medio de la línea (9).

Figura No. 10 : Rectificación continua de soluciones fermentadas



El etanol obtenido en la planta de concentración ahora fluye a través de la línea (10) a una sección de etapa simple (11) para la producción de etanol absoluto, aquí es deshidratado por medio de destilación aseo trópica a una concentración mayor al 99.5% m/m, y es descargado por medio de la línea (12).

La energía calorífica requerida para el proceso de rectificación es suministrada a toda la planta (13) que comprende la sección para la concentración del etanol (6) y la sección para producir etanol absoluto (11), en la forma de vapor para calentamiento, a través de la línea (14); este debe de tener una temperatura entre 150° y 230° C. La energía calorífica del vapor es utilizada para la operación de las columnas de destilación de la sección (11) para la producción de etanol absoluto. El condensado de vapor producido se mezcla por medio de la línea (15) con el agua para calderín que se suministra por la línea (17) y es utilizada para la producción de vapor directo para la sección de concentración. La energía requerida para esto es obtenida por medio de intercambiadores de calor, que no se muestran en el dibujo, del vapor del tope que es removido por medio de la línea (16) de la sección para la producción de etanol absoluto. El vapor del tope ya condensado es reciclado por medio de la línea (18) a la sección (11) para la producción de etanol absoluto.

D. Purificación

El proceso de destilación concentra el etanol, pero también remueve una gran parte de las impurezas que dan el mal sabor. Un método comúnmente utilizado es la

hidroselección, proceso en el que la materia prima destilada es diluida en agua y luego se vuelve a destilar. Este proceso de hidroselección ayuda a remover las impurezas indeseables pero aumentan substancialmente la energía requerida para la destilación. Por otra parte, repetidas purificaciones por destilación para remover la mayoría de las impurezas indeseables también remueve todos los elementos de sabor que son necesarios en licores para consumir. Consecuentemente, en la destilación de licores para beber, el proceso de remoción de las impurezas se completa parcialmente de tal forma que se retengan los elementos de sabor deseados.

La remoción de las impurezas indeseables es especialmente importante en el Ron debido a que es una bebida pura a la que no se le agregan sabores para enmascarar el sabor de las impurezas. Esta es una suave, inodora e incolora mezcla de alrededor del 40 al 50 % de etanol y 50 a 60 % de agua, con un sabor extremadamente suave.

Para purificar más el Ron de impurezas en la destilación original, este es bombeado a través de camas sucesivas de carbón activado. El carbón a sido tradicionalmente hecho con madera dura, como lo sería la haya, maple, roble o la nuez dura. El espíritu final es diluido con agua desmineralizada antes de ser introducido al mercado.

E. Costo

Con anterioridad (5), se ha considerado un análisis de los costos en una destilería independiente sin extracción del azúcar a partir de caña, con equipo de diseños estándares. En el siguiente cuadro se da un resumen de los resultados.

Distribución de costo de equipo para una unidad independiente	
	Porcentaje del costo total
Servicios públicos de la planta	31 – 50 %
Preparación de la caña, extracción y tratamiento del jugo	27 – 40 %
Destilación y almacenamiento del producto	7 – 20 %
Fermentación	4 – 18 %

Se advierte fácilmente que el 50% del costo total se va en equipo para la preparación de la caña, extracción del jugo y servicios de la planta. Incluso recientemente se han reportado valores mayores para los requerimientos del equipo que no se usa para la fermentación (6). Los costos de producción de etanol en estas unidades también han sido analizados (5) y se ha demostrado que las materias primas y los nutrientes representan aproximadamente el 70% del costo total de la producción de etanol, la depreciación y los intereses conforman el 24%, y el 6% restante incluye los demás factores. Estas cifras concuerdan generalmente con otros estudios de costos publicados en la literatura técnica (6, 7, 8). Del total de la energía necesaria para el procesamiento, cerca del 46% se consume en la preparación de la caña y la extracción del jugo, entre el 21 y el 39% para la recuperación de etanol (según sea la eficiencia de la unidad de destilación) y el resto se utiliza en la generación eléctrica para los motores del proceso.

El aprovechamiento completo de la materia prima y su conversión en etanol es el principal objetivo que hay que perseguir para disminuir los costos de producción, ya

que ello representa el rubro principal en la estructura de costo del proceso. En Brasil se ha desarrollado el concepto de la mini o micro destilería, es decir, plantas que producen menos de 5,000 L de etanol por día.¹⁰ La extracción de los azúcares para fermentar en estos ingenios pequeños es solamente del 60%.

III. Justificaciones

En la actualidad existe un fuerte desarrollo en la conversión de diferentes substratos (convencionalmente azúcares) a etanol, el cual se está utilizando principalmente como aditivo para carburante, pero también como base intermedia en la síntesis de otros productos químicos.

Siendo el nuestro un país donde el rendimiento del cultivo de la caña es de alta competitividad, se justifica la investigación de procesos que permitan integrar verticalmente áreas relativamente pequeñas de tierra, en agro-industrias que proporcionen un mayor desarrollo rural y del país en general.

La combustión de carburantes fósiles contribuyen al efecto invernadero y calentamiento global, pero la combustión de etanol de origen agrícola no tiene impacto neto en los niveles atmosféricos de CO_2 , debido a que la cantidad de CO_2 que libera al quemarse ha sido previamente absorbida de la atmósfera durante el proceso de crecimiento del cultivo que es utilizado para producirlo.

IV. Objetivos

A. Generales

Modernizar el proceso de fermentación, y proponer una alternativa a mediano plazo para modificar el proceso destilación y purificación del etanol, para un fabricante de Ron en Centroamérica

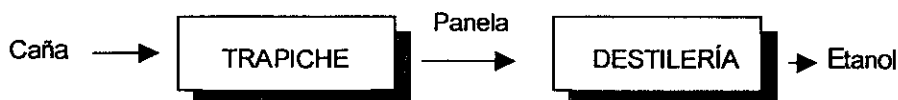
B. Específicos

- Aplicar tecnología de fermentación de melazas por medio de levaduras de cerveza.
- Recomendación para una posterior reingeniería del proceso de destilación, rectificación y purificación.
- Determinación de estándares internacionales de la composición de etanol para bebidas alcohólicas, y equipo necesario para el control de calidad.
- Determinación del costo estándar de la Industria del etanol para la manufactura de etanol a partir de melaza.

V. Problema a resolver

En este estudio el problema principal radica en el hecho que el proceso actual es obsoleto, produciendo ineficientemente etanol de muy mala calidad, a partir de panela. El proceso se presenta a continuación.

Figura No. 11 : Esquema actual



La panela es comprada a agricultores locales, los cuales la obtienen al extraer el jugo de la caña por medio de un molino muy rudimentario (trapiche), el cual difícilmente extrae más de un 55% del total de los azúcares fermentables. Esto lo convierte en una materia prima sumamente cara, siendo en ocasiones tan caro como el azúcar mismo. Además la panela es un material higroscópico lo que lo convierte en un producto perecedero, su almacenamiento es un proceso delicado. En la figura No. 12 se describe el procedimiento de producción de etanol actual.

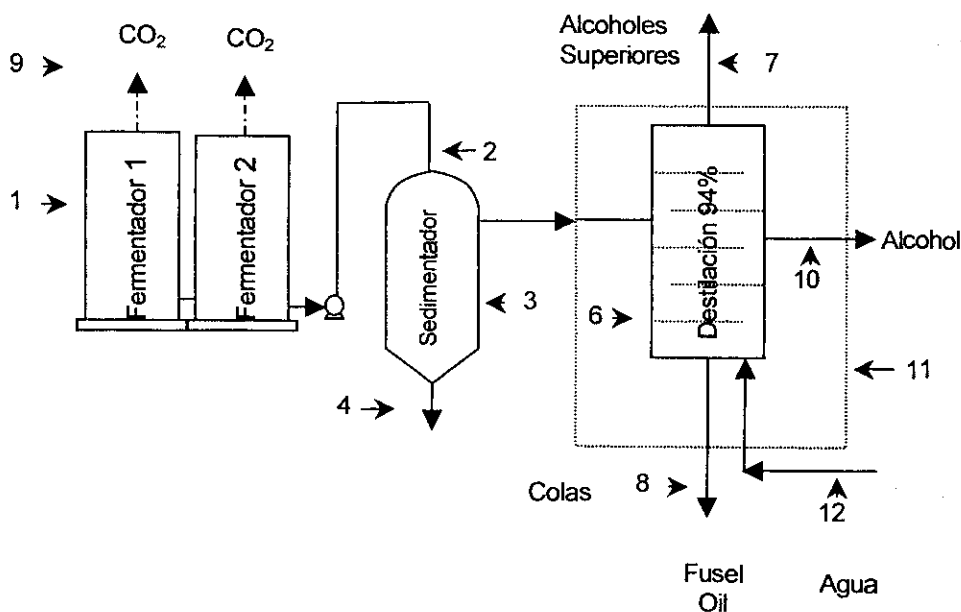
Los tanques de fermentación son dos tanques rectangulares de 2.5 metros de alto, por 2 metros de ancho, por 5 metros de largo, 25 metros cúbicos (1). Están contruidos de adobe, y recubiertos con una capa de mezcla. En un procedimiento normal, se pone la panela en el tanque, luego se agrega el afrecho (que cumple con la función de proveer los microorganismos necesarios para la fermentación) y finalmente se agrega el agua; la temperatura no se controla y se espera durante tres días a que se lleve a cabo el proceso de fermentación. Debido a que los tanques están abiertos al medio ambiente se contaminan fácilmente, eso sin tomar en cuenta los posibles microorganismos que vienen incorporados a la panela, o que traen insectos como las abejas que atraídas por el panela lo visitan con frecuencia, por otra parte el afrecho que es el agente inoculante esta también fuera de control.

Quizás sea por estas razones que entre un 30 y 50 % de las fermentaciones terminen en fracaso; a veces por la formación de vinagre en lugar de etanol, pero otras veces porque la fermentación simple y sencillamente se detiene, situación que es percibida por el operador al dejar de burbujear la solución. El burbujeo es producido por la producción de CO_2 como parte de un proceso normal de fermentación (9). Debido a que los tanques son abiertos el CO_2 se pierde en el medio ambiente, situación que es económicamente contraproducente, ya que este es un producto utilizado en la manufactura de cerveza, y por productores de aguas gaseosas, para agregarlo a sus respectivos productos como un preservante.

La acumulación de los desechos sólidos en los tanques de fermentación es de carácter obligatorio, ya que estos producen lo que se conoce como una cama, cama

que ayuda a que las consiguientes fermentaciones ocurran más rápidamente. Sin embargo la permanencia de esta cama acarrea el problema de la descomposición aun mayor de los desechos sólidos, por lo que en algunos casos la solución producida con aproximadamente un 9% de etanol, posee un insoportable olor a cloaca, lo que lo convierte en un producto inaceptable para comercializar. La masa fermentada fluye del fermentador (1) a través de la línea (2) al sedimentador (3), en el cual los sólidos sedimentan rápidamente para ser descartados a través de la línea (4).

Figura No 12 : Diagrama de operación del problema a resolver



La fase clara con un bajo contenido de sólidos que se forma en la parte superior del sedimentador (3) pasa a ser alimentada a través de la línea (5) a la sección de concentración del etanol (6). La torre de destilación es de bronce, y originalmente funcionaba perfectamente, en la actualidad se encuentra deteriorada, y es necesario hacer un estudio para reemplazar el equipo a mediano plazo. En esta sección de concentración se obtiene por medio de una destilación de etapa múltiple un etanol con una concentración aproximada del 94% peso sobre peso. Al mismo tiempo componentes de bajo punto de ebullición son removidos por medio de la línea (7), y los fusel oils por medio de la línea (8) que son las colas de la destilación, con un contenido menor a las 1,000 ppm. en peso sobre peso de etanol. El etanol obtenido en la planta de concentración ahora fluye a través de la línea (10) a una sección de almacenamiento para su posterior envasado.

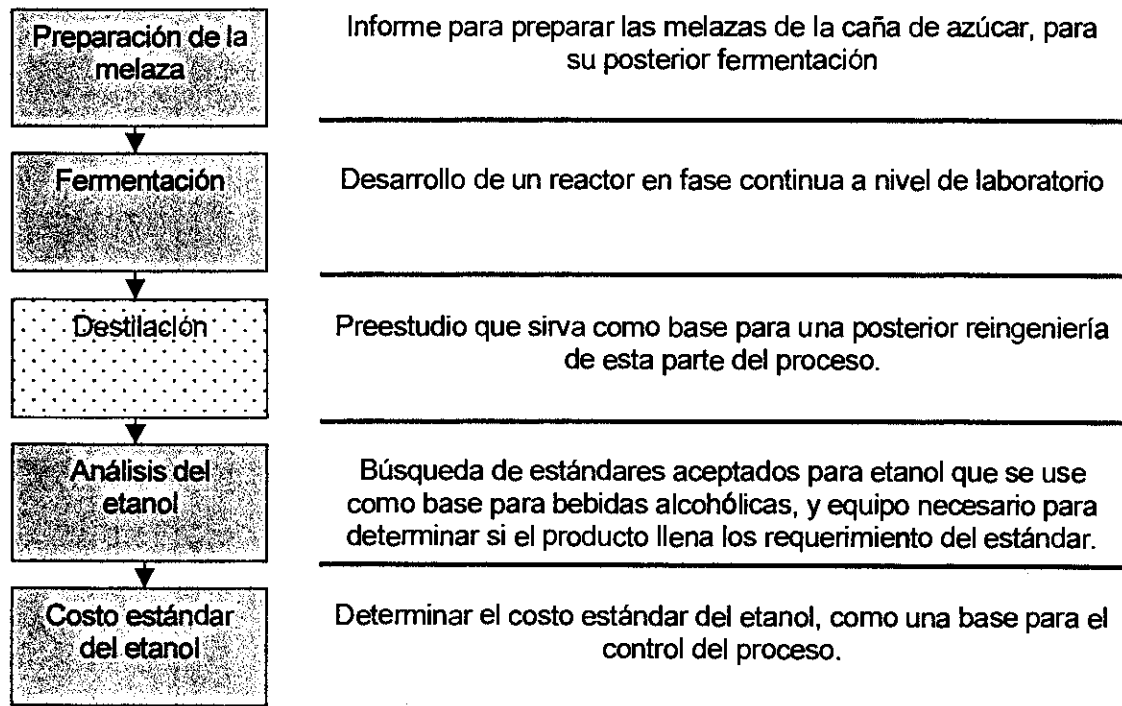
La energía calorífica requerida para el proceso de rectificación es suministrada a toda la planta (11), en la forma de vapor para calentamiento, a través de la línea (12); este debe de tener una temperatura entre 150° y 230° C. La energía calorífica del

vapor es utilizada para la operación de la columna de destilación de la sección (6) para la producción de etanol al 94% peso sobre peso.

La capacidad de producción requerida es muy baja, de unos 10,000 litros de etanol al 95% al mes, por lo que debe recomendarse un proceso que sea económicamente factible.

IV. Metodología

A continuación se presenta una secuencia de las etapas requeridas para la realización del trabajo de graduación.



VII. Resultados

A. Fermentación

Después de una amplia investigación en la base de datos pública de Patentes de los Estados Unidos de América, que incluyó de 1977 a 2003, conociendo la literatura de la industria a la cual se hace mención en la bibliografía y en especial los trabajos del Ing. Rolz, aunado a la experiencia práctica que se ha obtenido a lo largo de más de 15 años de fermentaciones, se decidió proponer el siguiente proceso por su simple diseño, efectividad de producción, y adecuación a los bajos niveles de producción que se necesitan.

El sistema puede ser descrito como un reactor separador continuo de múltiples etapas, el que ya fue designado en la introducción por sus siglas en inglés (MSRS), este posee cuatro componentes para separar el etanol que inhibe la reacción del caldo de cultivo, las cuales son:

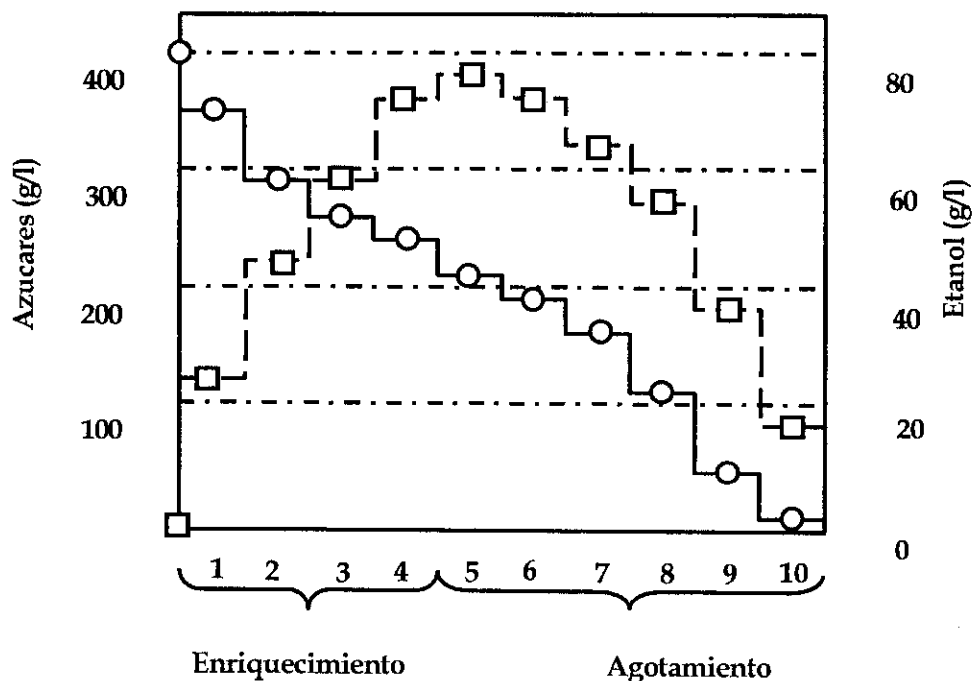
- Una fase gaseosa de dióxido de carbono inerte que absorbe el etanol.
- El caldo de cultivo para la fermentación.
- Accesorios internos opcionales en el reactor.
- Levaduras.

El diseño básico es el de un reactor separador para la producción de etanol inhibitorio por medio de fermentación de melaza, que es utilizada como sustrato. El equipo posee un arreglo vertical de tanques de fermentación, dispuesto en forma de cascada lo que permite que el líquido fluya a través del sistema sin utilizar bombas (Figura No. 12 / Pág. No. 20). En cada etapa del aparato, el producto es formado en la fase líquida debido a la acción de levaduras sobre los azúcares de la melaza. Cada una de las etapas incluye un tanque-reactor con agitadores. La fase líquida que contiene el producto rebalsa el reactor, y entra en un separador líquido-gaseoso donde es contactada con una fase gaseosa de dióxido de carbono la cual extrae una parte del producto, permitiendo que la otra parte fluya al tanque-reactor inmediato inferior, donde prosigue la fermentación.

Las etapas son ensambladas verticalmente en dos tipos básicos de secciones de reacción: una de enriquecimiento y otra de agotamiento. El caldo de cultivo, conteniendo el sustrato y los nutrientes, es alimentado a la primera etapa del reactor, que es también la primera etapa de la sección de enriquecimiento. Los azúcares son convertidos a etanol y el producto se distribuye en la sección de contacto líquido gaseoso, entre el caldo de cultivo y el dióxido de carbono. Este separador de contacto líquido gaseoso contiene empaques de columna estructurados o aleatorios. En la sección de enriquecimiento el líquido y el gas fluyen concurrentemente (misma dirección). Lo que promueve un incremento de etanol en el caldo así como en el dióxido de carbono, al pasar de etapa a etapa. El caldo de fermentación que abandona la sección de enriquecimiento es alimentado a la sección de agotamiento donde el caldo es contactado en contracorriente con dióxido de carbono, mientras que los azúcares remanentes son transformados en etanol. La concentración del producto inhibitorio de la fermentación en la fase líquida es reducida por el gas de agotamiento

que viaja en contracorriente al líquido, permitiendo altas velocidades de reacción y conversión completa de los azúcares de la melaza.

Gráfica No. 1 : Concentración de azúcares y etanol en cada etapa del proceso



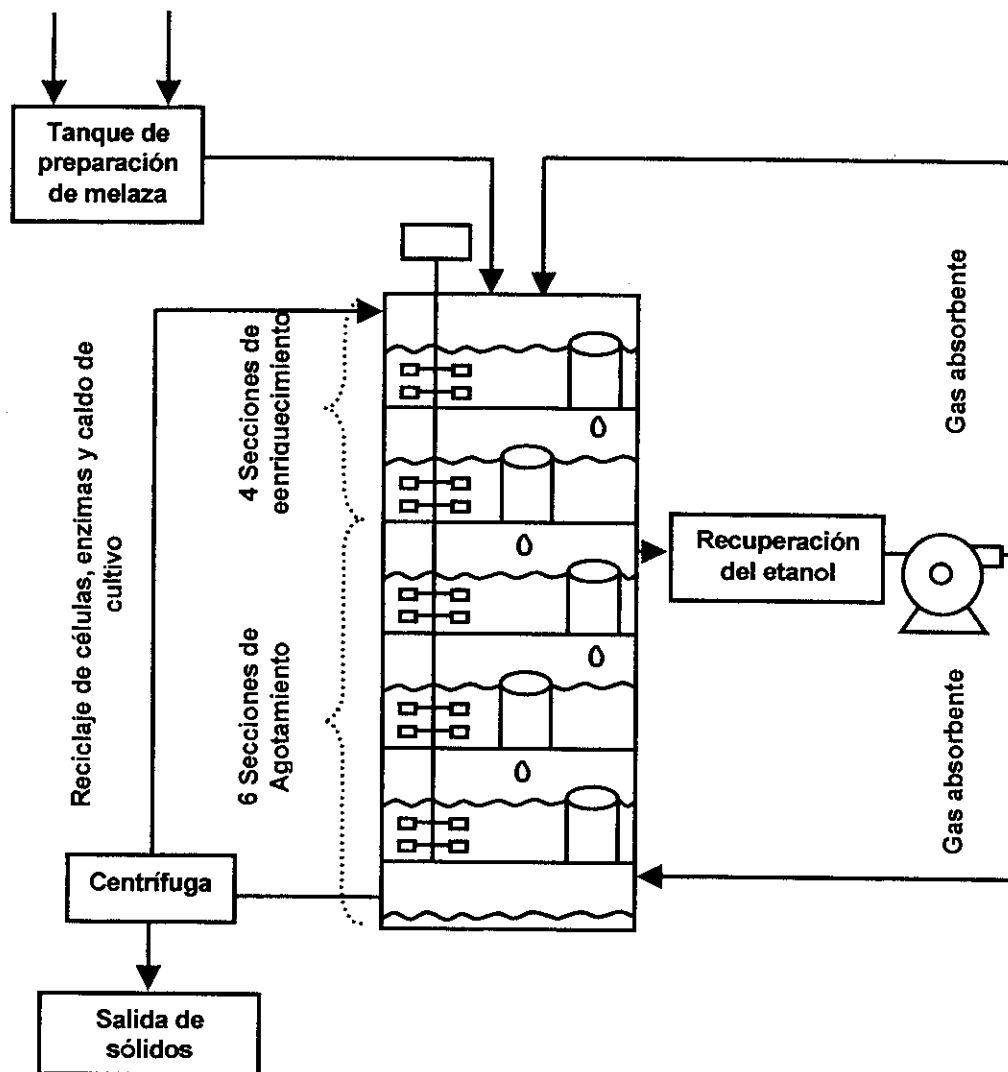
El reactor cuenta con cuatro etapas de enriquecimiento, y seis etapas de agotamiento. En estas se mantiene una alta densidad de levaduras en cada etapa reciclando células libres del efluente por medio de una centrifuga que concentra las levaduras, que luego son agregadas a la primera etapa de enriquecimiento.

El fermento de la última etapa de fermentación pasa a través de una separación de levaduras en una centrifuga o membrana de filtración. La crema de levadura es recolectada y tratada ácidamente antes de ser reciclada al primer fermentador de la serie. Esta recirculación junto a algún crecimiento de levaduras en el sistema, mantiene la concentración de levaduras activas en el sistema en 50 gramos por litro. Cuando este sistema de reciclado es utilizado el tiempo de residencia total es del orden de 10 horas, con una concentración inicial de azúcares de 400 gramos por litro de solución.

La temperatura del MSRS dependerá en gran medida de la actividad termal de las levaduras en esa región en particular. Generalmente entre 25° y 40° Celsius. Cuando se ha logrado establecer una temperatura, se puede determinar una presión

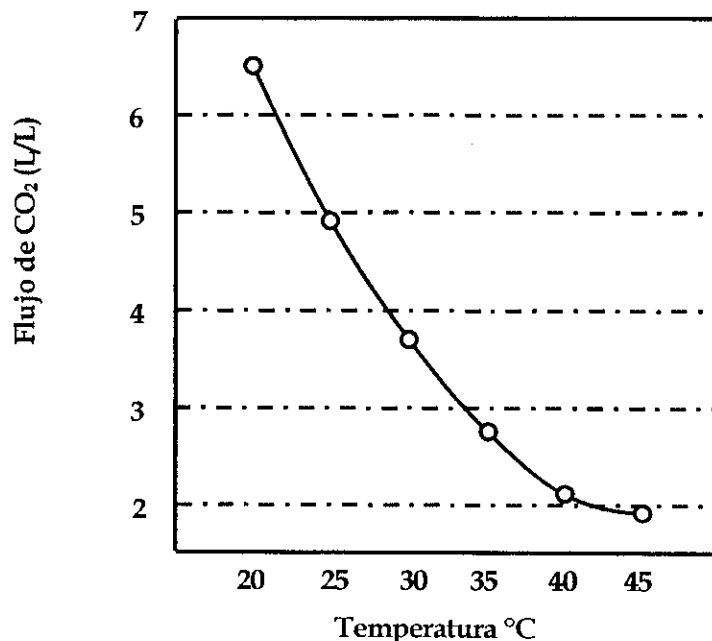
de operación. En general, operar a presión atmosférica permite una menor inversión de capital y un costo de operación mas bajo que operando al vacío o a alta presión.

Figura No. 13 : Reactor separador (MSRS)



Cuando han sido determinadas la temperatura y la presión de operación, se puede determinar el flujo requerido de CO_2 para reducir la concentración de etanol. En la gráfica No. 2 se muestra la relación requerida de flujo (L/L) entre el CO_2 y el Caldo de Cultivo para reducir las concentraciones de etanol en el efluente final a menos del 1% (m/m) de la concentración de ingreso, todo esto en función de la temperatura de operación.

Gráfica No. 2 : Relación de requerimiento de flujo gaseoso vrs. temperatura



Los requerimientos de la relación de flujo gaseoso disminuyen en un factor de alrededor de 2 por cada 10° centígrados de incremento de la temperatura. Esto indica que los costos de circulación de gas pueden ser reducidos si las levaduras soportan mayores temperaturas de operación. Cuando la temperatura alcanza 85° centígrados, no se necesita más CO₂ que el de la reacción.

Si en determinada etapa el calor generado por la reacción es substancial, entonces se podrán utilizar serpentines en las secciones de reactores agitados. El gas que permanece en contacto con las secciones de extracción líquido gaseosa tiende a enfriar el caldo de cultivo, por lo que la temperatura estará en gran medida determinada por la temperatura de saturación de la corriente de CO₂. Por lo tanto la temperatura del MSRS puede ser fácilmente controlada ajustando la temperatura de saturación del que entra a los segmentos de enriquecimiento y absorción del sistema. (7, 4,5)

La agitación del reactor agitado se puede lograr introduciendo una porción del CO₂ que ingresa a una etapa directamente al tanque de fermentación. Para lograr esto se necesita de una compresión adicional del gas pero permite beneficios adicionales, como; el enfriamiento del caldo de cultivo y el suministro de nutrientes en la fase gaseosa (Ej.: oxígeno) al reactor. (8,6)

A continuación damos un ejemplo para determinar el uso de un MSRS, en la producción de etanol a partir de melaza, asumiendo que cada etapa posee el mismo volumen de caldo de cultivo.

La expresión de velocidad de reacción (de acuerdo a Genon et al., Chem. Eng. Común. (1983) 23, 425).

Ecuación No. 1

$$r = X_s V_{\max} \left(1 - \frac{P}{K_p} \right) \left(\frac{S}{K_{s1} + S + S/K_{s2}} \right)$$

Donde:

Variable	Significado	Constante Dimensionales
P_o	Concentración del producto	g / L
S_i	Concentración del substrato	g / L
r	Velocidad de reacción	g Etol/ L - hr
X_s	Densidad de levaduras	50 g célula / L
V_{\max}	Máxima capacidad de productividad de etanol	0.85 g Etol/ g célula-hr
K_p	Constante de inhibición de etanol	107 g / L
K_{s1}	Constante de saturación de melaza	4.3 g / L
K_{s2}	Constante de inhibición de melaza	2,300 (g / L) ²

Para este experimento cada sección posee un diámetro de 60 cm., con un nivel de líquido de 60 cm., y una columna empacada de 21 cm. de diámetro para contacto líquido gaseoso donde rebalsa el caldo de cultivo. Este diseño da un volumen de reactor de 149 L por etapa. Una relación molar de flujo gas a líquido (G/L) de 3.0 es utilizada en la sección de enriquecimiento, mientras que en la de agotamiento la relación es de 8.0. El MSRS es operado a presión atmosférica y a 32 °C, la densidad de células es de 50 g/L de peso seco de células, esta concentración se logra mediante el reciclaje de las mismas.

Se aplicó una solución de melaza de 400 g/L, y al utilizar la ecuación de velocidad de reacción No. 1, la cual incluye un término para la inhibición de la reacción por concentración de azúcares, se alcanzó la casi completa utilización de los azúcares en un tiempo de residencia de 9.9 horas.

B. Destilación, rectificación y purificación

Se sabe que una buena purificación del etanol acuoso puede lograrse al soplar un gas como CO₂ a través de la solución a temperatura atmosférica, preferiblemente en contra corriente al líquido que desciende. El gas se satura con los vapores del etanol y las impurezas volátiles y luego es arrastrado a través de un absorbente que remueve al menos en parte las impurezas. El CO₂ es re-circulado para ser re-usado.

Las impurezas volátiles, especialmente aquellas que poseen un bajo punto de ebullición, que por lo general no son fácilmente absorbidas por el carbón activado, tienden a acumularse en el gas re-circulante. Esta es la razón por la que es recomendable sangrar la mezcla del gas. El sangrado se hace de forma continua en la descarga del compresor que re-circula el gas. La cantidad extraída de CO₂ debe de ser equivalente a la reemplazada por el gas fresco que se produce en el MSRS.

Los compuestos que se remueven completa o parcialmente del etanol acuoso impuro por medio de la corriente de gas son los siguientes:¹²

Tabla No. 1

Compuesto	°C
Acetaldehído	21
Etil Éter	34.6
Acroleína	52.5
Acetona	64.7
Alcohol Metílico	77.15
Ester Acético	82.3
Alcohol Izo propílico	82.8
Alcohol Ter – Butílico	97.19
Alcohol n-Propílico	99.5

Ter-Amil Alcohol	101.8
Crotón aldehído	104
Isobutil Alcohol	108.39
Sec-Isoamil Alcohol	114
Piridina	115
n-Butil Alcohol	117.7
Ácido Acético	118
Amil alcohol	128
Isoamil Alcohol	131.5
n-Amil alcohol	138
Furfural	162

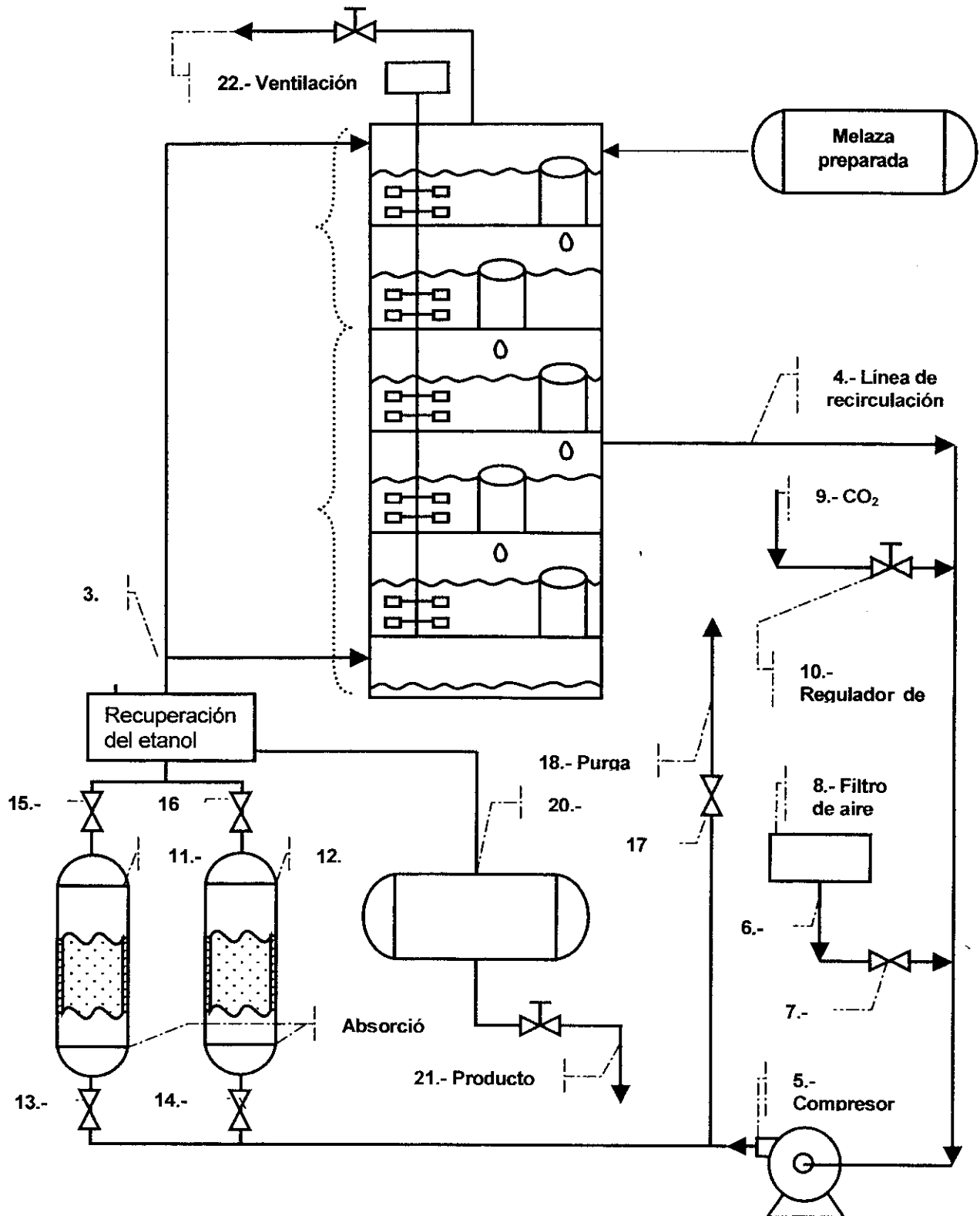
Los compuestos de bajo punto de ebullición tienen una presión de vapor relativamente alta, por lo tanto son fácilmente absorbidos por el gas re-circulante. Algunos de los compuestos de alto punto de ebullición, como los alcoholes amílicos, muestran una presión de vapor notablemente alta al estar en presencia de agua y por lo tanto también serán absorbidos en cierto grado por el gas recirculante. Otra ventaja del proceso anterior es que el carbón activado no está en contacto directo con la solución acuosa del etanol y por lo tanto no puede contaminar el líquido.

La figura 14 es un diagrama en vista de elevación de una fábrica apta para llevar a cabo el proceso. La materia prima es el caldo de cultivo del cual se produce constantemente etanol, dentro del MSRS. El producto es alimentado al receptor (20) y de ahí a través de la línea (21) al almacenamiento o directamente al embotellado. Si el producto requiere de alguna clarificación adicional puede ser filtrado en este punto.

El dióxido de carbono saturado con los vapores del etanol, agua y todas las impurezas volátiles es impulsado a través de la línea de recirculación (4) por el compresor (5). El gas saturado impulsado por el compresor pasa a través de cualquiera de los tanques de absorción (11) o (12) donde retienen una substancial cantidad de impurezas para luego regresar al MSRS (2).

Una pequeña cantidad del gas recirculante que contiene al dióxido de carbono se sangra continuamente a través de la válvula (17) y línea (18) y es llevado a la sección de recuperación del CO₂. El sangrado de una parte del gas en recirculación contribuye a evitar cualquier acumulación de impurezas que puedan

Figura No. 14 : MSRS con purificación de etanol

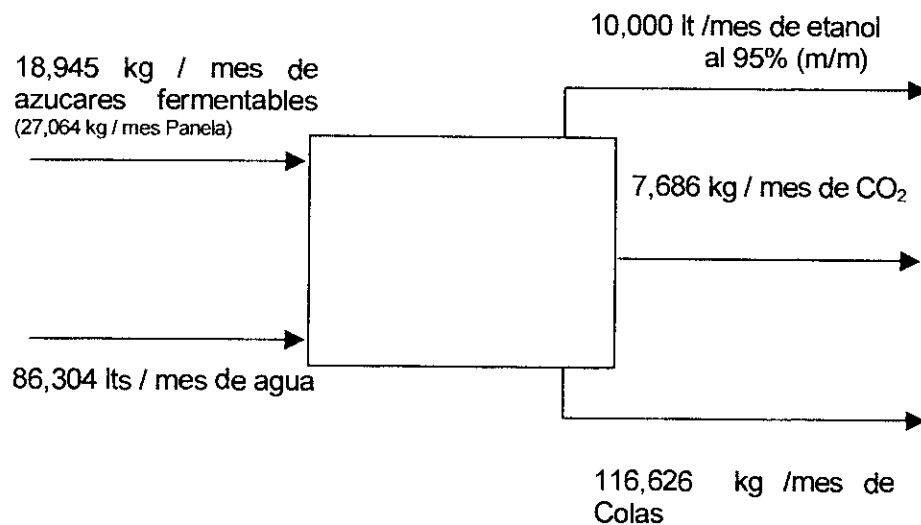


No ser absorbidas en el carbón activado. Una porción del CO_2 se disuelve en la solución de etanol reduciendo el pH a un rango deseado. El dióxido de carbono necesario para reponer el absorbido en la solución de etanol y el que fue sangrado, es producido por la reacción de fermentación que se lleva a cabo dentro del MSRS. La cantidad promedio de CO_2 disuelto en el etanol es usualmente de una libra de dióxido de carbono por 1000 galones imperiales de etanol. Adicionalmente se puede agregar aire fresco a través del filtro de aire (8) que se encuentra en la línea que va al compresor (5) al abrir ligeramente la válvula (7). Así el gas que contiene CO_2 el puede incluir otros gases como nitrógeno si se desea.

Los tanques de absorción (11) y (12) se llenan con carbón activado. Las secciones de absorción se utilizan alternativamente dependiendo de la actividad del absorbente en la sección que se está utilizando. Así, cuando el carbón activado de la sección de absorción (11) a sido agotado, se abren las válvulas (16) y (14) y se cierran las válvulas (15) y (13) para permitir el gas de recirculación pase a través de la sección de absorción (12) que contiene carbón activado fresco. Mientras tanto, el carbón activado agotado que se encuentra en la sección de absorción (11) se descarga y repone con absorbente fresco.

Para poder hacer un análisis de caudales, se debe hacer referencia a la ecuación numero 1, que se encuentra en la pagina 25. Con esta ecuación se puede determinar el tiempo de residencia de la solución, por lo que para llevar a cabo el calculo del volumen del reactor, solamente se debe de conocer la cantidad deseada de producción en un periodo determinado.

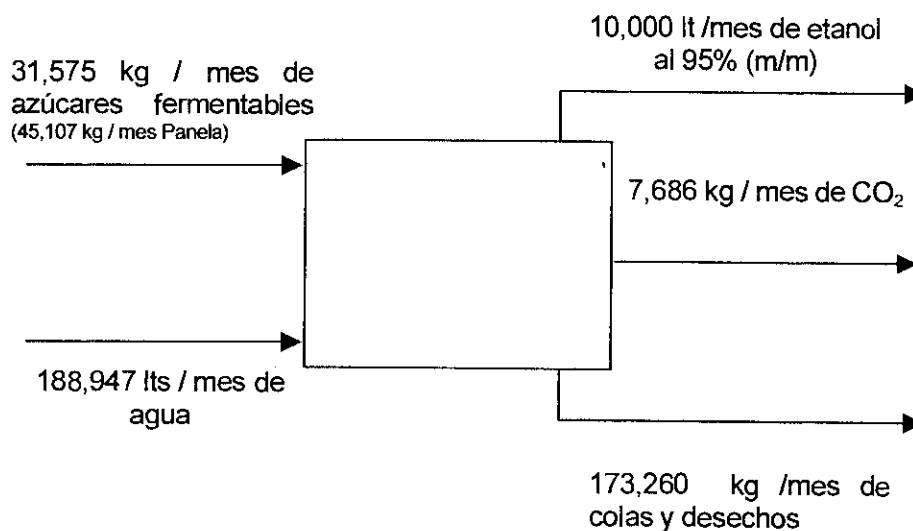
Figura No. 15 : Balance de masa del problema a resolver con 100% de éxito en las fermentaciones



La panela posee un rango de azúcares fermentables de 70% a 80% , se utilizó la parte baja del rango para hacer el calculo.

En la siguiente figura se está haciendo una aproximación más realista al balance de la empresa ya que como se explico en el planteamiento del problema: en un procedimiento normal, se pone el panela en el tanque (figura No. 12), luego se agrega el afrecho (que cumple con la función de proveer los microorganismos necesarios para la fermentación) y finalmente se agrega el agua; la temperatura no se controla y se espera durante tres días a que se lleve a cabo el proceso de fermentación. Se lleva a cabo un calculo del balance de masa con un 60% de éxito en las fermentaciones.

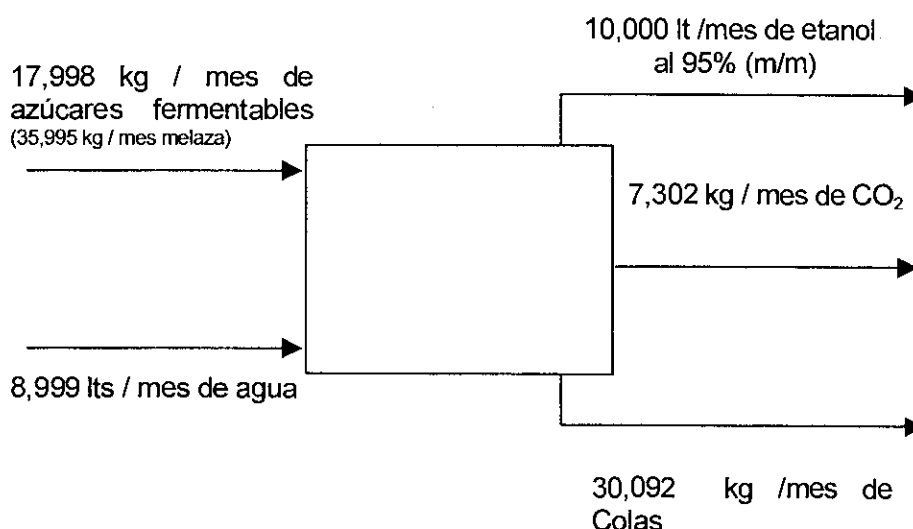
Figura No. 16 : Balance de masa del problema a resolver con 60% de éxito en las fermentaciones



En la siguiente figura podemos observar un balance de masa con el MSRS, en este punto la principal diferencia a recalcar es que como se plantea en la gráfica No. 1 de la página 22, en la etapa de enriquecimiento 1 y 2 la concentración de azúcares y levaduras es tan elevada que en la practica es imposible que compita algún microorganismo con la colonia ya establecida de levaduras, y prácticamente no logran desarrollarse, por lo que siempre se produce etanol, si a esto agregamos que a partir de la etapa No. 3 ya tenemos 60 g/l de etanol, el cual es toxico y mata a los microorganismos que pudieran estar contaminando el caldo de cultivo, tenemos prácticamente un sistema invulnerable a las infecciones tan comunes que obligaban a un 60 % de éxito de fermentación en la figura número 16. Dicho de otra manera de

cada 10 fermentaciones 6 eran exitosas en la figura número 16, mientras que en el MSRS de cada 10 fermentaciones 10 son exitosas.

Figura No. 17 : Balance de masa del MSRS



Comparación de condiciones iniciales contra condiciones finales

Procesos comparados	Proceso del problema	MSRS
Azúcares fermentables (kg / mes)	31,575	17,998
Colas (kg / mes)	173,260 <small>Colas y desechos</small>	30,092

En el caso de los azúcares fermentables hay una reducción del 43%, mientras que en lo que se refiere a los desechos que generalmente requieren de tratamiento para poder ser desechados es del 82%.

A continuación se presenta un análisis de preferencia de sabor que se llevó a cabo sobre etanol destilado y rectificado, el producto final obtenido por medio del proceso anteriormente descrito y un Vodka Comercial.

Tabla No. 2

Productos comparados	Etanol	Etanol refinado por el proceso	Vodka comercial
Etanol por volumen	40	40	37.5
(% v / v)			
Extracto	inmedible	inmedible	0.02
(g por 100 mL)			
Tiempo de permanganato	38	41	41
(min.)			
PH	7.0	4.5	6.9
Preferencia de gusto	40	85	80
(%)			

A pesar que los contenidos de impurezas químicas determinados no decrecen drásticamente, el panel de preferencia de sabor muestra que el producto ha perdido su aroma y sabor original, y que al menos es igual o mejor que un vodka comercial de buen grado. Las impurezas que pudieron ser determinadas también son menores que las impurezas contenidas en un vodka comercial.

Esto implica que el uso de dióxido de carbono provee de productos que poseen un sabor mejorado. Además se debe hacer notar que la disminución del pH a alrededor de 4.0 no afectó adversamente la suavidad del producto final.

Tabla No. 3

Impurezas presentes en el etanol

Gramos por 100 litros de etanol absoluto

Productos comparados	Etanol	Etanol refinado por el proceso	Vodka comercial
Acidez volátil (como ácido acético)	0.34	0.37	0.46
Esteres (como acetato de etilo)	Nulo	Nulo	Nulo
Aldehídos (como acetaldehído)	0.08	0.05	0.51
Furfural	Nulo	Nulo	Nulo
Alcoholes superiores (como alcohol izó butílico)	Nulo	Nulo	Nulo

C. Presentación de estándares internacionales de la composición de Etanol para bebidas alcohólicas

La información se obtuvo de la legislación de la comunidad económica europea vigente, y se encuentra en el reglamento (CEE) n° 1576/89 del Consejo, de 29 de mayo de 1989, donde se establecen las normas generales relativas a la definición, designación y presentación de las bebidas espirituosas. En el Anexo I de este reglamento se encontró la tabla No. 4, donde se indican las características que debe de tener el Etanol de origen agrícola.

Tabla No. 4

Características del etanol de origen agrícola

Características organolépticas	Sin sabor perceptible ajeno a materia prima
Grado alcohólico volumétrico mínimo	96% vol
Gramos por 100 litros de etanol absoluto	
Acidez total	1,5
(expresada en ácido acético g/hL de etanol a 100% vol)	
Esteres	1,3
(expresada en acetato de etilo g/hL de etanol a 100% vol)	
Aldehídos	0,5
(expresada en acetaldehído g/hL de etanol a 100% vol)	
Alcoholes Superiores	0,5
(expresada en 2-metil propanol-1 g/hL de etanol a 100% vol)	
Metanol	50
(expresada en g/hL de etanol a 100% vol)	
Extracto seco	0,1
(Bases nitrogenadas volátiles expresadas en nitrógeno g/hL de etanol a 100 % vol)	
Furfural	Imperceptible

El laboratorio de análisis deberá contar con el equipo básico necesario para llevar a cabo trituraciones, tamizado, mediciones de peso, mediciones de densidad, mediciones de volumen, mediciones de temperatura, decantación, filtración, desecación, evaporación, destilación y extracción.

Sin embargo el énfasis se hará sobre el método de cuantificación de los diferentes hidrocarburos que componen al etanol, producto de la fermentación. Para esto se recomienda un cromatógrafo de gases HP 5890 serie II, equipado con un controlador electrónico de presión y un detector de ionización de llama. Generalmente se utiliza un sistema capilar 100-metro. Una temperatura de horno de 35 °C permite una separación del pico del etanol, la excelente forma del pico que produce el etanol permite una cuantificación exacta. Este método permite la separación de la mayoría de las impurezas presentes en el etanol, siendo un beneficio adicional, que estas pueden ser identificadas y cuantificadas.

D. Costo estándar de la manufactura de etanol a partir de melaza

Los costos estándar son los elementos constitutivos de un sistema de presupuestos y de control por retroalimentación.¹³

1. Costos estándar como auxiliares del control por retroalimentación. Los costos estándar son costos cuidadosamente determinados; son costos objetivo, costos que deben de ser alcanzados. Los costos estándar ayudan a elaborar los presupuestos, a medir el nivel de ejecución alcanzado, a obtener los costos de los productos, y ahorrar costos de teneduría de libros.

Un conjunto de estándares describe en rasgos generales cómo debe ser realizada una tarea o cuánto debe costar. A medida que se hace el trabajo, los costos reales incurridos son comparados con los costos estándar para hacer resaltar las variaciones. Esta retroalimentación ayuda a descubrir mejores formas de cumplir con los estándares, de alterar los estándares y de cumplir con los objetivos.

2. Variaciones en precio y en eficiencia. El gerente usualmente quiere unas pocas señales que le ayuden a explicarse por que los resultados reales difirieron de los planes originales. Dividir las variaciones del presupuesto en dos subdivisiones principales, precio y eficiencia, es a menudo de gran utilidad:

Variación en precio: es la diferencia entre los precios unitarios reales y precios unitarios estándar multiplicada por la cantidad real de insumo utilizado.

Variación en eficiencia: la eficiencia es una medida relativa; es a menudo expresada como la razón de lo que entra a un sistema dividido por lo que sale de él, de los insumos al producido. Para un nivel de unidades producidas, la variación en eficiencia es la diferencia entre los insumos que deberían haberse usado y los insumos que fueron realmente usados.

3. Otra terminología utilizada. Para hacer resaltar su similitud básica, las dos variaciones principales son designadas aquí como variaciones en precio y en eficiencia tanto para los materiales directos como para la mano de obra directa. En la práctica, sin embargo, usted debe de estar alerta para reconocer una variedad de términos que son usados a veces para designar estas variaciones. Por ejemplo, la variación en precio es a menudo llamada una tasa de variación o una variación en salario cuando se usa en relación con la mano de obra directa. La variación en eficiencia es a menudo llamada variación en cantidad o en utilización cuando se usa con relación a los materiales directos o a la mano de obra directa.

4. Responsabilidad en el establecimiento de estándares. El establecimiento de estándares y el proceso de fijación de las cifras del presupuesto en una organización es a menudo principalmente la responsabilidad del personal de línea directamente involucrado. La estrechez relativa del presupuesto es el resultado de una discusión cara a cara entre el gerente y su superior inmediato.

A continuación se definen los estándares de precio y eficiencia en la producción de etanol, de acuerdo a los estándares de la industria en Guatemala, el precio estándar de la melaza es de 0.64 Q/L. La eficiencia estándar de conversión de melaza a etanol es de 0.4 litros de etanol por litro de melaza.

El trabajo del departamento de contabilidad es (a) valorizar los estándares físicos; es decir expresarlos en términos monetarios; y (b) elaborar informes sobre los resultados de operación comparados con los estándares.

5. Responsabilidad por variaciones de precio y eficiencia. El control del costo se ve auxiliado mediante la medición de las variaciones en términos de responsabilidades. Típicamente el consumo de recursos constituye la principal responsabilidad del jefe de un departamento, mientras que el precio puede ser la principal responsabilidad de un funcionario de compras. Por lo tanto, la medida monetaria de la variación de la eficiencia no debe ser influenciada por los cambios en los precios unitarios. El precio se mantiene constante en el estándar y la variación resultante en la eficiencia es atribuible solamente a la desviación con respecto al estándar de consumo de recursos en el departamento a cargo del jefe correspondiente. En caso de variación en el precio, puesto que el funcionario de compras no influye en la cantidad usada, la diferencia en el precio unitario se dice que es aplicable a todas las cantidades usadas. Se considera que la responsabilidad del gerente de compras es comprar para todas las necesidades independientemente de si los materiales son usados eficientemente o no.

Teóricamente la variación en precio debería ser subdividida en dos variaciones:

Ecuación No. 2

$$Vp = D_p \times C_e$$

Variable	Significado
Vp	Variación en precio
D_p	Diferencia en precio
C_e	Cantidad estándar (No se usa la cantidad Real)

Ecuación No. 3

$$Vpe = D_p \times D_c$$

Variable	Significado
Vpe	Variación en la combinación de precio y eficiencia
D_p	Diferencia en precio
D_c	Diferencia en cantidad

La variación en eficiencia se define de la siguiente forma:

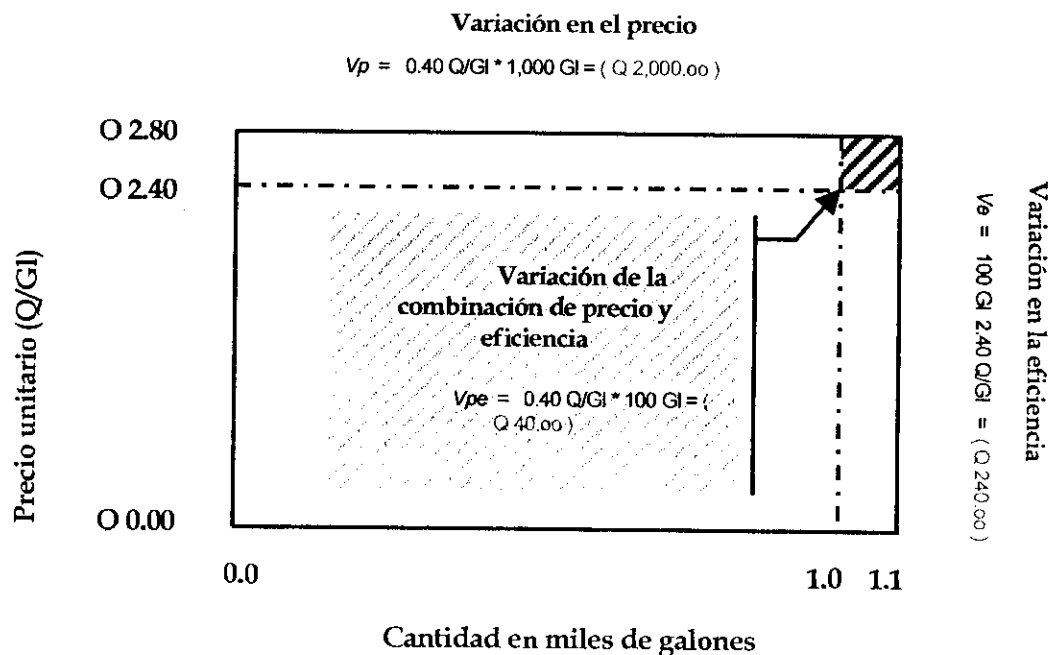
Ecuación No. 4

$$Ve = D_p \times P_e$$

Variable	Significado
Ve	Variación en eficiencia
P_e	Precio estándar
D_c	Diferencia en cantidad

En la siguiente gráfica se pueden observar la relación de las variaciones de precio y eficiencia. El diagrama No. 5 ofrece un análisis gráfico que muestra los cálculos de las variaciones en términos rectangulares. Teóricamente como se muestra en la gráfica, la variación en precio debería ser subdividida en dos variaciones:

Gráfica No. 3 : Análisis gráfico de las variaciones del costo estándar



VIII. Discusión

A. Preparación de la melaza

La razón por la que se seleccionaron las melazas derivadas del proceso de azúcar como la fuente de azúcar fermentable ya que actualmente es la materia prima más económica para la producción de etanol.

Además la melaza posee cierto número de nutrientes de crecimiento que ayudan al crecimiento y desarrollo de la levadura, evitando así el costo de agregar nutrientes.

B. Fermentación

Las ventajas del MSRS son evidentes al observarse en fermentaciones fuertemente inhibidas por etanol lo que implica altas concentraciones iniciales de azúcares. Las fermentaciones convencionales de azúcares a etanol, ya sean batch o continuas, no pueden utilizar concentraciones de azúcares superiores al rango de 200 a 250 g/L ya que la inhibición de la producción de etanol ocurre entre el 10 y 12 % de concentración. El nivel de inhibición varía de especie a especie dependiendo del sustrato y del producto. El efluente de la sección de agotamiento se caracteriza por las bajas concentraciones de etanol y azúcares. Altas velocidades de reacción son mantenidas en el sistema al mantener una baja concentración de etanol y una alta densidad de levaduras en el caldo de fermentación. Además el etanol producido no contiene sustratos de la fermentación o levaduras.

El MSRS, con su fase gaseosa de agotamiento del etanol producido durante la fermentación, tiene la habilidad de poder manejar la melaza en condiciones de alta viscosidad y con sólidos insolubles, es por esto que se pueden utilizar altos niveles de azúcares reduciendo en gran manera el volumen del efluente lo que impactando favorablemente el costo de preparación de la alimentación y del manejo de el efluente de una forma que permita un bajo impacto ecológico, lo cual tiene cada día mas importancia, pudiendo en algunos casos llegar a ser determinante para la marcha del negocio. Lo anterior es particularmente cierto cuando la melaza es utilizada como sustrato. Otra ventaja es que al poder manejar altas concentraciones de azúcar el costo de capital se reduce por ser relativamente pequeño en tamaño, y al ser operado en continuo los costos en salarios también disminuyen.

El MSRS maneja melaza en condiciones de alta viscosidad y con sólidos insolubles, es por esto que se pueden utilizar altos niveles de azúcares, lo que implica:

- El costo de preparación de la alimentación disminuye hasta en un 50%
- Una gran reducción del volumen del efluente, reduciendo hasta en un 50% la necesidad de capacidad instalada para el proceso de tratamiento del efluente.
- El costo de capital del equipo se reduce por ser relativamente pequeño en tamaño.
- Al ser operado en continuo los costos en salarios disminuyen.

Además el MSRS se caracteriza por:

- Un efluente que se caracteriza por las bajas concentraciones de etanol y azúcares, maximizando la conversión de azúcar a etanol, garantizando un bajo costo.
- El etanol producido no contiene substratos de la fermentación o levaduras.

C. Destilación, rectificación y purificación

Las torres de destilación son de bronce, originalmente funcionaban perfectamente, en la actualidad se encuentran deterioradas, pero funcionando, por lo que se recomienda el método de absorción para complementar el proceso y posiblemente mejorar la calidad del etanol producido.

La remoción de las impurezas indeseables es especialmente importante en el Ron debido a que es una bebida pura a la que no se le agregan sabores para enmascarar el sabor de las impurezas. Esta es una suave, inodora e incolora mezcla de alrededor del 40 al 50 % de etanol y 50 a 60 % de agua, con un sabor extremadamente suave.

Los procesos utilizados en las destilerías, el etanol debe de ser preparado adecuadamente por destilación y luego purificado antes de que pueda ser utilizado para la producción de bebidas alcohólicas. La purificación por lo general es costosa y complicada, especialmente cuando se lleva a cabo rectificación adicional, filtración sobre carbón activado y añejamiento. En la rectificación de soluciones de etanol se requiere un gran número de platos de burbuja, o su equivalente, y un alto grado de reflujo para producir un etanol más o menos puro.

En lo que se refiera a filtración sobre carbón activado, el filtrado debe de llevarse a cabo muy lentamente, y se requieren descargar altas cantidades de carbón activado. Además la filtración siempre presenta la posibilidad de que algún componente orgánico indeseable o materia inorgánica sean extraídos del absorbente y contamine el etanol.

Durante el añejamiento los contenidos de ácidos, esteres, adheridos, cetonas y alcoholes fósiles solo decrecen ligeramente. De cualquier forma su contenido es estabilizado y no cambiara durante el periodo adicional de almacenaje antes del consumo.

El método propuesto nos presenta una alternativa a la rectificación adicional, ya que permite la absorción selectiva de los contaminantes en el carbón activado, además resuelve el problema de la extracción del mismo ya que todo el proceso es en fase gaseosa, lo que también implica una disminución en la cantidad de carbón activado a regenerar, y por último logra estabilizar los contenidos del etanol, para que no cambien durante el periodo adicional de almacenaje, por lo que el proceso presenta una alternativa excelente y sumamente económica para LM, ya que el proceso se puede adaptar perfectamente a un MSRS, lo que disminuye más aún los costos.

El método de absorción del etanol en la corriente de CO₂, para luego ser filtrado en columnas de carbón activado nos da los siguientes beneficios:

- Nos presenta una alternativa más eficiente a la rectificación adicional, ya que permite la absorción selectiva de los contaminantes en el carbón activado.
- Resuelve el problema de la extracción de contaminantes que normalmente existen en el carbón activado ya que todo el proceso de filtrado es en fase gaseosa.
- Se da una disminución en la cantidad de carbón activado a regenerar. Se logra estabilizar los contenidos del etanol, para que no cambien durante el periodo adicional de almacenaje.

D. Costo estándar de la manufactura de etanol a partir de melaza

El establecimiento de estándares y el proceso de fijación de las cifras del presupuesto en una organización será principalmente la responsabilidad del personal de línea directamente involucrado. La estrechez relativa del presupuesto es el resultado de una discusión cara a cara entre el gerente y su superior inmediato. Esta retroalimentación ayudará a descubrir mejores formas de cumplir con los estándares y con los objetivos.

IX. Conclusiones

1. Para modernizar el proceso de fermentación se recomienda MSRS que maneja melaza en condiciones de alta viscosidad y con sólidos insolubles, es por esto que se pueden utilizar altos niveles de azúcares, lo que implica:

- El costo de preparación de la alimentación disminuye hasta en un 50%
- Una gran reducción del volumen del efluente, reduciendo hasta en un 50% la necesidad de capacidad instalada para el proceso de tratamiento del efluente.
- El costo de capital del equipo se reduce por ser relativamente pequeño en tamaño.
- Al ser operado en continuo los costos en salarios disminuyen.

Además el MSRS se caracteriza por:

- Un efluente que se caracteriza por las bajas concentraciones de etanol y azúcares, maximizando la conversión de azúcar a etanol, garantizando un bajo costo.
- El etanol producido no contiene substratos de la fermentación o levaduras.

2. La alternativa a mediano plazo para modificar el proceso de destilación y purificación del etanol, es el aprovechamiento del hecho de que el etanol en el MSRS se encuentra absorbido en una corriente de CO_2 , lo que implica que para poner en práctica el proceso propuesto solamente debe de ser filtrado en columnas de carbón activado en su fase gaseosa ya que esto permite la absorción selectiva de los contaminantes lo que nos da los siguientes beneficios:

- Nos presenta una alternativa más eficiente a la rectificación adicional, ya que permite la absorción selectiva de los contaminantes en el carbón activado.
- Resuelve el problema de la extracción de contaminantes que normalmente existen en el carbón activado ya que todo el proceso de filtrado es en fase gaseosa.
- Se da una disminución en la cantidad de carbón activado a regenerar.
- Se logra estabilizar los contenidos del etanol, para que no cambien durante el periodo adicional de almacenaje.

3. Se recomienda utilizar urea como una fuente de nitrógeno y para cubrir la deficiencia en fósforo se recomienda ácido fosfórico. Se recomiendan condiciones anaerobias, en las que la levadura lleva a cabo una fermentación alcohólica produciendo no más de 7.5 kilogramos de sólidos de levadura por 100 kilogramos de glucosa. El método agregado puede ser por tanda o con alimentación continua.

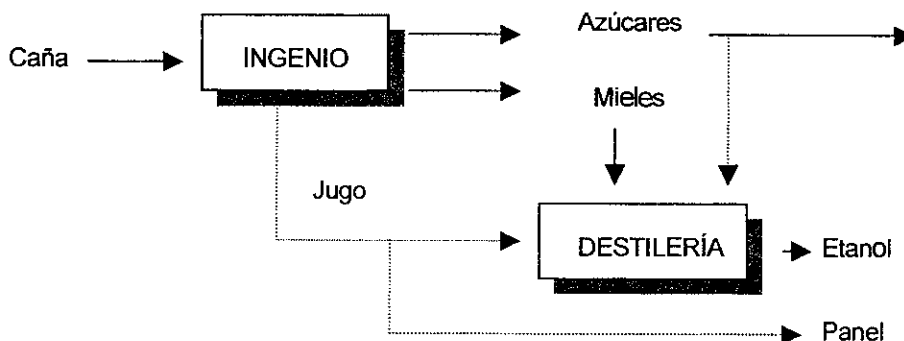
4. Se recomienda utilizar la legislación de la Comunidad Económica Europea del reglamento (CEE) n° 1576/89 del Consejo, de 29 de mayo de 1989, como estándar internacional de la composición de Etanol para Bebidas Alcohólicas.

5. Para el control de calidad se recomienda un cromatógrafo de gases HP 5890 serie II, equipado con un controlador electrónico de presión y un detector de ionización de llama.

10. Recomendaciones

La recomendación mas importante es la de proseguir el estudio para determinar la factibilidad del esquema lógico de integración vertical para la Licorera, el cual consistiría en agregar la capacidad de producir azúcar.

Figura No. 18 : Combinación de ingenio y destilería



El problema principal de este planteamiento se advierte fácilmente en los costos de instalación del proceso de extracción de mieles vírgenes ya que el 50% del costo total de instalación de una destilería que tiene su propio proceso de extracción es en equipo para la preparación de la caña, extracción del jugo y servicios de la planta. En Brasil se ha desarrollado el concepto de la mini o micro destilería, es decir, plantas que producen menos de 5,000 L de etanol por día. La extracción de los azúcares para fermentar en estos ingenios pequeños es solamente del 60% m/m del total existente en la caña de azúcar, esto se debe a que instalan equipos ineficientes debido a la falta de capital para invertir, y a que los equipos que existen en el mercado están diseñados para instalaciones mucho más grandes.

El siguiente problema a resolver sería la fuente de poder, tradicionalmente los ingenios utilizan el bagazo de caña para generar vapor en calderas piro tubulares, para luego producir electricidad con la que mueven todo el ingenio. El problema sería que estos equipos están diseñados para industrias muy grandes y por lo tanto habría que buscar alternativas totalmente nuevas para resolver el problema.

La última recomendación sería la de desarrollar un sistema completamente automático para la fabricación del etanol, ya que esto permitiría una disminución considerable en los costos, un proceso mejor controlado, y una mayor competitividad en economía de escala.

XI. Bibliografía

- (1). Fernández, Frances. 1997. **Diseño de Plantas: Planta de Etanol**. Universidad Landívar.
- (2). Fillipova, Irima V. **U.S. Patent 5,370,981**. 1994.
- (3). Fong, WS. Kones, JL and Semrau KT. **Cost of producing ethanol from sugar cane**. Chem Eng Prog 76 (9): 39 –46, 1980.
- (4). Guidoboni GE. **Continuos Fermentarion System for Alcohol Production**. Enzyme Microbiology Thecnology 6:194-200, 1984.
- (5). Heck, Gunter, Lienerth, Aladar. Malow, Egon. Schuartz, Karl-Heinz. Faust, Uwe. **U.S. Patent 4,511,437**. 1985.
- (6). Horngren, Charles T., **Contabilidad de Costos**, 1 ra. Edición, p. 194 – 205, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., Mexico, 1980.
- (7). Hulet DJL: **The development of a microdistillery for fuel-alcohol in Brazil**. Sugar J 44 (5): 7-9, 1981.
- (8). Kelly FHC: **Cost control factors in the production of ethanol from sugar cane**. Int Sugar J 82: : 172 – 176, 1980.
- (9). Manganelli, Raymond L. Klein, Mark M. **Cómo Hacer Reingeniería**. Grupo Editorial Norma, 1 ra. Edición, Colombia.
- (10). Rolz, C. **A new technology to ferment sugar cane directly: the EX – FERM process**. Process Biochem 15(6): 2-6, 1980.
- (11). Rolz, Carlos. **Caña de Azucar a Etanol: el Concepto EX - FERM**. Publicación ICAITI.
- (12). **U.S. Pat. No. 2,879,165**
- (13). Yang V, Trindade SC and Castelo Branco JR. **How Brazil grows motor fuel**. Chem Technol 11 (3): 168-172, 1981.



Imprenta "GORA"

25 Av. 25-71, Zona 5

Telefax: 2335-5733 - 5218-7292