



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"**

**"Estudio técnico–económico de las alternativas para el  
tratamiento y/o aprovechamiento de los efluentes de la  
industria alcohólica (vinazas), por fermentación de  
melazas"**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A  
**GUSTAVO PACHECO SUÁREZ**

**ASESOR: ING. J. BENJAMIN RANGEL GRANADOS**



**CIUDAD DE MÉXICO 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

\*ZARAGOZA\*

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/ 393/16

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): Pacheco Suárez Gustavo

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>PRESIDENTE</b>	<b>DR. ALEJANDRO ROGEL RAMÍREZ</b>
<b>VOCAL</b>	<b>I.Q. JOSÉ BENJAMÍN RANGEL GRANADOS</b>
<b>SECRETARIO</b>	<b>FIS. CARLOS JAVIER MARTÍNEZ GÓMEZ</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>I.Q. EVERARDO FERIA HERNÁNDEZ</b>
<b>SUPLENTE</b>	<b>M. EN I. CRESENCIANO ECHAVARRIETA ALBÍTER</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
México D.F. a 10 de Junio de 2016.

JEFA DE CARRERA

  
I.Q. DOMINGA ORTÍZ BAUTISTA





# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## DEDICATORIAS

A mi esposa Alejandra y mis hijos Gustavo y Guillermo que son mi motor para seguir superándome día con día y gracias a ellos por estar a mi lado tanto en los momentos buenos como en los difíciles.

A mi madre y padre por haberme impulsado y apoyado en mis estudios, por ser mi modelo a seguir y haberme enseñado que lo que uno quiere se consigue siempre y cuando uno realice su mayor esfuerzo.

A I.Q. López López Simón Roberto por ser un compañero incondicional y formar parte de este proyecto. Cada que vea la tesis me acordare de ti descansa en paz.

A mis hermanos por su apoyo durante mi época de estudiante.

A la universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Estudios Superiores "Zaragoza" por ser mi Alma Mater de mi formación profesional.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## AGRADECIMIENTOS

Al I.Q. J. Benjamín Rangel Granados quien me brindó su apoyo y dedicación para la conclusión de este proyecto. También por ser uno de los profesores que tuve el privilegio de tener durante la carrera y uno de los cuales me enseñó a ser responsable.

Al M. en I. Cresenciano Echavarrieta Albíter quien tuve el privilegio de tener como compañero y por sus aportaciones realizadas en éste proyecto.

Al I.Q. Everardo Feria Hernández por sus aportaciones para la realización de éste trabajo y tener el privilegio de tener lo como compañero de la carrera

Al Físico Carlos Javier Martínez Gómez por haberlo tenido como profesor de matemáticas y haberle aprendido el gusto a la materia. También por tener la fortuna de haber jugado futbol a su lado.

Al Dr. Alejandro Rogel Ramírez por sus observaciones a éste trabajo y por tener el gusto de haberlo tenido como profesor en dos semestres de la carrera, así como el haber convivido fuera del salón.



## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROBLEMÁTICA:** La industria alcohólica enfrenta un grave problema con respecto a la contaminación de agua generado por las vinazas que se producen durante la fermentación de las melazas no solo por su aspecto cuantitativo, que es de 8 a 14 veces mayor que el alcohol producido, sino también por su aspecto cualitativo que las hace extremadamente contaminantes debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), similar a la que producen las aguas negras de 1.43 habitantes por cada litro de vinazas, los cuales asociados dan origen a cargas extremadamente grandes que de ser lanzadas sin un tratamiento adecuado pueden poner en grave riesgo la calidad de las aguas receptoras.

**OBJETIVO:** Este trabajo se enfocará principalmente a analizar los aspectos técnicos y económicos de las alternativas para el tratamiento y/o aprovechamiento de las vinazas provenientes de las melazas de caña que proponen los principales países productores de alcohol por fermentación que han enfrentado el mismo problema, para darles una utilidad, o hacer que cumplan con la normatividad mexicana con el menor costo posible, y evitar que el desarrollo de esta industria pueda dañar nuestro medio ambiente.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## RESUMEN

La industria alcohólica enfrenta un grave problema con respecto a la contaminación de agua generado por las vinazas que se producen durante la fermentación de las melazas no solo por su aspecto cuantitativo, sino también por su aspecto cualitativo que las hace extremadamente contaminantes debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), las cuales deben ser tratadas para evitar poner en riesgo la calidad de las aguas receptoras.

Por tal motivo en este trabajo se proponen alternativas de solución al problema, que han sido consideradas para eliminar el carácter polutivo de las vinazas, así como también, poder lograr un mejor desarrollo de esta industria con una reducción significativa del consumo de energía, sin que se vea afectado nuestro medio ambiente.

La clave para los sistemas futuros, está en gran parte sobre la capacidad de reducir los volúmenes de vinazas, con su correspondiente elevación en el contenido de sólidos. A su vez, esto es reflejado en la técnica de fermentación en donde se hace posible el reciclamiento de vinazas sin ninguna reducción en la concentración de etanol o en la eficiencia de conversión.

De estas consideraciones, es razonable concluir que en alguna en el futuro, la destilación de melazas vendrá a ser autosuficiente en el consumo de energía por el consumo de sus propios desperdicios y traerá como consecuencia una destilería libre de contaminación.

## **INDICE DE FIGURAS**

	Pag.
Figura 1.- Ruta de fermentación de Embden-Meyerhof-Parnas.....	8
Figura 2.- Etapas básicas del proceso convencional de una destilería de alcohol por fermentación de melazas de caña.....	10
Figura 3.- Proceso convencional de una destilería de alcohol por fermentación de melazas de caña.....	17
Figura 4.- Principales procesos de aprovechamiento de las vinazas de melazas de caña.....	23
Figura 5.- Esquema recomendado para la construcción de un sistema de lagunas de estabilización anaerobia para el tratamiento de vinazas.....	30
Figura 6.- Sistema de aprovechamiento del calor de las vinazas.....	33
Figura 7.- Camión tanque.....	40
Figura 8.- Vehículo distribuidor de vinazas.....	41
Figura 9.- Diagrama de flujo de la planta de tratamiento anaerobio de Bacardi Co. para el tratamiento de vinazas.....	50
Figura 10.- Reactor filtro anaerobio de la planta de tratamiento de vinazas de Bacardi Co.....	50
Figura 11.- Sistema de tratamiento aerobio por medio de biodiscos.....	59
Figura 12.- Recuperación de calor a partir de la combustión de vinazas gráfica art. alfa-laval.....	65
Figura 13.- Sistema de descontaminación de vinazas mediante su evaporación y combustión.....	67
Figura 14.- Sistema de enfriamiento por intercambiador de calor de platos externo.....	76
Figura 15.- Evolución del calor durante la fermentación y curvas de temperaturas.....	81
Figura 16.- Proceso de reciclamiento de levadura.....	83
Figura 17.- Curva mostrando un ejemplo de porcentaje de reacción/tiempo vs concentración de levadura.....	84
Figura 18.- Grupos básicos de componentes en las melazas finales.....	92
Figura 19.- Proceso Almotherm.....	95
Figura 20.- Ingenios azucareros en México, zafra 2015-2016.....	114
Figura 21.- Balance de vapor para 60,000 l/día de etanol a 96.5°G.L.....	119

## **INDICE DE TABLAS**

	Pag.
Tabla 1.- Composición típica de las melazas o mieles finales.....	9
Tabla 2.- Producción en la fermentación según Pasteur.....	15
Tabla 3.- Composición típica de las vinazas de melazas de caña.....	20
Tabla 4.- Límites máximos permisibles para las aguas residuales provenientes de la industria destilera.....	22
Tabla 5.- Datos recomendados para dimensionamiento de lagunas de estabilización anaerobia.....	29
Tabla 6.- Bases de cálculo para la evaluación económica del uso directo de las vinazas en el campo.....	43
Tabla 7.- Inversión necesaria para el uso directo de las vinazas en el campo...	44
Tabla 8.- Gastos operativos anuales totales para el uso directo de las vinazas en el campo.....	44
Tabla 8.a.- Gastos fijos anuales totales para el uso directo de las vinazas en el campo.....	44
Tabla 8.b.- Gastos variables anuales totales para el uso directo de las vinazas en el campo.....	45
Tabla 9.- Ganancias anuales por el uso directo de vinazas en el campo.....	45
Tabla 10.- Bases de cálculo para la evaluación económica de la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (proceso Bacardi Co).....	51
Tabla 11.- Costos de capital y de instalación del sistema anaerobio de Bacardi Corporation.....	52
Tabla 12.- Gastos operativos anuales totales en la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (proceso Bacardi Co).....	53
Tabla 12.a.- Gastos fijos anuales totales en la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (proceso Bacardi Co).....	53
Tabla 12.b.- Gastos variables anuales totales en la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (proceso Bacardi Co).....	53
Tabla 13.- Ganancias anuales totales en la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (proceso Bacardi Co).....	54
Tabla 14.- Comparación de las características de los procesos de producción de biomasa proteica.....	56
Tabla 15.- Bases de cálculo para la evaluación económica de la evaporación y combustión de vinazas.....	69

Tabla 16.- Ganancias en la recuperación de potasio y vapor.....	69
Tabla 17.- Inversión necesaria para la evaporación y combustión de vinazas...	70
Tabla 18.- Requerimientos diarios de operación para la evaporación y Combustión.....	70
Tabla 19.- Gastos operativos anuales totales para la evaporación y combustión de vinazas.....	71
Tabla 20.- Periodo de recuperación.....	71
Tabla 21.- Comparación de los sistemas de enfriamiento en la fermentación....	75
Tabla 22.- Ahorro en melazas por levadura reciclada.....	88
Tabla 23.- Ahorro en el vapor de la destilación por recirculación de levadura....	88
Tabla 24.- Ahorros en la disposición de vinazas por recirculación de levadura.....	89
Tabla 25.- Ahorros anuales (ganancias) por recirculación de levadura.....	89
Tabla 26.- Capital principal invertido para un sistema de fermentación convencional.....	89
Tabla 27.- Capital principal invertido para un sistema de fermentación por recirculación levadura.....	90
Tabla 28.- Incremento en los costos de capital invertido entre el reciclamiento de levadura y la fermentación convencional.....	90
Tabla 29.- Costos de elementos de operación para el reciclamiento de levadura.....	91
Tabla 30.- Periodos de recuperación cuando existe una conversión en la destilería para el sistema de recirculación de levaduras.....	91
Tabla 31.- Componentes de las melazas y su influencia en la producción de alcohol.....	94
Tabla 32.- Perdidas en melazas por el pretratamiento Almotherm y la dilución del reciclamiento de vinazas.....	102
Tabla 33.- Ahorros en la producción por la disminución en el tiempo de mantenimiento de la destilación.....	103
Tabla 34.- Ahorro en agua de proceso y en la evaporación de las vinazas por su reciclamiento.....	103
Tabla 35.- Ahorros anuales (ganancias) por el pretratamiento Almotherm con el reciclamiento de vinazas.....	103
Tabla 36.- Costos de inversión para el pretratamiento Almotherm.....	104
Tabla 37.- Requerimientos diarios de operación para el procesamiento Almotherm con el reciclamiento de vinazas.....	104

Tabla 38.- Costos operativos para el procesamiento Almotherm con el reciclamiento de vinazas.....	104
Tabla 39.- Ganancias combinadas para el procesamiento Almotherm y el reciclamiento de levadura/enfriamiento del fermentador con el reciclamiento de vinazas.....	105
Tabla 40. Inversión combinada para el procesamiento Almotherm y el reciclamiento de levadura/enfriamiento del fermentador con el reciclamiento de vinazas.....	105
Tabla 41.- Tasa de retorno anual combinada.....	105
Tabla 42.- Periodo de recuperación (pay-off) combinado.....	106
Tabla 43.- Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de soluciones propuestas para resolver el problema de contaminación del medio ambiente originado por las vinazas.....	109
Tabla 44.- Beneficios de los diferentes tipos de soluciones propuestas para resolver el problema de contaminación del medio ambiente originado por las vinazas.....	113
Tabla 45.- Ingenios azucareros por estado.....	115
Tabla 46.- Ingenios azucareros con destilerías.....	116

## **INDICE**

	Pag.
Jurado.....	I
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Problemática.....	iv
Objetivo.....	iv
Resumen.....	v
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas.....	vii
<b>CAPÍTULO 1 “INTRODUCCIÓN”</b> .....	1
Introducción.....	2
<b>CAPÍTULO 2 “GENERALIDADES”</b> .....	4
2.1.- Antecedentes.....	5
2.2.-Conceptos generales sobre la fermentación.....	6
2.3.- Descripción del proceso convencional de las destilerías de alcohol por fermentación de melazas de caña.....	9
2.3.1.- Preparación del substrato.....	11
2.3.2.- Fermentación.....	12
2.3.3.- Destilación.....	15
<b>CAPÍTULO 3 “ASPECTO CONTAMINANTE DE LAS VINAZAS PROVENIENTES DE LAS MELAZAS DE CAÑA”</b> .....	18
3.1.- Origen y problemática de las vinazas provenientes de melazas de caña.....	19
3.2.- Características de las vinazas provenientes de melazas de caña.....	20
3.3.- Normatividad ambiental sobre los efluentes generados por la industria destilera.....	21
3.4.- Tipos de soluciones estudiadas para resolver el problema de contaminación originado por las vinazas.....	22

<b>CAPÍTULO 4 “SOLUCIONES ESTUDIADAS PARA REDUCIR Y/O ELIMINAR EL CARACTER CONTAMINANTE DE LAS VINAZAS” .....</b>	<b>25</b>
4.1.- Métodos tradicionales para el tratamiento de aguas residuales (Tratamientos Biológicos).....	26
4.1.1.- Lagunas de estabilización.....	28
4.1.1.1.- Descripción del tratamiento anaerobio de las vinazas en lagunas de estabilización.....	28
4.1.1.2.- Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio de las vinazas en lagunas de estabilización.....	31
4.2.- Reciclamiento de vinazas.....	31
4.2.1.- Descripción del reciclamiento de vinazas.....	31
4.2.2.- Ventajas y desventajas del reciclamiento de vinazas.....	34
<b>CAPÍTULO 5 “SOLUCIONES ESTUDIADAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE VINAZAS” .....</b>	<b>36</b>
5.1.- Uso directo de las vinazas en el campo.....	37
5.1.1.- Descripción del uso directo de las vinazas en el campo.....	37
5.1.1.1.- Irrigación por surcos o por aspersión.....	39
5.1.1.2.- Riego con camiones tanque (CT).....	40
5.1.1.3.- Aplicación con vehículos distribuidores de vinazas (VDV).....	41
5.1.2.- Aspectos económicos del uso directo de las vinazas en el campo.....	42
5.1.3.- Ventajas y desventajas del uso directo de las vinazas en el Campo.....	46
5.2.- Digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás.....	47
5.2.1.- Descripción de la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás.....	47
5.2.2.- Aspectos económicos de la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás (Proceso Bacardi Corporation).....	51
5.2.3.- Ventajas y desventaja de la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás.....	54
5.3.- Tratamiento aerobia para la producción de biomasa proteica.....	55
5.3.1.- Descripción del tratamiento aerobio para la producción de biomasa Proteica.....	55

5.3.2.- Aspectos económicos del tratamiento aerobio para la producción de biomasa proteica.....	60
5.3.3.- Ventajas y desventajas del tratamiento aerobio para la producción de biomasa proteica.....	61
5.4.- Evaporación de vinazas.....	62
5.4.1.- Descripción de la evaporación de vinazas.....	62
5.4.1.1.- Evaporación de vinazas para su uso directo como fertilizante de suelos.....	62
5.4.1.2.- Evaporación de vinazas para su uso como complemento alimenticio para ganado.....	63
5.4.1.3.- Evaporación de vinazas para su combustión.....	64
5.4.2.- Aspectos económicos de la evaporación de vinazas.....	68
5.4.3.- Ventajas y desventajas de la evaporación de vinazas.....	72
<b>CAPITULO 6 “MEJORAMIENTO DEL PROCESO CONVENCIONAL DE LAS DESTILERIAS DE MELAZAS”</b> .....	73
6.1.- Mejoramiento en el sistema de enfriamiento del fermentador.....	74
6.1.1.- Fundamento del mejoramiento en el sistema de enfriamiento del fermentador.....	74
6.1.2.- Aspectos económicos del mejoramiento en el sistema de enfriamiento del fermentador .....	77
6.1.3.- Beneficios por el mejoramiento en el sistema de enfriamiento del fermentador.....	78
6.2.- Reciclamiento de Levadura.....	81
6.2.1.- Fundamento del reciclamiento de levadura.....	81
6.2.2.- Beneficios del reciclamiento de levadura.....	85
6.2.3.- Aspectos económicos del reciclamiento de levadura.....	87
6.3.- Pretratamiento de melazas.....	92
6.3.1.- Fundamento del pretratamiento de melazas .....	92
6.3.2.- Beneficios del pretratamiento de melazas.....	96
6.4.- Descontaminación de vinazas .....	97
6.4.1.- Fundamento de la descontaminación de vinazas.....	97
6.4.2.- Beneficios de la descontaminación de vinazas.....	100

6.5.- Aspectos económicos del sistema combinado para el pretratamiento Almotherm de melazas, el reciclamiento de levadura/enfriamiento del fermentador, el reciclamiento, evaporación y combustión de la vinazas.....	101
<b>CAPITULO 7 “TABLAS DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE ORIGINADO POR LAS VINAZAS Y DONDE SE ENCUENTRAN LOS INGENIOS AZUCAREROS EN MÉXICO.....</b>	<b>107</b>
7.1.- Tablas de ventajas y desventajas de los diferentes tipos de soluciones propuestas para resolver el problema de contaminación del medio ambiente originado por las vinazas.....	108
7.2.- Ubicación de los ingenios azucareros en México. ....	113
<b>CAPITULO 8 “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES” .....</b>	<b>117</b>
Conclusiones y recomendaciones.....	118
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>120</b>

# ***CAPÍTULO 1***

## ***INTRODUCCIÓN***

## **INTRODUCCIÓN**

La obtención de alcohol a partir de la fermentación de carbohidratos es conocida por el hombre desde los albores de su historia, ya que desde entonces se obtenían bebidas alcohólicas por medio de la fermentación espontánea de las frutas; a pesar de que su uso generalizado sólo es reconocido a partir del siglo XVIII, cuando se logra una evolución significativa en el control y desarrollo del proceso.

En la actualidad, el constante incremento de precios de los derivados del petróleo, ha ocasionado que la fermentación alcohólica de carbohidratos, y especialmente la de melazas de caña provenientes de la fabricación del azúcar, retome gran importancia como alternativa para substituir el alcohol producido a partir del etileno, hasta el punto de dominar en gran parte la producción mundial de alcohol en los últimos años.

Sin embargo, la industria destiladora de alcohol por fermentación, principalmente la de melazas de caña, genera uno de los más graves problemas de contaminación de aguas originado por el mismo mecanismo de fermentación; el cual hace que a lo largo del proceso de fabricación, con cualquier perfeccionamiento viable, sean generados subproductos y/o efluentes inevitablemente, entre los que se encuentran las vinazas o fondos de destilación.

Las vinazas representan un gran problema para la industria destiladora de alcohol por fermentación no sólo por su aspecto cuantitativo, que es de 8 a 14 veces mayor que el alcohol producido, sino también por su aspecto cualitativo que las hace extremadamente contaminantes debido a su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que es de 24,575 mg/l, similar a la que producen las aguas negras de 1.43 habitantes por cada litro de vinazas, los cuales asociados dan origen a cargas extremadamente grandes que de ser lanzadas sin un tratamiento adecuado pueden poner en grave riesgo la calidad de las aguas receptoras [Jackman, 1977].

En México abunda la caña de azúcar, por eso tiene una alta producción de alcohol por fermentación de melazas de caña, con un potencial de crecimiento en su producción. Haciéndose indispensable, que la industria destiladora mexicana

cuenta con métodos de tratamiento y/o aprovechamiento para la disposición de vinazas que no sólo solucionen el problema ambiental, sino que además, no se vean reflejados de manera significativa en los costos de producción; así como también, con tecnologías de diseño con tendencia a la generación de una menor cantidad de efluentes en futuras destilerías; para poder lograr un mejor desarrollo de esta industria, sin que se vea afectado nuestro medio ambiente.

El presente trabajo realiza una valoración de los aspectos técnicos y económicos de las principales alternativas que han sido consideradas para la eliminación del carácter contaminante de las vinazas, en los países productores de alcohol por fermentación que ha enfrentado con anterioridad el mismo problema, para conferirles el mejor uso, con o sin la posible recuperación de los productos útiles contenidos en las vinazas. Además, contempla los aspectos económicos de una opción de mejoramiento al proceso convencional empleado por las destilerías de alcohol por fermentación de melazas de caña, que engloba una disminución en la generación de efluentes con una reducción significativa del consumo de energía que es otro de los problemas que aqueja a esta industria.

## ***CAPÍTULO 2***

### ***GENERALIDADES***

Aunque es imposible considerar, aún en forma resumida, el vasto tema sobre la obtención de alcohol por fermentación de carbohidratos, el presente capítulo describirá los principios esenciales en los cuales se fundamentan las etapas básicas del proceso convencional utilizado en las destilerías tradicionales de alcohol por fermentación de melazas así como los antecedentes generales de la problemática que afronta esta industria, para poder tener una mejor comprensión del origen y de las posibles alternativas de solución al problema de contaminación de aguas generado por las vinazas, que serán tratados en este trabajo.

## **2.1.- ANTECEDENTES**

El alcohol etílico o etanol, comúnmente llamado alcohol, es un compuesto de suma importancia no sólo por su gran aplicación en diversas industrias como solvente y antiséptico, sino también por su potencialidad para substituir los combustibles derivados del petróleo y como posible materia prima para la síntesis de diversos productos químicos derivados del etileno, lo cual incrementara considerablemente su importancia a nivel internacional.

El alcohol puede ser producido sintéticamente a partir del etileno pero en la actualidad, es la fermentación de carbohidratos la que domina en gran parte su producción gracias a las ventajas ofrecidas por estas fuentes de biomasa al ser renovables en la naturaleza, a diferencia de los combustibles fósiles derivados del petróleo que incrementan constantemente sus precios.

El proceso de fermentación alcohólica puede llevarse a cabo casi con cualquier fuente de biomasa vegetal rica en carbohidratos como substrato; sin embargo, sea cual sea el substrato empleado es inevitable que a lo largo del proceso de fabricación, con cualquier perfeccionamiento viable, se genere una gran cantidad de efluentes producto de la misma ineficiencia del proceso fermentativo y del empleo de una gran cantidad de agua para la forzosa dilución inicial de carbohidratos en el substrato original, indispensable para alcanzar una eficiencia adecuada en el proceso, que posteriormente emergerá como fondos de destilación en la etapa de separación.

Estos fondos de destilación, también conocidos como vinazas, poseen un alto contenido de materia orgánica que los hace sumamente contaminantes. En los años 90 la producción de vinazas (1.5 millones de m<sup>3</sup>) [Bautista, 1998], los ríos no estaban tan contaminados y las leyes no disponían su recogida, de tal manera que lo más frecuente era su lanzamiento "in natura" a los cuerpos receptores cercanos (ríos, lagos, lagunas, etc.).

Hoy en día, la situación ha cambiado, ya que las instancias gubernamentales responsables del medio ambiente están imponiendo restricciones legales destinadas a conseguir la disminución de la contaminación generada por las destilerías e incluso están poniendo objeciones a nuevos desarrollos que no

cuiden adecuadamente los aspectos relacionados con la disposición de sus efluentes. Este es el caso de México, que a partir del 30 de octubre de 1996 puso en vigor la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales para las destilerías que contienen a las vinazas.

En México, al igual que en la mayor parte de los países tropicales donde la caña de azúcar abunda, el substrato preferido para la fabricación de alcohol son las melazas de caña o mieles incristalizables provenientes de la fabricación del azúcar; que si bien representa la materia prima más adecuada, por su facilidad de manejo y bajo costo, es la que genera el mayor problema en cuanto a contaminación de agua se refiere.

## **2.2.- CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA FERMENTACIÓN**

La fermentación se puede definir como cualquier proceso en el cual las sustancias orgánicas complejas contenidas en un substrato, tales como la sacarosa y otros carbohidratos, son degradadas a productos relativamente más sencillos, como es el alcohol y el bióxido de carbono en el caso de las fermentaciones alcohólicas, por la acción de catalizadores bioquímicos llamados enzimas elaboradas por algunos microorganismos vivos específicos.

Estos microorganismos que incluyen levaduras, hongos y bacterias, se caracterizan por su incapacidad para producir su propio alimento ellos mismos por fotosíntesis, teniendo que alimentarse de la materia orgánica presente en el medio; y aun cuando pueden diferir ampliamente en su morfología, tamaño, método de reproducción, etc.; todos ellos son capaces de producir las enzimas adecuadas para catalizar las reacciones a ellos adscritas, razón por la cual, la selección del tipo de microorganismo a utilizar depende en gran medida del producto o productos a obtener de la fermentación.

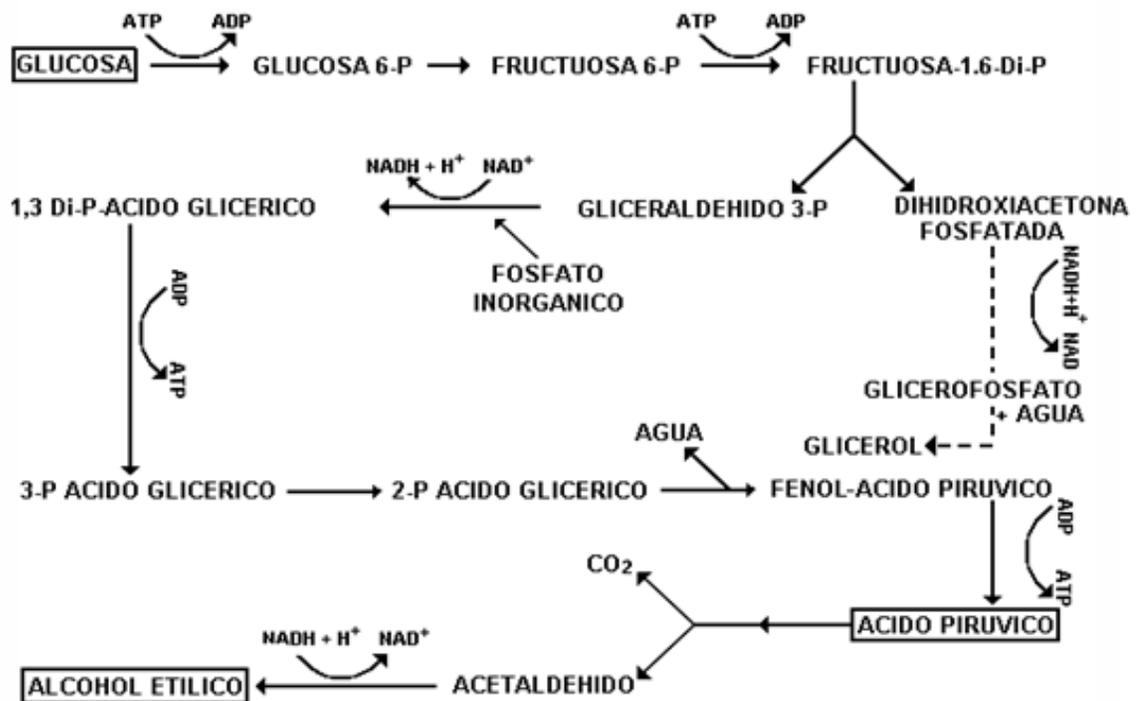
En el caso de las fermentaciones alcohólicas, se ha observado, que los microorganismos pertenecientes a las levaduras son las más indicadas para producir alcohol con altos rendimientos, especialmente la *saccharomyces cerevisiae*, ya que además de poseer una relativamente alta tolerancia al alcohol

en el fermentado, son capaces de producir las dos enzimas necesarias para acelerar la reacción de fermentación: la invertasa y la zimasa. La primera de ellas tiene la función de hidrolizar los azúcares fermentables (sacarosa) del substrato en una mezcla equimolar de monosacáridos simples (d-fructuosa y d-glucosa) llamada azúcar invertida; para que posteriormente sea convertida en partes equivalentes de alcohol etílico y dióxido de carbono por la acción de la enzima zimasa [Paturau, 1982].

Como se puede observar en el proceso de fermentación, el microorganismo realmente no es consumido o transformado, ya que su función sólo es dar origen a las enzimas que son en realidad las que sirven de catalizador para las reacciones de fermentación (las reacciones se verán en el apartado 1.3.2). El esquema de Embden-Meyerhof-Parnas (ilustrado en la figura 1), describe la ruta de fermentación de la glucosa a alcohol etílico y su interrelación con el microorganismo.

Los numerosos efectos enzimáticos que se llevan a cabo durante la ruta de fermentación demandan, además de la verdadera enzima, la presencia de cofactores o activadores para la transferencia de protones o electrones que se deben encontrar en forma de iones libres dentro del substrato. Estos cofactores o activadores van desde simples iones metálicos hasta los más específicos y complejos grupos protéticos relacionados con la misma transferencia de protones y electrones del substrato en la fermentación, entre los que se incluyen el dinucleótido de nicotinamida adenina (NAD) y el fosfato de dinucleótido de nicotinamida adenina (NADP).

La energía liberada por la remoción de protones o electrones del substrato juega un papel importante durante la fermentación; ya que, aunque parte de ella es liberada en forma de calor, algo de esta es utilizada en la formación de sulfuros o fosfatos de compuestos orgánicos, como el trifosfato de adenosina (ATP), que en su estructura poseen puentes que requieren una gran cantidad de energía y los cuales son capaces de liberarla para inicializar la hidrólisis por provenir de reacciones reversibles.



**FIGURA 1. RUTA DE FERMENTACION DE EMBDEN-MEYERHOF-PARNAS**

Fuente: [Paturau J. M., 1982]

En la fermentación, el efecto catalizador de las enzimas está altamente influenciado por dos factores: la temperatura y el pH del substrato. Generalmente, entre los 0 y 40°C, el efecto de las enzimas es duplicado por cada 10°C de temperatura incrementado; sin embargo, dentro del intervalo [70 a 100]°C, el efecto usualmente cesa y las enzimas son irreversiblemente inactivadas, aunque cabe hacer notar que algunas enzimas son más termo resistentes que otras. En tanto que, la concentración de iones de hidrógeno en el substrato, influye de manera directa en el efecto enzimático, pero el valor óptimo de pH varía de 1.2 a 9 de acuerdo al tipo de enzima.

Ciertas sustancias, tales como los éteres y feniluretanos, en concentraciones considerables dentro del sistema, pueden inhibir el efecto enzimático sin destruir las enzimas. En cambio, otros compuestos como el ácido cianhídrico, sulfuro de hidrógeno, fluoruros, etc., pueden ejercer un efecto venenoso irreversible para las enzimas, aunque no existe un veneno universal para las enzimas [Paturau, 1982].

### **2.3.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONVENCIONAL DE LAS DESTILERIAS DE ALCOHOL POR FERMENTACIÓN DE MELAZAS DE CAÑA**

La miel incristalizable, también conocida como miel final o melazas, provenientes de la fabricación del azúcar constituye la materia prima más utilizada para la producción de alcohol por fermentación, ya que su bajo costo y facilidad de manejo, la hacen la materia ideal.

Las melazas se presentan como un líquido, viscoso, denso rico en azúcares reductores y con un bajo contenido de agua. Su composición es variable y se encuentra directamente ligada al proceso de refinación del azúcar y a la calidad de la caña. En la tabla 1, se muestran los valores de los componentes, generalmente, encontrados en las melazas.

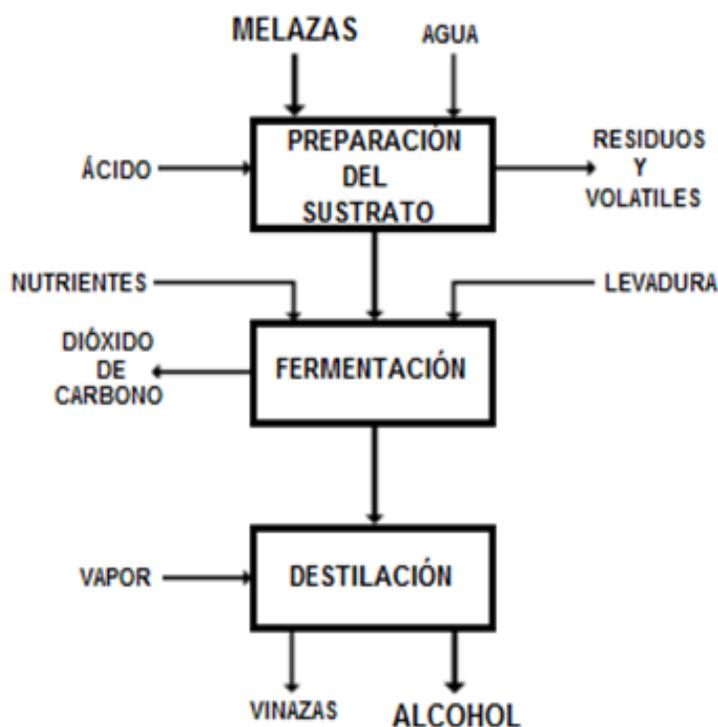
**TABLA 1.- COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS MELAZAS O MIELES FINALES**

<b>Compuesto</b>	<b>% Peso</b>
A.- Agua	20.0
B.- Sacarosa	35.0
C.- Dextrosa (glucosa)	7.0
Levulosa (fructuosa)	9.0
Otras sustancias reductoras	3.0
D.- Otros carbohidratos (gomas, almidones, etc.)	4.0
Compuestos nitrogenados (proteínas, etc.)	4.5
Ácidos no nitrogenados	5.0
Ceras, esteroides y fosfolípidos	0.4
Pigmentos y otros	0.1
E.- Cenizas inorgánicas	12.0
F.- Sólidos suspendidos (precipitados de calcio, arena, etc.)	8 - 15 (v/v)

Fuente: Vega, J., Delgado, K, Sibaja, M. & Alvarado, P., Uso alternativo de la melaza de caña de azúcar residual para la síntesis de espuma rígidas de poliuretano (ERP) de uso industrial, Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ) vol. 22 núm. 2, 2007, Sitio web: [www.imiq.org](http://www.imiq.org)

Aun cuando, existen numerosos procesos comerciales para la fabricación del alcohol etílico a partir de melazas de caña, los cuales varían de acuerdo al tipo de alcohol a fabricar y a la eficiencia que se desee obtener en el proceso, todos ellos generan problemas similares en lo que a contaminación de aguas se refiere.

Sin embargo, considerando la importancia que tiene la descripción del proceso para una mejor comprensión del origen y problemática de las vinazas, a continuación se describen las tres etapas básicas, que se encuentran presentes en todos los procesos de fabricación de alcohol por fermentación de melazas empleados por las destilerías tradicionales, las cuales son: preparación del sustrato, fermentación y destilación (figura 2).



**FIGURA 2. ETAPAS BÁSICAS DEL PROCESO CONVENCIONAL DE UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL POR FERMENTACIÓN DE MELAZAS DE CAÑA**

Fuente: ALFA-LAVAL

### **2.3.1.- Preparación del Substrato**

Las melazas o mieles incristalizables provenientes de la refinación del azúcar no pueden ser expuestas directamente al proceso de fermentación debido a su elevada concentración de azúcar y bajo contenido de algunos nutrientes, indispensables para la levadura, por lo que antes es necesario prepararlas adecuadamente; de manera que, la levadura encuentre el medio propicio para poder realizar el proceso de fermentación con una eficiencia óptima y alcanzar la máxima utilización de la materia prima en su conversión a alcohol.

La etapa de preparación del substrato, normalmente se realiza en cubas o depósitos llamados de preparación, y consiste básicamente en diluirlas y acidularlas convenientemente, además de añadir algunas sales nutritivas indispensables para la levadura.

El grado de dilución de las melazas depende de la concentración del alcohol que puede ser obtenido en el fermentado final, antes de que la levadura pierda su actividad por la inhibición del alcohol, y de otros factores; aunque, normalmente se acostumbra diluirlas de manera tal que las melazas iniciales provenientes de la fabricación de azúcar en los ingenios, que contienen de un 50 a 55% de azúcares fermentables, reduzcan su contenido de estos azúcares hasta alrededor del 14 al 18% en peso en las melazas a fermentar.

A las melazas diluidas es también necesario proporcionarles un ambiente rígido de pH, que facilite la actividad de la levadura y disminuya la multiplicación de otras bacterias perjudiciales para la fermentación, por medio de la adición de un ácido; además de adicionarle una sal de amonio como constituyente nutritivo para la levadura.

La acidificación del substrato es de gran importancia para una buena fermentación, ya que además de neutralizar y acidificar el medio convenientemente, libera los ácidos orgánicos volátiles contenidos en las melazas que son perjudiciales para el buen desarrollo de la levadura, por su toxicidad. Por otra parte descompone los nitratos y sulfitos, a la vez que desplaza los ácidos orgánicos fijos, factor indispensable para mantener el pH entre los límites óptimos.

La acidificación no precisa ser muy fuerte, pues la presencia de ácido sulfúrico libre perjudica el buen desarrollo de la levadura y por el contrario, una acidez demasiado baja puede perjudicar el buen rendimiento de la fermentación, ya que las levaduras tenderán a estabilizarse en el medio, al pH más conveniente para su actividad a expensas de los azúcares contenidos en las melazas. La acidificación correcta debe resultar por consiguiente de estos dos factores; siendo que esta, generalmente, se localiza entre un pH de 4-5 correspondiente a un 1.5-2.5 g/l en acidez sulfúrica [Zamora, 1991].

Los ácidos que se emplean en la acidificación del substrato son principalmente el sulfúrico y fosfórico por economía; sin embargo en melazas muy encaladas con tendencia a formar incrustaciones en el equipo de calor, suelen substituirse con ácido clorhídrico.

Aunque por lo general, las melazas de caña contienen una proporción suficiente de nitrógeno en forma de aminoácidos, no ocurre lo mismo con el fósforo, a causa de los tratamientos de encalado al que son sometidos los jugos azucarados en los ingenios; y dada su importancia como nutrientes en el desarrollo y proliferación de la levadura se hace necesaria la adición de un fosfato y de una sal amoniacal en la preparación del substrato, o de ser posible un fosfato diamoniacal, aunque por razones económicas se suele emplear el superfosfato y el cloruro o sulfato amoniacal. Las cantidades que generalmente se manejan de estos nutrientes en la preparación del substrato son: 400 g de sulfato de amonio o 1000 g de superfosfato o 500 g de fosfato diamoniacal o 1000 g de un autolizado de levadura por tonelada de melaza. Una vez que las melazas han sido convenientemente preparadas se mezcla y es enviada a la etapa de fermentación.

### **2.3.2.- Fermentación**

En la actualidad, existen disponibles un gran número de sistemas comerciales de fermentación adecuados para la producción del alcohol industrial; sin embargo, se traten de sistemas batch o continuos, todos ellos se basan sobre los principios establecidos de esta operación, y su eficiencia en productividad o rendimiento depende en gran medida de la calidad y cantidad de los azúcares fermentables presentes en el substrato, la eliminación del calor de fermentación por métodos

controlados, la tolerancia de la levadura al alcohol y a otros componentes inhibidores, así como de la concentración celular de levadura en el sustrato.

La etapa de fermentación consiste en dejar reposar el sustrato preparado, conocido como mosto, con la levadura (aproximadamente del 3 al 5% del volumen total de la tina de fermentación) en recipientes de fermentación para que por la acción de esta se lleve a cabo la degradación de los azúcares contenidos en el sustrato y obtener como productos alcohol etílico y bióxido de carbono; así como una pequeña fracción de una mezcla de productos menores conocida como aceite de fusel que incluye glicerol, ácido succínico y láctico, y otros productos secundarios, con una liberación considerable de calor.

La remoción del calor liberado en el transcurso de la fermentación es de gran importancia, ya que de otra forma se elevaría la temperatura a valores iguales o mayores de 40°C, dependiendo de las condiciones ambientales, afectando negativamente la actividad celular de la levadura y por ende el rendimiento del etanol en la fermentación. Por esta razón, los recipientes empleados para fermentación deben contar con un medio eficiente de enfriamiento.

En la práctica, es recomendable que el proceso de fermentación en la destilería se desarrolle en dos etapas separadas, una de prefermentación o multiplicación de levadura y la de fermentación alcohólica, ya que de llevarse a cabo ambas en un sólo recipiente, la alta concentración de alcohol que se alcanzaría en este impediría el buen desarrollo de la levadura, fundamental en el proceso, viéndose disminuida la eficiencia de fermentación.

La etapa de prefermentación o multiplicación de levadura, se lleva a cabo en recipientes conocidos como de levadura madre o prefermentadores, consiste en estimular la multiplicación y el crecimiento de las células de levadura cultivadas en el laboratorio, mediante la creación de un ambiente aerobio conseguido por la agitación con aire, una parte de los azúcares contenidos en el mosto se aprovecha para que al inicio de la fermentación alcohólica haya un inóculo lo suficientemente grande para realizar el proceso eficientemente. En esta etapa la producción de alcohol no debe pasar del 5%, ya que se podría perjudicar el poder fermentativo de la levadura [Zamora, 1991].

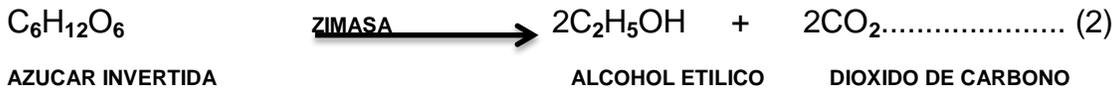
La segunda etapa en el proceso fermentativo, es la fermentación alcohólica propiamente dicha, en la cual se consigue la transformación del azúcar contenida en el mosto a alcohol y tiene como característica una reproducción de levadura muy limitada, por efectuarse en un medio anaerobio. Esta etapa consiste en dejar reposar el líquido proveniente de los prefermentadores, con la levadura desarrollada en ellos, y el mosto restante en los recipientes fermentadores, que se diferencian de los prefermentadores por no tener aireación y en el tamaño ya que la capacidad de los prefermentadores es de aproximadamente del 15 al 20% del volumen de los fermentadores; en donde, si la cantidad de células de levadura es adecuada y su estado fisiológico es bueno, en poco tiempo comienza la biosíntesis de etanol, la cual continua de manera acelerada en forma exponencial hasta el agotamiento de los azúcares fermentables contenidos en el medio.

Los tiempos requeridos para que se lleve a cabo cada una de las etapas son variables ya que dependen de muchos factores como son población y características de la levadura, calidad de las melazas, eficiencia de fermentación que se desee, etc., pero principalmente de las condiciones de operación en los recipientes; por lo que es necesario que todo el proceso sea llevado a cabo bajo una exacta supervisión de laboratorio, incluyendo la propagación y selección de la clase de levadura. Normalmente, cuando la temperatura se mantiene en el intervalo [21, 38]°C, los tiempos se encuentran [36, 59] H, para la fermentación y de 8 horas para la multiplicación de levadura.

Aunque el proceso ideal de fermentación debería producir, de acuerdo a la ecuación de Gay Lussac (ecs. 1 y 2), sólo alcohol etílico (51.1% en peso) y dióxido de carbono (48.9% en peso), desde los tiempos de Pasteur es reconocida la existencia de productos menores, como el glicerol, ácido láctico, ácido succínico y otros; los cuales son obtenidos también en la fermentación a partir de los azúcares contenidos en las melazas, de acuerdo a la tabla 2.



Fermentación:



**TABLA 2.- PRODUCCIÓN EN LA FERMENTACIÓN SEGUN PASTEUR**

<b>Compuesto</b>	<b>% Peso</b>
Alcohol etílico	48.4
Dióxido de carbono	46.6
Glicerina, ácido láctico, ácido succínico, etc.	5.0

Fuente: Paturau J. M., 1982

El valor anterior de 48.4% de alcohol etílico obtenido por Pasteur, representa alrededor del 94.5% del valor teórico del 51.5% de Gay-Lussac; sin embargo, este valor se encuentra basado sobre el azúcar invertida pura y no contempla el azúcar consumida para el crecimiento de la levadura, la cual se asume que es adicionada externamente; haciendo difícil que en los procesos con sistemas convencionales, se obtenga una eficiencia mayor del 90% sobre el total de azúcares invertidos cargados en la fermentación, que corresponde aproximadamente de un 6.5 al 10% en volumen de alcohol en el fermentado final.

Una vez concluida la fermentación, el fermentado final se pasa por un colador para eliminar cualquier partícula gruesa que pueda obstruir el trabajo de separación, y es enviado a la etapa de destilación.

### **2.3.3.- Destilación**

La etapa de destilación de una destilería, tiene por objeto llevar a cabo la concentración de los productos de la fermentación así como la purificación y recuperación del alcohol producido. Los sistemas de destilación empleados en la producción de alcohol son muy variados y pueden constar desde 2 columnas hasta 6 o más, dependiendo del grado de rectificación o de pureza que se desee.

No obstante, el sistema de rectificación que consta de 3 columnas de destilación es el más empleado en el proceso de destilación de melazas.

En este sistema, el mosto fermentado se hace pasar a través de un tren de intercambiadores de calor llamados calentativos para posteriormente ser enviada a la primera columna de destilación, llamada destrozadora o fraccionadora, la cual agota el alcohol a ella alimentada; extrayéndose por el fondo el líquido efluente altamente contaminante, conocido como vinazas o licor agotado, que contiene la materia sin fermentar, sólidos en suspensión, sales y materiales en solución en una gran cantidad de agua; en lo alto se obtiene un alcohol crudo que contiene numerosas impurezas en fase vapor, el cual es alimentado a la segunda columna denominada depuradora.

En la columna depuradora se extrae en lo alto, en forma concentrada, una mezcla de destilados ligeros, compuesta de éteres, aldehídos, derivados orgánicos amoniacales y demás sustancias de bajo punto de ebullición. La otra mezcla de compuestos menos volátiles atraviesan la columna y sale como producto de cola, en la que se encuentra contenido el alcohol con ácidos y éteres de punto de ebullición elevados; la cual es lavada con agua y separada en dos fases para ser extraído el aceite de fusel mientras que la fase acuosa que contiene el alcohol se alimenta a la tercera columna llamada rectificadora.

En la columna rectificadora se lleva a cabo la separación de algunas sustancias volátiles que no pudieron ser separadas en la columna depuradora, así como en el fondo el agua en la que estaba contenido el alcohol; mientras tanto en la zona media de la columna es extraída la flema, la cual está agotada en alcohol [Zamora, 1991]. En la figura 3 se muestra el proceso convencional de una destilería de alcohol por fermentación de melazas de caña

Las diferencias de este sistema, con el resto de un mayor número de columnas, consisten básicamente en lo siguiente:

- a) La operación de la columna depuradora en lavado de agua a contracorriente.
- b) La adición de una columna extra para concentrar y separar el aceite de fusel.
- c) La adición de una columna para separar del alcohol rectificado, los compuestos de punto de ebullición muy próximos al etanol.

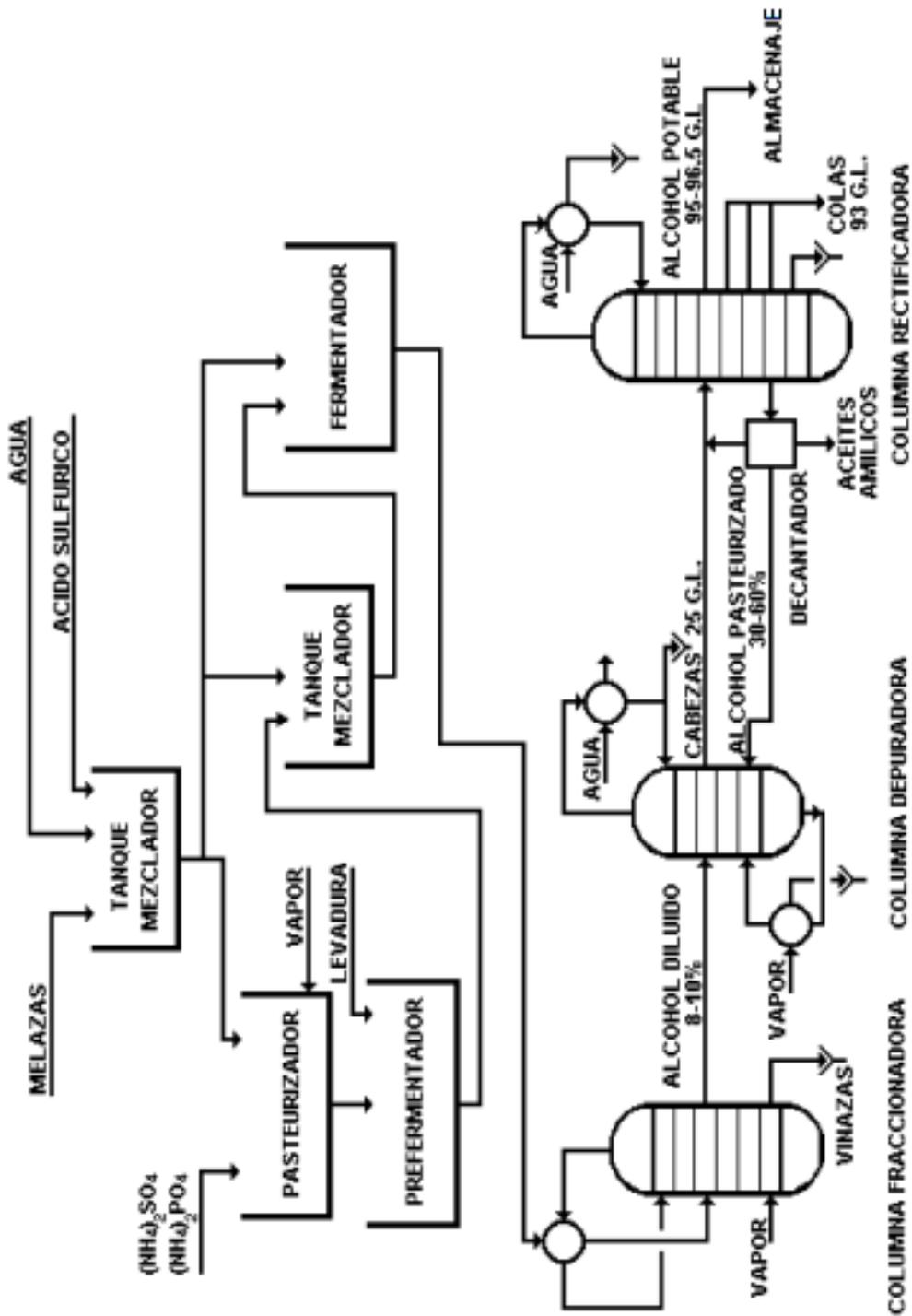


FIGURA 3. PROCESO CONVENCIONAL DE UNA DESTILERIA DE ALCOHOL POR FERMENTACION DE MELAZAS DE CAÑA

Fuente: Zamora, A. H., 1991

## ***CAPÍTULO 3***

### ***ASPECTO CONTAMINANTE DE LAS VINAZAS PROVENIENTES DE LAS MELAZAS DE CAÑA***

Este apartado pretende mostrar el origen de los efluentes derivados de la industria destiladora de alcohol por fermentación de carbohidratos y la problemática ambiental generada por su disposición, así como el conocer las características de estos y la reglamentación vigente, con la finalidad de poder plantear posibles soluciones a esta problemática en los capítulos subsecuentes teniendo como base las características de estos.

### **3.1.- ORIGEN Y PROBLEMÁTICA DE LAS VINAZAS PROVENIENTES DE MELAZAS DE CAÑA**

En el proceso de fabricación de alcohol por fermentación, sea cual sea la materia prima y tecnología empleada, la dilución de carbohidratos es una etapa básica e inevitable dentro de la destilería; ya que, la misma naturaleza de la fermentación y los límites de tolerancia al alcohol y a otros componentes inhibidores por parte de las levaduras, hacen necesario que el contenido de los azúcares fermentables disponibles en el substrato a fermentar no exceda del 20% en peso para que el proceso fermentativo se pueda llevar a cabo con la eficiencia óptima y una máxima economización de la materia prima.

De aquí que, los azúcares a fermentar tengan que estar contenidos en un gran volumen de agua (de 8 a 14 veces más que el alcohol producido), la cual tiene que ser transportada a través de todo el sistema de fermentación y surge como fondos en la primera columna de destilación cuando se separa el alcohol.

Sin embargo, estos fondos de destilación comúnmente llamados vinazas o licor agotado contienen una gran cantidad de materia orgánica originada por los componentes no fermentables presentes en las melazas, subproductos no volátiles de la fermentación y algo de los azúcares fermentables que resultan de las ineficiencias en la consecución de una conversión máxima a alcohol; que les proporciona un carácter sumamente contaminante por su alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), similar a la que producirían aguas negras domésticas de 1.43 habitantes por cada litro de vinaza.

Esto para una destilería de tamaño normal, que produce 60,000 litros/día de alcohol, a partir de melazas de caña, correspondería a una contaminación semejante a la que producirían alrededor de 85,800 personas/día.

Con estos niveles de contaminación no sólo se produce un grave riesgo para el medio ambiente; sino que, además, se pone en peligro el desarrollo de los esquemas de biomazas como posibles substitutos de los combustibles y productos derivados del petróleo.

### 3.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS VINAZAS PROVENIENTES DE MELAZAS DE CAÑA

Los fondos de destilación o vinazas de las destilerías de alcohol por fermentación de melazas de caña, se presentan como un líquido café oscuro que se origina como subproducto durante la fermentación y que se obtiene como efluente de la primera columna de destilación en donde se separa el alcohol; y aunque, su composición varía regularmente contiene un 93.5% de agua, un 4.6% de materia orgánica, y un 1.9% de minerales, principalmente potasa (0.5%) y fósforo (0.01%) [Bautista y Duran, 1998].

**TABLA 3.- COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS VINAZAS DE MELAZAS DE CAÑA**

<i>Parametro</i>	<i>Vinazas</i>	
	<i>Frescas</i>	<i>Almacenadas</i>
Temperatura, °C	25 – 35	25 - 30
Ph	6.5 – 7.0	4.5 – 5.5
Alcalinidad, mg CaCO <sub>3</sub> /litro	5,800	9,000
Turbiedad, NTU (unidades nefelométrica)	30,000	30,000
Sólidos totales, mg/litro	63,000	47,700
DBO <sub>5</sub> , mg O <sub>2</sub> /litro	31,500*	27,500+
DQO, mg O <sub>2</sub> /litro	69,000	64,000
Nitrógeno (Kjeldhal), mg N/litro	1,600	1,300
Nitrógeno amoniacal, mg N/litro	150	500
Sulfatos, mg/litro	3,100	2,800

\*Dilución de 1/100

+Dilución de 1/50

Fuente: Duran, C., Medellín, P., Noyola, A., Poggi, H. & Zedillo, L.E., (1988). Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos., *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 3 (2), 1988, Sitio web: [www.imiq.org](http://www.imiq.org)

La naturaleza y composición de las vinazas varía según sea el tipo de tratamiento al cual hayan sido sometidas las melazas de caña en la fabricación del azúcar, ya sea por clarificación simple o clarificación por sulfitación (en la producción de azúcar cruda o blanca respectivamente), el sistema de fermentación, los aditivos o productos químicos usados en el proceso de fermentación, ácidos, antibióticos y

nutrientes, el tipo de equipo de destilación, la levadura empleada, la calidad del agua, etc.

No obstante la variación en la naturaleza y composición de las vinazas, la extensión de la materia orgánica es ineludible y unas vinazas con baja demanda biológica de oxígeno DBO, es físicamente imposible ya que solamente puede variar en la cantidad de agua contenida o en alguno de los otros componentes inorgánicos.

En la tabla 3, se presenta una descripción más detallada sobre la composición típica de las vinazas provenientes de la destilación de melazas de caña, con el rango máximo y mínimo de valores que han sido identificados por varios investigadores en todo el mundo.

### **3.3.- *NORMATIVIDAD AMBIENTAL SOBRE LOS EFLUENTES GENERADOS POR LA INDUSTRIA DESTILERA***

En México, el proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, publicado en el diario oficial del 24 de junio de 1996 y que entro en vigor a partir del 30 de octubre de 1996; establece los siguientes límites máximo permisibles de contaminantes para las descargas de las aguas residuales provenientes de la industria destilera a los cuerpos receptores, ver tabla 4.

Entendiéndose, por aguas residuales de la industria destilera las que provienen de la fabricación de alcohol etílico, aguardientes y bebidas alcohólicas destiladas como: brandy, ron, vodka, ginebra, whisky, tequila, mezcal, charanda entre otras; los cuales son obtenidos a partir de la fermentación y posterior destilación de mostos, elaborados con materias primas que contienen azúcares; y que incluyen los residuos de la destilación (vinazas) característicos de las materias primas de las que se origina cada uno de los productos destilados, así como las aguas de lavado y limpieza de la planta.

**TABLA 4.- LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DESTILERA.**

<i>Parámetro</i>	<i>Límite máximo permisible</i>	
	<i>Promedio diario</i>	<i>Instantáneo</i>
pH (Unidades de pH)	6-9	6-9
DBO (mg/l)	200	240
DQO (mg/l)	260	360
Grasas y Aceites (mg/l)	10	20
Sólidos sedimentables (mg/l)	1.0	2.0
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	200	240
Fósforo total (mg/l)	5	6
Nitrógeno total (mg/l)	10	12

Fuente: NOM-001-ECOL-1996

### **3.4.- TIPOS DE SOLUCIONES ESTUDIADAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN ORIGINADO POR LAS VINAZAS**

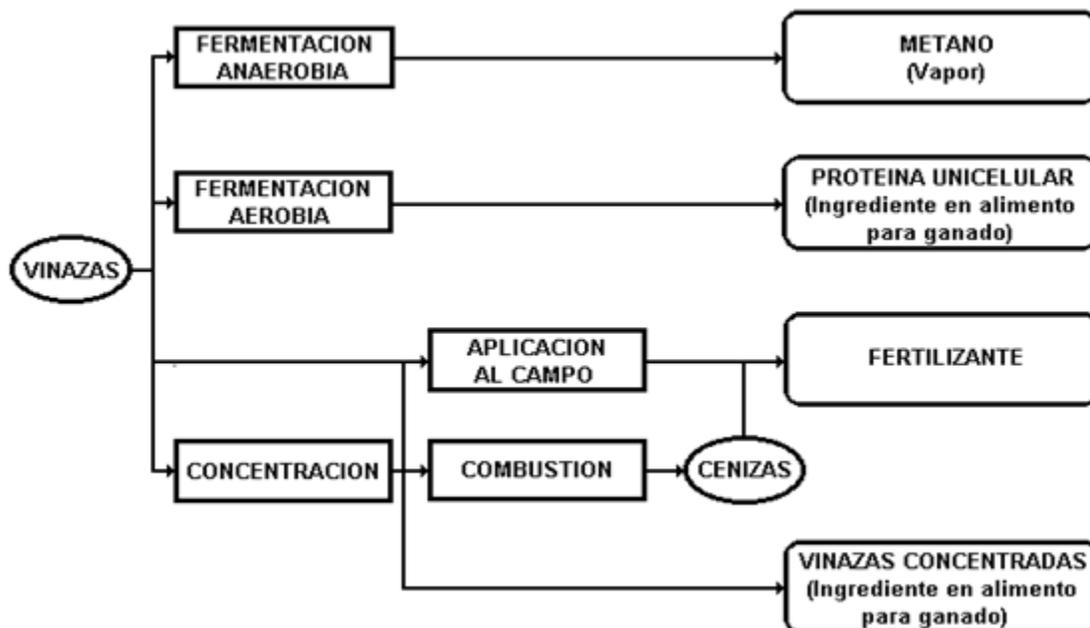
La eliminación de los fondos de destilación o vinazas ha constituido por siempre un grave problema, en los principales países productores de alcohol por fermentación de melazas de caña, ya que es el efluente más contaminante que se genera durante la producción de alcohol, por lo que diversas soluciones han sido estudiadas para tratar de resolver el grave problema de contaminación de agua originado por las destilerías de alcohol por fermentación de melazas.

Inicialmente, los conceptos básicos de los sistemas de tratamiento estuvieron en manos de ingenieros municipales y civiles; los cuales experimentaron principalmente métodos, que sólo trataban de reducir o eliminar el carácter contaminante de estos efluentes, en procesamientos de tipo aerobios convencionales o con reciclamientos.

Estos sistemas, sin ganancia alguna, fomentaron la creencia que los efluentes no debían ser tratados, si es que se podía evitar; sin embargo, el relativamente alto contenido de componentes orgánicos e inorgánicos contenidos en las vinazas provenientes de las melazas de caña, que les proporciona el carácter contaminante, puede ser explotado como ventaja para conferirles un aprovechamiento.

De aquí que se desarrollarán procesos de aprovechamiento que, además de proponer una solución para el problema de contaminación del medio ambiente causado por las vinazas, buscan una factibilidad económica mediante la obtención de productos que puedan tener alguna utilización noble o valor comercial aprovechando sus potencialidades orgánicas y minerales.

La figura 4 resume esquemáticamente los principales procesos de aprovechamiento de las vinazas desarrollados, en los principales países productores de alcohol por fermentación de melazas que enfrentaron este problema con anterioridad, así como los respectivos productos que pueden ser obtenidos.



**FIGURA 4.- PRINCIPALES PROCESOS DE APROVECHAMIENTO DE LAS VINAZAS DE MELAZAS DE CAÑA**

Fuente: Ribeiro, C. C.

Otro tipo de solución propuesta, para resolver el problema de contaminación originado por las vinazas de melazas de caña, es el buscar una reducción en la generación de estos efluentes por medio de un mejoramiento en los procesos convencionales de obtención del alcohol por fermentación de melazas de caña, que permita alcanzar una mayor eficiencia en la obtención de alcohol en el fermentado.

En los capítulos siguientes se presentan cada una de los diferentes tipos de soluciones propuestas para resolver el problema de contaminación del medio ambiente originado por las vinazas.

## ***CAPÍTULO 4***

### ***SOLUCIONES ESTUDIADAS PARA REDUCIR Y/O ELIMINAR EL CARACTER CONTAMINANTE DE LAS VINAZAS***

En este apartado se engloban las soluciones que sólo ven el carácter fundamental del problema de contaminación de agua originado por las vinazas; sin opción al aprovechamiento de las mismas como materia prima para la producción de productos aprovechables y, por tanto, sin ganancia alguna. Este es el caso de los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales y los procesos de reciclamiento de vinazas.

#### **4.1.- MÉTODOS TRADICIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS)**

Al tomar en cuenta las características contaminantes, en términos de DBO, que tendrá el influente (ver tabla 3) y las que deberá poseer el efluente (ver tabla 4) en un sistema tradicional de tratamiento para el acondicionamiento de las vinazas, se deduce que la eficiencia de remoción de este, cualquiera que sea, deberá ser superior al 99%.

Para alcanzar esta eficiencia, la hipótesis más indicada es la utilización de un proceso de tratamiento biológico. Esta clase de tratamientos, son procesos de tipo fermentativos, basados en el desdoblamiento de la materia orgánica biodegradable disuelta en el agua de desecho a compuestos químicamente más simples y estables, los cuales pueden ser recuperados o no dependiendo del dispositivo empleado para el tratamiento, por la acción de microorganismos o bacterias capaces de asimilar esta materia orgánica, en presencia de oxígeno (tratamientos aerobios) o sin este (tratamientos anaerobios), como nutrientes para reproducirse y formar una biomasa microbial lo suficientemente densa para su posterior sedimentación.

Aunque los tratamientos biológicos aerobios son bioquímicamente más eficientes y rápidos que los de tipo anaerobio, cuando se aplican a efluentes con una alta carga orgánica, tales como las vinazas, se encuentran con grandes dificultades operacionales a causa del gran volumen de biomasa (lodos) producido, la incapacidad económica para tratar altas cargas de DBO o DQO y altos costos en términos de energía debido a la aireación necesaria para su realización. Por esta razón, son los procesos de tipo anaerobio los que se consideran más adecuados para el tratamiento de las vinazas, ya que además poseen ventajas como una simplicidad operativa y constructiva, reducidos costos de implementación por la eliminación de la necesidad de la aireación, menor requerimiento de nutrientes y de espacio para su instalación, así como un menor aumento de los lodos y posibles beneficios adicionales por la recuperación de subproductos.

En términos prácticos, el desarrollo de los procesos anaerobios puede ser realizado en 3 tipos diferentes de dispositivos:

- 1.- Tanques Imhoff
- 2.- Digestores
- 3.- Lagunas de estabilización anaerobias

Los tanques Imhoff son empleados para pequeños volúmenes (125 a 500 m<sup>3</sup>/día), no siendo económicos ni técnicamente recomendables para grandes volúmenes como los que ocurren en el caso de las vinazas, además el flujo que sale del tanque es de mala calidad orgánica y microbiológica<sup>1</sup>.

En lo que respecta a los digestores, estos son principalmente utilizados para el tratamiento de efluentes sanitarios; no obstante, últimamente también han sido empleados para el procesamiento de desechos de animales, residuos vegetales y otros efluentes de origen orgánico, siendo posible que las vinazas puedan ser tratadas en digestores, como se verá en el capítulo siguiente.

Mientras tanto, los digestores son dimensionados según los criterios usuales, los cuales contemplan la presencia de una fase sólida, denominada lodo, en el efluente, proveniente de un proceso unitario de naturaleza física como una sedimentación antes de llegar al digestor. Por lo que al considerarse el caso de las vinazas, los grandes volúmenes (generalmente > 1,200 m<sup>3</sup>/día) originarían que la sedimentación se deba llevar a cabo en una unidad decantadora separada, cuyo dimensionamiento exige cuidadosos estudios a nivel laboratorio para la determinación de los parámetros adecuados del proyecto, así como la necesidad de construir y operar un sistema de dos unidades además del manejo constante del lodo estabilizado; llegándose a la conclusión que para el caso de las vinazas no son la solución más adecuada, cuando no se le da importancia a la recuperación de los lodos.

Finalmente, se tienen las llamadas lagunas anaerobias que parecen ser el dispositivo más indicado para el tratamiento de las vinazas gracias a su gran

---

<sup>1</sup> **Organización Panamericana de la Salud**, "Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización", 2005, consultese: [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

simplicidad constructiva y operacional, la cual origina que los costos de implementación y operación sean muy bajos; además que en ellas se consigue una gran estabilización del lodo formado en el fondo, garantizando con esto parámetros adecuados para su diseño y operación por el completo desenvolvimiento del proceso de digestión anaerobio, siempre y cuando el tiempo de retención sea el adecuado y la carga de biomasa este regulada; conjuntamente con una reducción del DBO del orden del 95%.

Es oportuno resaltar que su eficiencia, semejante a la de los otros dispositivos, es inferior a la referida anteriormente, volviendo necesario una complementación del tratamiento cuando es necesario cumplir con la normatividad.

#### **4.1.1.- Lagunas de Estabilización**

##### **4.1.1.1.- Descripción del Tratamiento Anaerobio de las Vinazas en Lagunas de Estabilización.**

El tratamiento anaerobio de las vinazas en lagunas de estabilización, consiste básicamente en estancarlas en lagunas construidas enterradas en la tierra para su posterior desalojo a los ríos circunvecinos de las unidades industriales, con autorización de los organismos estatales responsables del control ambiental.

Las lagunas de estabilización deben ser construidas interconectadas en serie, teniendo que ser la primera inoculada con estiércol de ganado y cal, para mantener una población microbacteriana, así como para estabilizar el pH de las vinazas. La proporción de vinazas alimentada al sistema debe ser aumentada gradualmente, obedeciendo parámetros que tienen relación con condiciones ambientales (temperatura, la irradiación solar, la velocidad del viento, etc.) [Shelef y Kanarek, 1995], de manera que después de un tiempo de retención determinado -entre 65 y 135 días- se obtenga un efluente con pH neutro y bajo en DBO<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> **Indústria do Ácool no Nordeste**, "Soluciones estudiadas para resolver el problema de contaminación en el medio ambiente".

Durante el tiempo de retención de las vinazas en las lagunas, la superficie de estas es en gran parte cubierta por sólidos suspendidos que cumplen la finalidad de insolar la fase líquida del aire atmosférico y permitiendo, a la vez, la difusión de gases (principalmente bióxido de carbono y metano) a la atmósfera; de manera que, los gases formados no son acumulados en el sistema. En tanto que, la biomasa bacteriana va creciendo conforme pasa el tiempo acumulándose en el fondo de la laguna por sedimentación.

Analizando el volumen de las lagunas de estabilización para el tratamiento de vinazas, en función de la capacidad de las destilerías, recomienda para su dimensionamiento los datos mostrados en la tabla 5, en un esquema de construcción semejante al sistema de lagunas anaerobias ilustrado en la figura 5 que describe el desarrollo de tres lagunas de estabilización anaerobia para el tratamiento de vinazas en paralelo con el objetivo de que dos se mantengan en operación mientras se realiza limpieza de lodos en la tercera .

**TABLA 5.- DATOS RECOMENDADOS PARA DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA**

**Capacidad de la destilería: 60,000 l/día**

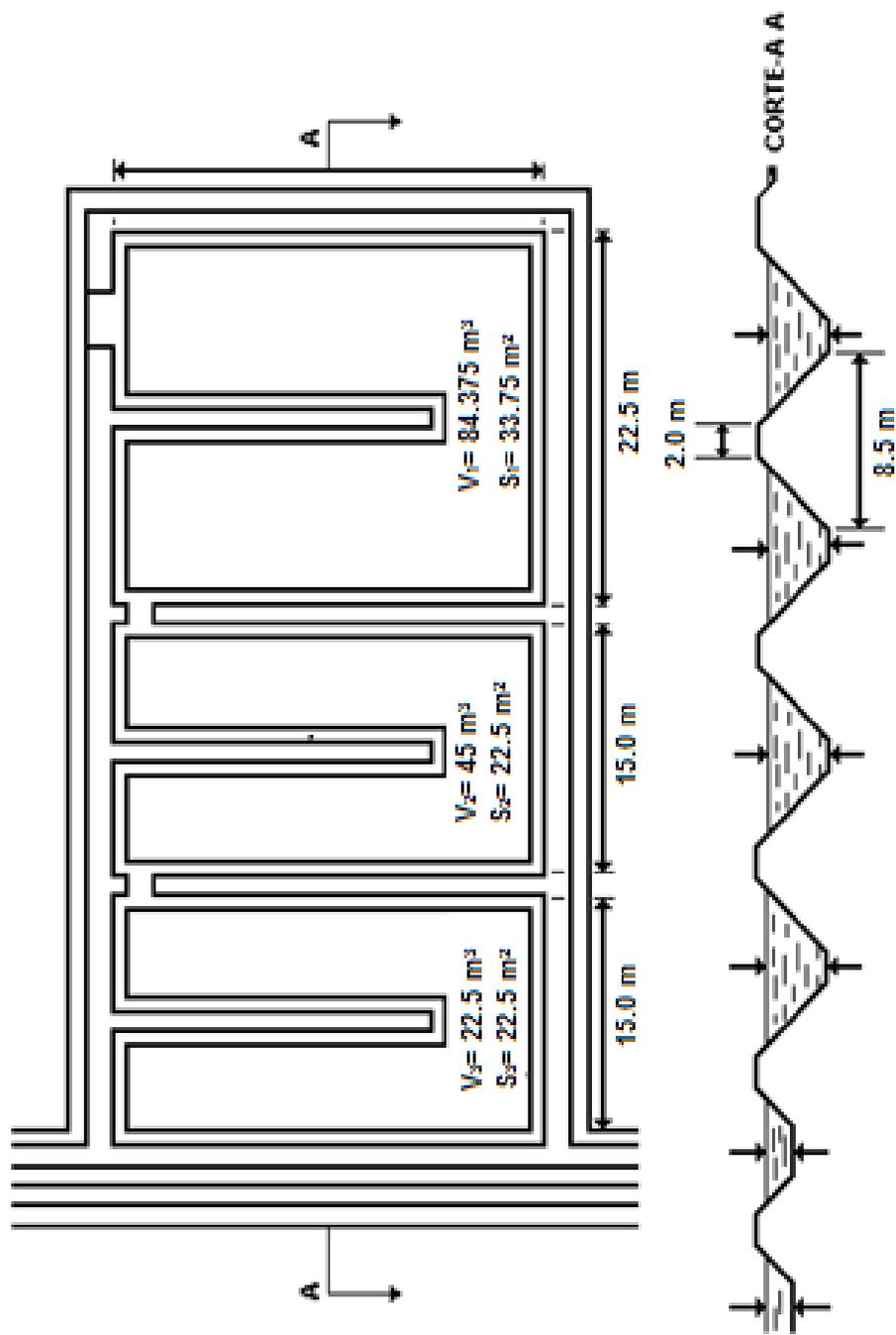
**Vinazas generadas: 900,000 l/día**

**Volumen útil (80%): 121,500 m<sup>3</sup>**

**Tiempo de retención: 135 días**

<b>Laguna</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	<b>33.750</b>	<b>2.5</b>	<b>84.375</b>
<b>2</b>	<b>22.500</b>	<b>2.0</b>	<b>45.000</b>
<b>3</b>	<b>22.500</b>	<b>1.0</b>	<b>22.500</b>
<b>TOTAL</b>	<b>78.750</b>		<b>151.875</b>

Fuente: RIO, J. M. del.



**FIGURA 5.- PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA PARA EL TRATAMIENTO DE VINAZAS**

Fuente: Río, J.M. del, 1982

#### **4.1.1.2- Ventajas y Desventajas del Tratamiento Anaerobio de las Vinazas en Lagunas de Estabilización.**

Las ventajas que presenta el tratamiento anaerobio de vinazas mediante lagunas de estabilización [Rio, del, 1982], son las siguientes:

- Disminución de la carga orgánica (Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO]) en las vinazas hasta en un 70%.
- Bajo costo de capital invertido en el tratamiento, siendo solamente necesario la inversión para la remoción de la tierra.
- Bajo costo de operación, ya que la necesidad de nutrientes es mucho menor cuando se compara con los tratamientos aerobios.
- Área relativamente pequeña ( $< 100 \text{ m}^2$ ) para el sistema de tratamiento, ya que la alta carga de materia orgánica puede ser distribuida en lagunas con una área pequeña y bastante profundidad.

Al lado de las innumerables ventajas de los procesos anaerobios se presentan algunas desventajas, debido a las altas cargas contaminantes que requieren ser tratadas en ellas, entre las cuales se encuentran:

- Tiempos largos (entre 65 y 135 días) de retención necesarios para llevar a cabo el tratamiento.
- Necesidad de un tratamiento adicional si se requiere alcanzar los límites permisibles de la normatividad ambiental vigente.
- No se recupera ningún producto durante el tratamiento.

### **4.2.- RECICLAMIENTO DE VINAZAS**

#### **4.2.1.- Descripción del Reciclamiento de Vinazas**

Aunque la expresión "revertimiento" se mira generalmente con desagrado por la gran mayoría de los destiladores de melazas de caña debido a que se ve como un paso retrógrado, lleno de dificultades e ineficiencias en las fermentaciones

subsecuentes. En países, donde no abunda el agua se han llevado a cabo experiencias con la recirculación de vinazas, no sólo con la finalidad de ahorrar agua sino con el propósito de lograr una disminución en el volumen de los efluentes generados, teniendo como resultado que, en general, hasta un límite del 15% de recirculación puede ser posible para las destilerías tradicionales.

El proceso de recirculación de vinazas consiste en substituir parte del agua utilizada en la dilución de las melazas por vinazas con el objeto de lograr un ahorro en los requerimientos de agua de proceso y ácido, así como una disminución en los efluentes generados y un mejor aprovechamiento de los azúcares contenidos en las melazas.

Antes de poder llevar a cabo la recirculación de vinazas, es necesario enfriar estas a una temperatura cercana a los 30°C ya que las altas temperaturas a las cuales emergen de la columna de destilación pueden aumentar la temperatura del substrato a niveles inconvenientes para la fermentación, además de poder causar serios problemas de corrosión en el sistema de tuberías, por su alta acidez.

El enfriamiento puede ser realizado en un sistema de torre de enfriamiento o un sistema de intercambiadores de calor mediante el cual se aprovecha el calor de las vinazas para precalentar el agua de alimentación a la caldera (figura 6).

Evidentemente, la proporción de recirculación para cada situación implica una solución particular la que depende principalmente de la calidad de las melazas de las cuales tienen su origen las vinazas recicladas, ya que la eficiencia de las fermentaciones subsecuentes irá disminuyendo conforme se incremente la concentración de sales y otros constituyentes inhibidores de la fermentación, que se encuentran presentes en las melazas y por ende en las vinazas recicladas, hasta volver el medio de fermentación completamente ineficiente.

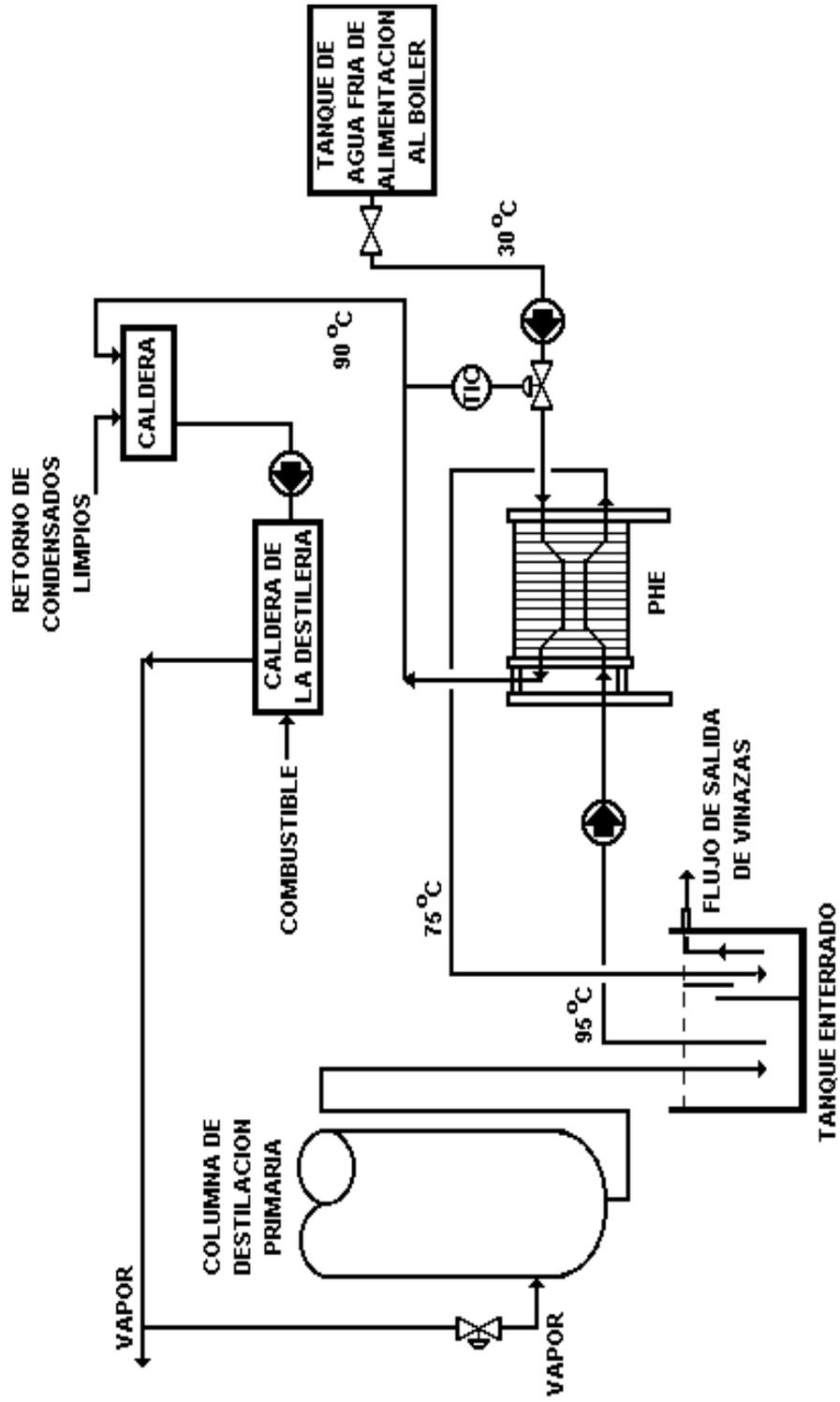


FIGURA 6.-SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL CALOR DE LAS VINAZAS

Fuente: Alfa-Laval

Hasta ahora no existe una regla, para precisar la cantidad de vinazas recicladas de la columna primaria, ya que las melazas, los métodos de fermentación y rasgos del inóculo varían considerablemente en las diferentes destilerías. Sin embargo, se recomiendan realizar dos de las siguientes actividades, para el establecimiento de las condiciones óptimas del reciclamiento.

1. Las pruebas deben ser llevadas a cabo, primero, a nivel laboratorio, aunque estas pruebas no necesariamente serán decisivas para las condiciones de la fábrica.
2. Las cantidades de reciclamiento deben ser incrementadas gradualmente de manera que se le pueda dar a la levadura la suficiente oportunidad de aclimatarse a las nuevas condiciones de fermentación.

#### ***4.2.2.- Ventajas y Desventajas del Reciclamiento de Vinazas***

El proceso de reciclamiento de vinazas, cuando se lleva a cabo con vinazas de buena calidad y de manera adecuada tiene grandes ventajas, entre las cuales se pueden citar.

- Aprovechamiento de las vinazas para la obtención de alcohol, con lo que se contribuye al contexto industrial, por la reducción del costo propio del alcohol.
- Ahorro en la cantidad de agua utilizada para el proceso fermentativo, debido a su substitución por vinazas.
- Aumento en el rendimiento de las melazas para la producción de alcohol, debido a la obtención de alcohol a partir de los azúcares contenidos en las vinazas que no alcanzaron a fermentar en la primera fermentación.
- Disminución en la cantidad de ácido y nutrientes utilizados en la preparación de los mostos a fermentar y en la regulación del pH, debido a las características de las vinazas recirculadas.
- Se logra una mayor capacidad de las lagunas de estabilización para el tratamiento de las vinazas, debido al menor volumen y mayor concentración de compuestos orgánicos de los efluentes.

- Ahorro en los gastos de equipo para el aprovechamiento o tratamiento de los efluentes debido a la reducción del volumen de los mismos.
- Beneficios en los procesos de aprovechamiento de vinazas, por la disminución del volumen y el aumento en la concentración de los compuestos orgánicos aprovechables.

Al lado de sus ventajas, el proceso de reciclamiento de vinazas presenta las siguientes desventajas.

- Sólo se reduce el problema de contaminación originado por las vinazas, ya que no se pueden recircular todas las vinazas generadas.
- Se puede ver afectada la eficiencia de la fermentación si no se cuentan con melazas de buena calidad, teniendo lugar la posibilidad de no poderse llevar a cabo el reciclamiento en algunas destilerías convencionales, principalmente si son de melazas de caña de azúcar, teniendo que realizar otro tratamiento mencionado en los apartados 4.1.1.

## ***CAPÍTULO 5***

### ***SOLUCIONES ESTUDIADAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE VINAZAS***

Consideramos en este apartado las soluciones propuestas con vistas al aprovechamiento de las vinazas como fertilizante y como materia prima para la obtención de otros productos útiles que ayudan a absorber los gastos generados para su disposición, entre estas opciones destacan: el uso directo de las vinazas como fertilizante sobre la tierra, la digestión anaerobia para la generación de biogás, la concentración a jarabe para su posterior comercialización o combustión y el tratamiento aerobio para la producción de proteínas.

## **5.1.- USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO**

### **5.1.1.-Descripción del Uso Directo de las Vinazas en el Campo**

La aplicación directa de las aguas residuales procedentes de la producción de alcohol (vinazas) en los campos de cultivo es una de las alternativas que, además de garantizar el aprovechamiento de estos efluentes, posee una gran importancia en la agroindustria azucarera de muchos países en el mundo<sup>3</sup>. Su importancia radica en el hecho que estos residuos contienen elementos orgánicos y minerales en cantidades considerables (ver tabla 3), que los hace sumamente útiles como enmendantes orgánicos o biabonos sin contar con que constituyen un recurso muy importante de agua.

La caña de azúcar es un cultivo exigente de nitrógeno y potasio, ya que para producir 100 ton por hectárea se requieren cerca de 130 a 150 kg de nitrógeno e igual cantidad de potasa ( $K_2O$ ), en tanto que los requerimientos de fósforo ( $P_2O_5$ ) se sitúa alrededor de los 20 kg. Es por esto, que la aplicación de vinazas sobre plantaciones y cosechas de retoños de caña, como estimulante para el crecimiento y fertilizante, ha dado buenos resultados gracias a su alta calidad fertilizante y gran capacidad para corregir la acidez del suelo resultado de su riqueza orgánica y de nutrientes minerales, especialmente el potasio.

Un uso de vinazas en cantidades razonables, distribuida uniformemente, estimula el crecimiento normal de la caña de azúcar dando lugar a una aparición de valores característicos para las variedades cultivadas; ya que, las vinazas poseen una composición muy compleja formada por componentes orgánicos de origen enzimático y sales en proporción desequilibrada que da lugar a una reacción violenta en la planta, incluso cuando se usan pequeñas cantidades tales como 35m<sup>3</sup> por hectárea, que cambia visiblemente la fisiología de la planta, estimulando el crecimiento y posponiendo su período de maduración. A la vez, existe una variación en la proporción de la médula y la fibra con una disminución de esta última, además se produce un aumento en la humedad del tallo así como un decrecimiento en la lignina, que junto con la celulosa forman la fibra, disminuyendo con ello la combustibilidad de la caña.

---

<sup>3</sup> **Indústria do Alcool no Nordeste**, "Soluciones estudiadas para resolver el problema de contaminación en el medio ambiente".

Por otro lado, su aplicación al suelo lleva a un descenso de la acidez de este debido a la misma acidez de las vinazas (pH 4.8) que provoca el desarrollo de vida microbial en el campo, originando con esto un incremento en el valor del pH.

El valor fertilizante de las vinazas provenientes de las destilerías de melazas de caña fue establecido, por Magro y Gloria, en un sistema experimental donde compararon los efectos de un fertilizante químico (10-5-15) con una distribución de 400 kg por hectárea para retoños de caña, con una proporción de 35m<sup>3</sup> de vinazas, obteniéndose un valor de 4.2 veces inferior para el fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y de 4.4 veces superior para la potasa (K<sub>2</sub>O), teniendo como punto de referencia el nitrógeno. A su vez demostraron que la adición de vinazas durante la época de crecimiento de la caña proporciona un incremento en la producción agrícola, el cual fue diferente para las dos variedades utilizadas, del 28% para la variedad conocida como IAC52-326 y del 35% para la variedad CB49-260 [Brieger O. F., 1979].

Las cantidades recomendadas para su distribución como fertilizante han variado desde 35 hasta 1,000m<sup>3</sup> por hectárea. Sin embargo, en la práctica se deben considerar las características del suelo, las condiciones del cultivo y otros factores, como la naturaleza del fermentado o mosto del cual tienen su origen las vinazas. Por lo que, es de gran importancia un análisis químico de las vinazas antes de su aplicación y el obedecer las dosis adecuadas de acuerdo al tipo de suelo, ya que cantidades excesivas pueden producir un exceso de vegetación dando lugar a altas producciones con un bajo contenido de azúcar y con un jugo que contiene alto contenido de cenizas que impide la formación de azúcar de buena calidad. Aunque es interesante señalar que el uso de maduradores en la caña ha corregido aparentemente los efectos negativos de las aplicaciones de vinazas excesivas.

Los métodos de aplicación de las vinazas varían, pues difícilmente un sistema soluciona el problema de distribución de las vinazas en el campo. Las más utilizadas son: la irrigación por gravedad en surcos o por aspersión, aplicación con camiones tanque (CT) y vehículos distribuidores de vinazas (VDV).

### **5.1.1.1.- Irrigación por Surcos o por Aspersión**

La irrigación con vinazas por gravedad en surcos o por aspersión es diferenciada de la aplicación de estas como fertilizante, básicamente en el método de aplicación en el campo; el cual es racional, llevando consigo la necesidad de diluirlas con agua para que se tenga el efecto de vehículo natural para que las vinazas puedan ser dispersadas, ya que normalmente son utilizadas raciones mínimas por hectárea.

En función de la topografía y de las propias áreas en las que se va a aplicar, las vinazas diluidas son bombeadas a través de tuberías, para su posterior distribución por canales enclavados en la tierra o por medio de equipos de irrigación por aspersión.

Las principales desventajas que presenta este método de aplicación es la necesidad de estaciones de bombeo permanentes, tuberías y canales de distribución, tanto primarios como secundarios; en los cuales, sino se toman en cuenta la colocación de revestimientos adecuados y una dilución de las vinazas, el elevado potencial corrosivo de éstas disminuirá su vida útil, tornándose frecuentes la infiltración por los surcos; así como de una topografía adecuada con una perfecta nivelación, ya que cualquier variación en esta puede hacer que algunas plantas reciban volúmenes mayores de los precisados, que frecuentemente matan la caña, y que las zonas más altas no reciban el tratamiento adecuado sin producir efecto alguno en ellas.

Otros de los inconvenientes de estos sistemas radica, en el hecho que no se puede cambiar fácilmente debido a su rigidez no pudiendo incluir, muy a menudo por razones técnicas, nuevas áreas en la instalación original, y la necesidad de mano de obra para acompañar las vinazas al campo y asegurar su distribución, además de su incompatibilidad con otros sistemas, puesto que los canales son un obstáculo para camiones u otro equipo móvil.

### 5.1.1.2.- Riego con Camiones Tanques (CT)

El riego de vinazas con camiones tanque con un doble eje trasero ofrece gran capacidad de distribución, de 10 a 15m<sup>3</sup>, y la movilidad necesaria para llegar a zonas a cualquier distancia de la destilería, sin embargo el sistema puede tener problemas en terrenos con demasiada inclinación o por condiciones climatológicas que originen humedad en los caminos, como son las lluvias.

La utilización de camiones tanques sin bomba es sin duda la alternativa más barata; pero daría lugar a un flujo irregular generando una falta de uniformidad en la aplicación, pues a medida que el tanque se va vaciando, el vaciado del líquido disminuye, además sólo se podría regar una porción de terreno estrecha en cada camino y la distribución sería lenta.

En tanto, los camiones equipados (ver figura 7) con una bomba ofrecen poder distribuir las vinazas en una mayor porción de terreno para cada camino, con el flujo constante necesario, así como una descarga más rápida de las vinazas, logrando hacer, por tanto, más viajes por día. Sin embargo, requiere una mayor inversión, como consecuencia del motor y la bomba, y continuando los mismos problemas para la distribución en días lluviosos y en terrenos de acentuada declividad.



**FIGURA 7. CAMIÓN TANQUE**

Fuente: [www.gascom.com.br](http://www.gascom.com.br)

### 5.1.1.3.- Aplicación con Vehículos Distribuidores de Vinazas (VDV)

La solución más aconsejable es la creación de un vehículo agrícola que distribuya las vinazas en el campo y el uso de camiones para transportar el líquido desde la destilería hasta el campo. Un vehículo, diseñado por Santal, con este propósito es un tractor agrícola, acoplado con un depósito de 15m<sup>3</sup> y una bomba, ambos de acero inoxidable, que dispersa las vinazas sobre el campo (ver figura 8).



**FIGURA 8. VEHÍCULO DISTRIBUIDOR DE VINAZAS**

Fuente: [www.Lexicarbrasil.com.br](http://www.Lexicarbrasil.com.br)

Las ventajas de utilizar este tipo de vehículos son: la reducción en la compactación del suelo, el fácil manejo y, principalmente, el permitir trabajar en días lluviosos así como el poder llegar a cualquier zona sin importar su declividad. Entre las desventajas, se puede citar la mayor inversión inicial, ya que para recibir las vinazas de la fuente habrá que llevarla al lugar de distribución, puesto que los vehículos distribuidores de vinazas son lentos en comparación con los camiones; se tiene la necesidad de contar con 3 camiones tanques, para transportar las vinazas a los VDV, en distancias medias de 10 km, o de 4 en distancias superiores a 20 km.

### **5.1.2.- Aspectos Económicos del Uso Directo de las Vinazas en el Campo**

Para evaluar económicamente el directo uso sobre la tierra de las vinazas como fertilizante, sería necesario que las vinazas tuvieran un precio de venta establecido en orden de determinar la ganancia. Sin embargo, esta información no está disponible debido a que la irrigación con vinazas es un procedimiento interno en donde normalmente las destilerías pertenecen a los propietarios de las plantaciones en donde se lleva a cabo la irrigación.

A pesar de esto, considerando que en la actualidad la disposición de estos efluentes es inevitable, a continuación se realiza un cálculo aproximado de los beneficios económicos, a partir de las ganancias obtenidas por el incremento en la producción de caña, logrado por el uso directo de las vinazas de caña como fertilizante sobre las plantaciones de esta.

Para la realización de estos cálculos se tomaron como base, los datos mostrados en la tabla 6, para obtener el equipo requerido y el respectivo costo de inversión (ver tabla 7) necesario para la aplicación de las vinazas como fertilizante en plantaciones de caña.

Así mismo, la tabla 8 proporciona los gastos operativos totales calculados, divididos en gastos fijos (ver tabla 8. A) y gastos variables (ver tabla 8. B). Estos cálculos proporcionan un total de US\$ 427,678.7 divididos en US\$ 326,958.7 por transportación y US\$ 100,719.9 por distribución.

Los datos económicos fueron actualizados al 2016 con apoyo de los indicadores económicos de la revista chemical engineering.

**TABLA 6.- BASES DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO.**

Capacidad de la destilería [l/día]:	60,000
Volumen de vinazas generadas por l de alcohol [l]:	15
Volumen total de vinazas generadas [l/día]:	900,000
Días de operación por año o zafra de 6 meses:	180
Producción media de caña sin fertilizar [ton/Ha]:	54.00
Relación de vinazas empleada para riego [l/Ha]:	35,000
Incremento en producción por las vinazas [%]:	20%
Capacidad por camión tanque (CT) [l]:	15,000
Distancia promedio ida y vuelta al campo [km]:	20
Tiempo promedio ida y vuelta de los CT [hr]:	1
Capacidad diaria por CT [l]:	360,000
Capacidad por vehículo distribuidor de vinazas (VDV) [l]:	15,000
Tiempo requerido por los VDV para el riego [hr]:	0.25
Capacidad diaria por VDV [l]:	1,440,000
Eficiencia de operación de los CT y VDV:	70%
Capacidad diaria por CT al 70% [l]:	252,000
Número de CT requeridos al 70%:	4
Capacidad diaria por VDV al 70% [l]:	1,008,000
Número de VDV requeridos al 70%:	1
Precio actual de la caña [US\$/ton]:	32.33
Gastos X carga de la caña [US\$/ton]:	2.93
Gastos X corte de la caña [US\$/ton]:	4.15
Gastos X transportación de la caña [US\$/ton ]:	1.46
Gastos X procesamiento de la caña [US\$/ton]:	7.79

Fuente: Brieger O. F.

**TABLA 7.- INVERSIÓN NECESARIA PARA EL USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO.**

<b>EQUIPO</b>	<b>COSTO UNITARIO [US\$]</b>
Camión Mercedes Benz Mod. 2213	64,821.1
Depósito de Acero Inoxidable de 15,000 l	33,122
Bomba de Acero Inoxidable KSB potencia de 0.8 kW	5,545.7
<b>Total por CT</b>	<b>103,488.8</b>
<b>INVERSIÓN EN EQUIPO DE TRANSPORTACIÓN</b>	<b>413,955.2</b>
VDV con Tractor Valmet Mod. 110 y	117,847.1
Depósito de Acero Inoxidable de 15,000 l	
<b>Total por VDV</b>	<b>117,847.1</b>
<b>INVERSIÓN EN EQUIPO DE DISTRIBUCIÓN</b>	<b>117,847.1</b>
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>	<b>531,802.4</b>

Fuente: Brieger O. F.

**TABLA 8.-GASTOS OPERATIVOS ANUALES TOTALES PARA EL USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO**

<b>CONCEPTO</b>	<b>TRANSPORTACIÓN [US\$]</b>	<b>DISTRIBUCIÓN [US\$]</b>
Gastos fijos anuales totales	216,569.680	53,863.6
Gastos variables anuales totales	110,389.1	46,856.3
<b>GASTOS OPERATIVOS ANUALES</b>	<b>326958.7</b>	<b>100,719.9</b>
<b>GASTOS OPERATIVOS ANUALES TOTALES</b>		<b>427,687.7</b>

Fuente: Brieger O. F.

**TABLA 8.A.- GASTOS FIJOS ANUALES TOTALES PARA EL USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO**

<b>CONCEPTO</b>	<b>TRANSPORTACIÓN [US\$]</b>	<b>DISTRIBUCIÓN [US\$]</b>
Depreciación* de equipo	67,324	16,835.3
15% de interés anual sobre la inversión	62,093.3	17,677.1
Salarios y Pagos	81,961.9	19,351.3
Licencias	3,431.2	_____
Seguros	1,759.2	_____
<b>COSTOS FIJOS TOTALES</b>	<b>216,569.7</b>	<b>53,863.6</b>
<b>COSTOS FIJOS GLOBALES</b>		<b>270,433.3</b>

\* La depreciación se calculó teniendo en cuenta la diferencia en material, vehículos en 5 años y material de acero inoxidable así como los diversos valores que quedan en 10 años.

Fuente: Brieger O. F.

**TABLA 8.B.- GASTOS VARIABLES ANUALES TOTALES PARA EL USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO**

<b>CONCEPTO</b>	<b>TRANSPORTACIÓN [US\$/km</b>	<b>DISTRIBUCIÓN [US\$/hr</b>
Mantenimiento por unidad	0.14	5.61
Ruedas y cámaras de aire por unidad	0.09	0.57
Combustible por unidad	0.20	8.78
Lubricantes por unidad	0.01	0.43
Lavado y engrase por unidad	0.01	0.10
<b>Costos variables por unidad</b>	<b>0.46</b>	<b>15.49</b>
<b>Costo variable anual por Unidad*</b>	<b>27,597.3</b>	<b>46,856.3</b>
<b>COSTOS VARIABLES TOTALES</b>	<b>81,071</b>	<b>46,856.3</b>
<b>COSTOS VARIABLES GLOBALES</b>		<b>157,245.4</b>

\* Se considera que se labora 24 hr en los 180 días de zafra, con un 70% de eficiencia y que los CT recorren 20 km/hr  
Fuente: Brieger O. F.

Por otro lado, la tabla 9 presenta las ganancias obtenidas; por el incremento de un 20% en la producción de caña conseguido en el campo por la aplicación directa de vinazas, considerando un uso de 35 m<sup>3</sup> de vinazas/Ha y un volumen total de vinazas de 162,000 m<sup>3</sup>/año o zafra de 6 meses; que restando los gastos de recolección, carga, transportación y procesamiento de la caña extra dentro del ingenio proporcionan un beneficio neto de US\$ 800,087.1 sobre el volumen total de vinazas empleadas para riego.

**TABLA 9.- GANANCIAS ANUALES POR EL USO DIRECTO DE VINAZAS EN EL CAMPO**

<b>CONCEPTO</b>	
Volumen total de vinazas [m <sup>3</sup> /año]	162,000
Área fertilizada por año [Ha]:	4,628.57
Producción total de caña sin fertilizar [ton]:	249,942.90
Incremento de caña por las vinazas [ton]:	49,988.57
<b>Ganancia brutas x el incremento de caña [US\$/año]:</b>	<b>1,616,215.28</b>
Gastos totales por corte, carga, transportación y procesamiento de la caña extra [US\$/año]:	816,146.3
Ganancias netas por Ha fertilizada [US\$]:	172.86
Ganancias netas por m <sup>3</sup> de vinazas [US\$]:	4.94
<b>GANANCIAS NETAS [US\$/AÑO]:</b>	<b>800,087.1</b>

Fuente: Brieger O. F.

Cabe señalar que, las condiciones topográficas del terreno y las distancias en relación con la destilería, tienen un papel relevante en los costos de operación. Por lo que, los beneficios obtenidos de las vinazas puede variar de acuerdo a las características de estas y la economía del sistema empleado para su distribución; sin embargo debe también valorarse los aspectos técnicos de estos.

### **5.1.3.- Ventajas y Desventajas del Uso Directo de las Vinazas en el Campo**

La utilización de las vinazas como fertilizante para la tierra, presenta las siguientes ventajas:

- No es necesaria una inversión para equipo de tratamiento destinado a reducir o eliminar la carga contaminante de las vinazas.
- Ahorro en gastos de fertilización, cuando las plantaciones de caña pertenecen a la destilería, en el caso de destilerías anexas a los ingenios.
- Se mejoran las condiciones agrícolas del suelo para la plantación de otros cultivos, además de la caña de azúcar, como el frijol, algodón y sorgo.
- Se consigue un incremento en el rendimiento agrícola cercano al 10 %, en comparación con el terreno fertilizado químicamente.

En tanto, los principales inconvenientes que presenta la aplicación de vinazas como fertilizante de suelo son:

- El uso inadecuado de las vinazas como fertilizante puede ocasionar problemas irreversibles a corto plazo en el suelo.
- Se pueden ocasionar problemas en la producción de azúcar, por las afectaciones del cultivo que se dan con el uso de vinazas.
- El problema de contaminación de agua puede ser transformado en un problema de aire a largo plazo; ya que la irrigación con vinazas, por varios años, puede originar un olor a putrefacción de vinazas, el cual es extremadamente picante.
- No pueden ser aplicadas al suelo por mucho tiempo, ya que sólo en los primeros años se experimentan beneficios, pero después de irrigar un cierto número de años pueden acarrear problemas de acidez y de olor en la tierra.

## **5.2.- DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS**

### **5.2.1.- Descripción de la Digestión Anaerobia de Vinazas para la Obtención de biogás.**

La producción de biogás, a partir de la digestión Anaerobia de la materia orgánica contenida en las aguas residuales, es uno de los procedimientos que se ha adaptado perfectamente como posible solución al problema de contaminación generado por efluentes de origen orgánico con una alta carga contaminante, de entre 5,000 y 30,000 ppm en compuestos orgánicos medidos como DBO, como el presentado en las vinazas de melazas de caña; no sólo por los beneficios resultantes de este proceso, como lo son la generación del gas combustible y un residuo con características de biofertilizante, sino por la reducción significativa conseguida en la carga contaminante de los efluentes. La digestión anaerobia para la obtención de biogás es un proceso de tipo fermentativo, basado en la asimilación de las sustancias biodegradables (materia orgánica) presentes en el agua residual por microorganismos anaerobios metano génicos (microbios); los cuales son capaces de utilizar esta materia orgánica, en ausencia de oxígeno, como nutrientes para reproducirse hasta formar una biomasa microbial lo suficientemente densa para su sedimentación; obteniéndose como resultado de esta asimilación productos más sencillos, tales como metano y bióxido de carbono, entre otros.

El proceso de digestión Anaerobia para la producción de biogás, se realiza en recipientes llamados biodigestores o digestores anaerobios en los cuales se pone en contacto los efluentes con la biomasa microbiana, a las condiciones más favorables para la digestión (pH de 6.5 a 7.5 y temperatura de 33 a 38°C). Un biodigestor se compone, básicamente, de un recipiente generalmente enterrado, que puede ser construido con tubos premoldados, plástico flexible, láminas metálicas o con cualquier otro material impermeable; y como cobertura una campana también de material impermeable, que sirve para acumular el gas generado en el proceso.

El gas producido durante la digestión anaerobia de los residuos orgánicos es una mezcla de gases: metano de un 55 a 77% del total y dióxido de carbono en un 30

a 45%, junto con otros compuestos menores como gas sulfhídrico (1.5%), nitrógeno, oxígeno e hidrógeno estos últimos nunca en proporciones superiores al 1%; con propiedades combustibles análogas a las del gas L.P. (gas licuado del petróleo), el cual puede ser empleado sin mayores problemas para uso doméstico e industrial, con un poder calorífico de entre 5,000 y 8,000 Kcal/m<sup>3</sup> dependiendo de su grado de pureza.

En tanto, la biomasa microbiana resultante de la fermentación anaerobia en el biodigestor, representa un considerable volumen de abono orgánico de primera calidad que podrá ser utilizado en explotaciones agropecuarias con una reducción en los costos de producción. La producción de gas y lodo en la digestión anaerobia, así como la cantidad de materia orgánica removida del efluente, dependen de la eficiencia alcanzada en el proceso de digestión anaerobia siendo esta una función del tiempo de retención del efluente con los microorganismos en el biodigestor, principalmente. La búsqueda por alcanzar una mayor eficiencia, con un menor costo de producción y una mejor recuperación de los productos, particularmente del metano, ha proporcionado un amplio campo para la investigación y el desarrollo de numerosos tipos de bioreactores; como son los biofiltros, el anerobio de manto de fango con flujo ascendente, el de capa fija con flujo descendente y los de lecho fluidizado; los cuales tienen en común la retención de la biomasa microbiana dentro del reactor y el modo de operación, que depende de la tendencia por parte de las bacterias metanogénicas, para adherirse a las superficies sólidas. Aunque cabe destacar que son muy pocos los datos reportados a nivel industrial de la aplicación de estos métodos para el tratamiento de las vinazas provenientes de la destilación de melazas de caña.

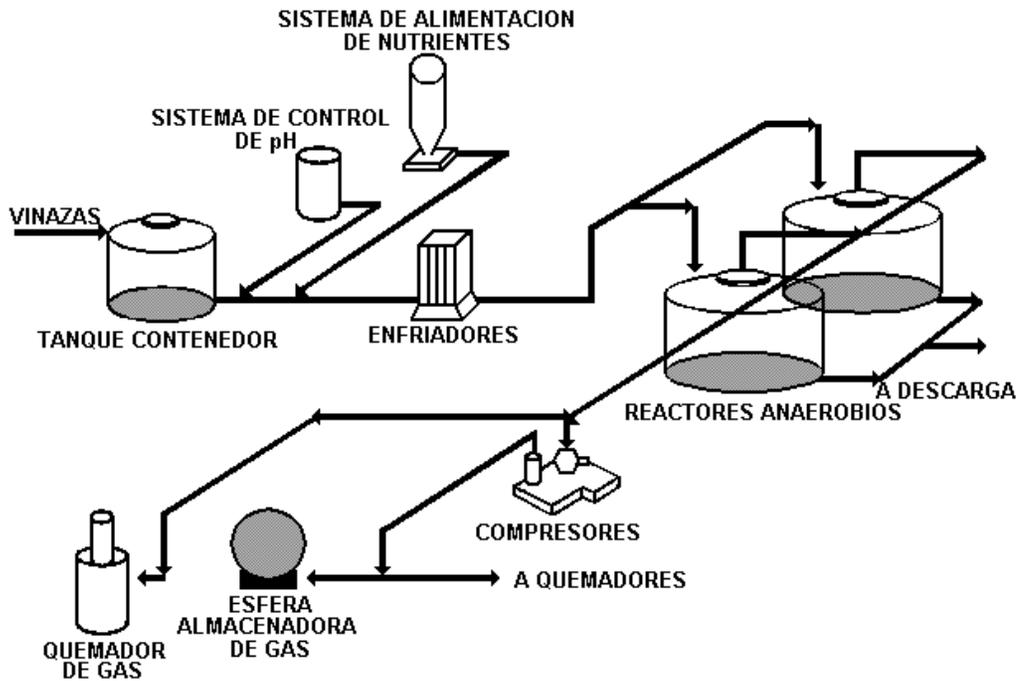
Uno de estos pocos casos es el de la destilería de melazas de caña más grande del mundo, perteneciente a Bacardi Corporation, en San Juan Puerto Rico; quien transforma sus efluentes a metano en una planta de digestión anaerobia, que emplea un reactor filtro anaerobio de innovador diseño, patentado por ellos mismos después de un largo periodo de desarrollo, el cual utiliza los conceptos básicos del filtro anaerobio desarrollado por Young y McCarthy.

La planta de tratamiento Anaerobio de Bacardi Corporation (ver figura 9) se compone básicamente de un tanque contenedor de vinazas para regular el flujo, dos tanques de almacenamiento con sistema de alimentación para la regulación y

el control del pH, un sistema de alimentación de nutrientes, una torre de enfriamiento e intercambiadores de calor para el control de la temperatura de la alimentación, estaciones de bombeo y el reactor filtro anaerobio empacado con un medio plástico para proporcionar el área superficial necesaria para que se forme el metano y se adhieran las bacterias; así como de tres compresores de baja presión para conducir el gas producido directamente a las calderas y uno de alta presión para enviar cualquier exceso de gas a una esfera almacenadora, y un quemador de gas para consumir el gas en caso que la esfera se encuentre llena o que las calderas se encuentren en paro.

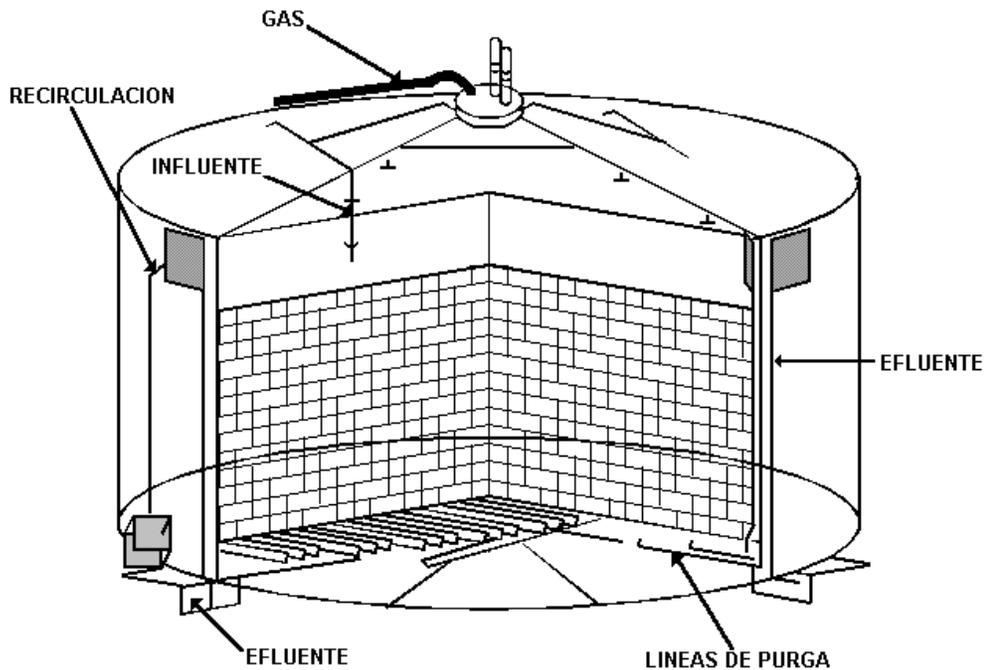
El reactor filtro anaerobio, mostrado esquemáticamente en la figura 10, es el elemento esencial de la planta de tratamiento anaerobio. Este reactor es un tanque de acero relleno con un medio plástico, llamado B.F. Goodrich "Vinyl Core", fabricado por la unión alternativa de láminas de plástico planas y corrugadas soldadas para formar empaques rectangulares de 5.08cmx5.08cmx10.16cm con los lados verticales en forma de canales ondulados que guían el flujo descendente del líquido sobre los costados de los empaques de manera que este entre en contacto con los microbios, los cuales tienden a adherirse a el medio plástico hasta formar una masa microbial de un espesor aproximado de **0.16cm**. Mientras tanto, las burbujas del gas formado se elevan hacia lo alto del reactor, proporcionando una mayor dispersión del líquido y una turbulencia adicional que mejora el contacto del líquido con los microorganismos.

El medio plástico se encuentra soportado dentro del reactor, sobre vigas de concreto que se elevan a una altura de 76.2cm de un fondo, el cual está ajustado con una cuadrícula de tubos perforados a través de los cuales el gas o el agua pueden ser bombeados cuando se necesita purgar el medio. Los empaques plásticos de las capas inferiores deben tener paredes de mayor espesor para soportar el peso de las capas superiores. El piso del reactor filtro anaerobio, está equipado con 24 puertos para la recirculación de líquido de las capas inferiores, por medio de 8 bombas de 1.5 HP, hacia lo alto del reactor. En tanto que el efluente, sale a través de 8 tubos ascendentes, adyacentes a la superficie interior de la pared del tanque, que aparecen en lo alto del reactor para inundar una caja cercana al tanque, la cual controla el nivel del líquido, y abandonar el reactor por el fondo de la caja hacia una tubería múltiple que lleva a las bombas de salida.



**FIGURA 9.- DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE BACARDI Co. PARA EL TRATAMIENTO DE VINAZAS.**

Fuente: L. Michael Szendrey



**FIGURA 10.- REACTOR FILTRO ANAEROBIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE VINAZAS DE BACARDI Co.**

Fuente: Bolívar J. A.

### **5.2.2.- Aspectos Económicos de la Digestión Anaerobia de Vinazas para la Obtención de biogás (Proceso Bacardi Corporation).**

Los aspectos económicos del proceso anaerobio de vinazas teniendo como base el proceso de Bacardi Corporation, se presentan a continuación teniendo como base de cálculo las condiciones promedio de operación alcanzadas en este sistema (tabla 10) y considerando que se trata de un sistema que es el primero y el más grande en su tipo por lo cual tuvo que ser diseñado conservadoramente, pudiendo tener características no esenciales o sobrediseños que reducirían el costo de capital en una planta futura, a la vez que fue instalado bajo restricciones de tiempo por lo que no ha alcanzado aún el estado óptimo de operación, de manera que el análisis económico que se presenta es una aproximación .

**TABLA 10.- BASES DE CALCULO PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS (PROCESO BACARDI Co).**

Capacidad de la destilería [l/día]:	60,000
Volumen de vinazas generadas / volumen de alcohol:	15
Volumen total de vinazas generadas [l/día]:	900,000
Días de operación por año o zafra de 6 meses:	180
Mano de obra requerida [No empleados]:	10
Tiempo de retención hidráulica [días]:	8 – 10
DBO <sub>5</sub> removido [%]:	80%
COD removido [%]:	70%
pH del influente:	4.2-4.7
pH del efluente:	7.2-7.5
Temperatura del efluente [°C]:	36.7-40
DBO <sub>5</sub> de la alimentación [kg/l o ppm]:	0.042
l de gas producido/kg de DBO removido	720
Volumen de gas producido [m <sup>3</sup> /día]:*	21,772.8
Valor calorífico del gas producido [kcal/ m <sup>3</sup> ):	8,000
Energía producida [kcal/día]	174,182,400
Precio del petróleo tipo Bunker C [US\$/ton]:	215.13
Poder calorífico del petróleo tipo Bunker C [Kcal /kg]:	10,287
M.O: Se considera un sueldo promedio de US\$914.63/mes para los 10 empleados x 6 meses más un 100% de prestaciones, IMSS, comedor y demás gastos	

Fuente: Bolívar J. A.

Así mismo, la tabla 11 presenta el costo de la inversión requerida para la instalación de una planta de tratamiento anaerobia similar a la de Bacardi Co, con la correspondiente adaptación de costos de acuerdo al tamaño de la planta que se a venido manejando en este trabajo.

**TABLA 11.- COSTOS DE CAPITAL Y DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA ANAEROBIO DE BACARDI CORPORATION**

<i>EQUIPO</i>	<i>COSTO [US\$]</i>
Estudio de suelos y pruebas	35,925
Seguro de equipo	2,874
Piloteado	290,274
<b>INVERSIÓN EN PREPARACIÓN DEL LUGAR</b>	<b>329,073</b>
Diseño	1,392,615
Contratista general	1,873,660
<b>INVERSIÓN EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>	<b>3,266,276</b>
Filtro anaerobio	2,241,790
Medio plástico B.F. Goodrich	900,401
Tanque de agua	119,162
Pintura	46,174
<b>INVERSIÓN EN EQUIPO DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>3,307,528</b>
Bombas, quemador de gas, compresores, mezcladores, alimentador de químicos y cáusticos, transformador, centro de control de motor, etc.	945,762
<b>INVERSIÓN EN EQUIPO MENOR</b>	<b>945,762</b>
Equipo de almacenamiento (esfera)	161,585
Instalación	39,758
<b>INVERSIÓN PARA REACONDICIONAR CALDERAS</b>	<b>201,343</b>
Panel de control principal	392,126
Instalación	20,872
Eléctrico	110,020
Varios	40,917
<b>INVERSIÓN EN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL</b>	<b>563,935</b>
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>	<b>8,613,916</b>

Fuente: Bolívar J. A.

En lo que respecta a los gastos operativos totales del proceso (ver tabla 12) estos se calculan en US\$2,215,693.51, los que se encuentran compuestos por US\$ 1,999,379 en gastos fijos (ver tabla 12.A) y US\$216,314.51 en gastos variables (ver tabla 12.B), los cuales tenderán a disminuir conforme la eficiencia del sistema lo haga.

**TABLA 12.- GASTOS OPERATIVOS ANUALES TOTALES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS (PROCESO BACARDI Co).**

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTOS [US\$]</b>
Gastos fijos anuales totales	1,999,379
Gastos variables anuales totales	216,314.51
<b>GASTOS OPERATIVOS TOTALES</b>	<b>2,215,693.51</b>

**TABLA 12.A.- GASTOS FIJOS ANUALES TOTALES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS (PROCESO BACARDI Co)**

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTOS [US\$]</b>
Depreciación de equipo	501,857
15% de interés anual sobre la inversión	1,292,087
Salarios y Pagos*	54,878
Seguros (1% A.F.)	50,186
Mantenimiento (2% A.F.)	100,371
<b>GASTOS FIJOS TOTALES</b>	<b>1,999,379</b>

(\*) Se considera un sueldo promedio de US\$914.63/mes para los 10 empleados, durante 6 meses más un 100% por prestaciones.

**TABLA 12.B.- GASTOS VARIABLES ANUALES TOTALES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS (PROCESO BACARDI Co)**

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTOS [US\$]</b>
Energía Eléctrica	163,715.16
Químicos (hidróxido de sodio, agente neutralizante)	52,599.35
<b>GASTOS VARIABLES TOTALES</b>	<b>216,314.51</b>

En tanto los beneficios económicos de la digestión anaerobia de las vinazas se encuentra en el valor que tiene la energía generada a partir del biogás producido en el sistema, teniendo presente el valor que representaría producirla a partir de combustibles de petróleo, como se muestra en la tabla 13.

**TABLA 13.- GANANCIAS ANUALES TOTALES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS (PROCESO BACARDI Co)**

<b>CONCEPTO</b>	
Volumen de gas producido [m <sup>3</sup> /año] :	3,919,104
Energía producida [Kcal/año] a partir de las melazas :	31,352,832
Poder calorífico del petróleo tipo Bunker C [Kcal/kg] :	10, 287
Petróleo Bunker equivalente a la energía producida* [ton/año] :	3,048
Precio del petróleo tipo Bunker C [US\$/ton] :	215.13
<b>GANANCIAS ANUALES TOTALES</b>	<b>655,71.24</b>

Cabe mencionar que los beneficios económicos de la digestión anaerobia de vinazas para la obtención de biogás vendrán a ser más favorables conforme se incremente el volumen de vinazas tratadas o el gas producido aumente, y desde luego con cualquier elevación significativa en los precios del petróleo.

### **5.2.3.- Ventajas y Desventaja de la Digestión Anaerobia de Vinazas para la Obtención de biogás.**

Las principales ventajas que presentan la digestión anaerobia de las vinazas en biodigestores para la obtención de biogás, son:

- Una disminución de la carga orgánica (DBO) de los efluentes hasta de un 80%.
- La reducción de los gastos de combustibles por la recuperación y utilización del biogás generado.
- La posibilidad de una generación local de energía eléctrica en la destilería.
- Se elimina la necesidad de utilizar algún otro combustible en la destilería.
- La posibilidad de utilizar la masa bacteriana como biofertilizante.
- Una reducción de los largos tiempos de retención requeridos por otros sistemas de tratamiento anaerobios.
- El área relativamente pequeña para el sistema de tratamiento, debido al menor volumen del tanque (reactor) ocasionado por el medio plástico que sirve como área de contacto.

Otras ventajas adicionales que se pueden lograr con la utilización del reactor empleado en la planta Anaerobia de Bacardi Corporation, son:

- Una flexibilidad en el sistema de tratamiento ya que el reactor puede manejar grandes variaciones de carga.
- Un menor requerimiento de energía en comparación con otros digestores de contacto comparables debido a que el filtro anaerobio de requerirá sólo 12 HP para el mezclado en comparación con los 500 HP requeridos por los otros digestores de contacto.
- El sistema producirá mucho más energía de la que consuma.
- La capacidad de paro y arranque ya que los paros de mantenimiento no afectan la estabilidad del sistema.
- Capacidad para tratar altas cargas contaminantes.
- La posibilidad de que el sistema se pague por sí sólo con la utilización de los productos generados (biogás y lodos).
- La generación de un combustible limpio y perfectamente utilizable para ser quemado en las calderas para producir vapor y en las turbinas de gas para producir electricidad o como combustible en motores de combustión interna.

Las principales desventajas que presenta la digestión anaerobia de las vinazas en biodigestores, además de los altos costos de inversión, son básicamente las mismas dificultades que presentan cualquiera de los otros dispositivos de digestión anaerobia, derivados de los grandes volúmenes de vinazas y altas cargas orgánicas, que originan largos tiempos de retención y la necesidad de un tratamiento aerobio adicional para alcanzar los límites permisibles de la normatividad ambiental vigente.

### **5.3.- TRATAMIENTO AEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA PROTEICA**

#### **5.3.1.- Descripción del Tratamiento Aerobio para la Producción de Biomasa Proteica**

La escasez de proteínas, en la mayoría de los países en desarrollo, así como los problemas de contaminación del agua ha motivado la realización de estudios encaminados a producir biomazas de proteínas simples a partir de la fermentación

aeróbica de algunos desechos industriales. Este es el caso de las vinazas de melazas de caña, las cuales han tratado de ser utilizadas para la producción de biomasa proteica, principalmente de levadura torula utilis (normalmente llamada Candida Utilis) o hongos filamentosos con un valor nutritivo hasta de un 50% en proteínas que ofrece la posibilidad de utilizarla como fuente proteica en dietas de animales, mono y poligástricos, así como de peces; conjuntamente con la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del 50 al 65% y del 55 al 80% en su Demanda Química de Oxígeno (DQO), en estas.

La tabla 14 compara los procesos de producción de biomasa proteica con los microorganismos más utilizados a partir de la digestión aerobia de vinazas.

**TABLA 14.- COMPARACION DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA PROTEICA**

PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE TORULA UTILIS	PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE FUNGOS FILAMENTOSOS
Proceso caro	Mayor reducción de DBO que la obtenida en el caso de la Torula
Necesidad de condiciones de producción cuidadosamente controladas	Sensibilidad reducida de los hongos a las variaciones de temperatura
Equipo para la separación de la biomasa de costo elevado (centrifugas)	Facilidad en la recuperación de la biomasa producida en el proceso a través de la utilización de coladores en lugar de centrifugas
Nutrición artificial costosa	

Fuente: Araujo, N. de Q.

El proceso de fermentación aerobia para la obtención de biomasa proteica pertenece a los tratamientos biológicos del tipo aerobio; en los cuales la materia orgánica biodegradable disuelta en el agua de desecho es desdoblada, por la acción de microorganismos o bacterias, en compuestos más sencillos y estables, tales como bióxido de carbono, agua, nitratos y sulfatos, al ponerse en contacto

con una densa población de microorganismos capaces de utilizar esta materia orgánica como nutrientes para desarrollarse en presencia de oxígeno.

En el proceso de fermentación aerobia, la degradación de la materia orgánica, se lleva a cabo por varios mecanismos y se realiza de la siguiente manera:

- Los sólidos suspendidos y muy finos se eliminan por medio de la adsorción y coagulación al ponerse en contacto con el lodo biológicamente activo.
- Parte de la materia orgánica soluble se remueve inicialmente por absorción al poner en contacto los desechos con el lodo biológicamente activo, el cual la consume o almacena en las células como reserva de alimento.
- La materia orgánica restante en disolución se remueve progresivamente mediante la oxidación de la materia celular biológica durante el proceso de aireación, resultando en la síntesis de nuevos organismos y en la producción de bióxido de carbono y agua.
- Las partículas grandes se subdividen por medio de la hidrólisis antes de oxidarse.

Estos hechos se pueden ilustrar con las siguientes ecuaciones:

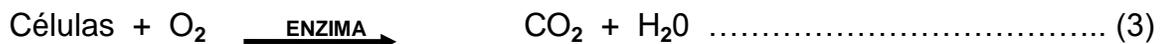
Oxidación de la materia orgánica:



Síntesis de la materia celular:



Oxidación de materia celular:



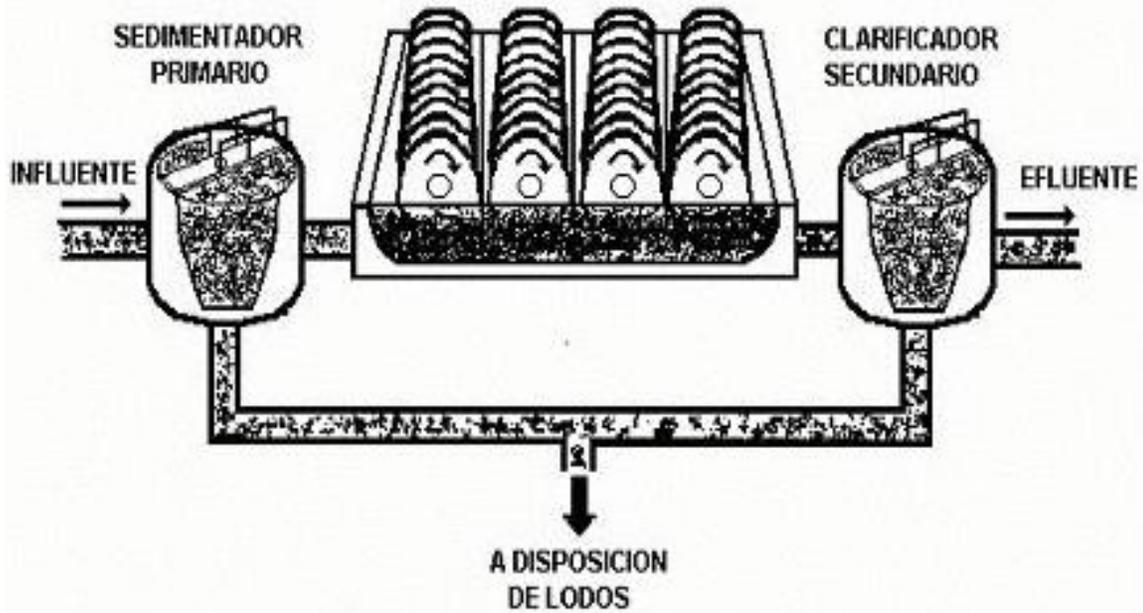
Como se puede observar en las ecuaciones anteriores que representan la fermentación aerobia, el oxígeno libre disponible en el medio de fermentación, ya sea el disuelto en el agua o el proporcionado por algún otro medio, es el factor clave que limita la capacidad de purificación del efluente y la formación de la biomasa microbial, ya que cuando los organismos aerobios utilizan los nutrientes orgánicos consumen al mismo tiempo el oxígeno disuelto y al no reponerse el crecimiento aerobio se detiene.

Otro factor, de gran importancia, para el buen desarrollo de la biomasa proteica y purificación del efluente, es la presencia de N y P; por lo que la adición de pequeñas cantidades (de 2 a 4 g/l) de fosfato de amonio y otras sales, es muchas veces deseable para mejorar la producción de la biomasa con una disminución proporcional del DBO en el proceso de tratamiento aerobio. En tanto, el control del pH no afecta significativamente el desarrollo del proceso.

Al igual que en el tratamiento anaerobio para la obtención de biogás, se han experimentado varios dispositivos para llevar a cabo la fermentación aerobia de las aguas de desecho, tales como las lagunas de estabilización aireadas por diversos medios mecánicos y los tanques aireados en los sistemas de lodos activados; sin embargo, el más empleado para el tratamiento aerobio de las vinazas es el sistema de biodiscos, también llamado reactor biológico rotatorio, debido a las ventajas económicas que presenta este sobre los demás dispositivos, originadas por el ahorro en la energía requerida para proporcionar la aireación, aunque puede presentar problemas referentes a una limitación en la capacidad de tratamiento.

El sistema de tratamiento aerobio para la obtención de biomasa proteica a partir de vinazas con el reactor rotatorio, esta constituido básicamente por un sedimentador primario, el cual tiene la función de separar los sólidos suspendidos y dejar enfriar las vinazas; el sistema de biodiscos que es lugar donde se lleva a cabo el proceso de fermentación aerobia propiamente dicha con el desarrollo de la biomasa; y de un sedimentador secundario, en donde los microorganismos desprendidos de los biodiscos en la etapa de fermentación aerobia son separados del agua tratada (figura 11).

El sistema de biodiscos consiste originalmente de una serie de discos de madera o material plástico, con diámetros entre 1 y 4 m, los cuales se encuentran soportados en el tanque por una flecha horizontal que se hace girar, a aproximadamente 1 o 2 r.p.m. cuando un 40% del área superficial de los discos se encuentra sumergidos en el agua, por un medio mecánico motriz acoplado a la flecha. Cuando inicia el movimiento, los microbios contenidos en las vinazas se adhieren a la superficie del material plástico y se desarrollan en ella, hasta que toda el área queda cubierta con una capa o película microbiana.



**FIGURA 11.- SISTEMA DE TRATAMIENTO AEROBIO POR MEDIO DE BIODISCOS**

Fuente: Antonie, R. L.

Al girar los discos, la película biológica adherida a estos entra en contacto, alternadamente, con el agua de desecho que está en el tanque y el oxígeno del aire. Al salir del agua del tanque, los discos arrastran una capa líquida sobre la superficie de la película biológica, lo cual permite la oxigenación del agua y de los microorganismos. Debido a la sucesión de las inmersiones y emersiones, la capa líquida se renueva constantemente. La oxigenación se lleva a cabo por difusión a través de la película líquida que queda adherida a la biomasa, al pasar por el aire del ambiente, los microorganismos utilizan el oxígeno molecular disuelto para efectuar la degradación aerobia de la materia orgánica. Cada vez que pasa por el agua de desecho, la biomasa absorbe materia orgánica la cual es utilizada como fuente de nutrientes para su desarrollo. El exceso de microorganismos se desprende de los discos debido a las fuerzas cortantes originadas por la rotación de estos al pasar por la superficie del agua y son separados posteriormente por sedimentación en el tanque secundario para su acondicionamiento final.

### **5.3.2.- Aspectos Económicos del Tratamiento Aerobio para la Producción de Biomasa Proteica**

Los aspectos económicos del aprovechamiento de las vinazas para la fabricación de biomasa proteica a partir de su tratamiento aerobio es quizás la más difícil de definir; pues depende mucho del precio en el mercado de esta y de la disponibilidad del alimento para ganado en regiones específicas con el cual compite, debido a que ha sido demostrado que la producción de células de proteínas simples a partir de las vinazas no es económicamente competitiva comparada con las otras fuentes de proteínas tales como la soya, cacahuate y semillas de algodón.

Esta desventaja económica es demasiado marcada por los grandes costos de producción y el capital necesarios para su producción, los cuales son difíciles de justificar, aun utilizando biodiscos, debido a la incapacidad económica mostrada en el capítulo anterior, que presentan los tratamientos aerobios con efluentes con una alta carga orgánica como la que presentan las vinazas.

En la actualidad, los principales factores que afectan la rentabilidad económica de la fabricación de biomasa proteica a partir de la digestión aerobia de las vinazas son:

- a) Los costos de los nutrientes fosfáticos y nitrogenados necesarios para el crecimiento de las proteínas, representan arriba del 50% de los costos de producción.
- b) Los procesos de fabricación involucran plantas costosas.
- c) La energía necesaria para la aireación, separación del producto y secado, puede representar arriba del 20 al 25% de los costos de producción.
- d) Los precios de las proteínas en el mundo han tenido una gran desestabilización en los últimos años.

A pesar de lo anterior, el proceso de producción de la biomasa proteica a partir del tratamiento aerobio de vinazas es deseable cuando se considera como finalidad del procesamiento, la disposición de los efluentes y no sólo los aspectos económicos del mismo, ya que con la optimización de la relación costos/ganancias junto con la obtención de un producto con un apropiado contenido de proteínas y aminoácidos, se puede ayudar a reducir el costo total del tratamiento de los

efluentes de la destilería, a la vez que se reduce la cantidad total de la materia orgánica presente en los efluentes.

Otra opción que ha sido estudiada para que el tratamiento aerobio de vinazas sea rentable, es como un proceso complementario de los tratamientos anaerobios de las vinazas en donde se recupera el biogás, ya que la incapacidad económica de los procesos aerobios disminuye conforme la carga de DBO presente en el efluente sea menor, a causa del aumento en su eficiencia.

### ***5.3.3.- Ventajas y Desventajas del Tratamiento Aerobio para la Producción de Biomasa Proteica***

La principal ventaja que tiene el tratamiento aerobio de las vinazas es la obtención de una biomasa proteica con un valor nutritivo equivalente al 27% en proteínas que ofrece la posibilidad de utilizarla como fuente proteica en dietas de animales, monos y poligástricos (rumiantes), así como de peces; conjuntamente con una reducción en su Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del 50 al 60% y del 55 al 75% en su Demanda Química de Oxígeno (DQO). [Araujo, 1977].

En lo que respecta a las desventajas, estas radican principalmente en las dificultades de los tratamientos aerobios con efluentes con una alta carga de materia orgánica y en la dificultad para la comercialización de la biomasa, entre estas podemos citar:

- Las vinazas sólo proporcionan las fuentes de carbono y energía para el crecimiento de la proteína, siendo necesario que el nitrógeno y el fósforo deban ser proporcionados a partir de nutrientes externos.
- El proceso de fabricación involucra plantas costosas.
- La aireación, separación y secado del producto demandan un gran uso de energía.
- La utilización de la biomasa proteica como alimento para animales en las condiciones actuales (80% de humedad y 5 días de almacenamiento) dificulta su comercialización.
- A pesar que el proceso se encuentra en la etapa de desarrollo preliminar, cabe mencionar que el producto tiene limitaciones de mercado debido al

bajo precio de venta que tiene la biomasa seca, mientras que los gastos de transportación serían altos. Provocando que no sea económicamente viable.

- La posible formación de sustancias tóxicas (como purinas), contaminantes del producto, debe ser minimizado de manera que se garantice su calidad.
- El efluente del proceso, en su actual concepción, contiene un valor de DBO elevado, volviéndose necesario, al igual que en el caso de la generación de metano, una reducción de este valor por medio de la utilización de un proceso de tratamiento adicional o paralelo.

## **5.4.- EVAPORACIÓN DE VINAZAS**

### **5.4.1.- Descripción de la Evaporación de Vinazas**

La evaporación de vinazas es una de las alternativas más empleadas para la disposición de las vinazas en los países desarrollados (España Inglaterra, estados unidos), la cual consiste en eliminar una cierta cantidad de agua con el objeto de obtener un jarabe concentrado (sirope), estable al almacenaje, que puede ser empleado como suplemento alimenticio para animales, fertilizante de suelos o para su combustión y/o incineración con la posibilidad de recuperar algunas sales valiosas. En tanto que, el condensado puede ser regresado a la destilería o tratarse en una laguna de aireación simple antes de ser descargada.

Como es de esperarse, tanto el sistema de evaporación como la concentración del jarabe final dependerán de la aplicación que tendrá el jarabe, pues la temperatura y las condiciones de evaporación de vinazas deberán ser las apropiadas para no perjudicar la calidad del jarabe final.

#### **5.4.1.1.- Evaporación de vinazas para su uso directo como fertilizante de suelos.**

La finalidad que se busca con la evaporación de las vinazas para su uso directo como fertilizante de suelos es conseguir una reducción considerable en el volumen a distribuir y lograr así un gran ahorro en los costos de transportación ;y lo que es más importante, disponer de un fertilizante mucho más estable para ser aplicado

cuando sea requerido, puesto que la aplicación de fertilizantes se lleva a cabo normalmente en temporadas fuera de cosecha cuando las vinazas no se encuentran disponibles.

En el caso de que las vinazas sean evaporadas para su uso directo como fertilizante de suelos, estas son generalmente evaporadas hasta conseguir un jarabe estable, a una concentración aproximada de 60 a 70°Brix, para lo cual normalmente son requeridos evaporadores de cuatro a cinco etapas. [Araujo, 1977]

#### **5.4.1.2.- Evaporación de vinazas para su uso como complemento alimenticio para ganado.**

Otra práctica de aprovechamiento de vinazas mucho más común que la evaporación de vinazas para su uso directo como fertilizante de suelos, es su evaporación a un jarabe con una concentración aproximada del 60% en sólidos, conocido en el mercado bajo el nombre de Melazas Solubles Condensadas, o en su defecto secarlas completamente hasta conseguir un producto sólido; que son empleadas en raciones alimenticias de animales, hasta en un nivel del 15%, para cerdos y aves de corral y del 20% para rumiantes, sin ningún problema de aceptabilidad o reacciones fisiológicas, y darles así una valiosa contribución para los requerimientos de energía de los animales.

En la evaporación de vinazas para su aprovechamiento como complemento alimenticio de ganado, mezclado con bagazo o forraje y otros complementos, la concentración del jarabe no es de gran importancia; pues la calidad del jarabe o producto final de la evaporación dependerá únicamente de las características de las vinazas, que provienen de la eficiencia de la fermentación, la cantidad y calidad de compuestos orgánicos no fermentables en el substrato original, y el contenido de cenizas; y solo por cuestiones de estabilidad, se acostumbra concentrarlas entre un 60 y 70°Brix, e incluso hasta secarlas a un producto en polvo que facilite su empaque, almacenado y transportación, no obstante que pueden surgir dificultades por la naturaleza higroscópica de los constituyentes inorgánicos. Sin embargo, las condiciones de temperatura a la cual se lleva a cabo

la evaporación, si es un factor relevante que determina la calidad alimenticia del producto obtenido, ya que de esta dependerá minimizar el desdoblamiento de la materia proteica contenida en las vinazas durante su evaporación.

#### **5.4.1.3.- Evaporación de vinazas para su combustión.**

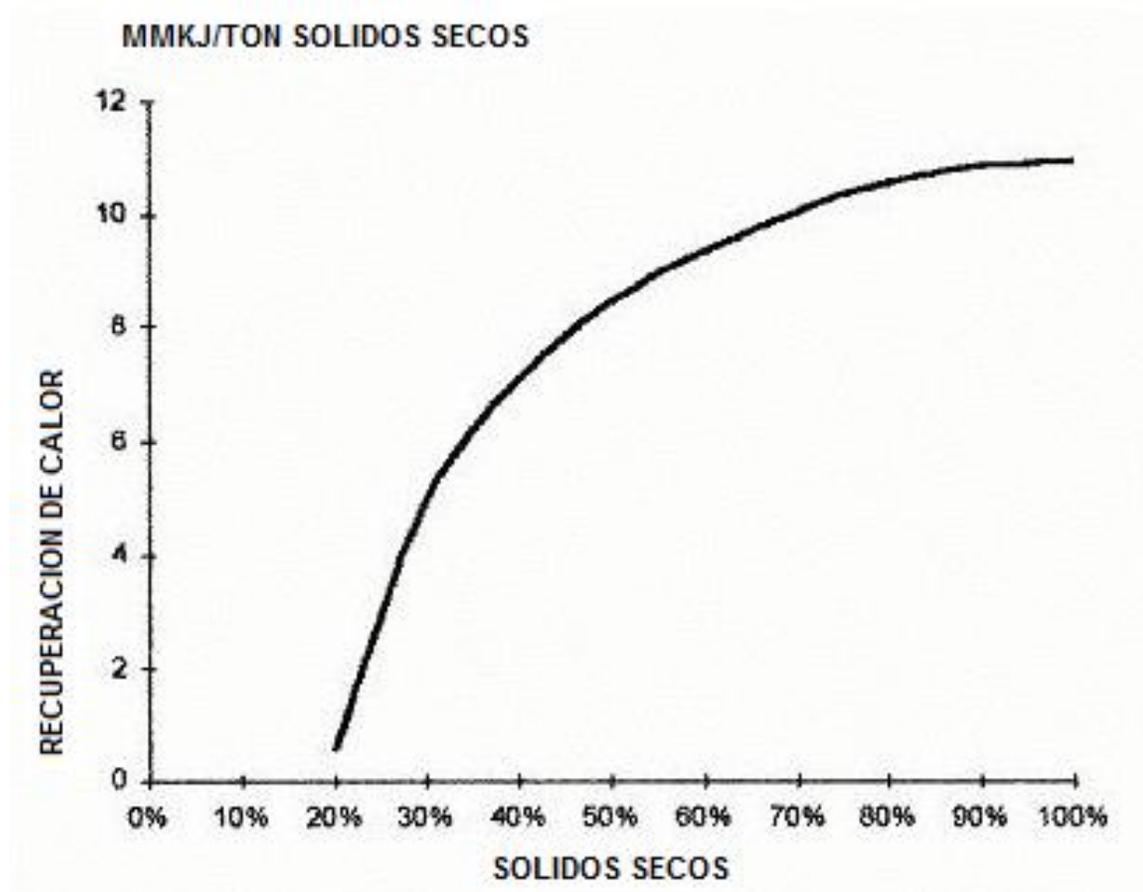
La evaporación de vinazas para su comercialización como jarabe es todavía una operación cara, ya que, incluso con la evaporación de múltiple efecto para la conservación de energía, el precio de venta de los jarabes de vinazas como complemento para ganado o fertilizante no justifican ni guardan proporción alguna con los costos de energía, sin contar con la nula o poca demanda que existe de estos productos en los países tropicales.

A pesar de esto, las vinazas contienen una gran cantidad de compuesto de considerable importancia que pueden ser utilizados para generar la energía necesaria para su evaporación, mediante su combustión, obteniendo además una ceniza con valor comercial como fertilizante.

En teoría, la mayoría de los jarabes de vinazas con un 35% de sólidos secos (35°Brix) se encuentran en condiciones autotérmicas de combustión (figura 12); sin embargo, a estas condiciones, aún se encuentra un alto contenido de agua la cual estará presente en los gases de combustión en forma de vapor de agua, lo cual reduce la capacidad de recuperación de calor. Se recomienda concentrarlas hasta en un 60% en sólidos secos antes de llevar a cabo su combustión. [Kujala, 1979]

En la figura 12, se muestra la recuperación de calor por la combustión de las vinazas de melazas con diferentes contenidos de sólidos secos, antes de la combustión, aunque la relación de materia orgánica y cenizas en los sólidos influye en la cantidad de calor recuperado. Sin embargo, la mayoría de los siropes de vinazas de melazas con un 60% en materia sólida seca producirán el suficiente vapor, tras su combustión, como para cubrir las necesidades de su evaporación en un evaporador de múltiples etapas para las vinazas de tipo tradicional.

La magnitud de la energía que se desprende de la combustión de las vinazas puede ser apreciada cuando se comprende que para operar un evaporador de efecto múltiple de cinco etapas para evaporar 1,250 m<sup>3</sup>/día de vinazas que contienen 8.4% peso en sólidos, se necesitarían alrededor de 13.5-14 ton de vapor/hr. De lo anterior se deduce, que los sólidos en las vinazas tienen un valor calorífico razonable, que oscila entre 3,000 a 3,600 Kcal/Kg.



**FIGURA 12.- RECUPERACIÓN DE CALOR A PARTIR DE LA COMBUSTIÓN DE VINAZAS**  
*Gráfica art. Alfa-Laval*

Fuente: Alfa-laval

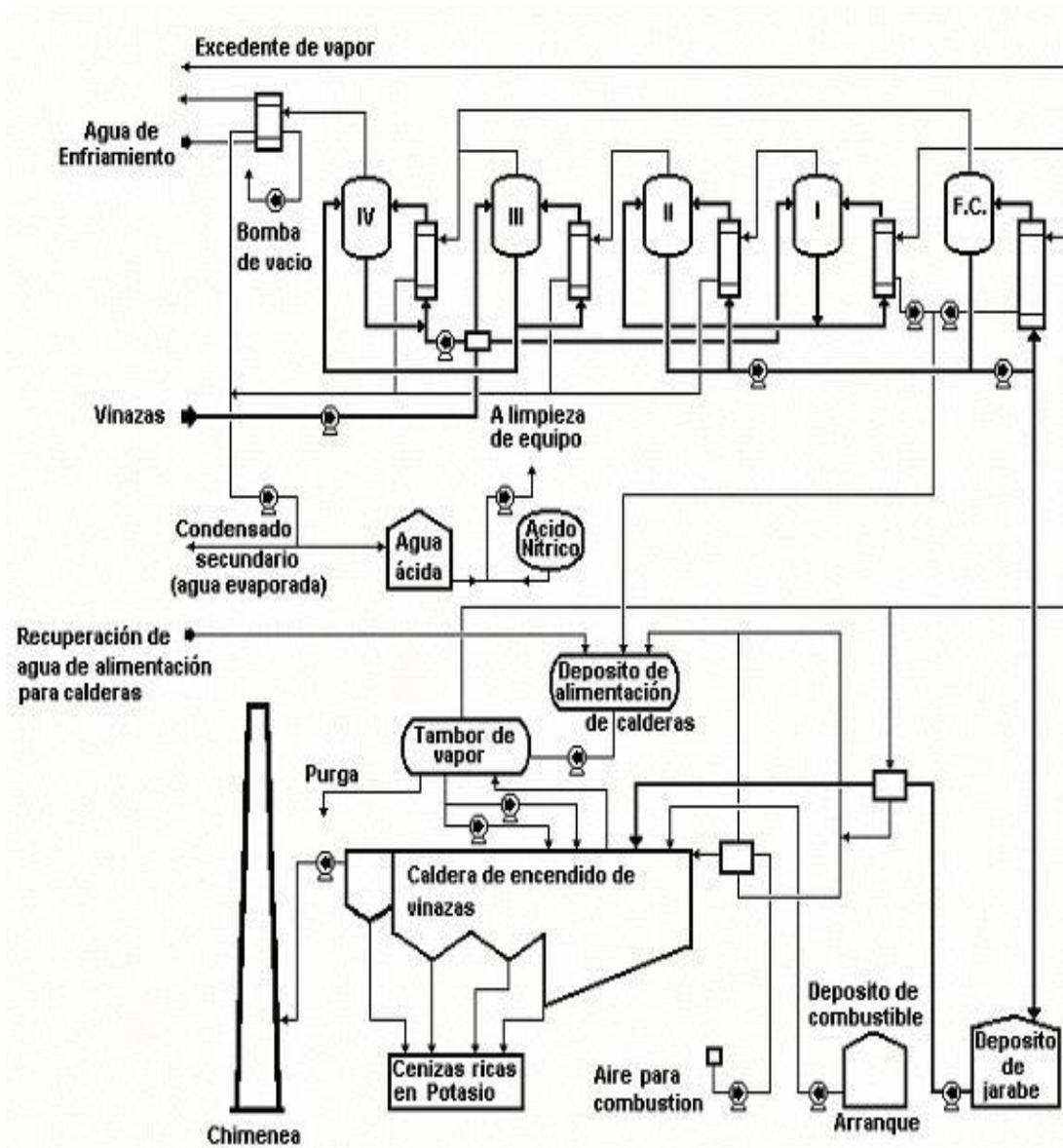
Aparte de la energía calorífica generada por la combustión de la materia orgánica presente en las vinazas de melazas, estas contienen una cantidad razonable de sales (entre un 8 y 16% de sales sulfatadas), principalmente de potasio (alrededor del 30% del peso total de las sales), las cuales aparecen como cenizas después de la combustión y si se pueden recuperar como producto vendible pueden representar un ingreso de valor.

Desafortunadamente, las sales de los metales alcalinos en las cenizas, principalmente los componentes de potasio, tienen una baja temperatura de fusión, por debajo de los 697°C, ya que cualquier fusión de estos compuestos en las cenizas originará un sólido prácticamente insoluble sin ningún valor comercial. La combustión controlada, es por lo tanto esencial; ya que una combustión a muy alta temperatura, para una eficiente recuperación de calor, provocara una posible pérdida de las cenizas, e inversamente para obtener unas cenizas sin fundir, la temperatura de combustión deberá disminuirse, con una menor recuperación de calor.

Se emplean reactores de lecho fluidizado y otros tipos de unidades de combustión, así como la adición de químicos, para poder llevar a cabo una combustión eficiente de los jarabes de vinazas de melazas sin que se fundan las cenizas.

Una de las más interesantes, es una caldera alimentada con jarabes de vinazas de melazas de caña, desarrollada por A. Ahlström Oy de Finlandia, con una cámara de combustión de alta temperatura con un mínimo de fusión de las cenizas, las cuales son extraídas mediante un sistema secundario de recuperación de polvos que alcanza una eficiencia de hasta el 97% de las cenizas generadas, con una buena calidad para la composición de fertilizantes. [Kujala, 1979]

La figura 13, ilustra el diagrama del sistema utilizado para la evaporación y combustión de las vinazas que emplea la caldera antes mencionada.



**FIGURA 13.-SISTEMA DE DESCONTAMINACIÓN DE VINAZAS MEDIANTE SU EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN.**

Fuente: Alfa-Laval

### **5.4.2.- Aspectos Económicos de la Evaporación de Vinazas**

El mayor factor de costo en la evaporación de vinazas para cualquier aplicación, sin atender su combustión, es el vapor empleado en el equipo de evaporación, haciendo que esta operación sólo sea económicamente factible en destilerías anexas a un ingenio en donde exista una alimentación en exceso de bagazo, o en caso de que se obtengan unas muy altas ganancias por los subproductos obtenidos.

Por ejemplo cuando la evaporación de vinazas es llevada a cabo sólo para la obtención de un jarabe o cenizas para ser utilizadas como fertilizante de suelos o como complemento alimenticio, esta es todavía una operación cara; ya que, el precio que alcanzan en el mercado los jarabes obtenidos o la disminución de los costos de transportación, cuando se utilizan para su uso directo como fertilizantes, no justifican los costos de energía utilizada para su evaporación, sin contar con la poca demanda que estos productos tienen.

En tanto que, los aspectos económicos de la evaporación de vinazas seguida de su combustión dependerán en gran medida de la recuperación de las cenizas y de las ganancias derivadas de estas, ya que gran parte del vapor se utiliza sólo internamente, por lo que la factibilidad de esta aplicación recaerá en el nivel de potasio contenido en las vinazas.

A continuación se describen los aspectos económicos de la evaporación y combustión de vinazas en el caso de una destilería que produce unas vinazas típicas, y teniendo como base de cálculo los datos de la tabla 15.

Los datos económicos fueron actualizados al 2016 con apoyo de los indicadores económicos de la revista chemical engineering.

**TABLA 15.- BASES DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN DE VINAZAS**

Capacidad de la destilería [l/día]:	60 000
Consumo de la una unidad de evaporación de cinco etapas [ton/ton de agua evaporada]:	0.227
Los sólidos son concentrados en la unidad de evaporación [% de D.S.]:	60%
Contenido de cenizas inorgánicas en los sólidos de las stillage [%]:	39.6%
Contenido de cenizas de K <sub>2</sub> O [%]:	40%
Precio de venta de las cenizas de K <sub>2</sub> O a la salida del quemador [US\$/ton]:	116.6
Contenido de D.S. en el vapor recuperado después de la combustión a 3.85 ton de vapor/ton de stillage en donde el vapor se encuentra a 4 bar, saturado.	60%
La recuperación de cenizas del quemador [%]:	90%
El costo del agua de alimentación del boiler [US\$/m <sup>3</sup> ]:	0.52
Condensados recuperados del boiler [%]:	60%
Perdidas de vapor exportado del boiler [%]:	5%
El costo del vapor [US\$/ton]:	22.1
El costo de la energía eléctrica [US\$/Kwh]:	0.25
El costo del agua de enfriamiento [US\$/m <sup>3</sup> ]:	0.15
El costo de la mano de obra [US\$/año]:	83,903
Los costos de limpieza química [US\$/ m <sup>3</sup> de stillage evaporada ]:	0.19

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 16.- GANANCIAS EN LA RECUPERACIÓN DE POTASIO Y VAPOR**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Producción de vapor, ton/día	219.4
Ganancias por vapor a US\$ 22.1/ton, US\$/día	4,849
Ceniza recobrada, ton/día	20.3
Ganancias por ceniza a US\$ 116.6/ton, US\$/día	2,367
Ganancia total, US\$/día	7,216
Ganancias anuales a 300 días, US\$ /año	2,164,716.0

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 17.- INVERSIÓN NECESARIA PARA LA EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN DE VINAZAS**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Costo instalado para una planta de evaporación con recuperación de cenizas secas, US\$	4,852,365.1

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 18.- REQUERIMIENTOS DIARIOS DE OPERACIÓN PARA LA EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Vapor de evaporación diario, ton/día	68.9
A US\$ 22.1/ton, US\$/día	1,523
Agua de enfriamiento diario, m3/día	2,330
A US\$ 0.15/m3, US\$/día	349.5
Químicos de limpieza a US\$ 0.19/m3 de stillage, US\$/día	96.7
Agua de alimentación al boiler, m3/día	98.7
A US\$ 0.52/m3, US\$/día	51.3
Consumo de Energía Eléctrica total, kW	160
A US\$ 0.25/kWh, US\$/día	960.0
Costos diarios de operación, US\$/día	2,980.2

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 19.- GASTOS OPERATIVOS ANUALES TOTALES PARA LA  
EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN DE VINAZAS  
(300 días de operación por año)**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Mantenimiento anual, US\$/año	48,8943
Intereses sobre la inversión a 15% sobre la inversión promedio, US\$/año	363,578
Costo de operación anual, US\$/año	894,073.6
Requerimientos de mano de obra, US\$/año	83,903
Total de costos operativos, US\$/año	<b>1,390,497.1</b>
Depreciación de la planta sobre 8 años, US\$/año	606,895
Total de costo operativo con depreciación de la planta, US\$/año	<b>1,997,392.3</b>

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 20.- PERIODO DE RECUPERACIÓN\***

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Inversión (tabla 17) US\$ /año	4,852,365
Ganancias anuales (tabla 16), US\$ /año	2,164,716
Costos operativos anuales sin depreciar (tabla 18), US\$ /año	1,390,497.1
Diferencia de ganancias y costos operativos sin depreciar, US\$	774,218.9
Tiempo de recuperación, años	6.3

Fuente: Alfa-Laval.

$$*\text{tiempo de recuperación} = \frac{\text{inversión}}{\text{Ganancias} - \text{Costos de operación sin depreciar}}$$

### **5.4.3.- Ventajas y Desventajas de la Evaporación de Vinazas**

Las ventajas que se presentan por la concentración de vinazas para su aplicación como fertilizante o complemento alimenticio, son:

- La obtención de un producto estable que puede ser almacenado en tanques de acero al carbono o en recipientes localizados estratégicamente para su distribución.
- Las vinazas concentradas posibilitan su aplicación entre zafras debido a la obtención de unas vinazas mucho más estables al almacenamiento, para una aplicación o venta posterior.
- El número de camiones de transporte y vehículos distribuidores se reducen, cuando se utiliza como fertilizante, conforme la concentración de las vinazas aumente.
- La vida útil de los camiones y vehículos distribuidores aumenta considerablemente, lo mismo al usar material de acero al carbono.

En tanto, las ventajas derivadas de su concentración para su posterior combustión, son:

- Ahorros en combustible para la destilería.
- La recuperación de sales de potasio como producto sólido.
- La eliminación completa del problema de polución originado por las vinazas ya que los únicos productos de este tratamiento son agua, energía y sales, que son completamente aprovechables.

Los problemas encontrados para efectuar la concentración de vinazas son principalmente debidos a la corrosión de los equipos y a la acentuada formación de incrustaciones. Así como los grandes costos en equipo y en energía los cuales difícilmente se podrán justificar con las ganancias obtenidas de los subproductos, en caso de no tomar en cuenta su combustión.

## **CAPÍTULO 6**

### **MEJORAMIENTO AL PROCESO CONVENCIONAL DE LAS DESTILERIAS DE MELAZAS**

En este capítulo se presenta una alternativa de solución para el problema de contaminación generado por las vinazas, que aunque no lo afronta de manera directa, está encaminado a la búsqueda de una disminución en la generación de estos efluentes en las destilerías de alcohol tradicionales mediante un mejoramiento factible en el proceso de fermentación de melazas convencional que no sólo facilita el tratamiento de los efluentes por la disminución del volumen, al conseguirse una mayor eficiencia en la conversión del alcohol, sino que además hace que el tratamiento y la operación de la destilería sean autosuficientes en lo que a energía se refiere.

En el mejoramiento se involucran cuatro pasos que, aunque puede incorporarse de manera individual dentro de las destilerías de melazas, en conjunto generan mejores resultados tanto en lo económico como en la reducción de efluentes, siendo éstos:

- 1.- Mejoramiento en el Sistema de Enfriamiento del Fermentador
- 2.- Reciclamiento de Levaduras
- 3.- Pretratamiento de Melazas
- 4.- Descontaminación de las Vinazas

## **6.1.- MEJORAMIENTO EN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL FERMENTADOR**

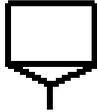
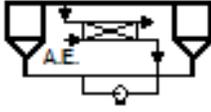
### **6.1.1.- Fundamento del Mejoramiento en el Sistema de Enfriamiento del Fermentador**

Durante la formación del alcohol etílico, por fermentación, alrededor de 287 Kcal/Kg de alcohol producido son liberadas en forma de calor, esto significa que sin cualquier forma de remoción del calor, la temperatura del fermentador podría incrementarse hasta los 37°C, nivel al cual mucha de la levadura pierde actividad dificultándose la fermentación por diversos factores hasta cesar, ocasionando con esto una baja producción de alcohol en el fermentado.

De aquí que, el sistema de remoción de calor en los fermentadores juegue un papel preponderante para mantener la fermentación dentro de un intervalo de temperatura que favorezcan la actividad de la levadura y la reacción biológica; pues dependiendo de las características particulares del inóculo de levadura existe un intervalo específico de temperatura en el que ocurre su máxima actividad. Por ejemplo, la mayoría de la levadura *Saccharomyces Cerevisiae* empleada en la fermentación alcohólica tiene una actividad máxima alrededor de los 32-33°C; no obstante, el intervalo adecuado de temperatura en el cual debe de mantenerse la fermentación puede tener como límite superior los 35°C, con la finalidad de alcanzar el intervalo de temperatura adecuado para minimizar los efectos de las bacterias infecciosas y reducir así subproductos no deseados originados por el ataque bacterial al sustrato.

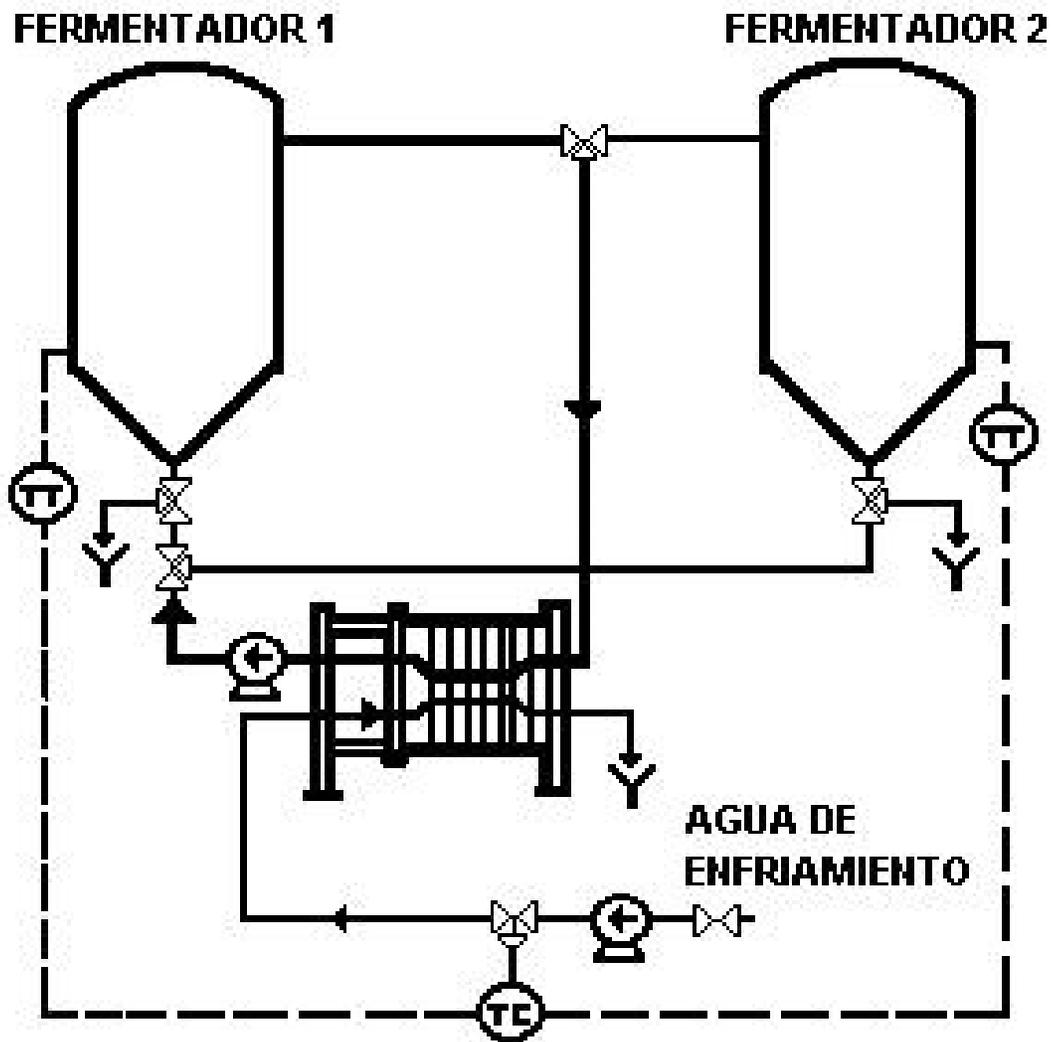
Las destilerías tradicionales emplean métodos de enfriamiento por convección natural en recipientes abiertos, anillos rociadores y serpentines internos, para controlar la temperatura de fermentación dentro del rango de temperatura óptima. Sin embargo, estos sistemas presentan cierta dificultad para mantener el control de la temperatura en el nivel óptimo, sin contar los problemas de operación y mantenimiento que se tienen.

**TABLA 21.- COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN LA FERMENTACIÓN**

CONDICIÓN	CONVECCIÓN Y RADIACIÓN NATURAL	ANILLOS ROCIADORES	SERPENTINES INTERNOS Y OTROS	INTERCAMBIADOR EXTERNO
INICIANDO A 28°C LA FERMENTACIÓN Y A 27°C EL A.E. A LA ENTRADA				
TAMAÑO DEL FERMENTADOR PARA EL PROCESO DE MELLE-BOINOT	Tamaños de laboratorio arriba de 1000 l	Fermentadores arriba de los 20,000l. Relación A/V >2	Todos los tamaños si se da el área de enfriamiento adecuado	Todos los tamaños adecuando el intercambiador y la bomba
INCREMENTO DEL MOVIMIENTO DEL AIRE	Mejora la remoción de calor	Ligera mejora en la remoción de calor	Auxilia a la remoción de calor	Auxilia a la remoción de calor
INCREMENTO EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES	Reducción en la remoción de calor	Reducción en la remoción de calor ligera	Efecto despreciable	Efecto despreciable
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	5-10 Kcal/h,m <sup>2</sup> ,°C	25-50 Kcal/h,m <sup>2</sup> ,°C	200-400 Kcal/h,m <sup>2</sup> ,°C	mas de 3000 Kcal/h,m <sup>2</sup> ,°C
INCLUSIÓN DE UN AGITADOR EN EL FERMENTADOR	Efecto despreciable	Mejora la etapa final de fermentación	Mejora la etapa final de fermentación	No se requiere. La remoción de calor es cte., por la recirculación
FLEXIBILIDAD DE DISEÑO	Ninguno	Ninguno, solo por uso de agua refrigerada	Ninguno, solo por uso de agua refrigerada	Flexible. Los platos se pueden aumentar o disminuir según se requiera
REVESTIMIENTO INTERNO CONTRA LA CORROSIÓN DE LAS PAREDES DEL RECIPIENTE	Actúa como aislante en la remoción de calor	Actúa como aislante en la remoción de calor	Reducción despreciable en la remoción de calor	Reducción despreciable en la remoción de calor
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y CORROSIÓN	Si es acero al carbón, tiene vida limitada por la corrosión	Si es acero al carbón, tiene vida limitada por la corrosión	El recipiente se puede recubrir pero el serpentín si sufre corrosión	El recipiente se recubre, y el sistema es de material inerte a la corrosión, con amplia vida
LIMPIEZA Y CONTROL DE INFECCIÓN	Fermentador sin internos, fácil de limpiar	Fermentador fácil de limpiar. En los externos crecen algas y otros. La dureza del agua causa escamas en el sistema	Serpentines y soportes esconden bacterias dañinas difíciles de limpiar. Los tubos se escaman fácilmente	Fermentador sin internos fácil de limpiar. El intercambiador se desarma y limpia fácilmente, aunque rara vez será necesario

Fuente: Alfa-Laval.

En cambio, con la instalación de un sistema de enfriamiento externo por medio de un intercambiador de calor de platos con recirculación, como el mostrado en la figura 14, se lograría una mejora notoria en la etapa de fermentación en la destilería, debido a las ventajas que ofrece este sistema sobre los sistemas de enfriamiento tradicionales, mostradas en la tabla 21.



**FIGURA 14.- SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLATOS EXTERNO.**

Fuente: Alfa-Laval

### **6.1.2.- Aspectos Económicos del Mejoramiento en el Sistema de Enfriamiento del Fermentador**

Puesto que los tamaños de la mayoría de los fermentadores industriales (0.25 hasta 30 m<sup>3</sup>) requieren de la instalación de un sistema de enfriamiento, no es posible realizar una evaluación económica de los beneficios de su instalación, siendo sólo en los diferentes sistemas en donde se puede hacer una comparación económica, ya que de una u otra forma se tiene que implementar cualquier sistema.

En lo que respecta a los costos de capital, el método de enfriamiento con anillos rociadores es el de más barata instalación pero presenta problemas de corrosión y oxidación, y principalmente tiene poca eficiencia térmica por lo que se restringe a fermentadores de tamaño reducido; ya que no es aconsejable su uso en fermentadores de tamaño superior a 25 m<sup>3</sup> de capacidad, que sólo se encuentran en destilerías pequeñas.

En el caso de los serpentines, es sumamente importante proporcionar al fermentador una buena relación entre el diámetro y la altura a fin de que los modelos de movimiento del líquido fermentado proporcionen una efectiva transferencia de calor; sin embargo, en la fermentación de melazas a este aspecto se le da muy poca consideración, lo cual viene a ser desventajoso.

Con el sistema de enfriamiento externo del intercambiador de calor de platos los aspectos de diseño son de nula consecuencia, puesto que los fermentadores pueden ser diseñados en cualquier relación altura/diámetro, sin que la eficiencia de enfriamiento se vea afectada pues éste no depende de los modelos de movimiento que existen dentro del fermentador. En tanto que, el tamaño tampoco es un factor limitante; lo que implica una mayor simplicidad en el diseño del recipiente y la construcción en el sitio con la correspondiente reducción de costos.

Además, en la utilización del intercambiador de calor de platos para un par de fermentadores, el material necesario para su instalación debe ser treinta veces menor al de un serpentinado de similar espesor al de los platos, por reducirse en esa misma cantidad el área de enfriamiento ; y la energía empleada por la bomba, se conserva en un nivel razonable debido a que la energía de la bomba es sólo la

necesaria para vencer la caída de presión debida a la fricción a través del intercambiador de calor y la tubería. Al mismo tiempo, que la bomba reemplaza la necesidad de instalar un agitador dentro del fermentador, el cual si se instala en un recipiente de gran capacidad, bien podría exceder la energía empleada por la bomba.

Datos económicos acerca de la instalación del sistema de enfriamiento externo del fermentador, son dados en el apartado 6.2 conjuntamente con los del sistema del reciclamiento de levadura.

### ***6.1.3.- Beneficios por el Mejoramiento en el Sistema de Enfriamiento del Fermentador***

El mejoramiento en el sistema de enfriamiento de los fermentadores, por la instalación del sistema de enfriamiento externo con intercambiador de platos, para el mejor control de la temperatura traerá los siguientes beneficios dentro del proceso:

#### ***Incremento del alcohol producido***

Al controlar la fermentación a la temperatura óptima se favorecerá la actividad óptima de la levadura y se evitara la reproducción de bacterias infecciosas, originando que más azúcares sean convertidos en alcohol y disminuyendo los subproductos no deseados de una fermentación ineficiente. A la vez que, se reducirán las pérdidas de alcohol por evaporación que existen con el desprendimiento del bióxido de carbono.

Por otro lado, con la utilización del sistema de enfriamiento externo, se asegura el íntimo contacto de la levadura y los azúcares durante toda la fermentación, debido a la agitación lograda por el sistema de recirculación, con una máxima oportunidad para su conversión que se verá reflejada en una mayor eficiencia en la fermentación.

#### ***Incremento en la capacidad de producción***

Al lograr un mejor control de la temperatura de enfriamiento se conseguirá la disminución del tiempo necesario para llevar a cabo la fermentación, logrando con

esto un turno de operación más corto para los fermentadores y un incremento de la producción para el mismo equipo. Otra alternativa de esta ventaja que puede ser preferible, es emplear el tiempo ahorrado en la fermentación en alcanzar una mayor concentración de alcohol en el fermentado; siempre y cuando las características de la levadura puedan tolerar el alto nivel de concentración de alcohol sin ninguna pérdida apreciable en la actividad, para producir una mayor cantidad de alcohol para un mismo volumen de agua de dilución inicial; mejorando con ello la eficiencia en la utilización del vapor en la columna de destilación primaria además de disminuir el volumen de los efluentes generados.

### ***Conservación del agua de enfriamiento***

Con el intercambiador de calor de platos como sistema de enfriamiento que tiene un coeficiente global de transferencia de calor mayor a 15 veces el de un serpentín y de 120 veces que los enfriadores de anillos rociadores, la diferencia promedio de temperaturas entre el fermentado y el agua de enfriamiento será menos crítica. Bajo estas circunstancias, las características de la transferencia de calor del sistema de enfriamiento mejoran notoriamente, sobre las otras formas de enfriamiento, utilizándose menos agua de enfriamiento.

### ***Disminución en el tiempo de paro***

En la fermentación por lotes es necesario un lapso para realizar la limpieza de los recipientes entre el vaciado y el llenado del siguiente lote esto no es una tarea fácil con los sistemas de enfriamiento tradicionales; al formar éstos parte del recipiente, la capacidad de tener una superficie lisa se pierde por la presencia de los accesorios internos que sirven de escondite para la materia contaminante, además de originar mayor oxidación del recipiente; y lo que es más importante, un mayor tiempo para este procedimiento.

En cambio, con el sistema de enfriamiento externo del intercambiador de calor de platos, la limpieza del recipiente será una tarea fácil pues éste no tendrá obstrucciones internas por lo que el tiempo de mantenimiento será corto, y el recipiente tendrá largo tiempo de vida por no estar sujeto a corrosión.

### ***Flexibilidad para cambios de operación***

En los sistemas de enfriamiento donde se emplean serpentines, anillos rociadores y otros métodos de “áreas fijas”, la adaptación cuando existe un cambio en las

condiciones del proceso en el cual se requiera que el calor de fermentación sea rápidamente removido se originan grandes problemas; puesto que los intentos por remover una mayor cantidad de calor provoca que el incremento en el flujo de agua de enfriamiento este limitado por la caída de presión del sistema y solamente podría ser resuelto empleando agua refrigerada en el sistema o con la instalación de superficie de enfriamiento extra que no incremente la caída de presión.

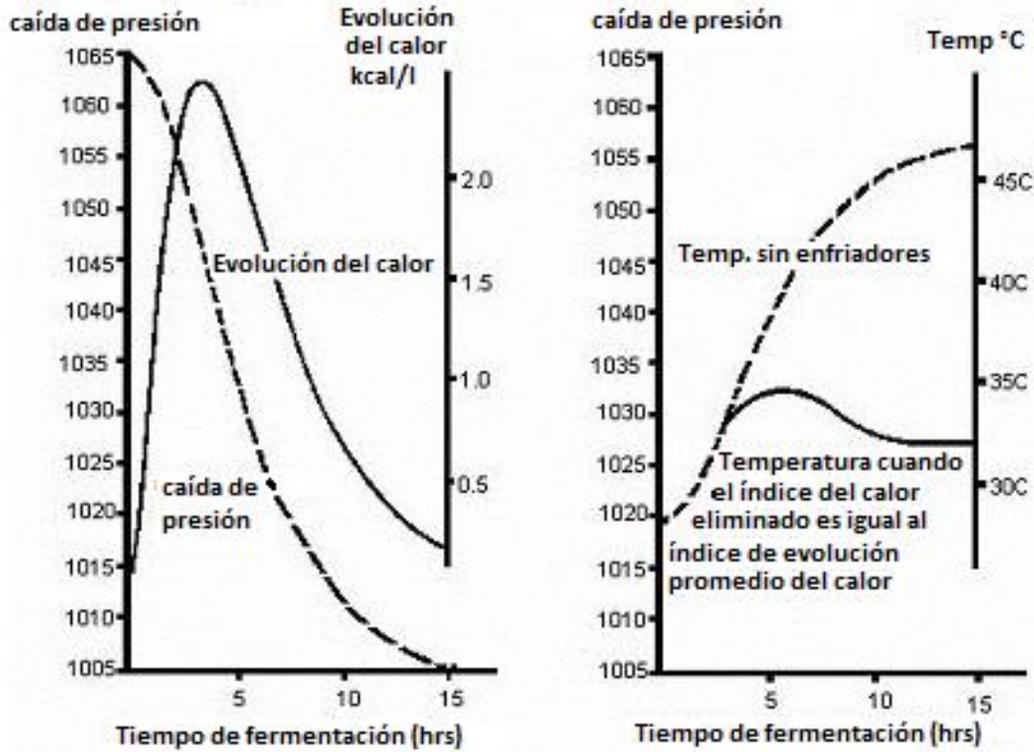
Sin embargo ambas opciones son costosas y complicadas, tanto en el diseño como en su instalación, éste no es el caso cuando se trata del sistema de enfriamiento externo con el intercambiador de calor de platos, debido a la flexibilidad que tiene el sistema para alterar su superficie de enfriamiento por la inclusión de platos extras con un mínimo incremento en la caída de presión sin ningún cambio en el sistema de fermentadores y a un bajo costo.

#### ***Ahorro en los costos de instalación del sistema de enfriamiento.***

En los métodos de enfriamiento tradicionales, requieren que cada recipiente fermentador sea equipado con los accesorios de enfriamiento, aunque el sistema de enfriamiento sólo sea requerido para una parte del ciclo de uso del fermentador, que no incluyen las etapas de limpieza, llenado, vaciado en donde estos accesorios las complican.

En cambio, cuando se instala el sistema de enfriamiento externo con el intercambiador de calor, con un arreglo de tuberías adecuado, el intercambiador de calor de platos y su sistema de bombeo para la recirculación puede ser unido a cualquier número de recipientes fermentadores, reduciendo de este modo el capital invertido a un mínimo. En la práctica, el mejor arreglo es el sistema en pares mostrado en la figura 14 en el cual un intercambiador de calor de platos y las bombas sirven a dos recipientes fermentadores, originando que los lotes de los fermentadores sean operados secuencialmente con cada par, lográndose los mayores beneficios del equipo por su continuo uso, sin mayor dificultad ya que el cambio entre el par de fermentadores es por la simple aplicación de aperturas y cierres de válvulas.

La figura 15 muestra la evolución del calor durante la fermentación así como las diferencias entre las curvas de temperatura de un sistema con enfriamiento y uno sin él.



**FIGURA 15.- EVOLUCIÓN DEL CALOR DURANTE LA FERMENTACIÓN Y CURVAS DE TEMPERATURAS.**

Fuente: Alfa-Laval.

## **6.2.- RECICLAMIENTO DE LEVADURA**

### **6.2.1.- Fundamento del reciclamiento de levadura**

En los métodos de fermentación tradicional, el grado de formación de alcohol, de acuerdo al coeficiente de Pasteur, se encuentra por debajo del 95% del rendimiento de la reacción química (Gay Lussac) ya que algunos de los azúcares producen productos secundarios de fermentación. En una población de levadura de 50-60 millones de células por milímetro para una fermentación convencional, por lo menos del 2 al 3% de los azúcares son también utilizados para la formación de levadura, cuando se lleva a cabo en tiempos normales; y hasta de un 6% cuando se necesitan tiempos cortos de fermentación, por requerirse una alta concentración de levadura. Sin embargo, estas pérdidas pueden ser evitadas en gran parte por la reutilización de la levadura.

En 1960, Firmin Boinot patentó un proceso para fermentaciones alcohólicas por medio de la recuperación de levadura después de completarse la fermentación y su posterior reciclamiento en el sustrato fresco. Esto proporciona un método mediante el cual la levadura activa, a una concentración alta, puede ser utilizada varias veces más, con una disminución en el tiempo de fermentación y un incremento en la producción de alcohol por arriba de un 10% en volumen sobre los métodos tradicionales de fermentación.

En este proceso (ver figura 16), la levadura es separada después de completarse la fermentación por medio de un separador de levadura para posteriormente ser reciclada a un nuevo proceso fermentativo con sustrato fresco. Antes de regresar la levadura a la fermentación, se acidula la masa húmeda que la contiene a un pH de 3 ó menor, manteniéndola agitada por un periodo de 3 hrs ó más, con lo cual se previene una excesiva coagulación y se disminuye la infección bacteriana, que puede afectar su actividad.

Esta etapa en el proceso de acidulación, es normalmente realizada con ácido sulfúrico y puede sustituir la adición del ácido que va a la fermentación para la corrección del pH; y en algunas ocasiones el dióxido de carbono, generado en la fermentación, puede ser empleado para rociar la masa húmeda y lograr un pH bajo, con el efecto de agitación deseado.

No obstante el cuidado proporcionado para que la levadura permanezca en una condición altamente activa, durante el proceso, existirá una pequeña pérdida de su actividad potencial conforme las células mueren por los sucesivos reciclamientos; y aunque esto, frecuentemente, no es perceptible por el crecimiento de levadura fresca dentro del sustrato durante la fermentación será necesario que sea repuesto con una cantidad no mayor de un 3% por pérdidas para el mantenimiento de la viabilidad de la levadura, siempre y cuando sean tomados todos los medios razonables para prevenir la infección bacteriana. Siendo preferible que esta reposición sea realizada en intervalos regulares con levadura fresca activa producida en una planta de propagación de levadura igual a la de una destilería convencional.

Por otro lado, las células de levadura muertas no se acumulan debido a que éstas se degradan a partículas de tamaño pequeño y, al igual que cualquier bacteria de

tamaño micro pequeño, serán arrastradas en el fermentado deslevadurizado que va a la etapa de destilación.

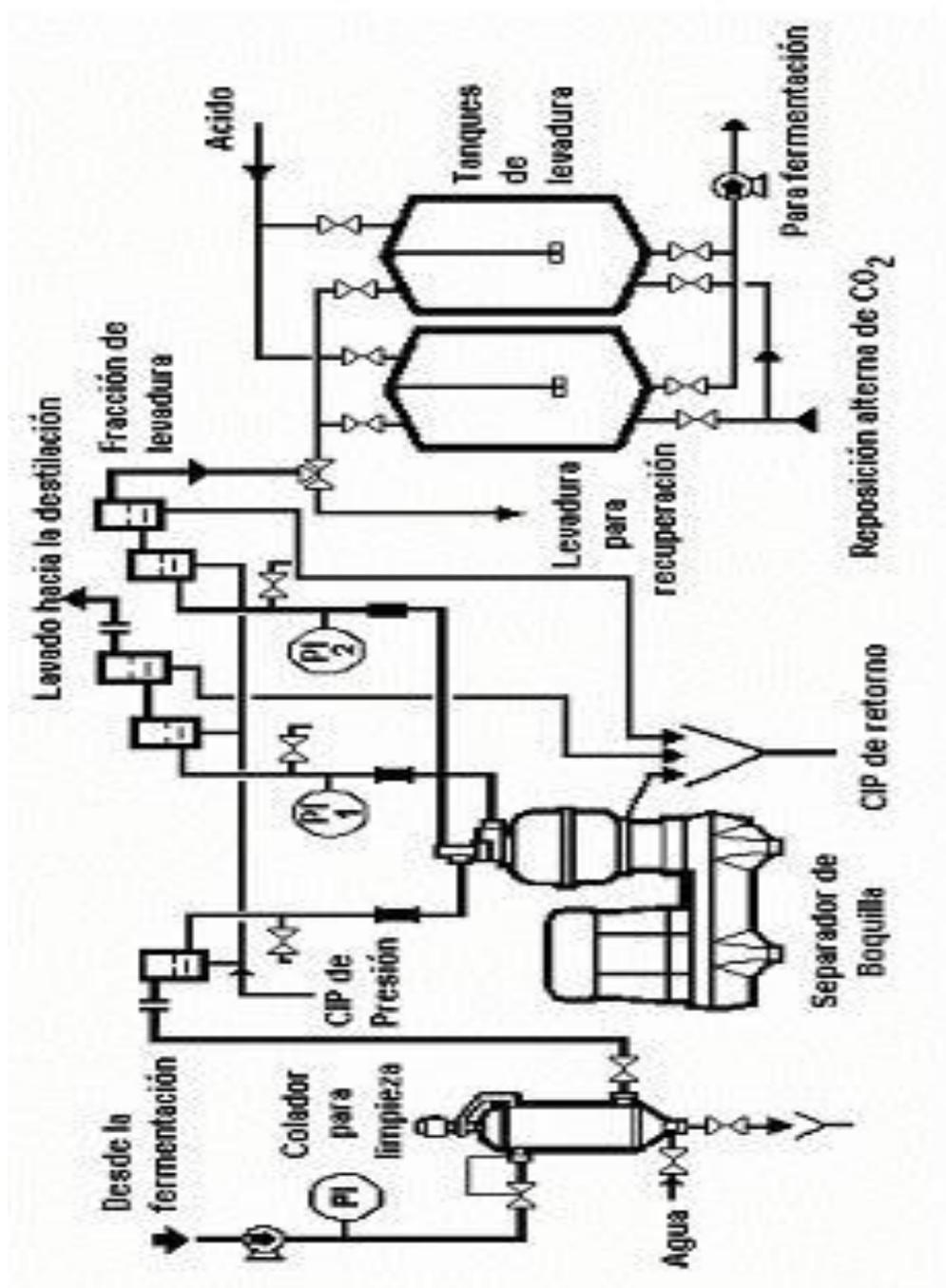
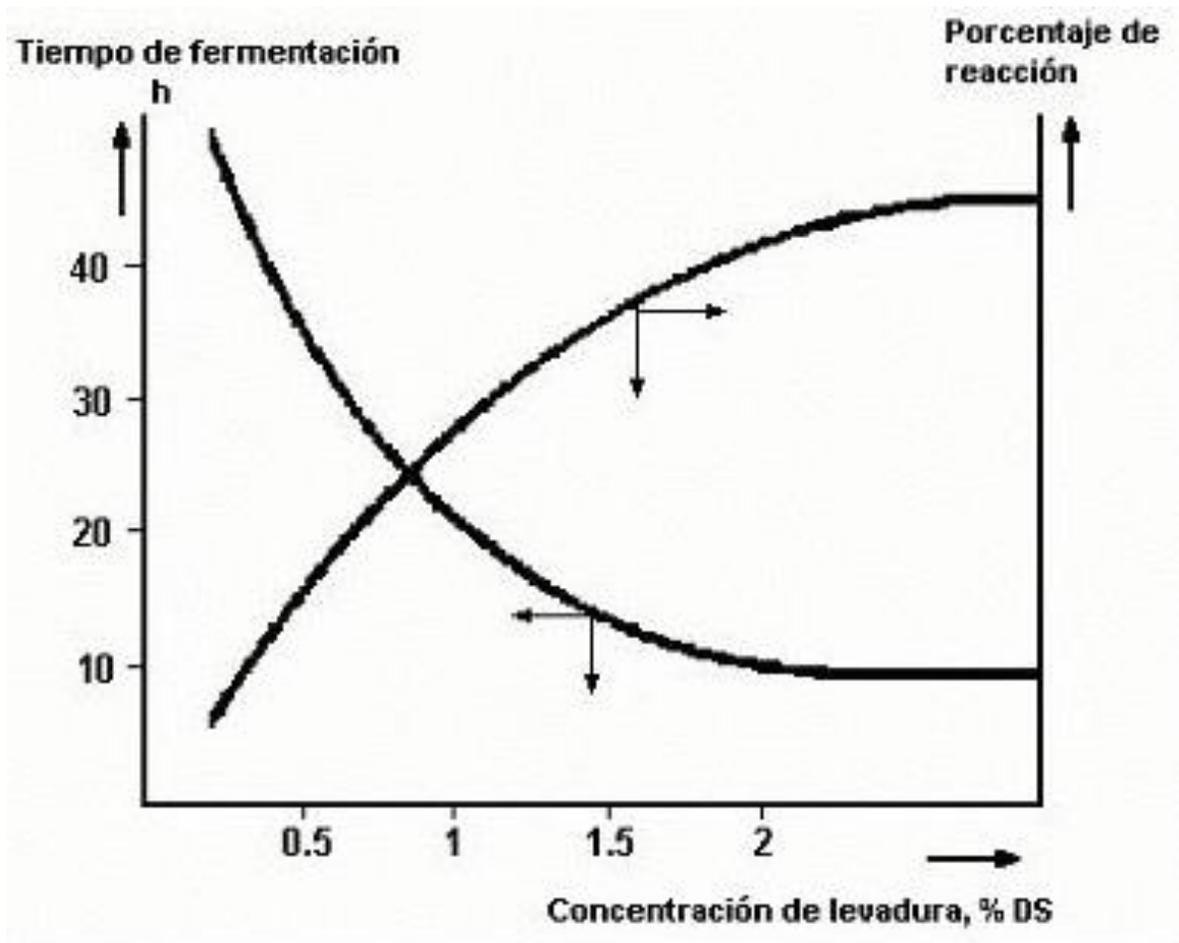


FIGURA 16.- PROCESO DE RECICLAMIENTO DE LEVADURA.

Fuente: Alfa-Laval

Un nivel razonable para operar, en la fermentación, es que la concentración de levadura se encuentre entre 10 y 15 gr. D.S. (sólidos secos) por litro (ver figura 17); lo cual puede ser alcanzado, normalmente, con sólo una etapa de separación utilizando de un 50-60% v/v de levadura húmeda para los propósitos de reciclamiento. [Alfa-Laval, 1980]



**FIGURA 17.- CURVA MOSTRANDO UN EJEMPLO DE PORCENTAJE DE REACCIÓN/TIEMPO VS CONCENTRACIÓN DE LEVADURA.**

Fuente: Alfa-Laval

### **6.2.2.- Beneficios del reciclamiento de levadura**

Cuando se instalan los separadores de la levadura para recuperarlas, de las melazas fermentadas al complementarse la fermentación, para recircularlas en el substrato fresco se obtendrán los siguientes beneficios:

#### ***Incremento del alcohol producido***

La mayor ventaja del reciclamiento de levadura es la maximización de la conversión de los azúcares fermentables en alcohol, debido a que los azúcares que normalmente serían consumidos en la formación de la levadura serán transformados en alcohol en vez de levadura. Además, la sucesiva reutilización de la levadura originaria que esta se encuentre adaptada al substrato y al medio ambiente particular del proceso, lo cual es beneficioso para que la levadura convierta más eficientemente los azúcares en alcohol.

En términos de productividad, el incremento en el alcohol producido puede ser considerable y posiblemente alcanzara el coeficiente de Pasteur.

#### ***Reducción de los subproductos no deseados en la fermentación***

El mismo separador de levaduras actúa como un efectivo medio mecánico de remoción de bacterias y otros microorganismos contaminantes con un tamaño menor al de las células de levadura, ya que no son separadas con la fracción de la levadura saliente en la centrífuga. A su vez, al mantener en altas concentraciones la levadura cultivada se restringe la capacidad de otros microorganismos para competir en el ataque del substrato. Esto tiende a suprimir la propagación bacteriana con una reducción en la formación de subproductos no deseados, produciendo un alcohol limpio y con una mayor eficiencia (por arriba del 90%).

#### ***Incremento en la capacidad de producción***

Además de las características del substrato, la estabilidad de la solución, la temperatura de fermentación, y otros factores acondicionados; el grado de concentración de la levadura es el factor más importante que influye en el tiempo de fermentación. Por lo que, una mayor población de levadura irá acompañado por una disminución en el tiempo de fermentación, véase fig. 17.

Bajo una relación normal de reciclamiento de levadura, en donde es obtenida una concentración de 10-15 gr D.S. por litro de substrato, se puede lograr un tiempo de fermentación de entre 12 y 16 hrs. Esto resulta en turnos de operación mucho más cortos para los recipientes fermentadores, incrementándose considerablemente la capacidad de producción de los mismos.

### ***Conservación del vapor en la destilación***

Con el reciclamiento de levadura, esta viene aclimatada a las condiciones del fermentado con un mejoramiento en la tolerancia al alcohol antes que la inhibición disminuya su actividad, lo que permitirá alcanzar mayores concentraciones de alcohol en el fermentado final. Estos mayores contenidos de alcohol, que son de alrededor del 10% de alcohol en volumen y en ocasiones hasta del 12% dependiendo de las características de la levadura, cuando se comparan con los métodos de fermentación convencionales, en donde el 8% en volumen es considerado una buena concentración final para el alcohol en el fermentado, representa un mejoramiento considerable ; el cual se ve reflejado en un ahorro de alrededor del 9% en el consumo de vapor para la etapa de destilación, debido a la reducción en la magnitud del líquido para la misma producción de alcohol y el volumen de vinazas será reducido alrededor del 20%.

### ***Reducción en el periodo de mantenimiento en la destilación***

El separador de levadura asegurará que el fermentado vaya a la destilación primaria estando relativamente libre de sólidos suspendidos, originando condiciones de destilación limpias. Esto es un factor que contribuye a que pase un mayor tiempo antes de que la columna necesite un periodo de mantenimiento para realizar su limpieza. También, las vinazas producidas serán más limpias en composición y con una menor DBO.

### ***Opción de recuperación de subproductos***

Muchas destilerías operan empleando la levadura sólo un número de ciclos determinados, seguido por su parcial remoción del sistema. De la levadura desechada puede ser recuperado un subproducto comercial adecuado para sales de forraje; sin embargo, su comercialización requerirá operaciones adicionales de lavado, recuperación y secado. En donde existe un mercado para la levadura, está aún puede participar en la formación del alcohol con una alta eficiencia de conversión y ayudar con ganancias a la destilería.

### **6.2.3.- Aspectos económicos del reciclamiento de levadura**

Los aspectos económicos del empleo del reciclamiento de levaduras sobre los métodos convencionales de fermentación por lotes son altamente atractivos con cortos periodos de recuperación (pay-off). Muchas de las ventajas financieras se encuentran en la mejor utilización de las melazas en la conversión del alcohol.

Los cálculos están basados sobre 60,000 litros/día de 96.5°G.L. de etanol.

A continuación se muestran los datos básicos del proceso, y los costos que fueron actualizados al 2016 con el apoyo de los indicadores económicos de la revista chemical engineering:

- La fermentación convencional toma 32 h para lograr un contenido del 8% vol. de alcohol en el fermentado. Además, 8 h son necesarias para el vaciado, limpieza y llenado, dando un total de 40 h por turno del recipiente. Una eficiencia de producción del 82% del coeficiente teórico de Gay Lussac, incluye el crecimiento de la levadura.
- La fermentación reciclando levadura, toma 16 h para lograr un contenido del 10% vol. de alcohol en el fermentado. Además, 8 h son necesarias para el vaciado, limpieza y llenado, dando un total de 24 h por turno del recipiente. Una eficiencia de producción del 88% del coeficiente teórico de Gay Lussac, incluye el crecimiento de la levadura para sustituir la reposición por pérdidas.
- La levadura no es recuperada para propósitos de sales.
- Los recipientes fermentadores son fabricados en acero templado e internamente revestidos con cubierta epóxica. El costo instalado para los recipientes fermentadores es de US\$ 2,544.3/ton de peso del recipiente.
- Ninguna provisión está hecha dentro de los cálculos para estructuras de soporte, tuberías, válvulas, etc. Estos costos serán similares en la comparación.
- El vapor de destilación al 8% vol. de alcohol contenido en el fermentado a 3.65 kg. de vapor/litro de alcohol de 96.5° G.L.
- El vapor de destilación al 10% vol. de alcohol contenido en el fermentado a 3.32 kg. de vapor/litro de alcohol de 96.5° G.L.
- El costo de vapor a US\$ 22.1/ton.
- La producción de alcohol al 82% del coeficiente teórico de Gay Lussac tomado a 274 litros de alcohol de 96.5°G.L./ton de melazas para un contenido de 52% de azúcar hexosa fermentable.
- El precio de las melazas descargadas en la destilería a US\$ 115.4/ton.

- El costo de evaporación de las vinazas a US\$ 5.4/m<sup>3</sup> de vinaza.
- La energía eléctrica a US\$ 0.25/kwh.
- Los costos de mano de obra adicionales para la operación del equipo del reciclamiento de levaduras a US\$ 41,951/año.
- Las horas de operación por año igual a 7,200 (300 días).

**TABLA 22.- AHORRO EN MELAZAS POR LEVADURA RECICLADA**

<b>Condición</b>	<b>Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000</b>
Fermentación convencional a 274 l de etanol al 96.5° G.L./ton de melazas, ton./día	219
Reciclamiento de levadura en la fermentación a 294 l de etanol al 96.5° G.L./ ton. de melazas, ton/día	204.1
Melazas ahorradas, ton/día	14.9
Ahorros en U.S. \$115.4/ton, US\$/día	1719.5

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 23.- AHORRO EN EL VAPOR DE LA DESTILACIÓN POR RECIRCULACIÓN DE LEVADURA.**

<b>Condición</b>	<b>Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000</b>
Fermentación convencional a 3.65 Kg de vapor/l de etanol al 96.5° G.L. (8,0/vol. de etanol), ton/día	219
Reciclamiento de levadura en la fermentación a 3.32 Kg de vapor/l de etanol al 96.5° (10.0% vol. de etanol), ton /día.	199.2
Vapor ahorrado, ton/día	19.8
Ahorros en US\$ 22.1/ton, US\$/día	437.58

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 24.- AHORROS EN LA DISPOSICIÓN DE VINAZAS POR RECIRCULACIÓN DE LEVADURA**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Fermentación convencional de vinazas desde la columna primaria con 85° G.L., m <sup>3</sup> /día	787
Reciclamiento de levadura en la fermentación de vinazas desde la columna primaria con 85° G.L., m <sup>3</sup> /día	623
Reducción en vinazas, m <sup>3</sup> /día	164
Ahorro en la evaporación a US\$5.4/m <sup>3</sup> US\$/día	885.6

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 25.- AHORROS ANUALES\* (GANANCIAS) POR RECIRCULACIÓN DE LEVADURA**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
A. Ahorro en melazas, US\$/año	515,838
B. Ahorros en destilación, US\$/año	131,274
C. Ahorros en evaporación, US\$/año	265,680
Total, US\$/año	912,792

\*300 días trabajados por año

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 26.- CAPITAL PRINCIPAL INVERTIDO PARA UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN CONVENCIONAL\*.**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Capacidad total de fermentación, m <sup>3</sup>	1,275
Número de fermentadores por volumen de operación, m <sup>3</sup>	12 x 107
Carga instalada de los fermentadores, ton.	132
Costos de instalación de los fermentadores, US\$	285,419
Costos de instalación del sistema de enfriamiento del fermentador, US\$	46,228
Costos de instalación de la planta de propagación de levaduras, US\$	78,309
Costos totales invertidos, US\$	409,956.3

\* Basada: 8.0% vol. de etanol en el lavado, 40 horas de fermentación por turno, 2% de la destilación perdida y levadura propagada sin recuperar.

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 27.- CAPITAL PRINCIPAL INVERTIDO PARA UN SISTEMA DE  
FERMENTACIÓN POR RECIRCULACIÓN LEVADURA \*.**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Capacidad total de fermentación, m <sup>3</sup>	716
Número de fermentadores por volumen de operación, m <sup>3</sup>	8 x 90
Carga instalada de los fermentadores, ton.	80
Costos de instalación de los fermentadores, US\$	172,982
Costos de instalación de los separadores de levadura (incluyendo sustituto) y equipo auxiliar, US\$	207,280
Costos de instalación del sistema de enfriamiento del fermentador, US\$	32,806.84
Costos de instalación de la planta de propagación de levaduras, US\$	39,155
Costos totales invertidos, US\$	452,222.4

\*Basada: 10.0% vol. de etanol en el lavado, 17% de levadura reciclada, 24 horas de fermentación por turno, 2% de la destilación perdida y levadura propagada para propósitos sólo de composición.  
Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 28.- INCREMENTO EN LOS COSTOS DE CAPITAL INVERTIDO ENTRE  
EL RECICLAMIENTO DE LEVADURA Y LA FERMENTACIÓN  
CONVENCIONAL (TABLA 26 – TABLA 27)**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Incremento en inversión, US\$ x 1000	42,266.1

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 29.- COSTOS DE ELEMENTOS DE OPERACIÓN PARA EL  
RECICLAMIENTO DE LEVADURA**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Mantenimiento anual, US\$/año	4,195
Operación adicional de labor, US\$/año	41,951
Costo de energía eléctrica (17 kW), US\$/año	30,912
Intereses sobre la inversión al 15% de la diferencia promedio en los costos de instalación, US\$/año	3,170
Total de costos de operación, US\$ x/año	80,228.6
Depreciación de la planta sobre 8 años sobre la diferencia en los costos de instalación, US\$/año	5,283
Total de costos de operación con la depreciación de la planta, US\$ x/año	85,511.8

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 30.- PERIODOS DE RECUPERACIÓN CUANDO EXISTE UNA  
CONVERSIÓN EN LA DESTILERÍA PARA EL SISTEMA DE  
RECIRCULACIÓN DE LEVADURAS.**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Inversión, US\$	207,280
Diferencias entre ganancias y costos de operación (sin depreciar), US\$ x/año	697,090
Tiempo de recuperación, años	0.30

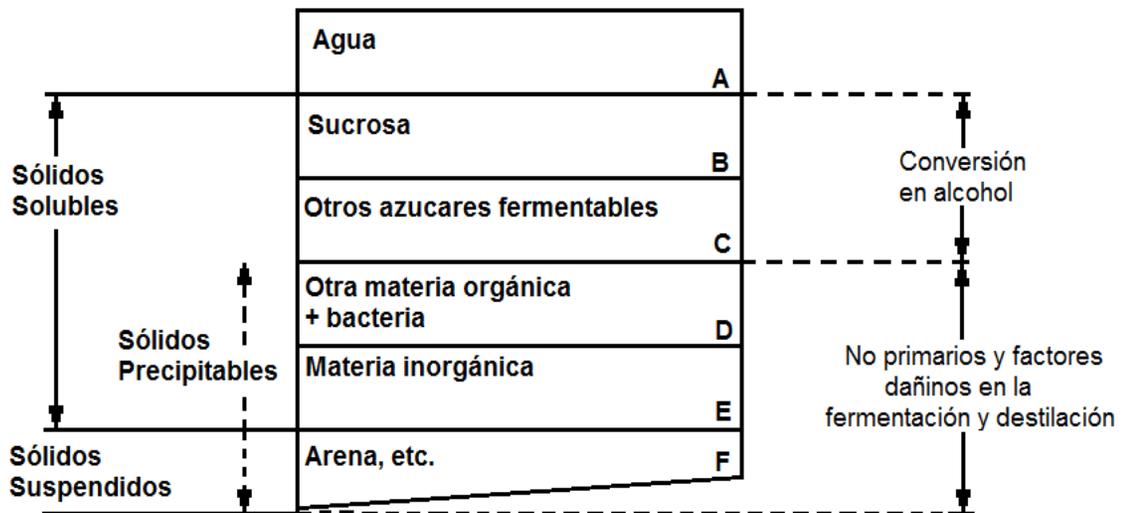
Fuente: Alfa-Laval.

$$*\text{tiempo de recuperación} = \frac{\text{inversión}}{\text{Ganancias} - \text{Costos de operación sin depreciar}}$$

## 6.3.- PRETRATAMIENTO DE MELAZAS

### 6.3.1.- Fundamento del pretratamiento de melazas

En la fermentación, la capacidad que tiene la levadura para asimilar los azúcares para producir alcohol es una función compleja del medio ambiente de fermentación y sólo algunas variables han sido identificadas, una de estas variables es la presión osmótica. Esta es la razón, por la cual el alcohol y los otros productos volátiles producidos en la fermentación son inhibidores de la actividad de la levadura, ya que son parte del total de la presión osmótica del medio de fermentación. Sin embargo, son los compuestos de bajo peso molecular e iones cargados que se encuentran presentes en las melazas, en forma de sales, oligómeros, azúcares no fermentables y otros constituyentes (fig. 18), los que incrementan en mayor proporción la presión osmótica.



**FIGURA 18.- GRUPOS BÁSICOS DE COMPONENTES EN LAS MELAZAS FINALES.**

Fuente: Alfa-Laval

En consecuencia, un mejoramiento en la calidad del substrato que permita una disminución en la concentración de las sales y otros constituyentes que contribuyen a la elevación de la presión osmótica o afectan la eficiencia de la fermentación, tendrá un efecto particularmente beneficioso en el proceso. Los

componentes presentes en las melazas y su influencia en la producción del alcohol, son presentados en la tabla 31, junto con sus métodos de tratamiento para mejorar la cantidad de azúcares fermentables sobre los no fermentables y otros factores perjudiciales.

El proceso ALMOTHERM (figura. 19) está diseñado para aumentar la calidad de las melazas hasta condiciones tan cercanas a las ideales cómo es posible, por la incorporación de las siguientes operaciones unitarias

- Separación de sólidos a bajas temperaturas.
- Tratamiento térmico.
- Tratamiento ácido.
- Separación de sólidos en condiciones ácidas y alta temperatura.

En el proceso Almotherm, las melazas diluidas se introducen a un sedimentador, para posteriormente suministrarles vapor abierto con el propósito de aumentar su temperatura hasta 80-85°C y arrastrar las sustancias volátiles tóxicas para la levadura, así como de realizar una pasteurización y mejorar la mezcla de las melazas por la turbulencia adicional que se origina por el burbujeo del vapor en el seno del líquido.

Las melazas calientes se introducen en un sedimentador continuo, térmicamente aislado para mantener la temperatura constante durante el proceso; ya que en estas condiciones la viscosidad de las melazas disminuye considerablemente facilitando la sedimentación del resto de los sólidos suspendidos.

El proceso se realiza en forma continua y la miel clarificada se enfría en un intercambiador de placas, en donde el agua empleada para el enfriamiento es utilizada en la dilución de las melazas que entran al proceso.

Por otro lado, los sólidos que son separados son lavados con agua caliente en un decantador centrífugo, para recuperar los azúcares que pudieron ser arrastrados y el agua de lavado regresa al proceso para diluir las melazas.

**TABLA 31.- COMPONENTES DE LAS MELAZAS Y SU INFLUENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL**

Componentes	Origen	Influencias en la producción de etanol	Método de tratamiento
A Agua	Caña de azúcar y de procesamiento	Necesaria	--
B Sucrosa	Caña de azúcar	Conversión a alcohol	--
C Otros azúcares Fermentables	Caña de azúcar	Conversión a alcohol	--
D Coloides (gomas, ceras, etc.)	Caña de azúcar	Interfieren con la levadura y obstaculizan la separación	Separación mecánica
Otros carbohidratos (almidón, etc.)	Caña de azúcar	Hidrolizado por azúcares pudiendo ser convertido a alcohol de otro modo no es perjudicial	Calentamiento e hidrólisis con ácido para solubilización y clarificación
Compuestos nitrogenados (proteínas, etc.)	Caña de azúcar y de procesamiento	Nutrientes para la levadura. Tendencia a la formación de éster desde aminoácidos complejos	Calentamiento e hidrólisis ácida mejora la calidad de los nutrientes
Ácidos no nitrogenados	Caña de azúcar, de procesamiento, almacenamiento	Alto contenido de ácidos volátiles pueden ser inhibidores de la actividad de la levadura	Calentamiento, remoción y separación
Otras materias orgánicas (pigmentos, etc.)	Caña de azúcar	Principalmente no es perjudicial	--
Bacteria	Almacenamiento y manipulación	Reduce el rendimiento del etanol. Forma sin falta productos de fermentación	Destrucción con calentamiento
E Sales de calcio solubles	Caña de azúcar y de procesamiento	Depósitos de escamas duras en el equipo de calentamiento	Calentamiento acidificación y separación mecánica
Otras sales metálicas solubles	Caña de azúcar	Principalmente no es perjudicial, excepto al cobre. Fosfatos y potasios actúan como nutrientes para la levadura	--
Dióxido de sulfuro	Sulfitación para la decoloración del azúcar	Inhibidor de la actividad de la levadura y forma mercaptanos	Calentamiento, remoción y separación
Sulfitos	Sulfitación para la decoloración del azúcar	Forma sin falta productos de fermentación, principalmente glicerol	Calentamiento, acidificación y oxidación
Nitritos y fluoridos	Caña de azúcar	Inhibidores de la levadura	--
Otros constituyentes ácidos	Caña de azúcar	Principalmente no es perjudicial	--
F Sólidos duros suspendidos	Tierra en la caña	Erosión de equipo. Obstrucción de la boquilla del separador de levadura	Separación mecánica
Cal suspendida	Azúcar de proceso	Depósitos en el equipo de Calentamiento	Calentamiento, acidificación y separación mecánica

Fuente: Alfa-Laval.

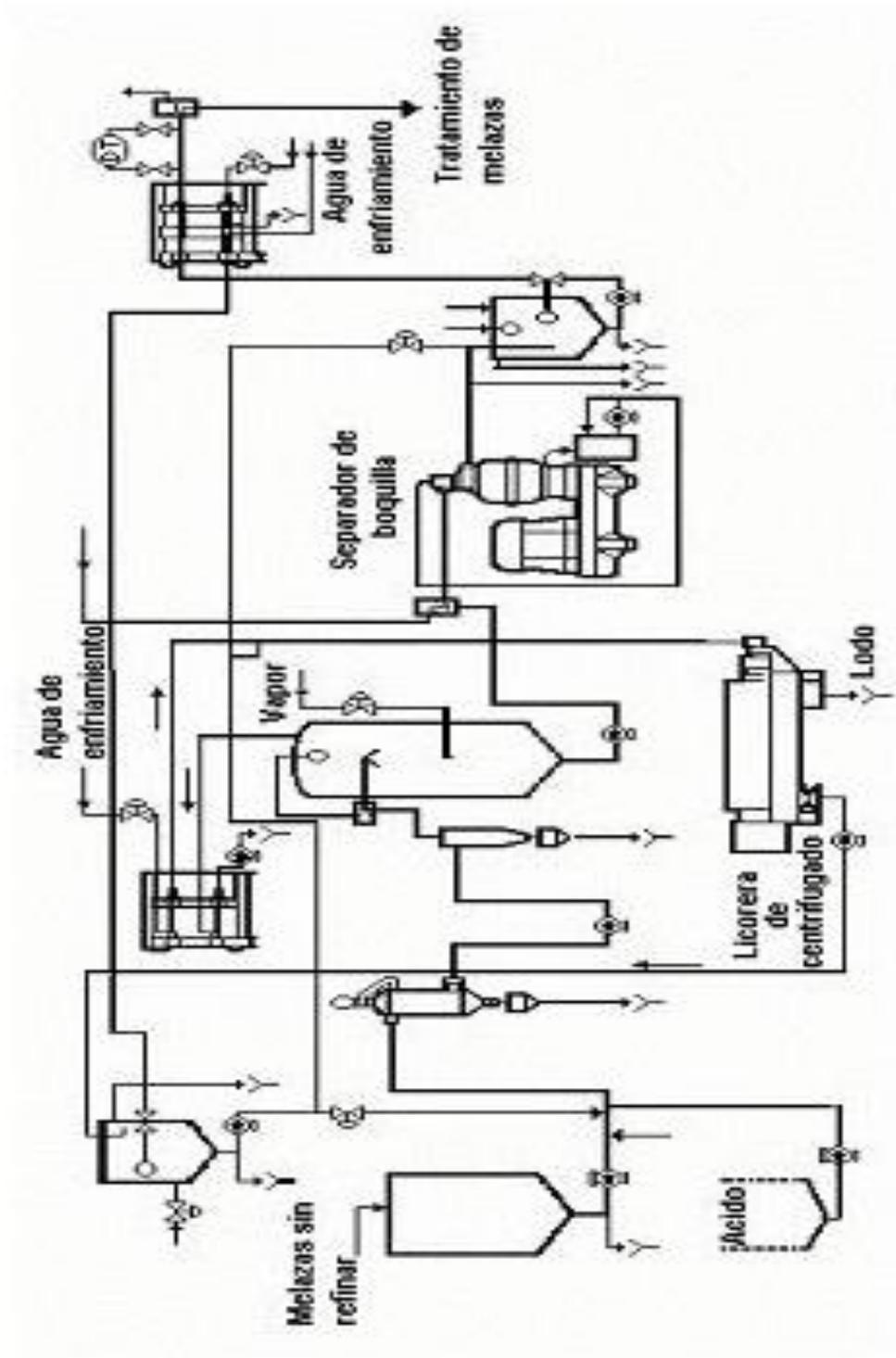


FIGURA 19.- PROCESO ALMOTHERM.

Fuente: Alfa-Laval

### **6.3.2.- Beneficios del pretratamiento de melazas**

La aplicación del proceso Almotherm para el tratamiento de melazas, además de ser necesario para un buen funcionamiento del reciclamiento de levadura (menor atascamiento y mayor tiempo de operación), traerá consigo los siguientes beneficios:

#### ***Incremento del alcohol producido.***

El incremento en la producción de alcohol se originara debido a los siguientes hechos:

- Al eliminarse las bacterias por pasteurización se permitirá que la levadura pueda alcanzar una máxima conversión de los azúcares contenidos en el substrato, en alcohol.
- Mediante el calentamiento de las melazas a condiciones ácidas, los azúcares no fermentables como la sucrosa y algunos polisacáridos, serán convertidos a compuestos fermentables por la hidrólisis ácida; originando que el substrato sea más rico en azúcares fermentables para su conversión a alcohol.
- Al removerse los ácidos orgánicos volátiles y el dióxido de azufre, se evitara que estos puedan formar mercaptanos y esterres a expensas de la conversión de alcohol.
- Con la oxidación de los sulfitos a sulfatos, por la presencia del aire a elevadas temperaturas, una menor cantidad de glicerol se produce durante la fermentación con su correspondiente incremento en alcohol.
- Con el incremento en la actividad de la levadura, por la remoción de gomas, ceras, sales inorgánicas y cualquier otro sólido suspendido, lograda mediante la clarificación se incrementara la producción de alcohol. De otra manera, estos compuestos inhibidores se incrementarían conforme se recicle la levadura disminuyendo la actividad de la misma.

#### ***Reducción en el tiempo de mantenimiento.***

La remoción de las sales de calcio, la silica y otros sólidos abrasivos, disminuirá la formación de capas duras en los platos de la columna de destilación primaria y demás superficies de calentamiento, reduciendo el tiempo necesario para desescamarlos que puede llegar a los 30 días por año para las destilerías que emplean melazas sin tratamiento. Además, de evitarse los problemas de erosión

en el equipo, tuberías, válvulas y separador de levadura que pueden ser perjudiciales en las operaciones de la destilería.

### ***Mejoramiento de los subproductos originados en el reciclamiento de levaduras.***

El mejoramiento en la calidad de las melazas, producirá que las levaduras recuperadas posean una mejor calidad al disminuir su cantidad de residuos no deseados, por lo que sus subproductos tendrán un mayor valor comercial.

### ***Reducción en el costo de tratamiento de los efluentes.***

Al aumentar la calidad de las melazas hasta condiciones tan cercanas a las ideales, se producirán unas vinazas lo suficientemente limpias y estériles para su reutilización como agua de procesamiento en la dilución de melazas, debido a que el valor de osmosensibilidad en la etapa de fermentación permanecerá inalterable. Con esto, el volumen de vinazas que ira a tratamiento será menor y con un mayor contenido de sólidos secos que a condiciones normales, produciéndose con ello un ahorro en el costo de cualquier tratamiento y beneficiando la recuperación de sales como subproducto cuando el tratamiento es la concentración.

### ***Ahorros en ácido y agua de proceso.***

Con el reciclamiento de las vinazas, una gran cantidad del agua de proceso necesaria para la dilución de las melazas es ahorrada. A la vez, que al ser regresadas bajo condiciones calientes y con pH de alrededor de 4.5, una menor cantidad de vapor será necesario para el tratamiento del substrato ácido.

## ***6.4.- DESCONTAMINACION DE LAS VINAZAS***

### ***6.4.1.- Fundamento de la descontaminación de vinazas***

Debido a que el mecanismo de fermentación del etanol está gobernado por la tolerancia de la levadura a la concentración del alcohol que es producido, una dilución inicial considerable es necesaria para alcanzar la óptima eficiencia de producción. Esto origina que un gran volumen de agua deba ser transportada a través de la destilería y que surja como agua de efluente de la unidad de destilación. Las vinazas están en grandes flujos volumétricos y, dependiendo de la

concentración de alcohol lograda en el líquido de las melazas fermentadas, estará en el orden de 8 a 13 veces el volumen del alcohol producido. [Alfa-Laval, 1980]

Estos productos de desperdicio, normalmente llamadas stillage o vinazas exhiben características específicas dependiendo del substrato inicial empleado y de la eficiencia de fermentación.

Los problemas económicos han creado una carencia de inversión debido a las inflexibilidades en los métodos de tratamiento. Tradicionalmente, los conceptos básicos de los sistemas de tratamiento han estado en manos de ingenieros municipales y civiles empleando procesamientos aeróbicos convencionales. Estos sistemas sin ganancia generados han fomentado la creencia que los efluentes no deben ser tratados, si es que se puede evitar. Ya que las melazas contienen materia orgánica infermentable y algo de los azúcares reductores sin convertir, las vinazas son altamente contaminantes. Inversamente, el relativamente alto contenido de componentes inorgánicos y orgánicos puede ser utilizado como ventaja.

Los considerables problemas derivados de su disposición y con las agencias gubernamentales de protección al medio ambiente con leyes legislativas que están siendo establecidas en la mayoría de los países han hecho forzoso su tratamiento, por lo que las destilerías deben encontrar métodos adecuados de procesamiento económicos.

Los sólidos presentes en las vinazas son de considerable importancia ya que ellos pueden ser utilizados para la generación de vapor con la ceniza resultante teniendo un valor como fertilizante.

Con el uso del pretratamiento Almotherm de melazas y el reciclamiento de levadura -descritos en las secciones anteriores- unas vinazas con características limpias están disponibles, dando la posibilidad de su reutilización para la dilución de melazas. Con el resultado de no sólo una disminución en el volumen, sino también un alto contenido de sólidos es alcanzado.

Cuando las vinazas son concentradas a jarabe con su combustión siguiente, las ventajas antes mencionadas pueden ser efectivamente empleadas en la reducción de la cuenta de combustible de la destilería y los costos de equipo.

El sistema de descontaminación de vinazas Alfa-Laval/Ahlstrom ilustrado en la figura 13, es un efectivo método de abatimiento de la contaminación y cuando opera en conjunción con el reciclamiento de vinazas, genera altas ganancias para recuperar el capital invertido en un periodo corto de tiempo.

Las ganancias están en forma de:

- Ahorros en combustible para la destilería.
- Recuperación de potasio como producto sólido.

Puesto que las melazas lavadas contienen materia orgánica infermentable y algo de los azúcares que quedaron sin convertirse, las vinazas son altamente contaminantes.

Los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales involucran un capital y costos operativos altos sin una ganancia adecuada. Uno de los métodos empleados en la actualidad es la evaporación a un jarabe el cual puede ser vendido como un alimento para los animales o fertilizante. Sin embargo, aun con la evaporación de múltiple efecto para conservar vapor, el precio pagado por el jarabe no alcanza a pagar el creciente costo de la energía.

La evaporación a jarabe seguida por la combustión es la mejor solución debido a las siguientes razones:

- Dependiendo del contenido orgánico, la combustión de las vinazas a jarabe permitirá recuperar el suficiente calor para generar el vapor para la evaporación y proporcionar un excedente para el proceso de la destilería.
- Dependiendo de la composición de sales inorgánicas en las melazas, de las cenizas pueden recuperarse sales de potasio con un alto valor como fertilizante.
- El único efluente es agua evaporada, mucha de la cual puede ser rehusada para la dilución de melazas.
- Otros desperdicios de la destilería pueden ser incinerados.

- La planta de evaporación y combustión puede ser muy compacta en área de tierra requerida.

El mejoramiento en la generación de ganancias seguirá continuando ya que tanto la energía y los fertilizantes incrementaran su valor en el futuro.

#### **6.4.2.- Beneficios de la descontaminación de vinazas**

##### ***Ahorro de combustible***

El reciclamiento de vinazas en la destilería es una forma de concentración de efluentes sin equipo de evaporación. A una proporción de reciclamiento de un 40% el cual se puede alcanzar con las operaciones anteriores, unas vinazas normalmente contienen un 9% de sólidos secos serán concentradas aun más alto nivel, alrededor de un 15%. Además, las vinazas son reducidas a un 60% de su volumen original.

Cuando las vinazas son concentradas más allá del destilado para utilizarlo como combustible para generar vapor por su combustión, el contenido de sólidos secos aceptado para quemarlo debe ser alrededor del 60%.

Por el reciclamiento de vinazas, el agua que debe ser evaporada para alcanzar el 60% D.S. contenida es de alrededor del 41% de unas vinazas convencionales. En base a que el mismo número de etapas de evaporación son empleadas en la producción de jarabe, atrae un considerable ahorro en la superficie de calentamiento y en los costos de operación. [Alfa-Laval, 1980]

Cuando las vinazas de melazas convencionales (MAS) al 8% de D.S. contenidos son evaporadas en un evaporador de 5 etapas, el consumo de vapor es de alrededor de 0.227 toneladas por tonelada de agua evaporada. Bajo estas condiciones, el vapor producido por la combustión será más que suficiente para la evaporación. Habrá un excedente en la producción de vapor producido el cual puede ser exportado a la destilería para propósitos del procesamiento.

Cuando las vinazas son recicladas, se obtiene un incremento en el excedente de vapor. De hecho, este excedente debe ser más de 2 Kg. de vapor por litro de etanol producido.

### ***Recuperación de potasio***

Del análisis anterior bajo la sección del pretratamiento de las melazas, unas melazas típicas sin tratamiento pueden contener un 12% por peso de cenizas inorgánicas solubles. De este contenido de cenizas, entre el 30 y el 50% está presente como  $K_2O$ .

Las sales de potasio pasan a través de la destilería en solución y emergen en las vinazas. Por lo tanto, cada tonelada de melaza que es procesada debe de producir entre 35 y 60 Kg. de potasio como  $K_2O$ .

El quemador de vinazas del generador de vapor Ahlstrom está diseñado con una técnica de quemado especial. No sólo pueden ser alcanzadas altas temperaturas de combustión con una alta eficiencia en el calor recobrado de los desechos, sino que también es recobrada una ceniza limpia, rica en componentes de potasio solubles.

## ***6.5.-ASPECTOS ECONÓMICOS DEL SISTEMA COMBINADO PARA EL PRETRATAMIENTO ALMOTHERM DE MELAZAS, EL RECICLAMIENTO DE LEVADURA/ENFRIAMIENTO DEL FERMENTADOR, EL RECICLAMIENTO, EVAPORACIÓN Y COMBUSTIÓN DE LAS VINAZAS.***

Bajo las condiciones del reciclamiento de vinazas en la fermentación, hecho posible por el pretratamiento Almotherm de melazas y el reciclamiento de levaduras, las vinazas que abandonan el proceso se encuentran en un volumen reducido y con un alto contenido de sólidos disueltos.

Los aspectos económicos de la recuperación de vapor y de potasio sobre la descontaminación convencional de vinazas están considerablemente mejorados. La evaluación está realizada de acuerdo con el anterior nivel de producción para la siguiente composición a una proporción de reciclamiento del 40%.

Los datos económicos fueron actualizados al 2016 con apoyo de los indicadores económicos de la revista chemical engineering.

1. 60,000 litros/día de etanol de 96.5°G.L. con 374 m<sup>3</sup>/día de vinazas (tabla 34), conteniendo 57 ton/día de sólidos.

Los siguientes datos del proceso e información de costos han sido tomados al mes de febrero del 2016:

- Una unidad de evaporación de cinco etapas con un consumo de 0.227 ton/ton de agua evaporada en donde los sólidos son concentrados a 60% de D.S. contenidos.
- Los sólidos en las vinazas contienen 39.6% de cenizas inorgánicas.
- La ceniza contiene 40% de K<sub>2</sub>O y el precio de venta (sin embazar) a la salida del quemador es de US\$ 116.6/ton.
- El vapor es recuperado después de la combustión a 3.85 ton de vapor/ton de vinazas con un contenido de 60% de D.S. en donde el vapor se encuentra a 4 bar, saturado.
- La recuperación de cenizas del quemador ha sido tomado al 90%.
- El agua de alimentación del boiler a US\$ 0.52/m<sup>3</sup> con un 60% de condensados recuperados y unas pérdidas del boiler del 5% de vapor exportado.
- El vapor a US\$ 22.1/ton.
- La energía eléctrica a US\$ 0.25/Kwh.
- El agua de enfriamiento a US\$ 0.15/m<sup>3</sup>.
- La mano de obra a US\$ 83, 903/año.
- Los costos de limpieza química a US\$ 0.19/m<sup>3</sup> de vinazas evaporadas.

**TABLA 32.- PERDIDAS EN MELAZAS POR EL PRETRATAMIENTO  
ALMOTHERM Y LA DILUCIÓN DEL RECICLAMIENTO DE VINAZAS**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Pérdidas diarias de azúcar a 0.5% (como melazas) sin el mejoramiento en la conversión, ton/día	1.0
Perdidas en US\$ 117.5/ton, \$/día	-117.5

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 33.- AHORROS EN LA PRODUCCIÓN POR LA DISMINUCIÓN EN EL TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LA DESTILACIÓN**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Producción extra en los 15 días de operación, m <sup>3</sup>	900
Ganancias adicionales de la destilería a US\$ 53.5/m <sup>3</sup> , \$/año	48,150

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 34.- AHORRO EN AGUA DE PROCESO Y EN LA EVAPORACIÓN DE LAS VINAZAS POR SU RECICLAMIENTO**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Vinazas en la columna primaria con el pretratamiento de melazas y el reciclamiento de levadura, m <sup>3</sup> /día.	623
Volumen reciclado a 40%, m <sup>3</sup> /día	249
Ahorro en agua de proceso a US\$ 0.57/ m <sup>3</sup> US\$/día	141.9
Ahorro en los costos de la evaporación de las vinazas a US\$ 5.4/ m <sup>3</sup> , US\$/día	1,344.6
Ahorro total del reciclamiento, US\$/día	1,486.5

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 35.-AHORROS ANUALES (GANANCIAS) POR EL PRETRATAMIENTO ALMOTHERM CON EL RECICLAMIENTO DE VINAZAS\***

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Perdidas en melazas (tabla 32), US\$/año	-35,250
Ahorro por la reducción del tiempo de mantenimiento (tabla 33), US\$/año	48,150
Ahorro por el reciclamiento de vinazas (tabla 34), US\$/año	445,959
Total US\$ /año	458,859

\*300 días trabajados por año

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 36.- COSTOS DE INVERSIÓN PARA EL PRETRATAMIENTO  
ALMOTHERM**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Inversión total, costo instalado US\$ /año	1,160,652.2

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 37.- REQUERIMIENTOS DIARIOS DE OPERACIÓN PARA EL  
PROCESAMIENTO ALMOTHERM CON EL RECICLAMIENTO  
DE VINAZAS**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Consumo diario de vapor, ton.	22.3
Costo del vapor, US\$/día	483.96
Consumo de Energía Eléctrica kW	95
Costo de energía, US\$/día	573.48
Agua de enfriamiento diaria, m <sup>3</sup>	750
Costo del agua enfriamiento, US\$/día	104.91
Consumo de ácido diario, l	224
Costo del ácido, US\$/día	96.73
Total de costos operativos diarios, US\$	1,259

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 38.- COSTOS OPERATIVOS PARA EL PROCESAMIENTO  
ALMOTHERM CON EL RECICLAMIENTO DE VINAZAS\***

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Mantenimiento anual, US\$/año	11,187
Intereses sobre la inversión al 15% sobre la inversión promedio, US\$/año	87,119
Costos anuales de operación, US\$/año	377,726
Total de costos de operación, US\$/año	476,031.7
Depreciación de la planta sobre 8 años, US\$/año	145,151
Total de costos de operación con la depreciación de la planta, US\$ /año	621,183.2

\*300 días trabajados por año

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 39.- GANANCIAS COMBINADAS PARA EL PROCESAMIENTO  
ALMOTHERM Y EL RECICLAMIENTO DE LEVADURA/ENFRIAMIENTO  
DEL FERMENTADOR CON EL RECICLAMIENTO DE VINAZAS**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Procesamiento Almotherm (tabla 35), US\$ /año	458,859
Reciclamiento de levadura en la fermentación (tabla 25), US\$ /año	912,792
Ganancias combinadas, US\$ /año	1,371,651

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 40. INVERSIÓN COMBINADA PARA EL PROCESAMIENTO  
ALMOTHERM Y EL RECICLAMIENTO DE LEVADURA/ENFRIAMIENTO  
DEL FERMENTADOR CON EL RECICLAMIENTO DE STILLAGE**

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Inversión del procesamiento Almotherm (tabla 36), US\$/año	1,160,652.2
Inversión del reciclamiento de levadura/enfriamiento del fermentador como costo incrementado (tabla 28), US\$ /año	42,266.1
Inversión total, US\$/año	1,202,918.2

Fuente: Alfa-Laval.

**TABLA 41.- TASA DE RETORNO ANUAL COMBINADA\***

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Ganancias totales (tabla 39 y 16), US\$ /año	3,536,367
Total de costos operativos depreciados (tabla 38 y 19), US\$ /año	2,618,576
Diferencia entre ganancias y costos operativos depreciados, US\$ /año	917,791
Inversión total (tabla 40 y 17), US\$ /año	6,055,283
Inversión promedio, US\$ /año	3,027,642
Tasa de retorno anual combinada, %año	30.3

Fuente: Alfa-Laval.

$$* \text{ Tasa de retorno anual} = \frac{\text{Ganancias} - \text{Costos operativos depreciados}}{\text{inversión promedio}}$$

**TABLA 42.- PERIODO DE RECUPERACIÓN (pay-off) COMBINADO\***

Condición	Litros/día de etanol al 96.5° G.L. 60,000
Ganancias totales (tabla 39 y 16), US\$/año	3,536,367
Total de costos sin depreciar (tabla 38 y 19), US\$ /año	1,866,529
Diferencia de ganancias y costos operativos sin depreciar, US\$ /año	1,669,838
Inversión total (tabla 40 y 17), US\$	6,055,283
Tiempo de recuperación, años	3.6

Fuente: Alfa-Laval.

$$* \text{ tiempo de recuperación} = \frac{\text{inversión}}{\text{Ganancias} - \text{Costos de operación sin depreciar}}$$

El tiempo de recuperación cae dentro de un lapso de tiempo razonable cuando se basan sobre los precios actuales de la energía y los fertilizantes de potasio. Al mismo tiempo, no se incluyen los créditos para el abatimiento de la contaminación dentro de los cálculos.

Con un exceso de vapor, después de emplearse en la evaporación, de alrededor de 68% de la producción estando disponible para las necesidades del proceso de la destilería (aproximadamente 2.5 kg/l de etanol de 96.5° G.L.), existirá una reducción en la inversión para vapor incrementando las facilidades. Este factor no ha sido introducido dentro de los cálculos.

Ya que el quemador del boiler tiene la facilidad de aumentar la generación de vapor por la combustión del petróleo, el boiler debe estar diseñado con accesorios para quemar petróleo, para actuar como el principal aumentador de la planta de destilación.

## **CAPÍTULO 7**

### **TABLAS DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE ORIGINADO POR LAS VINAZAS Y DONDE SE ENCUENTRAN LOS INGENIOS AZUCAREROS EN MÉXICO**

Este capítulo presentará una tabla que concentra las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de soluciones propuestas para resolver el problema de la contaminación que se genera en el medio ambiente ocasionado por la vinazas, al igual que mencionará la ubicación de los ingenios azucareros en México.

### **7.1.- TABLAS DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE ORIGINADO POR LAS VINAZAS.**

Durante el desarrollo de esta tesis se dieron a conocer diferentes propuestas para resolver el problema de contaminación del medio ambiente originado por los desechos (vinazas) de las destilerías de melazas de caña de azúcar y a continuación en la tabla 43 se muestran de manera concentradas las ventajas y desventajas de estas soluciones.

Así como también en la tabla 44 se muestran los beneficios que se generan al realizar una serie de procesos que permiten el mejoramiento al proceso convencional de las destilerías de melazas de caña de azúcar y por lo tanto esto traerá como consecuencia que se pueda resolver el problema que generan las vinazas de contaminación del medio ambiente y que en la actualidad es de suma importancia por las nuevas restricciones que están imponiendo las estancias del gobierno encargadas de la protección del medio ambiente.

**TABLA 43.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE ORIGINADO POR LAS VINAZAS**

TIPOS DE SOLUCIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p align="center"><b>TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LAS VINAZAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de la carga orgánica (Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO]) en las vinazas hasta en un 70%.</li> <li>• Bajo costo de capital invertido en el tratamiento, siendo solamente necesario la inversión para la remoción de la tierra.</li> <li>• Bajo costo de operación, ya que la necesidad de nutrientes es mucho menor cuando se compara con los tratamientos aerobios.</li> <li>• Área relativamente pequeña (&lt; 100 m<sup>2</sup>) para el sistema de tratamiento, ya que la alta carga de materia orgánica puede ser distribuida en lagunas con una área pequeña y bastante profundidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempos largos (entre 65 y 135 días) de retención necesarios para llevar a cabo el tratamiento.</li> <li>• Necesidad de un tratamiento adicional si se requiere alcanzar los límites permisibles de la normatividad ambiental vigente.</li> <li>• No se recupera ningún producto durante el tratamiento.</li> </ul>
<p align="center"><b>RECICLAMIENTO DE VINAZAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento de las vinazas para la obtención de alcohol, con lo que se contribuye al contexto industrial, por la reducción del costo propio del alcohol.</li> <li>• Ahorro en la cantidad de agua utilizada para el proceso fermentativo, debido a su sustitución por vinazas.</li> <li>• Aumento en el rendimiento de las melazas para la producción de alcohol, debido a la obtención de alcohol a partir de los azúcares contenidos en las vinazas que no alcanzaron a fermentar en la primera fermentación.</li> <li>• Disminución en la cantidad de ácido y nutrientes utilizados en la preparación de los mostos a fermentar y en la regulación del pH, debido a las características de las vinazas recirculadas.</li> <li>• Se logra una mayor capacidad de las lagunas de estabilización para el tratamiento de las vinazas, debido al menor volumen y mayor concentración de compuestos orgánicos de los efluentes</li> <li>• Ahorro en los gastos de equipo para el aprovechamiento o tratamiento de los efluentes debido a la reducción del volumen de los mismos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólo se reduce el problema de contaminación originado por las vinazas, ya que no se pueden recircular todas las vinazas generadas.</li> <li>• Se puede ver afectada la eficiencia de la fermentación si no se cuentan con melazas de buena calidad, teniendo lugar la posibilidad de no poderse llevar a cabo el reciclamiento en algunas destilerías convencionales, principalmente si son de melazas de caña de azúcar.</li> </ul>

**CONTINUACIÓN DE LA TABLA 43.**

TIPOS DE SOLUCIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p><b>RECICLAMIENTO DE VINAZAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beneficios en los procesos de aprovechamiento de vinazas, por la disminución del volumen y el aumento en la concentración de los compuestos orgánicos aprovechables.</li> </ul>	
<p><b>USO DIRECTO DE LAS VINAZAS EN EL CAMPO</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No es necesaria una inversión para equipo de tratamiento destinado a reducir o eliminar la carga contaminante de las vinazas.</li> <li>Ahorro en gastos de fertilización, cuando las plantaciones de caña pertenecen a la destilería, en el caso de destilerías anexas a los ingenios.</li> <li>Se mejoran las condiciones agrícolas del suelo para la plantación de otros cultivos, además de la caña de azúcar, como el frijol, algodón y sorgo.</li> <li>Se consigue un incremento en el rendimiento agrícola cercano al 10 %, en comparación con el terreno fertilizado químicamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El uso inadecuado de las vinazas como fertilizante puede ocasionar problemas irreversibles a corto plazo en el suelo.</li> <li>Se pueden ocasionar problemas en la producción de azúcar, por las afectaciones del cultivo que se dan con el uso de vinazas.</li> <li>El problema de contaminación de agua puede ser transformado en un problema de aire a largo plazo; ya que la irrigación con vinazas, por varios años, puede originar un olor a putrefacción de vinazas, el cual es extremadamente picante.</li> <li>No pueden ser aplicadas al suelo por mucho tiempo, ya que sólo en los primeros años se experimentan beneficios, pero después de irrigar un cierto número de años pueden acarrear problemas de acidez y de olor en la tierra.</li> </ul>
<p><b>DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una disminución de la carga orgánica (DBO) de los efluentes hasta de un 80%.</li> <li>La reducción de los gastos de combustibles por la recuperación y utilización del biogás generado.</li> <li>La posibilidad de una generación local de energía eléctrica en la destilería.</li> <li>Se elimina la necesidad de utilizar algún otro combustible en la destilería.</li> <li>La posibilidad de utilizar la masa bacteriana como biofertilizante.</li> <li>Una reducción de los largos tiempos de retención requeridos por otros sistemas de tratamiento anaerobios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una flexibilidad en el sistema de tratamiento ya que el reactor puede manejar grandes variaciones de carga.</li> <li>El sistema producirá mucho más energía de la que consume.</li> <li>Capacidad para tratar altas cargas contaminantes.</li> <li>Un menor requerimiento de energía en comparación con otros digestores de contacto comparables debido a que el filtro anaerobio de requerirá sólo 12 HP para el mezclado en comparación con los 500 HP requeridos por los otros digestores de contacto.</li> </ul>

### CONTINUACIÓN DE LA TABLA 43.

TIPOS DE SOLUCIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p><b>DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El área relativamente pequeña para el sistema de tratamiento, debido al menor volumen del tanque (reactor) ocasionado por el medio plástico que sirve como área de contacto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacidad de paro y arranque ya que los paros de mantenimiento no afectan la estabilidad del sistema.</li> <li>• La posibilidad de que el sistema se pague por sí sólo con la utilización de los productos generados (biogás y lodos).</li> <li>• La generación de un combustible limpio y perfectamente utilizable para ser quemado en las calderas para producir vapor y en las turbinas de gas para producir electricidad o como combustible en motores de combustión interna.</li> </ul>
<p><b>TRATAMIENTO AEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA PROTEICA</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtención de una biomasa proteica con un valor nutritivo equivalente al 27% en proteínas que ofrece la posibilidad de utilizarla como fuente proteica en dietas de animales, monos y polígástricos (rumiantes), así como de peces.</li> <li>• Reducción en su Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del 50 al 60%.</li> <li>• Reducción en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 55 al 75%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las vinazas sólo proporcionan las fuentes de carbono y energía para el crecimiento de la proteína, siendo necesario que el nitrógeno y el fósforo deban ser proporcionados a partir de nutrientes externos.</li> <li>• El proceso de fabricación involucra plantas costosas.</li> <li>• La aireación, separación y secado del producto demandan un gran uso de energía.</li> <li>• La utilización de la biomasa proteica como alimento para animales en las condiciones actuales (80% de humedad y 5 días de almacenamiento) dificulta su comercialización.</li> <li>• A pesar que el proceso se encuentra en la etapa de desarrollo preliminar, cabe mencionar que el producto tiene limitaciones de mercado debido al bajo precio de venta que tiene la biomasa seca, mientras que los gastos de transportación serían altos. Provocando que no sea económicamente viable.</li> </ul>

**CONTINUACIÓN DE LA TABLA 43.**

TIPOS DE SOLUCIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p><b>TRATAMIENTO AEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA PROTEICA</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• La posible formación de substancias tóxicas (como purinas), contaminantes del producto, debe ser minimizado de manera que se garantice su calidad.</li> <li>• El efluente del proceso, en su actual concepción, contiene un valor de DBO elevado, volviéndose necesario, al igual que en el caso de la generación de metano, una reducción de este valor por medio de la utilización de un proceso de tratamiento adicional o paralelo.</li> </ul>
<p><b>EVAPORACIÓN DE VINAZAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La obtención de un producto estable que puede ser almacenado en tanques de acero al carbono o en recipientes localizados estratégicamente para su distribución.</li> <li>• Las vinazas concentradas posibilitan su aplicación entre zafra debido a la obtención de unas vinazas mucho más estables al almacenamiento, para una aplicación o venta posterior.</li> <li>• El número de camiones de transporte y vehículos distribuidores se reducen, cuando se utiliza como fertilizante, conforme la concentración de las vinazas aumenta.</li> <li>• La vida útil de los camiones y vehículos distribuidores aumenta considerablemente, lo mismo al usar material de acero al carbono.</li> <li>• Ahorros en combustible para la destilería.</li> <li>• La recuperación de sales de potasio como producto sólido.</li> <li>• La eliminación completa del problema de polución originado por las vinazas ya que los únicos productos de este tratamiento son agua, energía y sales, que son completamente aprovechables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosión de los equipos y la acentuada formación de incrustaciones.</li> <li>• Costos elevados en equipo y en energía.</li> </ul>

**TABLA 44.- BENEFICIOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES  
PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN  
DEL MEDIO AMBIENTE ORIGINADO POR LAS VINAZAS**

TIPOS DE PROCESOS	BENEFICIOS
<b>MEJORAMIENTO EN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL FERMENTADOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento del alcohol producido.</li> <li>• Incremento en la capacidad de producción.</li> <li>• Conservación del agua de enfriamiento.</li> <li>• Disminución en el tiempo de paro.</li> <li>• Flexibilidad para cambios de operación.</li> <li>• Ahorro en los costos de instalación del sistema.</li> </ul>
<b>RECICLAMIENTO DE LEVADURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento en la producción de alcohol.</li> <li>• Reducción de los subproductos no deseados en la fermentación.</li> <li>• Incremento en la capacidad de producción.</li> <li>• Conservación del vapor en la destilación.</li> <li>• Reducción en el periodo de mantenimiento en la destilación.</li> <li>• Opción de recuperación de subproductos.</li> </ul>
<b>PRETRATAMIENTO DE MELAZAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento del alcohol producido.</li> <li>• Reducción en el tiempo de mantenimiento.</li> <li>• Mejoramiento en el costo de tratamiento de los efluentes.</li> <li>• Ahorros en ácido y agua de proceso.</li> </ul>
<b>DESCONTAMINACIÓN DE VINAZAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ahorro de combustible.</li> <li>• Recuperación de potasio.</li> </ul>

## **7.2.- UBICACIÓN DE LOS INGENIOS AZUCAREROS EN MÉXICO**

En México abunda la caña de azúcar, por eso tiene una alta producción de alcohol por fermentación de melazas de caña, ya que la agroindustria azucarera, las zonas de abasto cañero, los ingenios azucareros, las destilerías y los productores de caña de azúcar se encuentran distribuidos en siete regiones, donde se produce y procesa la caña de azúcar como se puede observar en la figura 20. Veracruz es el primer lugar a nivel nacional en cuanto a la producción de caña de azúcar por lo que Conagua (comisión nacional del agua) está preocupada por la contaminación que se puede generar en la cuenca del río Blanco y los ríos Jamapa y Atoyac. [www.scielo.org.mx].



En la tabla 45 se presentan los ingenios azucareros por estado de la república mexicana.

**TABLA 45.- INGENIOS AZUCAREROS POR ESTADO**

<b>ESTADOS</b>	<b>INGENIOS</b>		
<b>Campeche</b>	La Joya		
<b>Chiapas</b>	Pujiltic (La Fe)	Huixtla	
<b>Colima</b>	Quesería		
<b>Jalisco</b>	Bellavista José María Morelos	Melchor Ocampo San Francisco	José María Martínez (Tala)
<b>Michoacán</b>	Pedernales San Sebastián	Lázaro Cárdenas	Santa Clara
<b>Morelos</b>	Casasano (La Abeja)	Emiliano Zapata	
<b>Nayarit</b>	El Molino	Puga	
<b>Oaxaca</b>	Adolfo López Mateos	El Refugio	La Margarita
<b>Puebla</b>	Atencingo	Calípam	
<b>Quintana Roo</b>	San Rafael de Pucté		
<b>San Luis Potosí</b>	Alianza popular Plan de Ayala	Plan de San Luis	San Miguel del Naranjo
<b>Sinaloa</b>	El Dorado	Los Mochis	La Primavera
<b>Tabasco</b>	Azsuremex Tenosique	Benito Juárez	Santa Rosalía
<b>Tamaulipas</b>	Aarón Sáenz Garza	El Mante (Xico)	
<b>Veracruz</b>	Independencia Cuatotolapam San Gabriel La Concepción Nuevo San Francisco La Providencia El Modelo	San Pedro Zapoapita Central Motzorongo Central Progreso Constancia El Carmen El Higo	El Potrero La Gloria Mahuixtlán San Cristóbal San José de Abajo San Nicolás Tres Valles

Fuente: [www.scielo.org.mx](http://www.scielo.org.mx) (fecha de consulta octubre del 2016)

La producción de alcohol ha enfrentado diversas restricciones por lo que están operando solamente 16 destilerías. Los ingenios que cuentan con destilerías son los que se muestran en la tabla 46.

**TABLA 46.- INGENIOS AZUCAREROS CON DESTILERÍAS**

<b>INGENIOS AZUCAREROS</b>		<b>INGENIOS AZUCAREROS</b>	
1.	Aarón Sáenz	9.	La Joya
2.	Calipam	10.	La Providencia
3.	Constancia	11.	Pujiltic
4.	El Carmen	12.	San Cristóbal
5.	El Mante	13.	San Nicolás
6.	El Potrero	14.	San Pedro
7.	Emiliano Zapata	15.	San Sebastián
8.	Independencia	16.	Tamazula

Fuente: [www.cefp.gob.mx](http://www.cefp.gob.mx) (fecha de consulta octubre del 2016)

## ***CAPÍTULO 8***

### ***CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES***

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

De las secciones anteriores, los cinco pasos (mostrados en la figura 21) hacia delante para mejorar factiblemente en la destilación de las melazas no pueden ser separadas de las “E’s”, llamadas:

- Energía de consumo
- Efluentes contaminados
- Eficiencia en la conversión del alcohol

Aunque cada problema es de importancia individual, la energía térmica y su recuperación de los residuos orgánicos para su reutilización en la destilería es la principal consideración cuando no se encuentran disponibles combustibles baratos, tales como el bagazo. A los costos actuales de los combustibles, la influencia de la energía térmica en los precios de venta del etanol es considerable. Cualquier reducción apreciable en la demanda de combustible externo será beneficiosa para los aspectos económicos de la producción, particularmente con la continua elevación de precios de los combustibles esperada.

La clave para los sistemas futuros, está en gran parte sobre la capacidad de reducir los volúmenes de vinazas para razonables proporciones, con su correspondiente elevación en el contenido de sólidos. A su vez, esto es reflejado en la técnica de fermentación en donde se hace posible el reciclamiento de vinazas sin ninguna reducción en la concentración de etanol o en la eficiencia de conversión.

Es anticipado que las futuras técnicas de fermentación desarrolladas permitirán altas proporciones de vinazas recicladas. Esto resultara de las características de las levaduras con una mayor osmotolerancia que la normal o de la eliminación de otras restricciones inhibitorias.

También técnicas de destilación que reduzcan el consumo de vapor se espera que sean desarrolladas, logrando con esto grandes ahorros en energía térmica. En la figura 21 se ilustra el balance de vapor para 60,000 l/día de etanol a 96.5°G.L. con el pretratamiento Almotherm de melazas, el reciclamiento de levadura/enfriamiento



## **BIBLIOGRAFIA**

- A. T. Bull, D. C. Ellwood and C. Ratledge (1980). "Microbial technology: current state, future prospects". Cambridge University Press, pp 422.
- ALFA-LAVAL (1980), Technical- Economical improvements in Molasses Distilleries.
- Anon (1977). "Formulas for denatured alcohol and rum". Bureau of Alcohol, U. S. Gov. Printing Office, Washington D. C., pp 27.
- Anon (1978). "Effects of blending alcohol with gasoline on automotive engines". University of Miami, Florida, U. S. Gov. Printing Office, Washington D.C.
- Antonie, R. L. Fixed Biological Surfaces-wastewater Treatment. "The Rotating Biological Contactor". CRC Press, Inc., Cleveland, Ohio, 1976.
- Araujo, N de Q. (1977). Producao de biomassa fungica do vinhoto. inform, I.N.T., 10, 12-19.
- Bolivar José A. (1983). "The bacardi corporation digestion Process for stabilizing rum distillery wastes and producing methane". MBAA Technical Quartely, Vol. 20, No. 3, pp 119-128.
- Brieger O. F. (1979, Enero ). La destilación de los mostos de destilerías alcoholicas en Sao Paulo, Brasil. sugar y azucar, 2, pp.69-74.
- Chen C.P. (1991). "Manual del azúcar de caña". Ed. Noriega-Limusa. México. pp 938-942.
- D. I. C. Wang et. al. (1979). "fermentation and enzyme technology". Wiley, New York, pp 374.
- E. D. Unger and T. R. Coffey (1975). "Production of light bodied rum by an extractive distillation process". Ann. Techn. Agricole (France), 24 (3, 4), pp 469-495.
- E. E: Ecklund (1978). "Variations in automotive Engine. Performance and emissions with changes in air/fuel ratio when operation on alcohol fuels". U. S. Gov. Printing Office, Washington D. C., same reference as (233), pp 10.
- F. H. C. Kelly (1977). " A feasibility study on the production of ethanol from sugar cane". Report to the queensland department of commercial and industrial development, pp 212.

- G. Costa-Coimbra (1979). "Alcohol for use as fuel and chemical feedstock". PROQUIP. Conger SA, Sao Paulo, pp 28
- H. K. Naidu (1976). "Molasses and industrial alcohol. Proceedings of a meeting of experts". O.E.C.D., Paris (1978), pp 158.
- J. H. Bojnowski and D. L. Hanks (1979). "Alternatives to distillation". Chem. Eng., (5), pp. 66-71.
- J. Lodder (1970). "The yeasts, a taxonomic study". 2<sup>nd</sup> edn, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, pp. 1385.
- Jackman E. A. (1977). "Distillery effluent treatment in the Brazilian national alcohol programme". The Chemical Engineer, April, pp. 239-242.
- José A. Bolívar. (1983). The Bacardi Corporation Digestion Process for Stabilizing Rum Distillery Wastes and Producing Methane. MBAA Technical Quarterly, 20, 119-128.
- Kujala Pauli (1979). "Ahorro de combustible en destilerías por el procesamiento eficiente de las melazas y utilización de las vinazas". Sugar y azúcar, Octubre, pp. 67-71.
- L. Huss (1979). "treatment of sugar factory waste water". The sugar J., (1), pp. 9-11.
- L. Michael Szendrey, Ph. D., Paul E. Schafer and George H. Dorion, (1982). "Pollution and energy management through the anaerobic approach". Industrial wastes, Setember/October, pp. 31-34.
- L. stryer (1975). "Biochemistry". Freeman, San Francisco, pp. 877.
- M. Cristille and R. Darmain (1980). "Les carburants de remplacement". Editions Chiron, Paris, pp. 93.
- O. Brieger Franz. (1979). "La destilación de los mostos de destilerías alcohólicas en Sao Paulo, Brasil". Sugar y azúcar, Enero, pp. 69-74.
- P. C. Cogat and S. Tourliere (1979). "Evolution des problemes techniques en distillerie pour tenir compte des contraintes simultanees d'économie d' énergie et de depollution". Industries Alimentaires et Agricoles, pp. 991-994.
- P. Chenu (1977). "Alcohol manufacture in a sugar factory". Proc. 16<sup>th</sup> Congress ISSCT, (Brazil), Impres, Sao Paulo (1978), pp 3241-3251.
- P. Dupuy et. al. (1975). "Proc. Intern. Symp. On rum and cane alcohols". Ann Techn. Agricole (France), 24 (3, 4), pp. 354.
- P. Mariotte et. al. (1979). "Workshop on fermentation alcohol for use as fuel and chemical feedstock in developing countries". U.N.I.D.O., March 1979, Vienna, (50 technical papers presented).

- P. O. R. Thiel and C. R. B. du Coudray (1980). "The designing of a new autonomous distillery". Proc. 17<sup>th</sup> Congress ISSCT, (Philippines). In press, pp. 9.
- Paturau J. M., (1982). "Products of the cane sugar industria an introducción to their industrial utilization". Ed. Elsevier, Vol. 3, Netherland, pp. 194-250.
- Peters Max S. and Timmerhaus Klaus D. "Plant desing and economics for chemical engineers". Ed. Mc Graw Hill, third edition. Printed in the USA, pp. 166.
- R. Patil and J. T: Jadhav (1980). "Steameconomy in distillery waste disposal". Proc. 17<sup>th</sup> Congress ISSCT, (Philippines). In press, pp. 16.
- R.G. Isidro (1980). "CO<sub>2</sub> recovery plant of central Don Pedro". Proc. 17<sup>th</sup> Congress ISSCT, (Philippines). In press, pp. 9.
- RIO, J. M. del., (1982). Fundacao Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco.
- Robertiello A. (1982). "Upgrading of agricultural and agroindustrial wastes: the treatment of distillery effluents (vinasses) in Italy". Agricultural wastes, pp. 387-395.
- S. Aiba, A: E. Humphrey and N. F. Millis (1965). "Biochemical Engineering". Academic Press, New York, pp. 333.
- Shelef G. y Kanarek A. (1995). "Stabilization ponds with recirculation". Water Science and Technology, Vol 31, No 12, pp. 389-397. Gran Bretaña.
- Silverio Christopher M., Pacheco Ma. Vicenta, et. al. (1985). "Biogas production from distillery slops using an upflow anaerobic filter reactor". NSTA Technology Journal. July-Sept. pp. 27-41.
- Tielbaard M. H. (1992). "Experience with treatment of cane vinasse by UASB reactors". Int. sugar JNL. Vol. 94 No. 1127, pp. 101-103, 277-280.
- V. Yang and S. C. Trindade (1978). "The Brazilian Gasohol Programme". Centro de Technico Promon, Sao Paulo, pp. 35.
- Vlissidis A and Zouboulis A. I. (1993) "Thermophilic anaerobic digestion of alcohol distillery wastewaters". Bioresource Technology, pp. 131-140.
- W. H. Kampen (1975). "Technology of the rum industry". Sugar y Azúcar, 80, (6), pp. 36-43.
- W. H. Kampen (1978). "Ethyl alcohol, the automobile fuel of the future". Sugar y azúcar, 83 (4), pp. 18-30.

- W. Lewicki (1979). "Production, application and marketing of concentrated vinasses- Paper ID/WG 293/22". U.N.I.D.O. Workshop on fermentation alcohol, Vienna, March 1979, pp. 20
- Zamorano Pérez A. H. (1991). "Tratamiento biológico de las aguas residuales de la industria alcoholera a partir de melazas de caña de azúcar". F.Q. UNAM, pp. 11-23.

## ***BIBLIOGRAFIA WEB***

- Bautista, F. y Duran, M. (1998). Análisis del beneficio y riesgos potenciales de la aplicación al suelo de vinazas crudas y tratadas biológicamente. julio 14,1998, de UNAM Sitio web: [www.revistascca.unam.mx](http://www.revistascca.unam.mx)>viewFile.
- Bullock, J. (2002). Economic Indicators. enero 31, 2002, de McGraw-Hill Sitio web: [www.chemengonline.com](http://www.chemengonline.com)
- Bullock, J. (2016). Economic Indicators. mayo 31, 2016, de McGraw-Hill Sitio web: [www.chemengonline.com](http://www.chemengonline.com)
- Duran, C.,Medellín, P., Noyola, A., Poggi, H. y Zedillo, L.E. . (1988). Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. enero 30,2007, de imiq Sitio web: [www.imiq.org](http://www.imiq.org)
- Ingenios azucareros de México, Zafra 2015-2016 (2016). Sitio wep: [www.gob.mx](http://www.gob.mx)>sagarpa
- Aguilar, Noe. (2014). Índice de diversificación de la agroindustria azucarera en México. Sitio web: [www.scielo.org.mx](http://www.scielo.org.mx)
- Cámara de Diputados (2015). Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. "La Industria Alcoholera de México Ante la Apertura Comercial". Sitio wep: [www.cefp.gob.mx](http://www.cefp.gob.mx)