



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MÉXICO.**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA EN LA
PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE LA CAÑA DE
AZUCAR.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA:

DULCE ROSARIO SOLANO GUIZADO

MÉXICO, D.F.

2008





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

PRESENTACIÓN

El objetivo básico de la presente tesis es hacer un estudio de evaluación tecnológica de las rutas de obtención de etanol a partir de la caña de azúcar proponiendo la mejor de ellas, a partir de un estudio integral de proceso de aprovechamiento de la misma.

El estudio que se realizará, el cual es el ámbito de aplicación de esta tesis, es la evaluación de las alternativas tecnológicas disponibles para la producción de etanol a partir de la caña de azúcar, se trata de evaluar en base a una serie de factores (técnicos, ambientales, económicos, sociales, políticos, etc.) cual es la alternativa que mejor cumple a las necesidades requeridas de nuestro país.

Buscando considerar las alternativas de mayor interés para México, se estudiará la producción de etanol empleando mieles agotadas (miel C), mieles intermedias (miel B) y jugo directo de caña.

Para hacer una selección de una tecnología es necesario identificar con toda precisión las variables de proceso, los equipos clave, y aquellos factores que inciden en la eficiencia operativa y en la rentabilidad de la planta, así como otros que en su momento dado pueden ser determinantes en la selección, como son el impacto ambiental, el impacto social, etc.

La tesis está conformada por siete capítulos los cuales se encuentran estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo I se pretende dar un panorama general del porque la importancia de éste biocombustible, el mercado mundial y nacional, quienes son los países que encabezan su producción, el uso que se le da, etc.

En el capítulo II se describen brevemente los diferentes tipos de tecnologías existentes actualmente para la producción de etanol anhidro a partir de biomasa, empleando materias primas que se producen en México.

En el capítulo III se discute acerca de la posibilidad que se tiene en México de utilizar la caña de azúcar como materia prima para la producción de etanol, presentando las regiones cañeras, los precios de la caña, y la superficie a plantar para cubrir las necesidades requeridas del país.

Capítulo IV, en éste capítulo se da una descripción general del proceso de transformación de la caña en azúcar y etanol, describiendo cada una de las etapas desde la fabricación de azúcar, hasta la producción de etanol anhidro y tratamiento de los efluentes.

El capítulo V está conformado por la descripción de las tres rutas tecnológicas existentes, estudiadas y practicadas, para la producción de etanol a partir de la caña de azúcar (mieles agotadas, miel B y jugo directo de caña), aunque también se hace mención de la producción de etanol a partir de jugo directo de caña y residuos celulósicos, una tecnología que aun se encuentra en desarrollo.

En el capítulo VI se realizó un estudio integral de las tres alternativas tecnológicas mencionadas en el capítulo V, tomando en cuenta aspectos técnicos, ambientales, sociales, económicos, políticos, etc., que pueden afectar la introducción y uso del etanol en México.

Finalmente, en el capítulo VII se presenta un estudio de factibilidad económica de las rutas tecnológicas seleccionadas, así como también las inversiones industriales necesarias para cubrir la demanda requerida de etanol, a nivel nacional.

CONTENIDO

	PAG.
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	3
1.1 El Etanol y su Relación con el Medio Ambiente	4
1.2 Dependencia Energética Mundial de Combustibles Fósiles	5
1.3 El Etanol-¿Qué es?-Propiedades	7
1.4 Usos del Etanol	7
1.5 Mercado Mundial y Nacional	11
1.5.1 Producción Mundial	11
1.5.2 Producción Nacional	13
1.6 Principales Países Productores de Etanol	14
1.7 Introducción de Etanol en Gasolinas	15
1.7.1 Producción de Éteres en México (MTBE y TAME)	16
1.7.2 Posibles Escenarios para la Introducción del Etanol en México	17
1.8 Legislaciones y Regulaciones que afectan el Mercado Energético en México	19
II. TECNOLOGÍAS CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE BIOMASA	22
2.1 Tecnologías para la Producción de Etanol A partir de Biomasa	22
2.1.1 Producción de Etanol a partir de la Caña de Azúcar	24
2.1.2 Producción de Etanol a partir de Maíz	25
2.1.3 Producción de Etanol a partir de Trigo	27
2.1.4 Producción de Etanol a partir de Remolacha azucarera	29
III. LA CAÑA DE AZÚCAR, LA MEJOR OPCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL EN MÉXICO	32
3.1 Regiones Cañeras de la República Mexicana	33
3.2 Precios de la Caña de Azúcar	34
3.3 Costo Primo de la Caña de Azúcar en la Producción de Etanol	36
3.4 Superficie a Cultivar de Caña de Azúcar, para Cubrir los Escenarios 2 y 3	37
3.5 Plantaciones de Caña de Azúcar, Captura de Dióxido de Carbono y los Bonos de Carbono	38
IV. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA CAÑA, EN AZÚCAR Y ETANOL	39
4.1 Recepción, Descarga, Lavado y Alimentación de las Cañas	39
4.1.1 Recepción	39
4.1.2 Descarga y Lavado de las Cañas	39
4.1.3 Alimentación de las Cañas	39
4.2 Proceso de Molienda	40
4.3 Tratamiento del Jugo de Caña	40
4.4 Clarificación	41
4.5 Evaporación	41
4.6 Cristalización y Centrifugación	41
4.7 Almacenamiento y Secado del Azúcar	42
4.8 Fermentación	42
4.9 Separación y Deshidratación	43

V. MAPAS O RUTAS TECNOLOGICAS PARA LA OBTENCION DE ETANOL.....	46
5.1 Rutas Tecnológicas que Emplean la Caña de Azúcar.....	46
5.1.1 Producción de Etanol de Melazas Agotadas (miel C).....	48
5.1.2 Producción de Etanol de Melazas Intermedias (miel B).....	49
5.1.3 Producción de Etanol de Jugo Directo de Caña.....	53
5.1.4 Producción de Etanol de Jugo Directo de Caña y de Residuos Celulósicos.....	54
VI. EVALUACIÓN INTEGRAL DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	58
6.1 Evaluación técnica para la obtención de Etanol a partir de las diferentes rutas tecnológicas de la Caña de Azúcar.....	58
6.1.1 Melazas Agotadas (miel C).....	58
6.1.2 Mielés Intermedias (miel B).....	64
6.1.3 Jugo Directo de Caña de Azúcar.....	67
6.1.4 Jugo directo de Caña y Residuos Celulósicos.....	69
6.2 Estudio Económico en la Producción de Etanol Empleando Caña de Azúcar.....	71
6.2.1 Costos de Materia Prima.....	71
6.2.2 Costos de Operación y Mantenimiento.....	72
6.2.3 Costos Totales.....	73
6.2.4 Modulos Industriales e Inversiones.....	74
6.2.5 Precios de Indiferencia para el Etanol en México.....	75
6.2.6 Precios de Paridad para Productores de Etanol.....	77
6.3 Aspectos Políticos y Sociales que Intervienen en la Introducción del Etanol en México.....	78
6.4 Impacto Ambiental sobre el Uso de Etanol en México.....	80
VII. FACTIBILIDAD ECONÓMICA EN LA PRODUCCIÓN Y USO DE ETANOL A PARTIR DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	82
7.1 Dimensiones del parque productor de Etanol en México.....	83
7.2 Análisis Económico de la Producción y Uso de Etanol en México.....	85
CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXOS	
ANEXO I. COMPUESTOS CONTENIDOS EN LAS NAFTAS Y SUS EFECTOS AL AMBIENTE.....	95
ANEXOII. LAS REGIONES CAÑERAS DE MÉXICO.....	99
ANEXO III. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DE DESHIDRATACIÓN DEL ETANOL.....	100
ANEXO IV. PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES A SEGUIR.....	109

TABLAS

		PAG.
TABLA 1.1	Proyección de la Producción Mundial de Alcohol	11
TABLA 1.2	Producción de Etanol en la Zafra de 02/03 de los Ingenios de México.....	13
TABLA 1.3	Capacidad de las Plantas de Producción de MTBE y TAME.....	17
TABLA 1.4	Escenarios para Introducción de Etanol Combustible en México (Proyección hacia el 2010).....	18
TABLA 2.1	Composición química de tallos y hojas de la Caña azucarera.....	24
TABLA 2.2	Composición química del bagazo de la Caña azucarera.....	25
TABLA 2.3	Composición química del grano de Maíz.....	26
TABLA 2.4	Composición química del tallo y del olote de Maíz.....	27
TABLA 2.5	Composición química del grano de Trigo.....	28
TABLA 2.6	Composición química de la paja de Trigo.....	28
TABLA 2.7	Composición química de la raíz de Remolacha azucarera.....	29
TABLA 2.8	Microorganismos transformadores de polisacáridos en Etanol.....	30
TABLA 2.9	Síntesis de los procesos de fabricación de Etanol.....	30
TABLA 3.1	Evolución de los precios al agricultor, por tonelada de Caña.....	35
TABLA 3.2	Superficie a cultivar de Caña de azúcar para cubrir el escenario 2.....	37
TABLA 3.3	Superficie a cultivar de Caña de azúcar paracubrir el escenario 3.....	37
TABLA 5.1	Rutas tecnológicas para la producción de Etanol a partir de la Caña de azúcar.....	57
TABLA 6.1	Cantidad de nutrientes utilizados en la fermentación de las mieles.....	60
TABLA 6.2	Insumos y productos en la fabricación de Etanol a partir de Melazas agotadas (miel C)..	64
TABLA 6.3	Insumos y productos en la fabricación de Etanol a partir de Melazas intermedias (miel B	66
TABLA 6.4	Insumos y productos en la fabricación de Etanol a partir de Jugo directo de Caña.....	68
TABLA 6.5	Composición de los Costos de Producción de Etanol (US\$/litro).....	73
TABLA 6.6	Modulos Industriales para la fabricación de Etanol de Caña de Azúcar.....	75
TABLA 7.1	Número de unidades productivas necesarias para cubrir la demanda nacional de Etanol	83
TABLA 7.2	Inversión industrial total (tecnologías convencionales).....	83
TABLA 7.3	Superficie de cultivo requerida de Caña de azúcar para cubrir los diferentes escenarios propuestos.....	84
TABLA IV.1	Producción de efluentes provenientes de la fermentación en la fabricación de Etanol a partir de tres rutas tecnológicas.....	109

GRÁFICAS

	PAG.
GRÁFICA 1.1 Usos Principales del Etanol a Nivel Mundial.....	10
GRÁFICA 1.2 Producción mundial de Etanol 2000-2005.....	12
GRÁFICA 1.3 Producción de Etanol de Caña de Azúcar en México, 1988-2004.....	14
GRÁFICA 1.4 Ranking Mundial de Producción de Etanol	15
GRÁFICA 3.1 Evolución de los precios de la Caña al productor.....	36
GRÁFICA 5.1 Producción relativa de Etanol y Azúcar, para las condiciones medias de los ingenios de México.....	53
GRÁFICA 6.1 Costos del Etanol para los procesos convencionales de Caña de Azúcar.....	74
GRÁFICA 7.1 Inversiones industriales necesarias para cubrir la demanda de Etanol en cada escenario.....	84
GRÁFICA 7.2 Beneficio neto total del Etanol.....	86
GRÁFICA 7.3 Sensibilidad del costo del Etanol producido de miel pobre de Caña (miel C).....	86
GRÁFICA 7.4 Sensibilidad del costo del Etanol producido de miel rica de Caña (miel B).....	87
GRÁFICA 7.5 Sensibilidad del costo del Etanol producido de Jugo directo de Caña.....	87

FIGURAS

	PAG.
FIGURA 1.1	Consumo de Petróleo en el Mundo 1971-2026..... 6
FIGURA 1.2	Principales Productos obtenidos a partir del Etanol..... 10
FIGURA 2.1	Procesos para la producción de Etanol..... 22
FIGURA 3.1	Regiones cañeras de la República Mexicana..... 34
FIGURA 4.1	Esquema del proceso de obtención de Etanol a partir de Caña de azúcar..... 45
FIGURA 5.1	Procesos tecnológicos relevantes para la producción de Etanol..... 48
FIGURA 5.2	Flujos másicos en la producción de Etanol a partir de Melazas agotadas..... 49
FIGURA 5.3	Esquema de un ingenio para la producción combinada de Azúcar y Etanol..... 51
FIGURA 5.4	Flujos másicos en la producción de Etanol a partir de Melazas intermedias..... 51
FIGURA 6.1	Esquema de proceso para la producción combianada de Azúcar y Etanol a partir de Melazas agotadas (miel C)..... 63
FIGURA 6.2	Esquema de proceso para la producción combianada de Azúcar y Etanol a partir de Melazas intermedias (miel B)..... 67
FIGURA 6.3	Esquema de proceso para la producción de Etanol a partir de Jugo directo de Caña..... 69
FIGURA 6.4	Competitividad en la Producción de Etanol..... 76
FIGURA III.1	Diagrama de flujo de la destilación Azeotrópica del Etanol..... 101
FIGURA III.2	Diagrama de flujo de la destilación Extractiva del Etanol..... 103
FIGURA III.3	Diagrama de flujo de la destilación Extractiva Salina del Etanol..... 105
FIGURA III.4	Diagrama de flujo de la Pervaporación del Etanol..... 107

INTRODUCCIÓN

Muchos países presentan una tendencia creciente en el consumo de energéticos que supera su capacidad de autosuficiencia, lo que genera una dependencia de los países productores de petróleo.

Para romper dicha dependencia y contrarrestar los efectos ambientales en el uso de derivados del petróleo, los biocombustibles¹ aparecen como elementos esenciales de las políticas energéticas de la actualidad.

El otro factor que impulsa el desarrollo de los biocombustibles es la preocupación que surge a nivel mundial por el calentamiento global del planeta, las emisiones de gases con efecto invernadero y las emisiones de contaminantes, en zonas urbanas propiciadas principalmente por el uso de gasolinas y combustibles de origen fósil. En estas condiciones, para muchos países encontrar nuevas salidas es prioritario y por esto apoyan proyectos que incentivan la producción y el uso de biocombustibles y establecen objetivos de consumo cada vez más ambiciosos.

Como se observa, es la conjugación del factor energético con el factor agrícola lo que dimensiona a los biocombustibles como un mercado atractivo y como una alternativa viable para enfrentar el escenario de dependencia que se tiene, hoy en día, frente a los combustibles de origen fósil.

El etanol, obtenido a partir de biomasa, surge como la mayor fuente de energía renovable y se espera que esta tendencia continúe en el futuro, dados los condicionantes de precios relativamente bajos de la materia prima (caña de azúcar, maíz, remolacha, trigo, cebada, etc.), el aumento de los precios del petróleo y la gasolina, la prohibición del MTBE², y la dependencia del crudo importado que causa preocupación en muchos países.

¹ Aquellos generados a partir de biomasa y por lo tanto renovables, con un impacto ambiental menor que los combustibles fósiles.

²Metil-ter-butil-eter, oxigenante considerado como agente cancerígeno.

La principal fuente de biomasa para la producción de etanol está en el sector azucarero. En los últimos tres años la producción mundial de azúcar centrifugado sobrepasó los 140 millones de toneladas anuales³, donde el 70% proviene de la caña de azúcar y el resto de la remolacha.

El desarrollo de biocombustibles dependerá de la apropiada oferta de productos agrícolas y de la demanda energética. Por ahora, la producción mundial de estos biocarburantes alcanzó la cifra de los 49 billones de litros, que representan el 2% del consumo mundial de gasolina⁴. De esta producción, el 93% corresponde a bioetanol la cual se centra principalmente en Estados Unidos, Brasil, Canadá, la Unión Europea, China y Australia.

Debido a ello se realizará un estudio de evaluación de las tecnologías más viables para la producción de etanol a partir de la caña de azúcar, tomando en cuenta factores económicos, técnicos, sociales, políticos, ambientales, etc.

³Tomado de www.fao.org/docrep/008/j6801s/j6801s09.htm

⁴ www.ciem.org/bancoconocimiento/L/Laeradelosbiocombustibles/Laeradelosbiocombustibles.asp.



CAPITULO I

ANTECEDENTES



El creciente interés por el desarrollo de combustibles renovables y amigables con el medio ambiente encuentra su origen, en dos preocupaciones: el calentamiento global y el potencial desabastecimiento de petróleo.

El paradigma del fin del siglo XX ha sido que la atmósfera no resiste más las emisiones de dióxido de carbono y otros gases responsables de provocar el efecto invernadero y generar el calentamiento global del planeta, amenazando la vida de todas las especies.

El proceso por lograr el desarrollo de combustibles provenientes de fuentes renovables que fueran viables económicamente y menos contaminantes que los de origen fósil, ya había comenzado en la década de los '70, pero el mismo se aceleró en la década de los '90 al tomar conciencia de las consecuencias del efecto invernadero¹.

Con respecto al petróleo, el peligro de un potencial desabastecimiento, se funda en dos hechos: Por un lado, el agotamiento de las reservas petroleras y por el otro las grandes profundidades a las que se encuentra.

Estos motivos, sumados al conjunto de desafíos críticos con que comenzó el siglo XXI, en cuestiones de índole económica, seguridad, social y medioambiental, han potenciado el interés por los combustibles renovables de origen vegetal (biocombustibles), principalmente el etanol y el biodiesel.

¹ Una evidencia de ello fue en la cumbre de Kyoto (Japón) donde se intentó establecer una política ambiental global, que redujera las emisiones de dióxido de carbono, producto de la combustión de fuentes fósiles. El acuerdo que aún no ha sido ratificado por los principales países industriales, establece que cada país firmante se compromete que en el año 2010 el nivel de sus emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera no deberá superar el 90% del nivel de las emisiones registradas en 1990.

1.1 El Etanol y su Relación con el Medio Ambiente.

El etanol, como combustible renovable elaborado a partir de materias agrícolas, es una de las herramientas más eficaces para luchar contra la contaminación atmosférica.

Según el departamento de energía de los E.E.U.U., el transporte vehicular es el mayor agente contaminante. La combustión de derivados del petróleo por parte del sistema de transporte sería responsable del 82% del monóxido de carbono, del 43% de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) precursores del ozono a nivel de la superficie terrestre, y del 57% de los óxidos de nitrógeno, existentes en el aire en las ciudades norteamericanas.

Así mismo, según la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), las naftas son la fuente más grande de carcinógenos artificiales, puesto que son una mezcla compleja de docenas de químicos, muchos de ellos tóxicos, como los reforzadores de octanaje: el benceno y el tolueno. Cuando se agrega etanol a las naftas, la potencia de esos aditivos tóxicos se diluye, ya que el etanol contiene un 35% de oxígeno, lográndose por ello una combustión más completa del combustible, reduciéndose las emisiones nocivas, como los humos y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) que las naftas normalmente arrojan en el aire.

Los vehículos que utilizan mezclas combustibles que contienen etanol: (i) reducen las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero producto de los combustibles fósiles- hidrocarburos no quemados (HC), en el 3.9% (E-10) o hasta el 35-46% (E-85); (ii) disminuye las emisiones de monóxido de carbono (CO) en un 30%; (iii) las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en un 27%, aunque éste es liberado cuando se quema el etanol, es reciclado dentro de tejido orgánico durante el desarrollo de la planta.

De hecho, el uso del etanol mezclado en las naftas puede resultar en una reducción neta de los niveles de dióxido de carbono atmosférico, dependiendo de la forma en que se obtuvo el etanol.⁶

El etanol funciona como un excelente reforzador del octanaje, por ello, usando E-10 se elimina la necesidad de usar un aditivo en las naftas durante el invierno. El etanol no significa ninguna amenaza en el agua superficial o subterránea, puesto que es una sustancia producida durante la fermentación de la materia orgánica, es soluble en agua y es total y rápidamente biodegradable.

1.2 Dependencia Energética Mundial de Combustibles Fósiles.

La explotación y utilización generalizada de combustibles fósiles durante los últimos dos siglos ha provocado una disminución considerable en las reservas mundiales de estos recursos, sin poderse vislumbrar nuevos yacimientos que permitan evitar el abatimiento de su disponibilidad en el mediano o largo plazo.

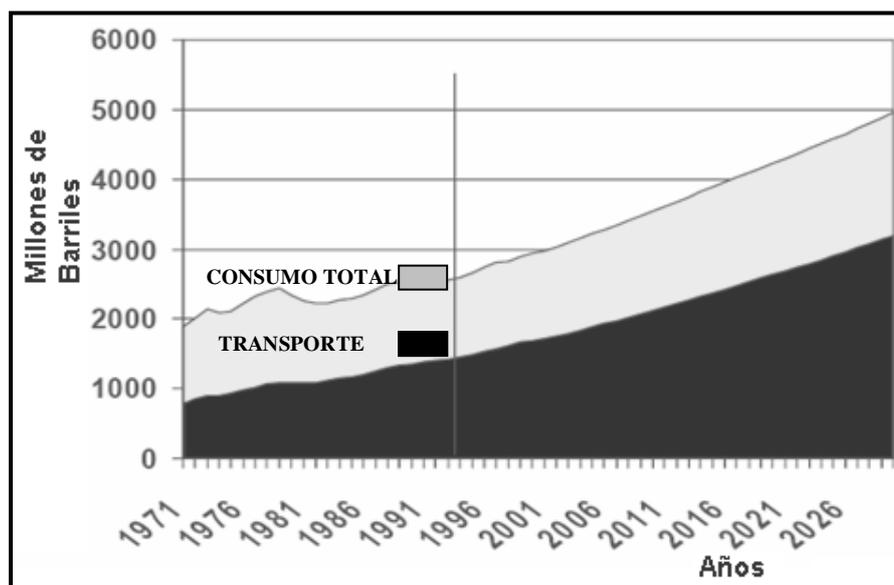
Los recursos energéticos fósiles constituyen un bien muy demandado, por esta razón las naciones con acceso a ellos tienen un gran poder de definición de políticas, explícitas o tácitas, de administración de estos combustibles. Las naciones carentes de recursos energéticos fósiles o con dificultad de acceso a los mismos, presentan una dependencia fuerte de los países productores de petróleo y gas natural. Algunos países sin recursos energéticos fósiles han buscado su independencia energética mediante el desarrollo de tecnologías de explotación de otros recursos, por lo general, de disponibilidad infinita debido a que el tiempo natural de formación de estos es menor o igual al tiempo de consumo humano. Entre estas fuentes energéticas está la transformación de materia vegetal en combustibles, como es el caso del etanol.

⁶ Michael S. Graboski, Fossil Energy Use in Manufacture of Corn Ethanol , Colorado School of Mines-August, 2002.

El petróleo es la fuente de energía que mueve el 95% del transporte mundial. No hay un sustituto energético total para el petróleo en todo el planeta, porque el petróleo representa el 40% del consumo mundial (Fig. 1.1) de energía y la mayor parte de la infraestructura mundial está preparada para consumir petróleo y no otros combustibles.

El cenit máximo de producción de petróleo en los próximos cinco o diez años, en el periodo de 2005 y el 2015 va a empezar a existir menos petróleo cada año que el año anterior y eso de forma inexorable y a un ritmo que puede oscilar entre el 3% y el 6% menos cada año.

FIGURA 1.1: Consumo de Petróleo en el Mundo 1971-2026.*



México es un país productor de petróleo, por lo cual su economía está basada en este recurso fósil. Sus reservas petrolíferas han disminuido en los últimos años y no ha habido descubrimientos importantes de yacimientos que permitan prolongar el estatus de la economía mexicana. Se hace necesaria una independencia del petróleo sólida y duradera, por esta razón en los últimos años el gobierno del país ha mostrado interés en fomentar la producción de etanol a partir de recursos vegetales.

* A. Villamar, Elementos de la Estrategia Política y Económica de los Promotores de Etanol, Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio (RMALC), Julio, 2007.

Un síntoma de la creciente percepción de los dirigentes mexicanos sobre las oportunidades del etanol es la reciente evolución del marco legal, tendiente a proporcionar la base adecuada para la adopción de etanol en la matriz energética. Así, pueden ser mencionadas la Ley de Desarrollo Sustentable de Caña de Azúcar, que en dos artículos menciona explícitamente la necesidad de promover el etanol como carburante y oxigenante de gasolina” (revisión en enero de 2006 de la Normativa 086/94), Especificaciones de los combustibles fósiles para protección ambiental, estableciendo exigencias de oxigenación para las gasolinas mexicanas y abriendo la posibilidad del empleo de etanol como aditivo, bien como la aprobación por la Cámara de Diputados de la Ley para el Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos, en abril de 2006.

1.3 El Etanol- ¿Que es? - Propiedades.

El etanol es un líquido incoloro, volátil con un olor característico suave; inflamable; soluble en agua; que hierve a 78°C (172°F) y se congela a -112°C (-170°F).

El etanol denominado también alcohol etílico o alcohol del cereal, es un compuesto orgánico cuya molécula se compone de carbono, hidrógeno y un hidroxilo, siendo su fórmula $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ y su peso molecular de 46.0684, por lo cual un litro de etanol pesa 0.815 Kg.

Es un alcohol anticorrosivo, relativamente no tóxico, hecho de materias biológicas no renovables, que cuando se quema produce una llama azul pálida sin residuos y entrega una energía considerable.

1.4 Usos del Etanol.

El etanol puede utilizarse como base en bebidas (cervezas, vinos, licores, etc.), como combustible o solvente, como materia prima en varios procesos industriales, tales como la fabricación de perfumes, pinturas, lacas y explosivos.

Básicamente existen tres maneras en que el etanol puede utilizarse como combustible para el transporte, aprovechando sus características como componente oxidante y antidetonante, con el consiguiente aumento en el número de octanos y mejoramiento en la calidad de las emisiones de la combustión:

- (i) como mezcla con las naftas denominadas genéricamente gasohol, naftas que contienen etanol en una proporción del 5.7%, 7.7% y 10% en E.E.UU., en un % variable en Brasil.
- (ii) Como componente de las naftas reformuladas ETBE. El etanol se usa en la fabricación de Etil-Tri-butil-Eter (ETBE)*, un aditivo suplementario a las naftas que sustituye al MTBE en la reformulación de las naftas. El MTBE (Metil-Tri-Butil-Eter)* se había convertido en un componente muy utilizado para elevar el contenido de oxígeno y el nivel de octanaje de las naftas cuando las preocupaciones ambientales hicieron que se eliminase el plomo de las naftas.
- (iii) Directamente como combustible alternativo para reemplazar las naftas en su fórmula conocida como “E-85”-mezcla un 85% etanol y un 15% nafta.

El etanol que se va a utilizar como combustible se le desnaturaliza agregándole una cantidad pequeña de nafta, con el objeto de hacerlo impropio para el consumo humano.

Puede usarse en dos formas básicas: el etanol anhidro, al que se le quita toda el agua que es usado en las mezclas con las naftas y el etanol hidratado, que mantiene agua en su composición, para ser usado como un combustible autónomo (95% de etanol).

*Para más detalles del impacto en el medio ambiente del uso del etanol, el ETBE y el MTBE, ver anexo I.

Ventajas:

- El etanol puede ser obtenido a partir de fuentes renovables
- Es un combustible líquido y puede ser manejado tan fácilmente como las naftas y el diesel.
- Presenta un alto índice de octanos: 105
- Produce menos dióxido de carbono al quemarse que la nafta, pero el impacto total depende del proceso de destilación y la eficiencia de los cultivos.
- Genera menores emisiones de monóxido de carbono cuando se usa como aditivo de las naftas.
- Resulta menos inflamable que los combustibles derivados del petróleo.
- Baja toxicidad.

Desventajas:

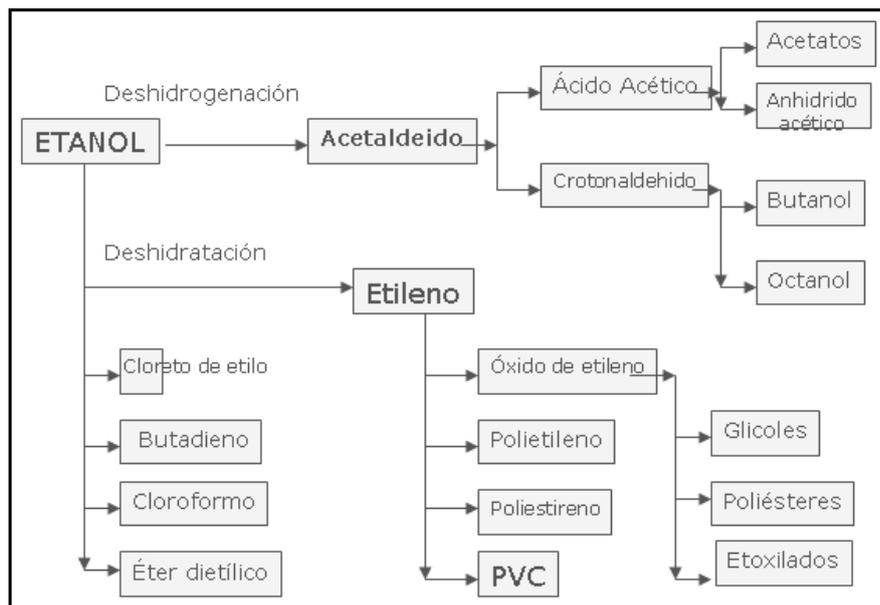
- Presenta una menor densidad de energía que las naftas, contiene dos terceras partes de la energía contenida para el mismo volumen de nafta.
- Genera emisiones altamente evaporativas.
- Presenta dificultades para encender en climas fríos, en estado puro, como E-100.
- Se incrementan las emisiones de óxidos de nitrógeno y aldehídos.

El mercado del alcohol puede subdividirse en tres (Gráfica 1.1), de acuerdo a sus destinos fundamentales como: combustible, uso industrial y bebidas. El uso como combustible representa el 61% de la producción mundial, ya sea para mezclar o reemplazar petróleo y derivados, alrededor del 23% se destina a la industria procesadora (cosméticos, farmacéutica, química, entre otras), y el 16% restante se destina a la industria de bebidas.

GRÁFICA 1.1: Usos Principales del Etanol a Nivel Mundial.



FIGURA 1.2: Principales Productos obtenidos a partir del Etanol.



1.5 Mercado Mundial y Nacional.

1.5.1 Producción Mundial.

Como puede apreciarse en la tabla presentada a continuación (Tabla 1.1), la tendencia de producción a nivel mundial describe un comportamiento ascendente, lo cual supone una demanda de mercado igualmente positiva. Cabe pensar que dicho comportamiento podría atribuirse a la necesidad internacional de sustituir los combustibles tradicionales debido a las sucesivas crisis que se experimentan en este campo, del mismo modo, el consumo mundial de bebidas alcohólicas está en crecimiento. Todo parece indicar que la demanda de Etanol en el mercado mundial tenderá a acrecentarse en los próximos años.

TABLA 1.1: Proyección de la Producción Mundial de Alcohol.

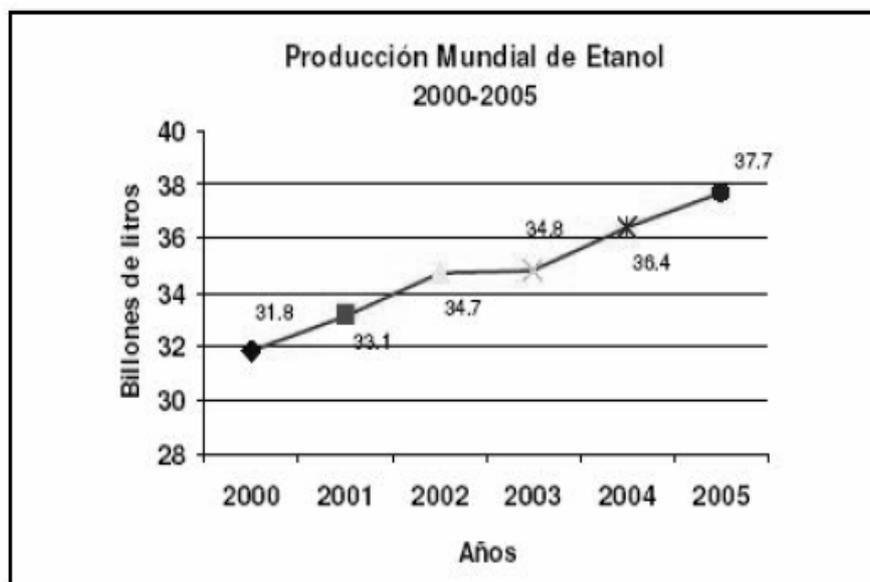
Año	Total (Billones de lts.)	DESTINOS		
		Combustible	Industria	Bebidas
2000	31.8	18	9.8	3
2001	33.1	20	10	3.1
2002	34.7	21	10.5	3.3
2003	34.8	21.5	10	3.3
2004	36.4	22	11	3.4
2005	37.7	23	11.2	3.5

Fuente: Proyecciones F.O. Licht

La tabla anterior revela dos características esenciales de la producción mundial de etanol. Lo primero y más importante, se puede observar un crecimiento constante y mantenido durante los últimos 4 años pasando de 31.8 billones de litros en el 2000 a 36.4 en el 2004 y en segundo lugar, tenemos que el crecimiento en el uso del etanol es más acelerado como combustible que como para bebidas o para usos industriales.

La demanda de etanol para combustible pasa de 19 billones de litros en el 2000 a 22 billones de litros en el 2004, y la demanda de etanol industrial pasó de 9.8 billones de litros en 2000 a 11 billones de litros en el 2004. Estos datos mundiales parecen indicar que la demanda mundial del etanol como combustible carburante está en crecimiento.

GRÁFICA 1.2: Producción mundial de Etanol 2000-2005.⁷



⁷ Fuente: Elaboración propia en base a datos de F. O. Licht

1.5.2 Producción Nacional.

Con potencial para producción de etanol, existen en México ya 58 ingenios azucareros, procesando la caña cosechada en 750 mil hectáreas y produciendo en torno de 5 millones de toneladas de azúcar por año. Una parte de estos ingenios posee destilerías, con una capacidad instalada para producir anualmente cerca de 167 mil m³ de etanol de todos los tipos, incluyendo 33 mil m³ de etanol anhidro. En los últimos años la producción de etanol es declinante, con un volumen de 39 mil m³ producidos en la zafra 2004/2005, a partir de miel residual de la producción azucarera. Considerando la producción de miel en los ingenios mexicanos y una productividad de 8.8 litros de etanol por tonelada de caña procesada, podrían ser producidos cerca de 400 mil m³ de etanol.

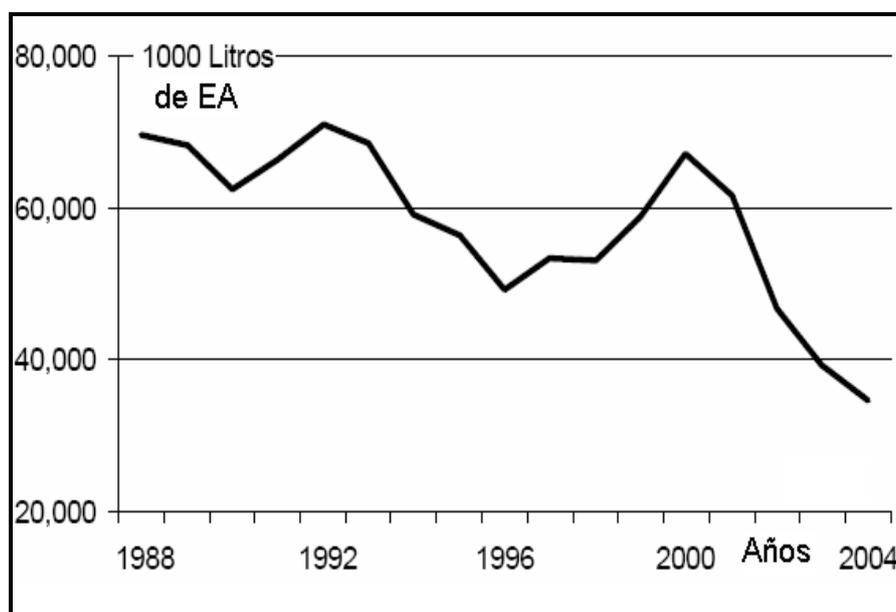
Las destilerías indicadas en la Tabla 1.2 que representan aproximadamente mitad de las destilerías mexicanas, que operaron en la zafra 02/03 totalizaron una producción de 39.2 mil metros cúbicos de etanol (96° GL),

TABLA 1.2: Producción de Etanol en la zafra 02/03 de los ingenios de México.

Ingenio	Capacidad instalada		Zafra 02/03		
	(litros/día)	(litros/zafra)	Miel producida (t)	Miel utilizada para etanol (t)	Etanol producido (litros)
Aarón Sáenz	28,500	8,550,000	39,756	21,028	4,948,000
Calipam	8,000	2,400,000	8,531	4,194	990,261
Constancia	30,000	9,000,000	21,675	21,248	4,997,400
El Carmen	18,000	5,400,000	19,815	11,872	2,923,000
El Mante	24,000	7,200,000	32,811	19,654	5,082,300
Independencia	15,000	4,500,000	7,845	4,743	1,250,908
La Joya	14,000	4,200,000	11,637	6,409	1,307,000
La Providencia	25,000	7,500,000	20,322	8,653	1,818,471
Pujilic	20,000	6,000,000	49,380	14,122	3,373,004
San José de Abajo	25,000	7,500,000	15,048	4,348	1,118,000
San Nicolás	40,000	12,000,000	14,800	10,973	2,547,683
San Pedro	25,000	7,500,000	27,341	13,140	3,206,000
Tamazula	25,000	7,500,000	42,463	27,000	5,643,750
total	297,500	89,250,000	311,425	167,384	39,205,777

Para las últimas zafras, los máximos valores de producción de etanol en los diversos ingenios mexicanos alcanzaran un total de 70 millones de litros/año. En ese sentido, es interesante observar que la producción alcanzada en la zafra 02/03 correspondió a 55% de ese máximo. La Gráfica.1.3 presenta como ha variado la producción de etanol de caña de azúcar en México en los últimos quince años.

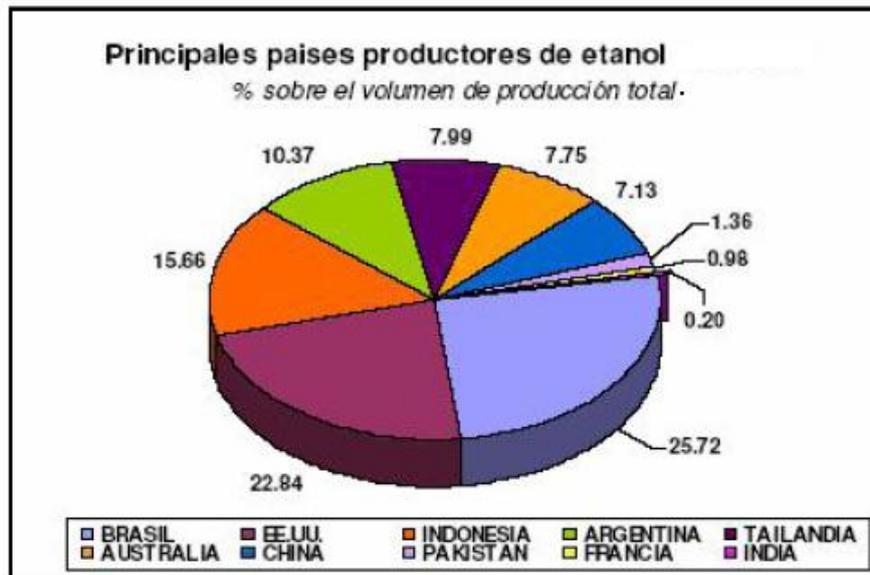
GRÁFICA 1.3: Producción de Etanol de Caña de Azúcar en México, 1988/2004.



1.6 Principales Países Productores de Etanol.

De acuerdo a las estadísticas internacionales, Brasil, Estados Unidos e Indonesia, encabezan respectivamente la lista de principales países productores a nivel mundial, acumulando entre ellos un 64.2% de la producción mundial total de etanol.

GRÁFICA 1.4: Ranking Mundial de Producción de Etanol.*



La gráfica anterior muestra que el líder indiscutible en la producción de Etanol a nivel mundial es Brasil, representante de una de las economías más potentes y grandes de América Latina. Del mismo modo, haciendo un análisis por zonas geográficas, se puede observar que tres países del Continente Americano (Brasil, Estados Unidos y Argentina) están produciendo más del 58% del Etanol mundial, lo que coloca el continente americano en una posición privilegiada en cuanto a experiencia en el tema.

1.7 Introducción de Etanol en Gasolinas:

La búsqueda de nuevos combustibles, de origen biológico y renovable (biodegradables), capaces de aumentar el rendimiento de los motores de automóviles, y la necesidad de disminuir la emanación de los gases invernadero han contribuido a usar al etanol anhidro (EA) como combustible o aditivo para gasolinas comerciales, a nivel mundial.

Brasil y EE.UU. tienen experiencias reconocidas de éxito, merced a políticas gubernamentales que legislan a favor de una “combustión limpia”, fomentando el consumo del etanol en particular y priorizando las nuevas tecnologías para elaborarlo. En ambos países, la producción de etanol es creciente, aunque aun no satisface a la totalidad de su parque automotor⁸.

1.7.1 Producción de Éteres en México (MTBE y TAME).

A continuación se presenta una visión de actuales condiciones para la fabricación de éteres y etanol en México, productos que pueden ser utilizados como componentes oxigenantes en la gasolina buscando mejorar su calidad y reducir las emisiones contaminantes.

De acuerdo con la actual especificación mexicana (NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005), todas las gasolinas regulares, (denominadas PEMEX Magma, con índice de octano mínimo 87) consumidas en las Zonas Metropolitanas de Valle de México, Guadalajara y Monterrey y toda la gasolina súper (denominadas PEMEX Premium, con índice de octano mínimo 92) consumida en todo el resto del país, deben contener aditivo oxigenante que permitan hasta 2.7% de oxígeno en peso (SEMARNAT, 2006).

Para el cumplimiento de éstas exigencias normativas de oxigenación se emplearon como aditivos el MTBE (Metil Terbutil Éter) y el TAME (Teramil Metil Éter), siendo requeridos en 2005 volúmenes de 23 MBD (miles barriles por día), parcialmente producidos en México.

La producción de esos oxigenantes en México fue de 10.6 MBD, 46% de las necesidades del país, complementándose las necesidades con MTBE importado.

⁸ Artículo: Producción de etanol anhidro como aditivo para la gasolina a partir de la caña de azúcar de la región del río Huallaga, Manuel G. Cerpa, Universidad de Valladolid, 2005.

La producción de éteres para oxigenación de gasolina en México es realizada en seis plantas instaladas en refinerías de PEMEX, con las capacidades nominales indicadas en la tabla 1.3, que suman 15.6 MBD como MTBE y TAME. Asumiendo una eficiencia de operación de 92%, sería posible una producción de 14.4 MBD de MTBE. En la actualidad esas plantas producen cerca de 10.6 MBD, operando a aproximadamente 70% de su capacidad nominal. Estas plantas eventualmente podrían ser adaptadas para utilizar etanol en sustitución al metanol, pasando a producir en este caso ETBE (Etil Terbutil Éter) y TAEE (Teramil Etil Éter).

TABLA 1.3: Capacidad de las plantas de producción de MTBE y TAME .

Refinería	MTBE (MBD)	TAME (MBD)
Madero	2.5	2.3
Cadereyta	2.9	0
Salamanca	1.1	0
Tula	2.3	2.3
Minatitlán	0	0
Salina Cruz	0.7	1.5
Total	9.5	6.1

1.7.2 Posibles Escenarios para la Introducción del Etanol en México.

Considerando los estudios previos hechos por consultores mexicanos, fueron estimados los potenciales de demanda y oferta de etanol combustible. Para la demanda fueron evaluados tres escenarios de penetración del etanol en México.

TABLA 1.4: Escenarios para introducción de Etanol combustible en México (Proyección hacia el 2010).*

Escenario	Demanda de Etanol	Ahorro de divisas por la reducción de la importación de gasolina y MTBE (mil US\$)
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE, en la capacidad de producción	411.9	185,355
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5.7% en 44% de la gasolina (2% de oxígeno)	1,110.6	499,500
3. Mezcla de 10% de etanol en toda la gasolina del país (3.5% de oxígeno)	4,406.3	1,982,835

Podría ser considerada, como alternativa al Escenario 1, la manutención de la producción local de éteres y sustitución de los éteres importados por etanol nacional, que significaría aumentar la demanda de etanol en ese escenario cerca del 22%. El Escenario 3 representa la máxima demanda de etanol, considerando la mezcla de 10% de etanol en todas las gasolinas.

En México se pretende estimular la fabricación nacional de etanol para su aplicación generalizada como componente de gasolinas, para:

- Contribuir a la seguridad energética nacional;
- Diversificar la oferta de energía con base en combustibles renovables;
- Desarrollar el campo mexicano y reducir el impacto al medio ambiente.

*Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y Biodisel para el transporte en México, SENER, Noviembre 2006.

1.8 Legislaciones y Regulaciones que afectan el Mercado Energético en México.

En términos de legislaciones y regulaciones aplicables al mercado energético mexicano, se pueden citar las siguientes:

- Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.
- Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS).
- Ley del Impuesto al Valor Agregado (IVA).
- Ley de Energía para el Campo.
- Proyecto de Decreto de la Ley para el Desarrollo y Promoción de Bioenergéticos.
- NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.

Todas estas regulaciones tienen un impacto en diferentes ámbitos del sector energético.

Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional: Se vincula a la facultad del estado para la transformación del petróleo crudo en la industria de refinación, así como en el transporte, distribución y venta de primera mano de los productos obtenidos de la misma.

Si bien el etanol proviene del sector agrícola, su empleo en forma directa como combustible no estaría sujeto a estas regulaciones. No así la mezcla de etanol con gasolina (en cualquiera de sus proporciones), la cual sólo puede llevarla a cabo Petróleos Mexicanos (PEMEX), a través de su organismo subsidiario PEMEX Refinación, quién en primer lugar es responsable de la elaboración, transporte, almacenamiento, distribución y las ventas de primera mano de los derivados del petróleo, y además es el propietario y administrador de la franquicia PEMEX, así como el único suministrador de los combustibles que se comercializan en las estaciones de servicio en el país.

Ley del IEPS y el IVA: Se aplican a la comercialización de las gasolinas y el diesel que se expenden en la red de estaciones de servicio, así como a las importaciones de estos productos. En la Ley del IEPS en su artículo 2^o-A, establece que los precios de referencia de las gasolinas y el diesel importados se ajustaran por la calidad correspondiente, al producto de ésta operación se deberán sumar los costos de manejo y el costo neto de transporte a las agencias de ventas de que se trate, éstos valores que se obtengan no incluirán el IVA.

En este contexto, la citada legislación establece en el artículo 2^o, inciso B que el alcohol (solución acuosa de etanol con impurezas que lo acompañan con graduación mayor a 55 grados Gay Lussacc, a una temperatura de 15 °C), alcohol desnaturalizado (solución acuosa de etanol con las impurezas que la acompañan, con una graduación mayor a 55 grados Gay Lussacc, a una temperatura de 15 °C, con la adición de las sustancias desnaturalizantes autorizadas por la Secretaría de Salud) y las mieles incristalizables tienen un impuesto del 50 por ciento.

Ley de Energía para el Campo: Establece las reglas para el otorgamiento de apoyos a las actividades agropecuarias, en donde se incluye la agricultura, la ganadería, silvicultura, acuacultura y la pesca ribereña. A través de ésta, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), establece las cuotas energéticas a cada una de las actividades mencionadas para cada ciclo productivo, las cantidades que serán sujetas a este tratamiento se establecen en el Reglamento, que para tal efecto emitió la Secretaría.

Decreto de la Ley para la Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos: En ella se establece la utilización de una concentración máxima de 10 por ciento en volumen de bioetanol en la formulación de las gasolinas a nivel nacional, determinando para ello la necesidad de evaluar y cuantificar la inversiones en infraestructura productiva, así como los requerimientos de apoyos para la consolidación y viabilidad de esta iniciativa, buscando en todo momento el desarrollo agrícola nacional idóneo a esta medida.

NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005: En esta norma se definen las especificaciones que deberán cumplir cada uno de los parámetros tanto de las gasolinas (PEMEX Magna y Premium), así como el diesel para servicio automotriz (PEMEX Diesel) y el destinado a servicio marino y agrícola.

En el caso de las gasolinas, en particular la PEMEX Magna comercializadas en las Zonas Metropolitanas de Guadalajara (ZMG), de Monterrey (ZMMTY) y del Valle de México (ZMVM), la norma establece que deberán contener en su fórmula un valor máximo de oxígeno de 2.7 por ciento en peso; además esta concentración se especifica a nivel nacional para la PEMEX Premium, sin establecer el tipo de compuesto empleado para tal fin, pero sí, la necesidad de reportarlo.

Clasificación química de la materia prima usada en el proceso de producción de Etanol:

- 1.- Azúcares (*caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce, melazas y frutas*).
- 2.- Almidones (*maíz, sorgo, cebada, trigo, yuca y papa*)
- 3.- Material celulósico (*madera, bagazo de caña y pulpa de papel*)

De acuerdo al estudio realizado por la Secretaría de Energía (SENER) de México, la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) y el Banco Interamericano de Desarrollo, los vegetales más extensamente cultivados en México, de acuerdo a su periodicidad de temporadas, son:

Cíclicos: maíz, frijol, sorgo, trigo, cebada y cártamo.

Perennes: caña de azúcar, cítricos, aguacate, alfalfa, café, nuez pecanera, plátano, uva, manzana y mango.

De los cuales y según el mismo estudio, los cultivos con mayor potencial para ser aprovechados como materia prima en la producción de etanol son: maíz, sorgo, trigo y caña de azúcar.

Además, en México se siembran y aprovechan otros cultivos menores como la yuca y la remolacha azucarera, que pueden ser también utilizadas para obtener etanol de sus componentes polisacáridos.

2.1.1 Producción de Etanol a partir de la Caña de Azúcar.

La **caña azucarera** (*Saccharum officinarum*) es una planta altamente aprovechable, pues de sus jugos se obtienen la sacarosa, mejor conocida como azúcar común, mieles y melazas; sus tallos molidos han sido empleados como combustible en los ingenios azucareros; y sus residuos vegetales son empleados para hacer composta utilizable como abono para cultivos. También del jugo de la caña se obtiene etanol por fermentación alcohólica con levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). Brasil ha desarrollado una tecnología para aprovechar los tallos molidos, mejor conocidos como bagazo de caña, y transformarlos bioquímicamente en etanol mediante microorganismos. La composición química de los tallos y de las hojas de la caña se muestra en la tabla 2.1.

TABLA 2.1: Composición química de tallos y hojas de la Caña azucarera.

Componente	Tallo (% peso)	Hojas (%peso)
Materia seca	29	26
Azúcares	15.43	2.18
Lignocelulosa	12.21	19.80
Cenizas	1.36	4.02
Materia prima para etanol	27.64	21.98

Una vez extraídos los jugos de los tallos de la caña, queda el bagazo constituido principalmente por los polisacáridos de las paredes celulares vegetales (Tabla 2.2).

Los rendimientos de caña por hectárea varían considerablemente entre países y regiones. En México es de 61 toneladas por hectárea y se cultivan por año cerca de 750 mil hectáreas, se producen poco más de 5 millones de toneladas de azúcar y 39 millones de litros de etanol. Esta producción podría ser ampliada rápidamente dedicando mayor producción de los 58 ingenios nacionales.²

TABLA 2.2: Composición química del bagazo de la Caña azucarera.

Componente	Bagazo de Caña (% peso)
Celulosa	51.23
Hemicelulosa	24.11
Lignina	20.67
Cenizas	3.99

2.1.2 Producción de Etanol a partir de Maíz.

El **maíz** (*Zea mays*) es una planta cuyo producto principal es el elote o mazorca, principal alimento de México y de algunos países de Latinoamérica. En el resto del mundo, a la mazorca se le emplea principalmente como forraje para animales.

² Arjona Diego, Combustibles y biocombustibles, Seminario Internacional de Biocombustibles, Organización Latinoamericana de Energía, Brasil, Abril, 2006.

Por esta razón, Estados Unidos y países no latinoamericanos han utilizado al grano de la mazorca en la obtención de etanol para diversos fines, entre ellos el energético. La composición química del grano de maíz se muestra en la tabla 2.3.

TABLA 2.3: Composición química del grano de Maíz.

Componente	Grano de Maíz (% peso)
Agua	15.1
Almidón	62.6
Aceite	3.7
Proteína cruda	8.4
Fibra cruda	2.0
Cenizas	1.5

Al igual que la caña de azúcar, las demás partes de la planta del maíz son aprovechables como forraje para animales principalmente. Pero debido a su composición química, su materia constitutiva (Tabla 2.4) puede ser transformada en etanol mediante un proceso similar al del bagazo de la caña de azúcar.

El olote de maíz, el cual es la estructura de la mazorca que contiene a los granos, casi no es aprovechado, se le considera un residuo del maíz. Pero según su contenido lignocelulósico puede ser empleado para producir etanol bioquímicamente.

TABLA 2.4 Composición química del tallo y del olote de Maíz.

Componente	Tallo (% peso)	Olote (%peso)
Celulosa	33.5	46
Hemicelulosa	32.6	
Lignina	11.0	
Pentosas	20.2	-
Cenizas	1.0	-

2.1.3 Producción de Etanol a partir de Trigo.

El **trigo** (*Triticum vulgare*, *Triticum durum*) es una planta totalmente aprovechable, pues sus granos y su cascarilla sirven de alimento humano y animal, y la paja o tallo sirve principalmente como aislante y combustible. Tradicionalmente, los granos han sido empleados para la producción de etanol mediante fermentación alcohólica con levaduras, obteniéndose cerveza, whisky y otros derivados.

La composición del grano de trigo se presenta en la tabla 2.5. Si el grano de trigo contiene más del 13% de proteína, no puede ser utilizado en la producción de etanol por problemas en la fermentación.

TABLA 2.5: Composición química del grano de Trigo.

Componente	Grano de Trigo (% peso)
Agua	13.2
Almidón	69.3
Aceite	2.0
Proteína cruda	11.7
Fibra cruda	2.0
Cenizas	1.8

La paja puede emplearse también en la producción etílica por su alto contenido de fibras de polisacáridos lignocelulósicos (Tabla 2.6).

TABLA 2.6: Composición química de la paja de Trigo.

Componente	Paja (% peso)
Celulosa	34.0
Hemicelulosa	27.6
Lignina	18.0
Pentosas	20.1

2.1.4 Producción de Etanol a partir de Remolacha azucarera.

La raíz de la **remolacha azucarera** (*Beta vulgaris*) o betabel también es empleada para producir azúcar debido a su composición química (Tabla 2.7), por lo que se le puede aprovechar para producir etanol.

TABLA 2.7: Composición química de la raíz de Remolacha azucarera.

Componente	Raíz de Remolacha (% peso)
Agua	75.10
Monosacáridos	19.14
Fibra cruda	1.13
Proteína cruda	1.35
Grasa	0.25
Cenizas	3.03

Existen otros cultivos vegetales aprovechables, pero los de mayor producción anual en México son los anteriormente mencionados.

Entre los microorganismos a ser utilizados en la transformación bioquímica de los componentes de los vegetales se encuentran la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) y otros más enlistados en la tabla 2.8.

TABLA 2.8: Microorganismos transformadores de polisacáridos en Etanol.

Microorganismo	Sacárido base
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Hexosas
<i>Candida sp.</i>	Pentosa
<i>Clostridium thermocellum</i>	Celulosa

En la tabla 2.9 se sintetiza los procesos existentes para fabricación de etanol, mostrando los aspectos generales de las biomásas. Mientras los procesos utilizando caña y maíz son conocidos y comercialmente bien desarrollados, los demás procesos no presentan la misma madurez. Particularmente el proceso de hidrólisis de los residuos celulósicos, de gran potencial, sigue en desarrollo, esperándose en un horizonte de por lo menos diez años su cabal perfeccionamiento.

TABLA 2.9: Síntesis de los procesos de fabricación de Etanol.

Cultivo	Conocimiento agronómico	Exigencia edafoclimática	Tecnología para producción de etanol	Posibilidad de integración productiva y uso de subproductos
caña	alto	alta	conocida y practicada	alta
maíz	alto	alta	Conocida y practicada (EUA)	alta
sorgo dulce	mediano	mediana	conocida	mediana
yuca	limitado	baja	conocida (Tailandia)	baja
remolacha azucarera	bajo	mediana	conocida (Europa)	baja

Los aspectos principales a tener en cuenta al promover un cultivo para fines energéticos son naturalmente su productividad y su costo. De hecho, para plantear un cultivo para fines bioenergéticos es esencial minimizar los requerimientos de área y presentar elevada viabilidad económica, ya que la materia prima representa el componente más alto del costo final del etanol, típicamente alrededor de 60%.

Sin embargo hay aspectos adicionales también muy importantes como la competencia con la producción de alimentos, la capacidad de provisión de servicios de extensión agrícola y la demanda asociada de recursos naturales para producción agrícola, particularmente suelos fértiles y agua. Además, la existencia de coproductos y subproductos, de valor alimentario, industrial o energético, es también un aspecto muy importante, que puede conferir una deseable flexibilidad en la producción bioenergética, asociando la disponibilidad de biocombustibles con otras fuentes de valor económico.

Además de los aspectos de productividad y costos, la selección de las materias primas a ser empleadas para producción de etanol se debe tomar en cuenta el nivel de conocimiento agronómico, el balance energético (que expresa la relación entre la demanda y la producción energética para una determinada combinación materia prima/ proceso de conversión), la disponibilidad de subproductos de valor económico y los impactos ambientales (a nivel de producción agrícola e industrial).

Bajo esos supuestos la caña surge naturalmente como la opción más evidente para promover en el corto plazo la producción de etanol en México, alternativa que se refuerza al tener en cuenta la larga experiencia del país con ese cultivo. No obstante, eso no quiere decir que la caña es necesariamente la única opción para producir etanol en México, ya que a mediano plazo podría desarrollar otras posibilidades.



CAPITULO III.



LA CAÑA DE AZÚCAR, LA MEJOR OPCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL EN MÉXICO.

En México, se cultivan desde hace décadas, el maíz, la caña de azúcar, el trigo, la yuca, la remolacha y el sorgo. No se tiene experiencia con la remolacha tropical.

De las especies mencionadas, se cultivan miles de hectáreas cada año con tecnología de “temporal” y de riego.

De las especies agrícolas citadas, desde hace décadas somos importadores de millones de toneladas de maíz, trigo y sorgo cada año. Por el contrario, de azúcar de caña, somos exportadores.

En México, se cultivan aproximadamente 50 millones de toneladas métricas de caña (TM), para una producción de 5.8 millones de TM de azúcar y 1.8 millones de TM de melazas (zafra 2004/05); uno de cuyos destinos finales es precisamente la producción de alcoholes de distintas calidades. En años recientes, se instalaron en dos destilerías de ingenios azucareros, sendas columnas deshidratadoras, para la obtención de alcohol anhidro, mejor conocido como *etanol*, para uso como carburante asociado a las gasolinas convencionales.

La iniciativa surgió del acuerdo suscrito entre la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica y el Gobierno del Distrito Federal, aunque sin la aprobación de PEMEX. Se acordó que serían destinados 10 millones de litros de etanol anhidro, para servir en las unidades del Gobierno del DF; recibiendo apoyos económicos los involucrados, mismos que serían liquidados en especie y en su momento.

El antecedente desafortunadamente fracasó, aunque sirvió para el desarrollo de una investigación orientada hacia la exploración de salidas alternativas al agudo problema del sector azucarero.

Si bien la producción de alcohol etílico en las 12 destilerías que operan en los ingenios alcanzó una cifra cercana a los 60 millones de litros en la zafra más reciente; en lo que respecta al *etanol anhidro*, la producción fue insignificante, destinándose fundamentalmente para fines distintos al energético.

Habiendo tenido contacto con la experiencia Brasileña, pilar de dicha iniciativa en el mundo, se puede decir que, para que la opción del *etanol* en México sea viable, se tiene que encontrar una solución al problema económico, relacionado con subsidios a la agricultura; y despojar el tema del vínculo político asociado permanentemente a este medio¹.

3.1 Regiones Cañeras de la República Mexicana.

La superficie cultivada se clasifica en XIV regiones cañeras (Anexo II) dentro de las cuales operan ahora, 58 ingenios azucareros en 15 estados de la república. La superficie cultivada en el país supera las 750 mil hectáreas de las cuales en la zafra pasada 2004-05, se industrializó la caña producida en 657 mil hectáreas. La diferencia de superficie significa aquella de las plantaciones del 2004 que se encuentran en crecimiento.

Los ciclos del cultivo de la caña se identifican como “Plantillas” para aquellas de primer corte con edades de 14 a 18 meses, según variedades tempranas o tardías; “Socas” que son las cañas para el segundo corte y “Resocas” cañas del tercer corte hasta el final de la vida útil del cultivo, que en México en su mayor superficie alcanza siete cortes en ocho años, sin perjuicio de que es posible encontrar cañas de 20 y hasta 30 años de plantadas. Naturalmente los

¹ Artículo: Producción de etanol anhidro en ingenios azucareros, Ing. Manuel Enríquez Poy, México, 2005.

cañaverales disminuyen su producción en función del tiempo transcurrido y por ello, ocurren los “volteos” de “cañas viejas” y las nuevas plantaciones.

De la superficie cultivada, aproximadamente el 35% es de riego y el resto recibe el agua de la lluvia, es decir, es de temporal, obviamente en su totalidad dentro de las zonas tropicales. (Figura 3.1).

FIGURA 3.1: Regiones cañeras de la República Mexicana.



3.2 Precios de la Caña de Azúcar.

El precio que recibe el agricultor por tonelada de caña es único, no diferenciado con otros cañeros y corresponde al 57% del valor del azúcar vendido por el ingenio.

Es importante mencionar que estos precios de la caña obedecen a los decretos y a la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar y que solamente se pueden aplicar para la caña que se transformará en azúcar.

Los algoritmos para determinar los precios y calidades de esta materia prima, no se pueden ni se deben aplicar en la misma forma cuando se trata de cañas para la producción de bioetanol.

En tal virtud, las relaciones de los proveedores de caña con los fabricantes de bioetanol, deberán establecer sus propias reglas y métodos de cálculo.

A continuación (Tabla 3.1) se presenta la evolución de los precios al agricultor, por tonelada de caña para azúcar en el lapso 1996-2005.

TABLA 3.1: Evolución de los precios al agricultor, por tonelada de Caña.

Año	Precio a pesos Corrientes **	Precio a pesos Constantes 1996
1996	171.98	171.98
1997	216.68	181.03
1998	236.60	171.27
1999	243.10	150.35
2000	288.05	163.27
2001	2.98.30	159.68
2002	310.96	157.66
2003	324.70	158.20
2004	353.79	164.97
2005	397.26	177.32

**Fuente: Comité de la Agroindustria Azucarera.(COAAZUCAR)

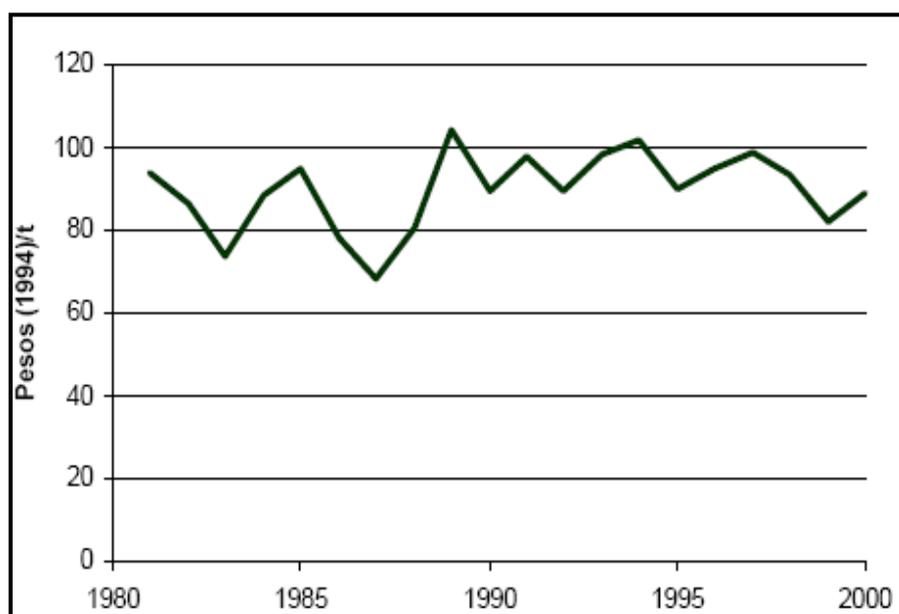
En una percepción superficial y por ello obviamente desafortunada, muchas personas involucradas en análisis económicos y técnicos de la agricultura y de la agroindustria azucarera, se equivocan al afirmar que en México se paga mucho por la caña y que ésta ha subido mucho de precio en los últimos años solo al observar los precios corrientes de la tonelada de caña. Sin embargo, la tabla anterior nos muestra que de 1996 a 2005, los precios son casi los mismos, prácticamente sin cambio.

Esta condición de precios, nos lleva sin grandes complicaciones a concluir que el mejoramiento del negocio de los cañicultores, si acaso ha sucedido, se debe al incremento de la productividad en sus tareas como cañicultores y también a la elevación de la eficiencia de los ingenios en tanto la recuperación de azúcar.

En efecto, la producción de caña en toneladas por hectárea se ha incrementado y el recobrado de los ingenios también.

La interrogante que se expresa “si acaso” es en razón de que así como se eleva el rendimiento de caña por hectárea, también se elevan los costos de producción, cosecha y transporte, basta señalar el exagerado crecimiento de los precios de los fertilizantes y combustibles.

GRÁFICA 3.1: Evolución de los precios de la Caña al productor*.



3.3 Costo Primo de la Caña de Azúcar en la Producción de Etanol.

Se analizan dos tecnologías en la producción de etanol.

Los rendimientos esperados en litros de etanol por ton de caña, en cada una de las dos tecnologías, serían los siguientes:

a) Jugo de caña directo: (14.5% de azúcares fermentables en tallos)

Rendimiento: 80 litros de etanol por tonelada de caña

Costo primo con caña de temporal por litro $\$236.47/80 \text{ litros} = \$ 2.96$

Costo primo con caña de riego por litro de etanol $\$210.74/80 = \$ 2.63$

* Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y Biodisel para el transporte en México, SENER, Noviembre 2006.

b) (jugo más bagazo) con un rendimiento esperado de 138 litros de etanol por tonelada de caña completa.

Costo primo por litro de etanol con caña de temporal $\$236.47/138$ litros = $\$1.71$

Costo primo por litro de etanol con caña de riego $\$210.74 / 138$ litros = $\$1.53$

3.4 Superficie a Cultivar de Caña de Azúcar, para Cubrir los Escenarios 2 y 3.

Escenario 2 “Bioetanol necesario en México para sustituir a los éteres que se agregan actualmente a las gasolinas de las zonas metropolitanas”.

Demanda esperada de Bioetanol anhidro para el año 2010, oxigenando gasolinas al 1.5% en peso y requerimientos de caña para satisfacerla.

Volúmenes y superficies a cubrir con caña de azúcar

TABLA 3.2: Superficie a cultivar de Caña de azúcar para cubrir el escenario 2.

Gasolinas	Bioetanol	Jugo a Bioetanol	Sup de caña	Jugo+bagazo	Sup de caña
MM litros en el año	MM litros en el año	M ton tallos caña	M hectáreas	M ton tallos caña	M hectáreas
19,728	782	9,772	130	5,665	76

Escenario 3 “La sustitución del 10% del volumen de las ventas nacionales de gasolinas (asumiendo una mezcla de 10% de etanol y 90 de gasolinas)”

A cubrir con caña de azúcar.

TABLA 3.3: Superficie a cultivar de Caña de azúcar para cubrir el escenario 3.

Gasolinas	Bioetanol	Jugo a Bioetanol	Sup de caña	Jugo+bagazo	Sup de caña
MM litros en el año	MM litros en el año	M ton tallos caña	M hectáreas	M ton tallos caña	M hectáreas
44,060	4,406	55,075	734	31,928	426

3.5 Las Plantaciones de Caña de Azúcar, Captura de Dióxido de Carbono y los Bonos de Carbono.

Las plantaciones nuevas de caña, cosechadas en verde o cruda y cuya biomasa se destine a la fabricación de etanol, podrían calificar para entrar en el mercado de los llamados “Bonos de Carbono”.

La cantidad de dióxido de carbono capturado por una plantación en la zona de abastecimiento del Ingenio de Atencingo (Región Balsas) con una producción de 966 toneladas de tallos en su vida útil de siete cortes, equivalentes a 1,256 toneladas de caña integral por hectárea (la mejor de México), alcanzaría teóricamente 512 toneladas (CO₂).

Se han realizado operaciones de certificados de reducción de emisiones en un precio de mercado de aproximadamente 10 dólares por tonelada de CO₂ absorbido por la plantación y por ello, el ingreso de los productores de ese ingenio al vender su captura sería de 5,120 dólares en el período de 8 años (siete cortes) o sea \$56,320 pesos por hectárea, igual a \$7,040 pesos por hectárea por año. Por tonelada de caña se obtendrían \$58.30.

Si se gestionara con éxito esta operación solo por un período de plantación de caña, con el contrato se podría obtener financiamiento bancario para apoyar la construcción en cooperativa de la fábrica de etanol.



CAPITULO IV.



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA CAÑA, EN AZÚCAR Y ETANOL.

4.1 Recepción, Descarga, Lavado y Alimentación de las Cañas.

4.1.1 Recepción.

La caña de azúcar se colecta de diversos cañaverales y es transportada en camiones pesados o trailers, una vez que llega al ingenio, la recepción de las cañas para la fábrica, se hace, directamente en la báscula del batey o en básculas anexas que sirven ciertos puntos importantes o alejados de la zona de aprovisionamiento del Ingenio.

4.1.2 Descarga y Lavado de las Cañas.

Una vez que la caña de azúcar llega al patio de recepción en el ingenio, es descargada y el exceso de tierra y piedras son removidos mediante el lavado de la caña.

Esta etapa es intensiva en el consumo de agua, es por ello, que el agua residual es enviada a una planta tratadora y recirculada para volver a ser usada en el lavado de la caña.

Posteriormente del lavado de la caña, una grúa cañera deposita la caña en mesas alimentadoras que transportan la caña hacia los molinos.

4.1.3 Alimentación de las Cañas.

La mesa de alimentación, consiste en un conductor muy ancho y muy corto, movido por un motor independiente. Su planta es rectangular o aproximadamente cuadrada. La grúa deposita la caña en esta plataforma y la mantiene alimentada a medida que se va descargando. En seguida la caña es transportada a los molinos mediante conductores.

4.2. Proceso de Molienda.

Antes de la entrada de la caña a través de los molinos para la extracción del jugo, ésta es preparada en tres equipos fundamentales: Cuchillas cañeras, cuya función es reducir el tamaño de la caña para facilitar su paso a los molinos, una desmenuzadora la cual asegura la alimentación de toda la batería, y prepara la caña, facilitando la toma de esta por los molinos y la extracción en ellos, y finalmente, una desfibradora. La desfibradora es un aparato que se emplea para completar la preparación y la desintegración de la caña y facilitar así la extracción del jugo por los molinos. Su nombre indica la acción que desarrolla, corta en pedazos pequeños y desfibra. El paso de la caña a través de estos equipos se hace mediante bandas transportadoras que son movidas por motores eléctricos.

Posteriormente, se lleva a cabo la extracción del jugo de caña, en molinos de tipo rodillo que son movidos por turbinas de vapor.

Los molinos recuperan, en efecto, una gran parte del jugo que deja la desmenuzadora, pero jamás el total.

El bagazo que sale del último molino es conducido a los hornos de las calderas para producir vapor, mientras que el jugo obtenido es tamizado dos veces antes de llevarlo a la fabricación de azúcar.

4.3 Tratamiento del Jugo de Caña.

El jugo obtenido del tamizado es bombeado a un tanque mezclador, el cual recibe una solución de lechada de cal proveniente de dos tanques pequeños, uno de los cuales se vacía mientras que el otro se llena, estos tanques se proveen de un agitador que gira de 8 a 10 r.p.m., de acuerdo con su diámetro.

Posteriormente el jugo es llevado a la siguiente etapa de clarificación, no sin antes calentarlo a una temperatura de 90 °C, por medio de vapor que se obtiene de los evaporadores para efficientizar su decantación.

4.4 Clarificación.

Una vez que el jugo ha pasado por el tratamiento de encalado, se deja decantar para separar el jugo claro del precipitado que se formó, para ello se hace uso de un tanque clarificador. El jugo claro obtenido, sale por la parte superior del clarificador de manera regular y continua tal como lo hacen las cachazas por la parte inferior, las cuales son extraídas por medio de una bomba de diafragma, de válvulas y membranas.

La decantación separa los jugos tratados en dos partes:

- 1) El jugo claro que va a la fabricación, es decir generalmente a la evaporación y;
- 2) La cachaza, la cual se filtra (en un filtro prensa) a fin de separar del jugo, el precipitado que contiene junto con las sales insolubles que se han formado y el bagazo fino que arrastró.

El jugo que se recupera de la filtración es enviado al clarificador.

4.5 Evaporación.

El jugo clarificado pasa a un proceso de evaporación al vacío donde pierde dos terceras partes de su agua al final de 3 o 4 de las torres de evaporación en serie, que van produciendo un vacío progresivo. El vapor de la última torre va a un condensador donde se puede recuperar agua para las necesidades del procesamiento en el ingenio.

4.6 Cristalización y Centrifugación.

El jarabe o meladura (65% sólidos y 35% agua) producido en la evaporación pasa a un tacho donde se evapora al vacío aún más hasta alcanzar el punto de saturación. Se añaden pequeños granos de azúcar al tacho para servir de semilla, del cual sirven de núcleo para la formación de los cristales de azúcar.

Una vez que el licor madre se agota hasta el límite práctico en lo que concierne a la templa, se separan los cristales para obtener el azúcar en forma comercial. Esta operación se lleva a cabo en centrífugas. La melaza que no cristaliza va a los tanques de almacenamiento y su uso final es para la producción de etanol.

4.7 Almacenamiento y Secado del Azúcar.

El azúcar comercial que sale de las centrífugas generalmente tiene una humedad entre 0.5% y 2%, para eliminar esta humedad, el azúcar es enviada a un secador el cual se compone de un elevador de azúcar, un secador rotatorio, que sirve al mismo tiempo como enfriador en su parte inferior, un calentador de aire, un ventilador, un ciclón, un separador de polvo, un segundo elevador, una tolva y una báscula automática que sirve para pesar los sacos de azúcar.

Finalmente, el azúcar es pesada y almacenada en sacos de 50 Kg. para luego ser distribuida.

Como se mencionó anteriormente, las mieles que no cristalizan se usan para la producción de etanol vía fermentativa.

A continuación se describe su proceso de obtención.

4.8 Fermentación.

El proceso típico de producción de alcohol a partir de melazas o jugo de caña (proceso Melle-Boinot), comprende la esterilización previa de la materia prima mediante un aumento de temperatura, cercana a los 120°C, enseguida se ajusta el pH a 4.5 con la adición de H₂SO₄ a través de una bomba dosificadora.

El mosto obtenido se somete a fermentación en dos reactores utilizando dos reactores tipo tanque agitado (CSTR) en serie, con recirculación de la levadura. Se alimenta continuamente jugo de caña (de 18 a 24 °Brix) al primer fermentador. Así mismo, se alimentan cultivos de *Sacharomices diastaticus* provenientes de cubas de reproducción y de la recirculación para mantener los niveles de población celular.

Este proceso fermentativo se hace bajo condiciones anaerobias a una temperatura de 32 a 35°C y un pH de 4.2 a 4.5.

Se adicionan algunos nutrientes como fuentes de nitrógeno y fósforo provenientes de tanques de almacenamiento para obtener óptimos resultados en el proceso de fermentación

La reacción es exotérmica y genera cerca de 16000 Btu/lbmol de azúcar fermentada, es por esto que el fermentador necesita un sistema adecuado de control de temperatura.

Para esto se emplea una chaqueta externa de enfriamiento que funciona con agua de la torre de enfriamiento. Las condiciones de temperatura y pH están controladas electrónicamente en los fermentadores, mientras que se realizan muestras periódicas de grado alcohólico y conteo microbiano.

El efluente proveniente del segundo reactor, pasa a un decantador donde se separa la torta de fermentación (levaduras y otros en muy pequeñas proporciones), del caldo de fermentación (etanol, agua y otros ácidos y alcoholes).

Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se debe recuperar el 98% en masa del etanol arrastrado.

El caldo de fermentación se bombea hacia un tanque y posteriormente pasa al proceso de recuperación de etanol por destilación.

4.9 Separación y Deshidratación.

Debido a que las mezclas de etanol y gasolina deben estar libres de agua para evitar problemas de separación de fases en los tanques de almacenamiento y suministro, el etanol a ser mezclado a la gasolina debe contener menos que 0,5% de agua. En ese caso no es posible utilizar procesos clásicos de destilación*, siendo necesario emplear otras tecnologías, como la destilación azeotrópica empleando benceno, ciclohexano o pentano como agentes de separación, la adsorción por balanceo de presión usando tamices moleculares o monoetilenoglicol, la destilación extractiva, una pervaporación, etc.

* Ver Anexo III: Descripción de las operaciones de deshidratación.

La destilación y la adsorción con tamices moleculares se usan para recuperar el etanol del caldo de fermentación obteniéndose etanol a 99,5% en peso de pureza. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO₂ disuelto (que es enviado a la torre de adsorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50% en peso de etanol y unos fondos con una composición inferior al 0,1% en peso; en esta columna se alimenta junto al caldo de fermentación el etanol recuperado en la adsorción proveniente de los gases de fermentación. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica.

El agua restante es removida de la mezcla mediante adsorción en fase vapor en dos lechos de tamices moleculares. El producto de la regeneración de los tamices es recirculado a la segunda columna de destilación (figura 4.1).

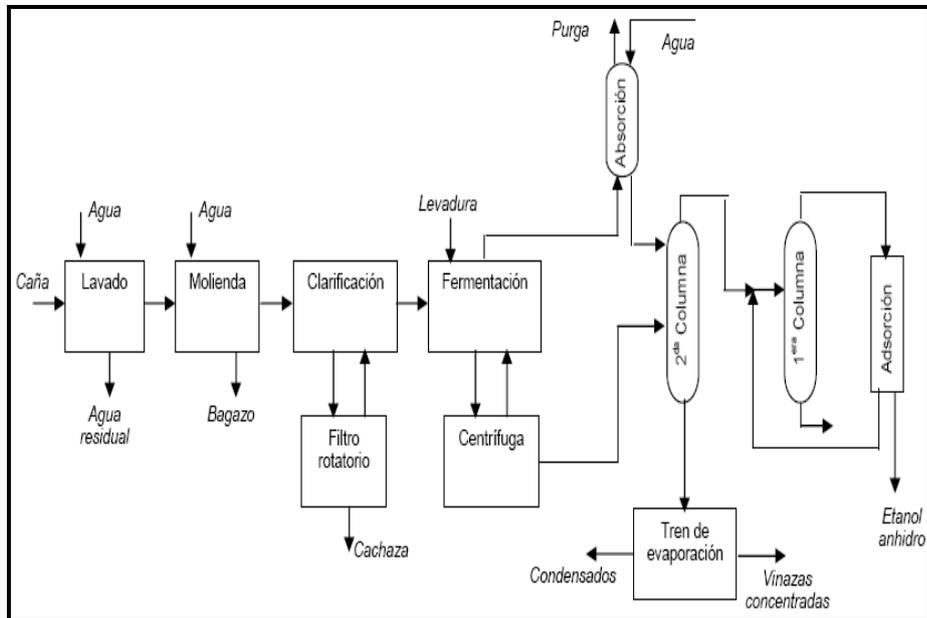
Tratamiento de efluentes.**

De las aguas de residuo en el proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar las de mayor volumen son aquellas que provienen de los fondos de la primera columna de destilación, conocidas como vinazas. El tratamiento propuesto consiste en su evaporación y posterior incineración. La función del tren de evaporación (cuatro efectos) es concentrar los sólidos solubles y demás componentes poco volátiles presentes en las vinazas hasta un valor cercano al 12% en peso, ya que en esta concentración se hacen aptas para su incineración¹. Los condensados de los evaporadores son recolectados junto con los fondos de la segunda columna de destilación y utilizados como agua de proceso.

¹ Merrick & Company, Wastewater Treatment Options for the Biomass- To Ethanol Process, Colorado, USA, 1998.

** Ver Anexo IV: Tratamiento de Efluentes (vinazas)

FIGURA 4.1: Esquema del proceso de obtención de Etanol a partir de la Caña de azúcar.





CAPITULO V.

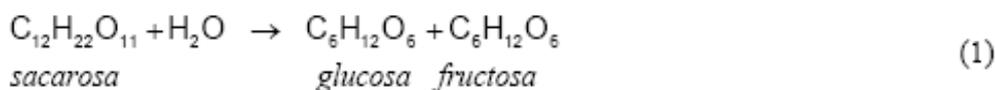


MAPAS O RUTAS TECNOLÓGICAS PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL.

5.1. Rutas Tecnológicas que Emplean la Caña de Azúcar.

La materia prima clásica para producción de etanol es la caña de azúcar, por su alto rendimiento y simplicidad en el proceso para obtención de soluciones dulces fermentables.

Esencialmente dos reacciones son necesarias para convertir la sacarosa en etanol: una hidrólisis de la sacarosa, con producción de hexosas y la fermentación alcohólica, con auxilio de levaduras del tipo *Saccharomyces Cerevisiae*, como se indica en las expresiones siguientes.



Considerando las varias fuentes de materia prima azucarada existentes en la agroindustria cañera, diversas alternativas pueden ser adoptadas para la producción de etanol, desde la fermentación directa del jugo de la caña hasta el empleo de soluciones acuosas de mieles finales o intermedias, o aún mezclas de mieles en jugo.

En los ingenios, la sacarosa de la caña puede ser convertida en azúcar de diversos grados de calidad. Cada proceso de cristalización es seguido por una separación de los cristales de sacarosa del llamado licor madre o miel, mediante centrifugación.

Así, la primera etapa de cristalización y centrifugación permite obtener el azúcar A y el miel A, luego esta miel A es sometida a nueva cristalización y centrifugación, resultando el azúcar B y la miel B, finalmente de modo análogo se produce el azúcar C y la miel C, considerada agotada y de la cual no se recupera más sacarosa, sin embargo contienen 50% de material fermentable.

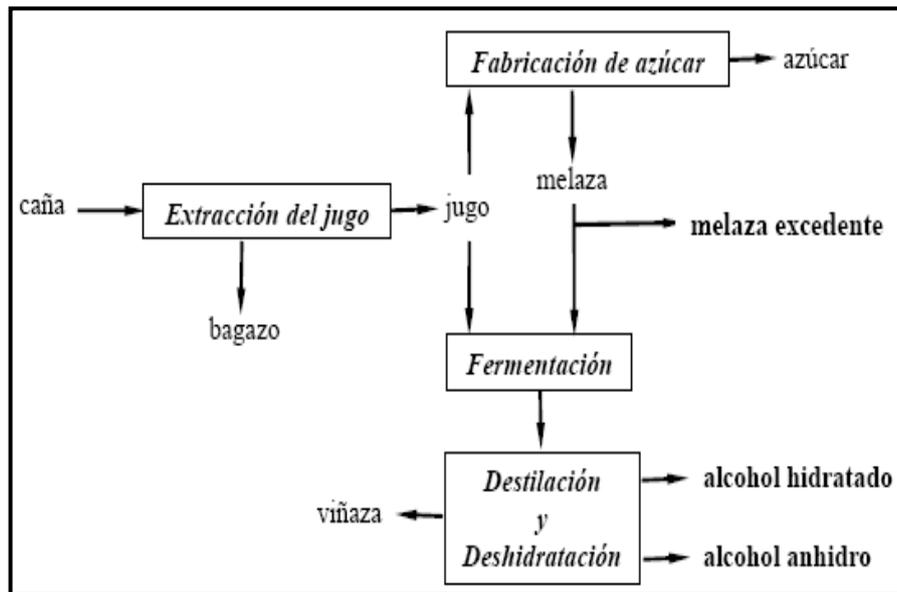
La melaza o miel final, es parcialmente utilizada para la producción de etanol y alimentación animal, pudiendo ser empleada como materia prima para una serie de otros productos, como levaduras, miel proteica, ácido cítrico, etc.

Buscando considerar las alternativas de mayor interés para México, se detalla sucesivamente la producción de etanol empleando mieles agotadas (C), mieles B, jugo directo y jugo directo más residuos celulósicos. Cabe observar que la utilización de mieles intermedias puede significar una interesante sinergia entre la producción de azúcar y etanol, con ventajas en términos de productividad y calidad del producto, siendo la ruta preferencial adoptada en Brasil.

La figura 5.1 sintetiza las rutas tecnológicas que pueden ser empleadas en la producción de etanol a partir de la caña de azúcar.

Existe una tecnología más, en donde utilizan al bagazo y hojas de la caña como materia prima para producción de etanol, una tecnología prometedora, pero todavía en desarrollo. Actualmente el bagazo representa una fuente de energía en el procesamiento de la caña y su utilización debe considerar también los usos alternativos de ese producto.

FIGURA 5.1: Procesos tecnológicos relevantes para la producción de Etanol.



5.1.1. Producción de Etanol de Melazas Agotadas (miel C).

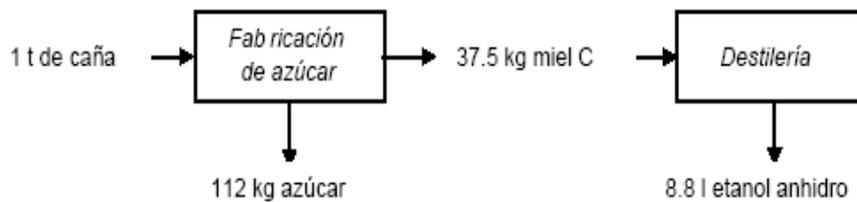
Para condiciones típicamente observadas en los ingenios mexicanos son producidos cerca de 37.5 kg de miel C o miel final con 85° Brix¹, por tonelada de caña procesada (CNIAA, 2006).

Así, apenas utilizando las melazas agotadas inevitablemente resultantes de la fabricación de azúcar, entre 6 y 12 litros de etanol pueden ser producidos por tonelada de caña procesada. El valor observado en los ingenios mexicanos que poseen destilerías, se sitúa en 8.8 litros por tonelada de caña.

¹ El grado Brix corresponde al porcentual en peso de sólidos solubles en la miel, cuyo contenido de azúcares reductores totales en las melazas agotadas puede ser determinado por su “pureza en ART”. Para las condiciones de las melazas producidas en los ingenios de México se estima que este parámetro varíe entre 32 y 63% (Poy, 2005).

Esquemáticamente, la Figura 5.2 representa los principales flujos de masa observados en esta alternativa, conforme las condiciones mexicanas.

FIGURA 5.2: Flujos máxicos en la producción de Etanol a partir de Melazas agotadas.



5.1.2. Producción de Etanol de Melazas Intermedias (miel B).

Cuando hay interés en producir más etanol que en el caso anterior, se disminuye proporcionalmente la cantidad de sacarosa convertida en edulcorante y se desvía más melaza hacia la producción de etanol, en este caso produciendo en el ingenio solamente los azúcares A y B, y destinando la miel B, a veces llamada miel rica, para la producción de etanol.

Bajo el concepto de aumentar la producción relativa de etanol, pueden ser adoptados procedimientos más complejos, por ejemplo con el uso de mostos combinando jugo directo o jugo pobre de los filtros y parte de las melazas intermedias, buscando simultáneamente reducir consumo de servicios auxiliares e insumos químicos, ampliando los beneficios de la integración productiva etanol/azúcar. Basándose en la amplia experiencia brasileña con esta tecnología, son citados los siguientes puntos como más relevantes en esta integración (Finguerut , 2005):

a. Todas las corrientes conteniendo azúcares de baja calidad, como los jugos de los últimos molinos y el jugo de los filtros pueden ser utilizados para producir etanol sin representar pérdidas de azúcar. Asimismo, todos los problemas de producción en la fábrica de azúcar, que resulten en disponibilidad de materiales azucarados, pueden ser resueltos de forma sencilla, enviando tales materiales para la destilería.

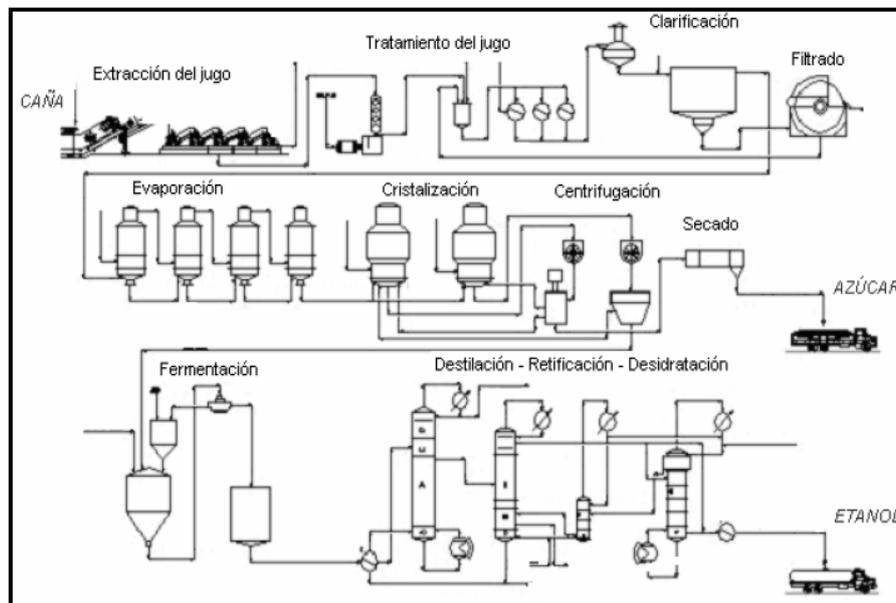
b. Al utilizar solo dos masas las melazas no son agotadas, permitiendo una calidad más elevada del azúcar (mejor color y pureza) y consecuentemente mejores precios.

c. El vapor producido en los evaporadores puede ser empleado eficientemente para tratamiento del jugo a ser fermentado y la destilería.

d. La necesidad de concentrar el jugo a ser fermentado se reduce pues el contenido de azúcares puede ser ajustado de forma sencilla mediante la mezcla con melazas, hasta la concentración más adecuada (18-24 °Brix), permitiendo producir un vino con elevada concentración alcohólica, dependiendo de la tolerancia alcohólica de las levaduras empleadas..

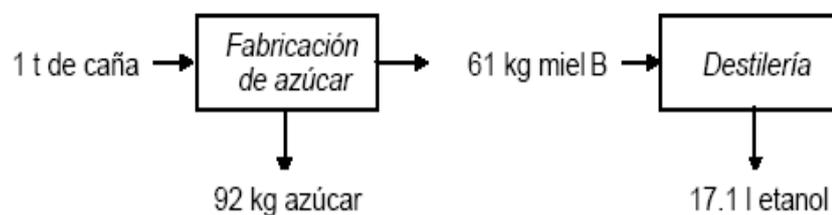
En la Figura 5.3 se presenta el esquema de equipos y procesos para un ingenio produciendo etanol a partir de melazas intermediarias (adaptado de Finguerut, 2006).

FIGURA 5.3: Esquema de un ingenio para la producción combinada de Azúcar y Etanol.



La Figura 5.4 representa los principales flujos de masa observados en esta alternativa, conforme las condiciones mexicanas (con una reducción en la producción de azúcar del 18%).

FIGURA 5.4: Flujos máxicos en la producción de Etanol a partir de Melazas intermedias.



Es interesante reiterar que esta alternativa permite una ancha gama de perfiles productivos.

Para evaluar diferentes escenarios de producción combinando azúcar y etanol, puede ser usada una expresión frecuentemente utilizada en Brasil para determinar la eficiencia industrial teórica en plantas que producen simultáneamente y en proporciones variables etanol y azúcar, traduciendo en ART ambos productos, como se presenta a continuación.

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{\text{ART}_{\text{productos}}}{\text{ART}_{\text{caña}}} = \frac{S}{0.95} + \frac{E}{0.647} \quad (3)$$

donde:

$\text{ART}_{\text{productos}}$ = azúcares reductores totales en los productos, (kg/t caña)

$\text{ART}_{\text{caña}}$ = azúcares reductores totales en la caña, (kg/t caña)

S = azúcar producida, (kg sacarosa/t caña)

E = etanol anhidro producido, (litro/t caña)

$\eta_{\text{teórica}}$ = eficiencia industrial teórica

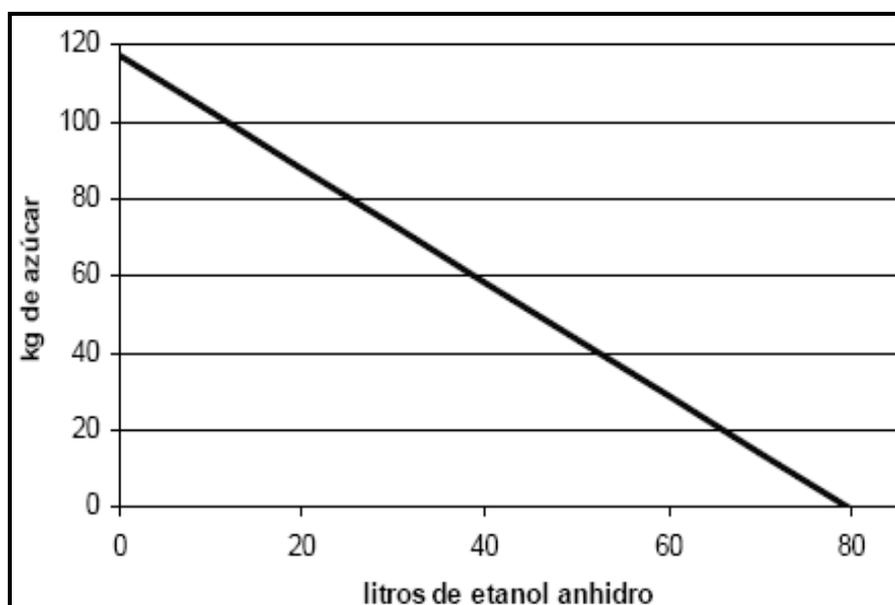
Típicamente y en la ausencia de datos experimentales, se estima que el contenido de ART en jugos de alta pureza, como jugo directo de caña, sea la suma de los azúcares reductores formados a partir de la sacarosa con el contenido de otros azúcares reductores, estimados en 0,5% del peso de la caña, resultando:

$$\text{ART}_{\text{caña}} = 1.05 \left(\frac{\text{Pol}_{\text{caña}}}{0.95} \right) = 1.105 \text{Pol}_{\text{caña}} \quad (4)$$

Partiendo del rendimiento industrial (“eficiencia en fábrica”) promedio observado en los ingenios mexicanos durante las últimas cinco zafras, 82.6%, y asumiendo una caña con 13.5% de sacarosa (CNIAA, 2006), es posible estimar la relación entre la producción de etanol versus la producción de azúcar, conforme presentado en la Gráfica 4.1. Cabe observar que esa situación representa un ingenio mexicano promedio.

Evaluando la producción de etanol utilizando mieles agotadas, por lo menos 8.8 litros de etanol pueden ser siempre producidos, ya que una fracción de la sacarosa de la caña no se alcanza a convertir en azúcar y así, la máxima producción de azúcar indicada en esa gráfica jamás podrá ser alcanzada. Naturalmente que, en función de los precios y estrategias de mercado, los productores de azúcar y etanol empleando tal tecnología pueden elegir el perfil de producción más adecuado.

GRÁFICA 5.1: Producción relativa de Etanol y Azúcar, para las condiciones medias de los ingenios de México.



5.1.3. Producción de Etanol de Jugo Directo de Caña.

Para incrementar la producción de etanol, se desvía progresivamente más jugo de caña hacia la producción de etanol, hasta la situación en que no se produce azúcar. Para condiciones así y considerando el contexto de los ingenios mexicanos, a partir de una tonelada de caña con 13 a 14% de sacarosa se estima obtener de 75 a 80 litros de alcohol anhidro, significando una recuperación de ART de la caña entre 82 y 85%. En ese caso se espera un consumo de vapor cerca de 10% inferior al consumo en la producción de azúcar, debiendo mantenerse el tratamiento térmico del jugo y el ajuste del nivel de concentración buscando mejorar las condiciones en la fermentación.

Evidentemente la producción de etanol directamente del jugo de la caña reduce la flexibilidad del ingenio en términos de producir diferentes productos y determinar según las condiciones de mercado, una composición de mayor rentabilidad. Por otro lado, la producción solamente de etanol reduce las inversiones significativamente, no siendo requerido equipo de la sección de cocimiento (tachos, turbinas de centrifugación, etc.), que pueden corresponder a 20% de las inversiones totales en un ingenio.

5.1.4. Producción de Etanol de Jugo Directo de Caña y de Residuos Celulósicos.

Considerando las disponibilidades de bagazo excedente en los ingenios, como consecuencia de la racionalización energética en los procesos de producción y uso de vapor, bien como las disponibilidades de residuos de cosecha (puntas y hojas de caña), la posibilidad de utilizar residuos materiales lignocelulósicos² de costo reducido como materia prima para producción de etanol despierta gran interés y podría con ventajas asociarse a producción convencional a partir de sustancias dulces de la caña.

Sin embargo, aunque la utilización de esta ruta productiva permita elevar dramáticamente la producción de etanol por unidad de materia prima procesada y potencialmente reducir bastante los costos, los procesos de conversión de celulosa están todavía en desarrollo.

El principal reto en la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es el pretratamiento e hidrólisis de la materia prima, que pueden utilizar esencialmente tres tipos de procesos y sus variantes y combinaciones: hidrólisis ácida (con ácido diluido o concentrado), hidrólisis enzimática y procesos termoquímicos.

² Los materiales lignocelulósicos son compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es formada por largas cadenas de glucosas, mientras la hemicelulosa es constituida por hexosas y pentosas. La lignina no contiene azúcares y envuelve las celdas vegetales con una capa que dificulta romper la celulosa y hemicelulosa para producir soluciones fermentables. La proporción de cada componente varía con la especie vegetal y su edad.

El pretratamiento tiene como objetivo desintegrar la matriz de carbohidratos de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior ataque enzimático. Adicionalmente, la mayor parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pretratamiento y la lignina se libera o puede incluso descomponerse, en algunos casos con producción de compuestos perjudiciales al proceso fermentativo posterior. No obstante, ya separada, la lignina puede presentar valor comercial o servir como combustible.

En una etapa posterior, la celulosa liberada es típicamente sometida a hidrólisis enzimática con celulasas exógenas, lo cual hace que se obtenga una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas (xilosas) resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa. Hay en estudio decenas de alternativas de proceso para pretratamiento e hidrólisis (Sun y Cheng, 2002). Como afirmado anteriormente, las glucosas pueden ser convertidas sin dificultades en etanol, pero las pentosas son todavía objeto de atención de los bioquímicos, que buscan desarrollar bacterias capaces de efectuar adecuadamente tal conversión.

A pesar del gran esfuerzo de instituciones públicas y privadas para desarrollar procesos eficientes, capaces de lograr a bajo costo una máxima conversión de los polisacáridos y baja degradación de los azúcares resultantes, como glucosas y pentosas, todavía no se definieron procesos económicamente competitivos, esperándose en un horizonte de diez años su cabal perfeccionamiento y desarrollo de las tecnologías asociadas (Worldwatch Institute, 2006).

En la actualidad se considera representativa una eficiencia de conversión y recuperación de celulosa en 76%, que asociada a una conversión fermentativa de 75%, aumentaría la producción a 336 litros de etanol anhidro por tonelada de celulosa (Badger, 2002). En el bagazo seco los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina son respectivamente cerca de 47%, 25% y 20%, valores próximos a los observados para los residuos de cosecha. Por tonelada de bagazo con 50% de humedad, se puede producir a partir de la celulosa, 123 litros de etanol anhidro y a partir de la hemicelulosa, 63 litros de este biocombustible (Rossel, 2005).

Estos datos permiten ver la relevancia de lograr la conversión y fermentación de las pentosas.

En términos concretos, específicamente para bagazo, empleando ácido diluido y tratamientos térmicos, estudios hechos en una planta piloto en un ingenio azucarero en Brasil llegaron a una productividad de 109 litros por tonelada de bagazo, con perspectivas de alcanzar hasta 180 litros por tonelada, en caso de conseguir fermentar las pentosas. A esos niveles, la producción de etanol prácticamente dobla por unidad de área en cultivo, estimándose que llegue a más de 12 mil litros por hectárea, utilizando cerca de 1/3 del bagazo producido, posible de ser obtenido sin afectar la operación normal de la planta, excedente del proceso de generación de vapor, más una cantidad similar de residuos de cosecha (Oliverio, 2005).

Como se tratan de procesos todavía en desarrollo y no son disponibles datos o parámetros de instalaciones reales, para los análisis posteriores, necesariamente simplificadas, serán considerados conservadoramente una productividad de 109 litros de etanol por tonelada de bagazo húmedo y una idéntica productividad en el procesamiento de los residuos de cosecha.

Considerándose disponibilidades de bagazo y residuos para producir etanol como se mencionó en el párrafo anterior, cerca de 166 kg de material celulósico, resulta por tonelada de caña procesada, 18 litros adicionales de etanol, que sumados a producción de etanol de jugo de los colmos, significa un total de 98 litros de etanol anhidro.

En la tabla siguiente se presenta un resumen de los parámetros más importantes de las diferentes rutas presentadas anteriormente.

TABLA 5.1: Rutas tecnológicas para la producción de Etanol apartir de la Caña de Azúcar.

materia prima	proceso	productividad (litro etanol/ t)	consumo energético	otros productos
caña de azúcar	miel pobre (C)	8.8	autosuficiente	112 kg azúcar
	miel rica (B)	17.1	autosuficiente	92 kg azúcar
	jugo directo	80	autosuficiente	menos relevante
	jugo directo + hidrólisis de residuos lignocelulósicos	(80+18) 98	autosuficiente	menos relevante



CAPITULO VI.



EVALUACIÓN INTEGRAL DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

En éste capítulo se pretende describir de manera general, la viabilidad que tiene el etanol al ser introducido en el mercado mexicano como oxigenante en las gasolinas que se producen nuestro país, tomando en cuenta aspectos técnicos, sociales, económicos y ambientales de cada una de las rutas tecnológicas presentadas en el capítulo anterior.

Como ya sabemos las tecnologías para la producción de etanol, son muy conocidas y practicadas desde ya hace varios años en nuestro país, sin embargo, en éste capítulo revisaremos de manera aislada, la producción de etanol a partir de melazas agotadas (miel C), mieles intermedias (miel B), y a partir de jugo directo de caña, además se presentarán costos de producción y todo lo que implica el uso de cada una de éstas tecnologías.

6.1 Evaluación técnica para la obtención de Etanol a partir de las diferentes rutas tecnológicas de la Caña de Azúcar.

6.1.1 Melazas Agotadas (miel C).

En esta alternativa tecnológica se emplean melazas que ya no cristalizan (miel C) en la fabricación del azúcar y son enviadas a la destilería para la obtención de etanol. Estas mieles son almacenadas en tanques para su posterior tratamiento.

Tratamiento de las mieles.

Antes de llevarse a cabo la fermentación, las melazas obtenidas deben ser diluidas en tanques contenedores con agua desionizada hasta llevarlas a un rango de 18 a 24 °Brix, ya que casi siempre se obtienen mieles de 85° Brix y no es posible efectuar así una fermentación adecuada, posteriormente la mieles que tienen una composición de 18% de sólidos solubles (18°Brix), se someten a un proceso de esterilización, las cuales se calientan hasta una temperatura cercana a los 120°C con vapor en un intercambiador de tubo y coraza durante 15 minutos. Este proceso de esterilización contribuye a la destrucción de todos los organismos patógenos, así como de todos los organismos que causen degradación del producto, y de aquellos que compitan posteriormente en la etapa de fermentación con la *Sacharomices cerevisae* por el alimento (azúcares reductores).

El mosto esterilizado se bombea hacia un tanque, en donde se agrega ácido sulfúrico para ajustar el pH a 4.5 mediante el uso de una bomba dosificadora y de esta manera dar unas condiciones de acidez óptimas para la reproducción de la levadura y la fermentación posterior del jugo; además actúa como agente precipitante de materia inorgánica y mantiene bajas las poblaciones de microorganismos contaminantes. El material sedimentado se retira por el fondo del tanque y es enviado a tratamiento.

El flujo que sale del tanque se bombea a través de una tubería donde se enfría hasta una temperatura de 32 °C en un intercambiador de calor de tubo y coraza, utilizando agua de pozo como fluido refrigerante. Esta temperatura y la concentración de 18°Brix, son las condiciones térmicas óptimas para alimentar al fermentador.

Reproducción de la levadura.

La preparación de la levadura para la inoculación de los fermentadores involucra procedimientos tanto en el laboratorio como en la planta. Los cultivos de levadura pura se activan en el laboratorio a una temperatura de 28 a 30°C hasta lograr una población de 190 a 200 millones de células por cm³, utilizando como medio de crecimiento jugo estéril diluido con una concentración de 7° Brix.

Posteriormente se realiza un escalamiento a dos cubas de reproducción, que contienen jugo diluido. En estas cubas se introducen elementos necesarios para el crecimiento y reproducción de la levadura, entre los que se tienen: urea como fuente de nitrógeno, fosfato de amonio como fuente de fósforo, oxígeno (aire estéril). Además se agrega antiespumante, las cantidades adicionadas se muestran en la Tabla 6.1:

TABLA 6.1: Cantidad de nutrientes utilizados en la fermentación de las mieles.

Componente	Cantidad (g/g Azúcar fermentable)
Fuente de Fósforo	0.016
Fuente de Nitrógeno	0.008
Antiespumante	0.02
Oxígeno	-----

Las cubas deben mantenerse a una temperatura de 28 a 30 °C y un pH de 4.2 a 4.5 para garantizar el óptimo desarrollo de la levadura que se utiliza en la etapa de fermentación.

Etapas de Fermentación.

Para el proceso de fermentación se utilizan dos reactores tipo tanque agitado (CSTR) en serie, con recirculación de la levadura. Se alimenta continuamente las melazas (18°Brix) al primer fermentador. Así mismo, se alimentan cultivos de *Sacharomices diastaticus* provenientes de las cubas de reproducción y de la recirculación para mantener los niveles de población celular entre 200-300 millones de células por mililitro de solución en el fermentador. Este proceso fermentativo se hace bajo condiciones anaerobias a una temperatura de 32 a 35°C y un pH de 4.2 a 4.5.

Se adiciona antiespumante y ergosterol, éste último en una relación de 5-40 mg/l de sustrato para hacer la levadura más resistente a las condiciones de concentración de etanol y temperatura del medio. También se agregan pequeñas cantidades de la enzima INVERTASA para ayudar a levadura a hidrolizar la sacarosa.

La reacción es exotérmica y genera cerca de 16000 Btu/lbmol de azúcar fermentada, es por esto que el fermentador necesita un sistema adecuado de control de temperatura. Para esto se emplea una chaqueta externa de enfriamiento que funciona con agua de la torre de enfriamiento. Las condiciones de temperatura y pH están controladas electrónicamente en los fermentadores, mientras que se realizan muestras periódicas de grado alcohólico y conteo microbiano.

El efluente proveniente del segundo reactor, pasa a un decantador donde se separa la torta de fermentación (levaduras y otros en muy pequeñas proporciones), del caldo de fermentación (etanol, agua y otros ácidos y alcoholes).

El CO₂ producido en la reacción se remueve del reactor por la parte superior y se envía a una torre de adsorción. El caldo de fermentación se bombea hacia un tanque y posteriormente pasa al proceso de recuperación de etanol por destilación.

Recuperación de Etanol y Obtención de Etanol Anhidro.

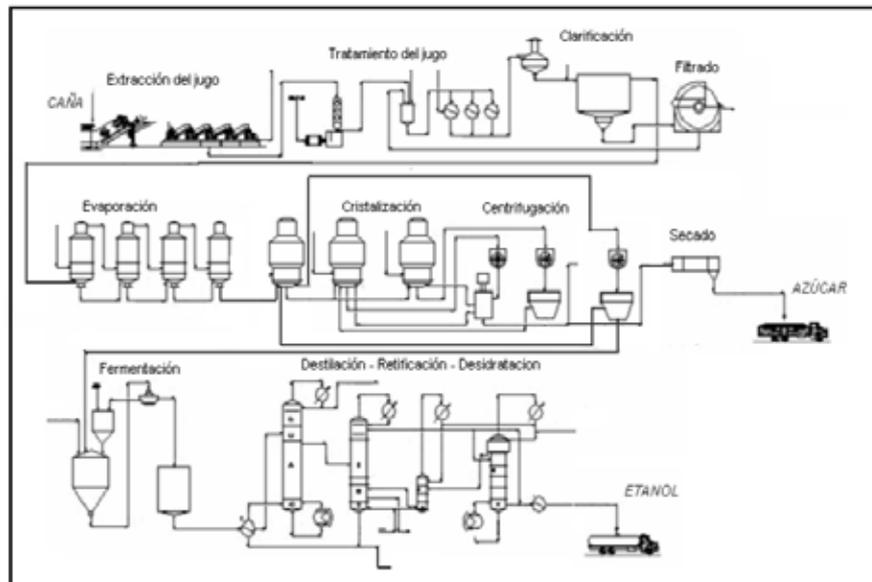
Para recuperar y deshidratar al etanol se usa la destilación azeotrópica utilizando benceno o ciclohexano como modificador.

La corriente de la solución alcohólica de 1 a 6% molar de etanol que sale del fermentador se rectifica en una columna de destilación fraccionada para obtener agua (fondo) y una solución alcohólica concentrada de 86% molar (cabeza). Parte de esta segunda corriente regresa a la columna como reflujo, mientras el resto es enviada a otra columna de destilación llamada azeotrópica, donde se mezcla con benceno produciendo un azeótropo ternario heterogéneo y liberando al etanol de la alimentación, obteniéndose como producto de fondo. El azeótropo ternario heterogéneo es condensado como producto de cabeza y se le decanta para obtener dos fases inmiscibles.

La fase orgánica, rica en benceno, regresa a la columna azeotrópica como reflujo, mientras la fase acuosa es bombeada a una tercera columna de destilación fraccionada llamada recuperadora, donde se separa al benceno del agua. El primero es obtenido como producto de cabeza y es reciclado a la alimentación de la columna azeotrópica, mientras que el agua es utilizada junto con la corriente obtenida en la columna rectificadora, como alimentación para otras etapas del proceso.

En la figura 6.1 se presenta un esquema de proceso de la producción de azúcar y etanol a partir de melazas agotadas.

FIGURA 6.1: Esquema de proceso para la producción combinada de Azúcar y Etanol a partir de Melazas agotadas (Miel C).



Considerando procesos teóricos de conversión de glucosa en etanol y la densidad de ese biocombustible (792 kg/m^3), se puede determinar que un kilogramo de sacarosa corresponde teóricamente a 0.679 litros de etanol anhidro, en otras palabras un litro de etanol requiere 1.473 kilogramos de sacarosa para ser producido.

En los procesos reales de fermentación y destilación para los tres casos evaluados, la eficiencia en la conversión de azúcares para etanol y obtención de etanol anhidro del vino (mosto fermentado) fue adoptada como respectivamente 90% y 98%, valores de referencia para las plantas brasileñas (Macedo, 2000). Bajo tales condiciones, por litro de etanol anhidro se requieren 1.67 kg de azúcares reductores totales. Para la caña fue adoptado un contenido de sacarosa ($Pol_{caña}$) y de fibra respectivamente de 13.5% y 13.2%, promedios de los valores observados en las últimas cinco zafas para los ingenios mexicanos (CNIAA, 2006).

La Tabla 6.2 presenta los componentes básicos de un balance de insumos y productos, con valores estimados de acuerdo a las condiciones observadas en ingenios brasileños y características de la caña en México.

TABLA 6.2: Insumos y productos en la fabricación de Etanol a partir de Melazas agotadas (Miel C).

Insumos		
Caña de azúcar	1,000	kg
Fuel oil (podría ser remplazado por bagazo)	10.7	kg
Electricidad (puede ser producida a partir del bagazo)	12.5	kWh
Agua tratada	5,600	litro
Ácido sulfúrico	0.026	kg
Urea (nitrógeno para las levaduras)	0.052	kg
Productos y subproductos		
Azúcar	112	kg
Etanol anhidro	8.8	litro
Bagazo con 50% humedad (consumido en el ingenio)	264	kg
Vinazas	88 a 141	litro
Cachaza (torta de filtro)	30	kg
Levadura (excedente a las necesidades de la producción)	1.6	kg
CO ₂ (producido en las cubas de fermentación)	6.9	kg

6.1.2 Mieles Intermedias (miel B).

Cuando hay interés en producir más etanol que en el caso anterior, se disminuye proporcionalmente la cantidad de sacarosa convertida en edulcorante y se desvía más melaza hacia la producción de etanol, en ese caso produciendo en el ingenio solamente los azúcares A y B, y destinando la miel B, a veces llamada miel rica, para la producción de etanol.

Bajo el concepto de aumentar la producción relativa de etanol, pueden ser adoptados procedimientos más complejos, por ejemplo con el uso de mostos combinando jugo directo o jugo pobre de los filtros y parte de las melazas intermedias, buscando simultáneamente reducir consumo de servicios auxiliares e insumos químicos, ampliando los beneficios de la integración productiva etanol/azúcar.

El proceso de obtención de etanol es similar al de las mieles agotadas, sin embargo, la cantidad de alcohol obtenido va a ser variable de acuerdo a la melaza desviada hacia su producción.

En ese contexto diversos escenarios productivos son factibles, dependiendo directamente del contenido de azúcares que presenta la melaza enviada para la destilería. En un cálculo que podría ser considerado conservador, un estudio realizado en México evaluó el uso de miel B para producir etanol, estimando por tonelada de caña, una producción simultánea de 104.3 kg de azúcar y 14.6 litros de etanol (Poy, 1998). En Brasil, correspondiendo a una división en proporciones iguales de los azúcares de la caña entre los dos productos, en promedio son producidos cerca de 67 kg de azúcar y 42 litros de etanol, por tonelada de caña procesada.

Entre estos límites y buscando reproducir una situación de bajo impacto en producción azucarera y una producción de etanol relativamente importante, admitiendo una producción de 61 kg de miel B por tonelada de caña procesada, con 82° Brix y un contenido de ART en el rango 49 a 60%, se estima una reducción en la producción de azúcar de 18%. Utilizando una melaza con esas características se espera una producción de etanol anhidro de 280 litros por tonelada de miel, resultando por tanto 17.1 litros de etanol.

Para tal caso, adoptando una demanda de vapor de 450 kg por tonelada de caña molida y una relación vapor/bagazo de 2.2, se estimó una reducción de 6% en la demanda de vapor y consecuentemente un consumo de bagazo menor en la misma proporción. Estas estimaciones fueron desarrolladas tomando como referencia un estudio detallado de conversión de plantas azucareras para producción de etanol. (Almazán y González, 1999).

Para las condiciones mexicanas, el efecto del consumo de vapor más bajo en la producción combinada de azúcar y etanol puede ser considerado mediante el cómputo de la reducción en la demanda de combustible adicional (fuel oil). En el caso presentado anteriormente, con 18% de reducción de la producción de azúcar y 17.1 litros de etanol por tonelada de caña procesada, se estimó un consumo de vapor inferior en 6%, permitiendo un consumo de fuel oil cerca de 30% más bajo que el valor indicado en la Tabla 6.2.

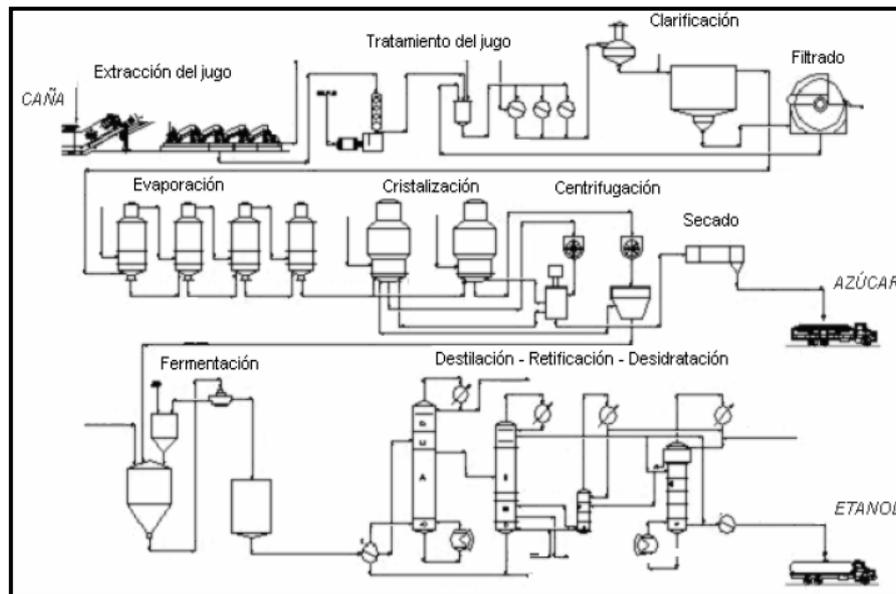
La tabla 6.3 presenta los insumos y productos en la producción de etanol a partir de melazas intermedias, estimados para 18% de reducción en la producción de azúcar y 17.1 litros de etanol por tonelada de caña.

TABLA 6.3: Insumos y productos en la fabricación de Etanol a partir de Melazas intermedias (Miel B).

Insumos		
Caña de azúcar	1,000	Kg
Fuel oil	7.4	Kg
Electricidad (puede ser producida a partir del bagazo)	12.5	kWh
Agua tratada	5,600	Litro
Ácido sulfúrico	0.050	Kg
Urea	0.100	Kg
Productos y subproductos		
Azúcar	92	kg
Etanol anhidro	17.1	litro
Bagazo con 50% humedad (consumido en el ingenio)	264	kg
Vinazas	171 a 274	litro
Cachaza	30	kg
Levadura	3.9	kg
CO ₂ (producido en las cubas de fermentación)	13.3	kg

En la figura 6.2 se presenta un esquema de proceso de la producción de azúcar y etanol a partir de melazas intermedias.

FIGURA 6.2: Esquema de proceso para la producción combinada de Azúcar y Etanol a partir de Melazas intermedias (Miel B).



6.1.3 Jugo Directo de Caña de Azúcar.

Para incrementar la producción de etanol, se desvía progresivamente más jugo de caña hacia la producción de etanol, hasta la situación en que no se produce azúcar empleando directamente el jugo proveniente de los molinos.

Evidentemente la producción de etanol directamente del jugo de la caña reduce la flexibilidad del ingenio en términos de producir diferentes productos y determinar según las condiciones de mercado, una composición de mayor rentabilidad. Por otro lado, la producción solamente de etanol reduce las inversiones significativamente, no siendo requerido equipo de la sección de cocimiento (tachos, turbinas de centrifugación, etc.).

Para condiciones así y considerando el contexto de los ingenios mexicanos, a partir de una tonelada de caña con 13 a 14% de sacarosa se estima obtener de 75 a 80 litros de alcohol anhidro, significando una recuperación de ART de la caña entre 82 y 85%. En ese caso se espera un consumo de vapor cerca de 10% inferior al consumo en la producción de azúcar, debiendo mantenerse el tratamiento térmico del jugo y el ajuste del nivel de concentración buscando mejorar las condiciones en la fermentación.

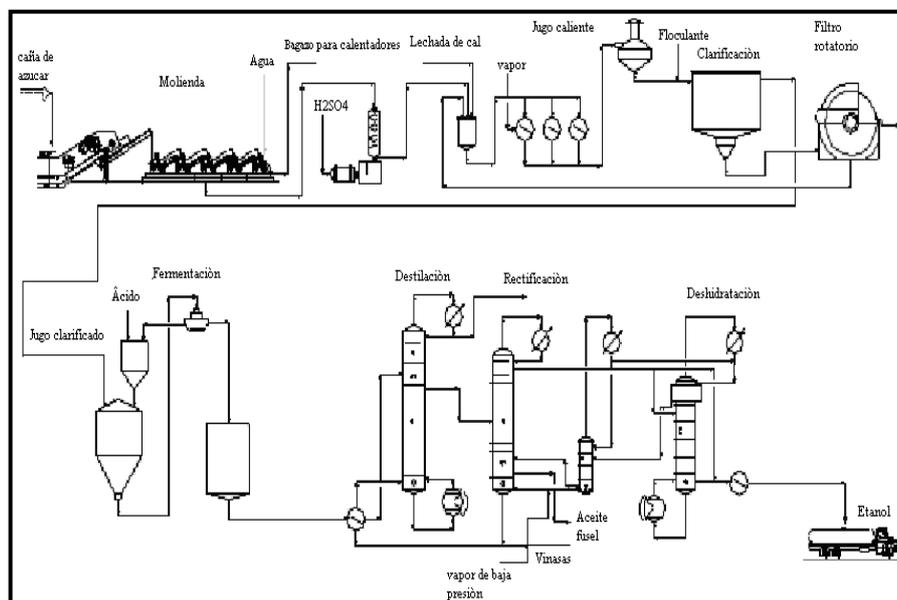
El proceso de obtención de etanol a partir del jugo directo de caña es similar al de las dos rutas tecnológicas anteriores, en lo único que varía es que no presenta la sección de cocimiento, ya que no hay producción de azúcar.

Las plantas agroindustriales operando dedicadas únicamente a la producción de etanol presentan como indicadores representativos los valores constantes de la Tabla 6.4, estimados con base en las condiciones observadas en los ingenios brasileños. Naturalmente que es posible esperar una variación en estos valores según cada contexto agroindustrial, en función de las características de la materia prima y las especificidades del proceso adoptado, en particular las condiciones de tratamiento del jugo y fermentación.

TABLA 6.4: Insumos y productos en la fabricación de Etanol de Jugo directo de Caña.

Insumos		
Caña de azúcar	1,000	kg
Fuel oil	7.4	kg
Electricidad (puede ser producida a partir del bagazo)	12.5	kWh
Agua tratada	5,600	litro
Ácido sulfúrico	0.050	kg
Urea	0.100	kg
Productos y subproductos		
Etanol anhidro	80	litro
Bagazo con 50% humedad (consumido en el ingenio)	264	kg
Vinazas	780 a 1248	litro
Cachaza	30	kg
Levadura	17.8	kg
CO ₂ (producido en las cubas de fermentación)	60.7	kg

FIGURA 6.3: Esquema de proceso para la producción de Etanol a partir de Jugo directo de Caña.



6.1.4. Jugo Directo de Caña y de Residuos Celulósicos.

Como se mencionó en el Capítulo V, el uso de esta alternativa tecnológica permitiría elevar dramáticamente la producción de etanol por unidad de materia prima procesada y potencialmente reducir bastante los costos, sin embargo, los procesos de conversión de celulosa están todavía en desarrollo.

El principal reto en la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es el pretratamiento e hidrólisis de la materia prima, que pueden utilizar esencialmente tres tipos de procesos y sus variantes y combinaciones: hidrólisis ácida (con ácido diluido o concentrado), hidrólisis enzimática y procesos termoquímicos. El pretratamiento tiene como objetivo desintegrar la matriz de carbohidratos de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior ataque enzimático. Adicionalmente, la mayor parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pretratamiento y la lignina se libera o puede incluso descomponerse, en algunos casos con producción de compuestos perjudiciales al proceso fermentativo posterior. No obstante, ya separada, la lignina puede presentar valor comercial o servir como combustible.

En una etapa posterior, la celulosa liberada es típicamente sometida a hidrólisis enzimática con celulasas exógenas, lo cual hace que se obtenga una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas (xilosas) resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa. Hay en estudio decenas de alternativas de proceso para pretratamiento e hidrólisis (Sun y Cheng, 2002). Como afirmado anteriormente, las glucosas pueden ser convertidas sin dificultades en etanol, pero las pentosas son todavía objeto de atención de los bioquímicos, que buscan desarrollar bacterias capaces de efectuar adecuadamente tal conversión.

En la actualidad se considera representativa una eficiencia de conversión y recuperación de celulosa en 76%, que asociada a una conversión fermentativa de 75%, aumentaría la producción a 336 litros de etanol anhidro por tonelada de celulosa (Badger, 2002). En el bagazo seco los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina son respectivamente cerca de 47%, 25% y 20%, valores próximos a los observados para los residuos de cosecha. Por tonelada de bagazo con 50% de humedad, se puede producir a partir de la celulosa, 123 litros de etanol anhidro y a partir de la hemicelulosa, 63 litros de este biocombustible (Rossel, 2005).

En términos concretos, específicamente para bagazo, empleando ácido diluido y tratamientos térmicos, estudios hechos en una planta piloto en un ingenio azucarero en Brasil llegaron a una productividad de 109 litros por tonelada de bagazo, con perspectivas de alcanzar hasta 180 litros por tonelada, en caso que se consiga fermentar las pentosas. A esos niveles, la producción de etanol prácticamente dobla por unidad de área en cultivo, estimándose que llegue a más de 12 mil litros por hectárea, utilizando cerca de 1/3 del bagazo producido, posible de ser obtenido sin afectar la operación normal de la planta, excedente del proceso de generación de vapor, más una cantidad similar de residuos de cosecha (Oliverio, 2005).

Como se trata de un proceso todavía en desarrollo y no son disponibles datos o parámetros de instalaciones reales, para los análisis posteriores, no se hablará de esta tecnología, sin embargo, es muy importante tomar en cuenta que si llegase a ser posible el progreso de esta tecnología podríamos producir etanol a bajos costos de materia prima, ya que ésta representa una inversión importante en la creación de una planta.

6.2 Estudio Económico para la Producción de Etanol Empleando Caña de Azúcar.

6.2.1 Costos de Materia Prima.

En términos de costo para producción agrícola, en un estudio realizado en la industria cañera se estimó que, en condiciones típicas, para cultivo temporal la productividad agrícola es de 61 t/ha y presenta un costo de producción de 236.47 \$/ton, mientras bajo riego se alcanzan 95 t/ha y un costo de 286.71 \$/ton. A partir de estos costos, se determinó que el ingreso neto de los productores de caña de México por hectárea estaría entre \$10,200.00 y \$14,250.00, respectivamente para cultivo temporal o bajo riego (Poy, 2005A).

Más allá de los costos para los productores, es el precio pagado por los ingenios que efectivamente representa el costo de la caña para la fines agroindustriales, pues prácticamente en toda la agroindustria cañera de México la materia prima es comprada de productores independientes. Esos productores reciben por su producto cierta cantidad, de acuerdo a una fórmula conocida como KARBE, que determina la cantidad de azúcar recuperable por tonelada de caña, en función de parámetros de calidad de la caña y del desempeño agroindustrial. En esa fórmula se adopta el contenido de sacarosa (Polcaña) como la principal variable de calidad de la caña y se toma como condiciones adicionales de referencia un contenido de fibra de 14.21% y una pureza del jugo mezclado de 81.23%.

Cada año se define el precio KARBE y mediante un mecanismo de pre-liquidaciones (80% del valor final estimado) y una liquidación final, se pagan a los productores de caña. El precio KARBE puede ser adoptado como costo de la materia prima, bajo el concepto de costo de oportunidad, para una planta productora de etanol de caña de azúcar.

Para 2005, el precio del azúcar referente para el pago de la caña a los productores fue \$5,759.97 por tonelada. Como el contenido de sacarosa estuvo entre 10.75% a 15.36%, resultó un rendimiento KARBE en el rango 90 a 127 kg/ton; considerando el reparto legal de 57% a los productores, la caña fue pagada como mínimo a 292.47 \$/ton y como máximo a 417.90 \$/ton, con un promedio nacional de 359.37\$/ton (CNIAA, 2006). Este precio ha estado prácticamente estable en los últimos diez años (Lazcano, 2006).

6.2.2 Costos de Operación y Mantenimiento.

A continuación se detallan los costos para operar una planta productora de etanol, incluyendo básicamente los costos de los servicios auxiliares (energía eléctrica y vapor de proceso), costos de mano de obra, costos administrativos, insumos de producción y costos de mantenimiento y conservación.

Los costos energéticos o de los servicios, para las alternativas asociadas a la caña de azúcar, están cubiertos por el uso del bagazo en la producción de vapor de alta presión y la utilización de esquemas de cogeneración, con producción combinada de electricidad y calor útil, de manera que no requiere el aporte de energía adicional.

Para la energía eléctrica consumida se adoptó un precio de 150 US\$/MWh y para el gas natural, asumido como la fuente a ser empleada en calderas con 80% de rendimiento, se consideró un precio de 5.50 US\$/MJ, valores adoptados en estudios similares para México (Fundación Emisión, 2005) y constatados como representativos.

Con base en datos de sistemas reales utilizando caña de azúcar, se estimó que los costos de mano de obra y costos administrativos corresponden respectivamente a 8.5% y 1.2% de los costos con materia prima. Para los costos asociados a los insumos de producción y costos de mantenimiento y conservación, se adoptó 3% de las inversiones para ambos casos. Estos valores fueron elegidos a partir de datos de plantas brasileñas (Assis, 2006) y son comparables a indicadores similares para otros procesos (Henniges y Zeddies, 2003). Como se verá a continuación, esos costos representan generalmente menos de 15% del costo total del etanol, mayormente formado por la materia prima, inversión y energía.

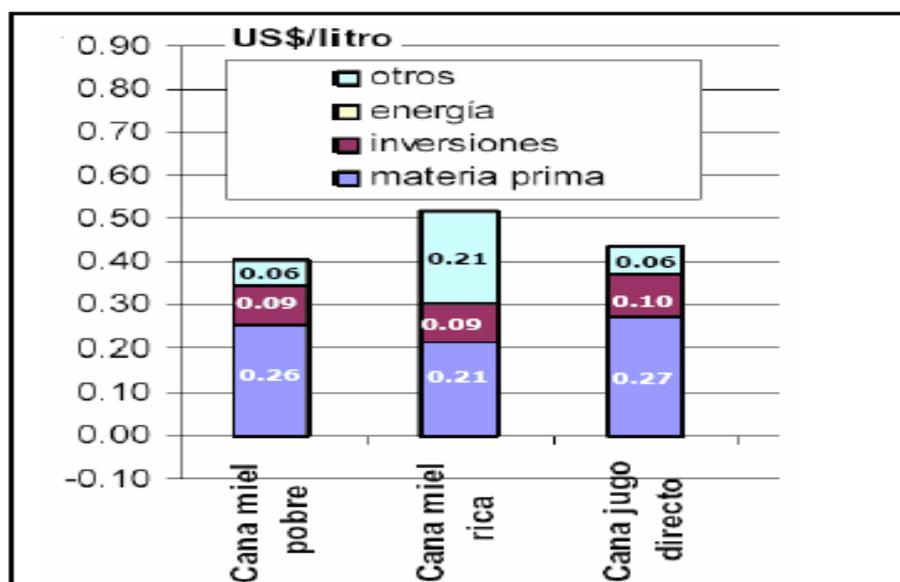
6.2.3 Costos Totales.

Estimándose el valor anualizado de las inversiones, mediante una tasa de descuento de 12%, una vida económica de 10 años y agregando los costos de materia prima, operación y mantenimiento anteriormente presentados, se obtiene el costo total del etanol presentado en la tabla 6.5 y la gráfica 6.1, con los distintos componentes. Obsérvese que el costo del azúcar no producido, un costo de oportunidad, carga en el costo del etanol de miel rica.

TABLA 6.5: Composición de los Costos de producción de Etanol (US\$/litro).

Caso	Caña miel pobre	Caña miel rica	Caña jugo directo
materia prima	0.26	0.21	0.27
inversiones	0.09	0.09	0.10
energía	0.00	0.00	0.00
otros	0.06	0.21	0.06
total	0.40	0.52	0.43

GRÁFICA 6.1: Costos del Etanol para los procesos convencionales de Caña de Azúcar.



6.2.4 Módulos Industriales e Inversiones.

Buscando estimar los costos de forma representativa, para cada tecnología se adoptó un módulo industrial, correspondiendo a unidades productivas reales. Naturalmente que esos costos pueden variar ampliamente en función de las condiciones del proyecto, como por ejemplo uso de materiales más resistentes a corrosión, adopción de sistemas de automatización y control más complejos, sistemas de tratamiento de efluentes, etc.

La Tabla 6.6 presenta las características principales para los módulos industriales empleando caña de azúcar en las diferentes rutas tecnológicas. Estos módulos fueron concebidos basándose en la experiencia brasileña para la destilería autónoma (Oliverio, 2006) y guatemalteca para las destilerías anexas, adoptándose en este último caso las inversiones estimadas en plantas productoras de etanol implantadas recientemente en Guatemala junto a ingenios azucareros, utilizando equipos producidos en México (CEPAL, 2006). Para las destilerías anexas, no fueron consideradas las inversiones en el ingenio, dedicadas esencialmente a fabricación de azúcar.

TABLA 6.6: Módulos industriales para la fabricación de Etanol de Caña de Azúcar.

proceso	módulo industrial
miel pobre	Destilería anexa con 150 m ³ /día de capacidad, inversiones de 15 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, anualmente utilizando miel C (propio o comprado de otros ingenios) resultante del procesamiento de 3.08 millones de toneladas de caña y produciendo 27,090 m ³ de etanol anhidro. Dispone de servicios auxiliares (electricidad y vapor generados a partir de bagazo en el ingenio asociado)
miel rica	Destilería anexa con 150 m ³ /día de capacidad, inversiones de 15 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, anualmente utilizando miel B (propio o comprado de otros ingenios) resultante del procesamiento de 1.58 millones de toneladas de caña y produciendo 27,090 m ³ de etanol anhidro. Dispone de servicios auxiliares (electricidad y vapor generados a partir de bagazo en el ingenio asociado)
jugo directo	Destilaría autónoma con 450 m ³ /día de capacidad, inversiones industriales de 50 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 1 millón de t de caña y produciendo 80,000 m ³ de etanol anhidro. Produce electricidad y vapor a partir de 250 mil t de bagazo producido por zafra, sin necesitar de aportes energéticos externos.

Estudios realizados sobre costos de ingenios alcoholeros en Brasil apuntan inversiones bastante similares a la estimación presentada en la tabla anterior (CGEE, 2006 y Assis, 2006).

6.2.5 Precios de Indiferencia para el Etanol en México.

Precios de paridad o de indiferencia para el etanol combustible pueden ser definidos de acuerdo con el punto de vista que se considere. Para el productor de etanol, precios de paridad son los niveles de precios para los cuales es indiferente producir etanol u otro producto a partir de la misma materia prima. Así, para el sector azucarero, cuya materia prima es la caña de azúcar, el precio de paridad sería como un precio de oportunidad o precio de indiferencia a partir de lo cual es más motivador producir el biocombustible, el cual es determinado basándose en el contenido equivalente de azúcares del etanol y adoptando eficiencias para los procesos industriales específicos de este producto.

La Figura 6.4 sintetiza el concepto de los precios de paridad del etanol (PIEA), que deben ser comparados con los precios de venta del producto para verificar si existen condiciones viables de producción que los demás productos azucareros.

FIGURA 6.4: Competitividad en la producción de Etanol.



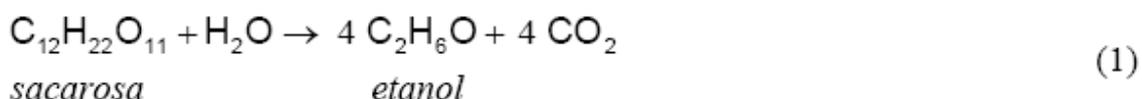
Para el consumidor, precios de paridad son los precios que hacen los costos operacionales iguales, utilizando o no etanol. Como se trata de discutir la factibilidad de la producción local de etanol para su inserción sostenible en la matriz energética mexicana, sin considerar la posibilidad de importar o exportar etanol combustible, son comparativamente más fundamentales las cuestiones referentes al productor.

Particularmente en el caso de México, adonde además de importarse gasolina, se utiliza una significativa cantidad de MTBE importado, la utilización de etanol nacional podrá traer ventajas interesantes, reduciendo el costo final de la gasolina y ampliando la demanda de corrientes de menor valor, siempre que se reconozca el valor antidetonante del etanol y su precio por unidad oxigenante sea competitivo.

6.2.6 Precios de Paridad para Productores de Etanol.

La discusión de los precios de paridad tiene sentido solamente cuando hay una posibilidad concreta de utilizar la misma materia prima para productos diferentes, preciaados de forma independiente. Esa situación ocurre particularmente para la caña, típicamente empelada para fabricar azúcar y que puede ser utilizada para producir etanol.

En la producción de etanol de caña de azúcar los precios de paridad deben ser determinados en función de los precios del azúcar y de las melazas, que representan los productos alternativos principales para esa materia prima. Tales precios son estimados sin tomar en cuenta las inversiones en sistemas de producción, pues representan directamente precios de oportunidad para productos alternativos utilizando una misma materia prima. De la siguiente ecuación de la producción de etanol:



Podemos decir que en condiciones representativas, un litro de etanol requiere 1.67 kilogramos de sacarosa para ser producido (Macedo, 2000), permitiendo establecer la expresión para Precio de Indiferencia del Etanol Anhidro, PIEA, como función del precio del azúcar (PAzu.).

$$\text{PIEA (\$/litro)} = 1.67 * \text{PAzu (\$/kg)} \quad (2)$$

Para las condiciones de México, conforme se comentó anteriormente, la producción de etanol podría darse principalmente en complementación a las actividades azucareras, en la extensión posible expandiendo los cultivos y añadiendo destilerías a las plantas existentes, siempre en un marco de eficiencia económica.

De hecho, las melazas son subproductos presentes en la fabricación de azúcar y bajo condiciones adecuadas de precios, pueden ser materias primas importantes para la producción de etanol.

En ese caso la producción de etanol no implica necesariamente incrementar el área sembrada en caña. Considerando la conversión de melaza con un contenido de azúcares (ART) de 56%, la expresión (2) anterior puede ser adaptada para determinar el Precio de Indiferencia del Etanol Anhidro, definiéndose PM_{el} como precio de la melaza:

$$PIEA (\$/litro) = 2.98 * PM_{el} (\$/kg)$$

Por lo tanto, los precios de indiferencia esencialmente son precios de oportunidad de la materia prima sacarosa, expresados en términos de etanol. Como existen diferentes productos azucareros, es oportuno observar la existencia de distintos niveles de precios, correspondientes progresivamente a utilizar las melazas agotadas y competir con los mercados de productos azucareros.

6.3 Aspectos Políticos y Sociales que Intervienen en la Introducción del Etanol en México.

Es evidente que la viabilidad de la producción y utilización del etanol en México no puede ser determinada de forma simplista, mediante una transposición de modelos aplicados en otros países. La diversidad de implicaciones e interrelaciones asociadas al etanol combustible, involucra una gama de actividades agrícolas, agroindustriales, del mercado de combustibles, impactos ambientales, sociales y políticos.

Sin embargo, un síntoma de la creciente percepción del gobierno mexicano sobre las oportunidades del etanol es la reciente evolución del marco legal, tendiente a proporcionar la base adecuada para la adopción de etanol en la matriz energética. Así, pueden ser mencionadas la Ley de Desarrollo Sustentable de Caña de Azúcar, que en dos artículos menciona explícitamente la necesidad de promover el etanol como carburante y oxigenante de gasolina”, especificaciones de los combustibles fósiles para protección ambiental, estableciendo exigencias de oxigenación para las gasolinas mexicanas y abriendo la posibilidad del empleo de etanol como aditivo, bien como la aprobación por la Cámara de Diputados de la Ley para el Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos, en abril de 2006.

En ese mismo sentido la Secretaría de Energía del gobierno mexicano, en el marco de un estudio sobre energías renovables para México, señaló que las materias primas potencialmente disponibles para producción de biocombustibles líquidos (etanol y biodiesel) alcanzaban un total de 200 PJ por año (SENER, 2006), correspondientes a cerca de 33 millones de barriles de petróleo, aproximadamente el 6.5% de la oferta interna de hidrocarburos en el país.

Otras de las regulaciones que tienen un impacto importante en el sector energético y que pueden afectar la introducción del etanol como combustible u oxigenante en México son:

- Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.
- Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS).
- Ley del Impuesto al Valor Agregado (IVA).
- Ley de Energía para el Campo.
- Proyecto de Decreto de la Ley para el Desarrollo y Promoción de Bioenergéticos.
- NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.

En cuanto al aspecto social las inversiones de nuevas plantas de producción de etanol, generan un efecto positivo sobre la economía general estimulando la demanda global, y particularmente en la actividad económica de las comunidades rurales donde se localizan las plantas de producción, creando en el área de influencia, nuevos puestos de trabajos directos e indirectos.

La instalación de una planta incrementa los ingresos adicionales de los productores agropecuarios, así como también el poder adquisitivo de la caña de caña de azúcar.

6.4 Impacto Ambiental sobre el Uso de Etanol en México.

Uno de los aspectos más importantes y podría decirse que el principal en la introducción del uso del etanol en el mundo, es el ambiental, una evidencia de ello fue el desarrollo de la cumbre de Kyoto (Japón) donde se intentó establecer una política ambiental global que redujera las emisiones de dióxido de carbono, producto de la combustión de fuentes fósiles.

El acuerdo que aún no ha sido ratificado por los países industriales, establece que cada país firmante se compromete a que en el año 2010 el nivel de sus emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera no deberá superar el 90% del nivel de las emisiones registradas en 1990.

Es por ello, que algunos países optaron por el uso de energías renovables, tal es el caso del etanol obtenido a partir de biomasa, es cual es una de las herramientas más eficaces para la lucha contra la contaminación atmosférica, utilizado como combustible o como mezcla en las gasolinas.

Otro de los factores importantes que puede ayudar en la implementación del uso de etanol en México son los “bonos de carbono”

Las plantaciones nuevas de caña, cosechadas en verde o cruda y cuya biomasa se destine a la fabricación de etanol, podrían calificar para entrar en el mercado de los llamados “Bonos de Carbono”.

La cantidad de dióxido de carbono capturado por una plantación en la zona de abastecimiento del Ingenio de Atencingo (Región Balsas) con una producción de 966 toneladas de tallos en su vida útil de siete cortes, equivalentes a 1,256 toneladas de caña integral por hectárea (la mejor de México), alcanzaría teóricamente 512 toneladas (CO₂).

Se han realizado operaciones de certificados de reducción de emisiones en un precio de mercado de aproximadamente 10 dólares por tonelada de CO₂ absorbido por la plantación y por ello, el ingreso de los productores de ese ingenio al vender su captura sería de 5,120 dólares en el período de 8 años (siete cortes) o sea \$56,320 pesos por hectárea, igual a \$7,040 pesos por hectárea por año. Por tonelada de caña se obtendrían \$58.30.

Si se gestionara con éxito esta operación solo por un período de plantación de caña, con el contrato se podría obtener financiamiento bancario para apoyar la construcción en cooperativa de la fábrica de etanol.



CAPITULO VII.



FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN Y USO DE ETANOL.

A partir de los temas explorados en los capítulos precedentes, que fundamentaron las condiciones actuales y potenciales de oferta y producción de etanol, es posible definir mejor los contextos más favorables cotejando las necesidades con las posibles fuentes del producto.

Así, en los párrafos siguientes se aborda inicialmente la dimensión de los parques productores de etanol para México, para las diferentes tecnologías de producción, especificadas por los módulos productivos, y escenarios de demanda, permitiendo estimar el nivel de inversión y requerimientos de tierra para suministrar la cantidad necesaria de materia prima. En seguida se efectúa un análisis económico para la producción de etanol en México, considerando los escenarios anteriores, basándose en los costos estimados para producción y los precios de paridad evaluados precedentemente. No se considero la posibilidad de comercio internacional de etanol combustible. Al final se presenta un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que afectan los precios del etanol, de modo a fortalecer la eventual toma de decisiones sobre la oportunidad y factibilidad económica del etanol combustible para México.

Los aspectos explorados en ese capítulo evidentemente no agotan las amplias implicaciones de la producción y uso del etanol, siendo imperativo agregar informaciones e indicadores de sustentabilidad para las distintas opciones, objeto de otros estudios. No obstante, la viabilidad económica es el punto de partida para propuestas consistentes buscando implementar programas de biocombustibles.

7.1 Dimensiones del Parque Productor de Etanol en México

Considerando los escenarios de demanda de etanol (Tabla 1.5) y las producciones potenciales de etanol para los diferentes módulos productivos presentados en el Capítulo 6, se presentan el número de unidades productivas necesarias, las inversiones asociadas a su implantación y las superficies de cultivo requeridas para cada caso. Las inversiones fueron graficadas (Gráfica 7.1), evidenciando como los impactos son nítidamente diferenciados entre las diversas posibilidades estudiadas.

TABLA 7.1: Número de unidades productivas necesarias para cubrir la demanda nacional de Etanol.

Materia prima y tecnología	Caña miel pobre	Caña miel rica	Caña jugo directo
Capacidad (m ³ /día)	150	150	450
Inversión industrial por unidad (mil US\$)	15,000	15,000	50,000
Producción anual (m ³ /año)	27,090	27,090	81,270
Escenario	Número de módulos		
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE	16	16	6
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5,7% en volumen	34	34	12
3. Mezcla de 10% de etanol en volumen en toda gasolina del país	144	144	48

TABLA 7.2: Inversión industrial total (tecnologías convencionales).

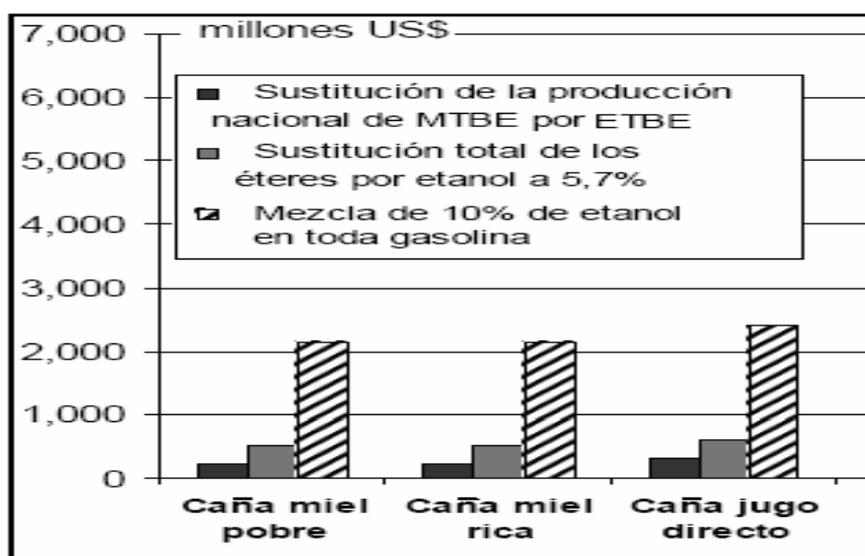
Materia prima y tecnología	Caña miel pobre	Caña miel rica	Caña jugo directo
Escenario	Inversión industrial (millones de US\$)		
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE	240	240	300
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5,7% en volumen	510	510	600
3. Mezcla de 10% de etanol en volumen en toda gasolina del país	2,160	2,160	2,400

De acuerdo a los valores presentados en las tablas anteriores se observa que la mayor inversión se tiene en la tecnología de producción de etanol apartir de jugo directo de caña, sin embargo es la que más produce y por lo tanto el número de módulos requeridos para cubrir la demanda de cada escenario es menor con respecto a las otras dos tecnologías.

TABLA 7.3: Superficie de cultivo requerida de Caña de azúcar, para los diferentes escenarios propuestos

Materia prima y tecnología	Caña miel pobre	Caña miel rica	Caña jugo directo
Productividad agrícola (t/ha)	61	61	61
Productividad industrial (litro/t)	8.8	17.1	80
Escenario	Superficie de cultivo (miles de ha)		
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE	767	395	84
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5,7% en volumen	1,698	874	187
3. Mezcla de 10% de etanol en volumen en toda gasolina del país	7,260	3,736	799

GRÁFICA 7.1: Inversiones industriales necesarias para cubrir la demanda de Etanol en cada escenario.



7.2 Análisis Económico de la Producción y Uso de Etanol en México

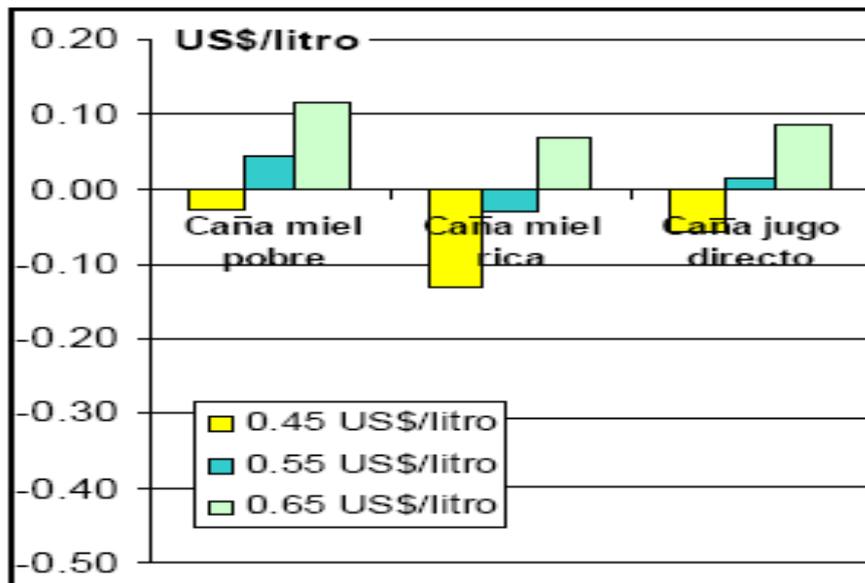
Tomando los costos de producción del etanol para los diferentes contextos estudiados (presentados en la Tabla 6.5) y asumiendo un precio de venta al nivel de los precios de paridad, es posible evaluar económicamente esa agroindustria energética. Hay que observar que el precio de las materias primas fue definido con base a costos de producción y los demás costos se refieren a módulos productivos basados en situaciones reales, en la extensión posible.

Como indicador de sustentabilidad económica, se determinó el resultado final neto de la actividad productiva, expresado en dólares por litro de etanol producido, considerando adicionalmente los siguientes parámetros para los cálculos, en un escenario de referencia: tasa de descuento de 12%, vida económica útil de 10 años, un factor de depreciación de 10% anual y una tasa de impuestos de 28% sobre el resultado bruto. La energía eléctrica y el gas natural fueron valorados respectivamente a 150 US\$/MWH y 5.50 US\$/MJ.

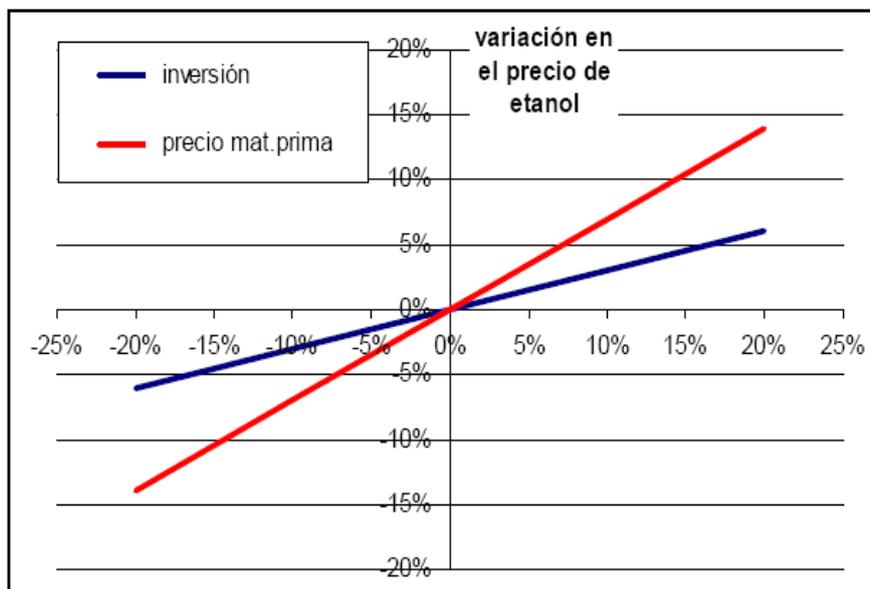
Para los precios del etanol, fueron evaluados tres casos: 0.45, 0.55 y 0.65 US\$/litro. Vale comentar que esos niveles de precios son representativos de los valores practicados en el mercado americano de etanol durante los meses de abril a junio de 2006 (Kelly, 2006). Bajo esas condiciones, se obtuvo la gráfica 7.2, indicando como la atractividad de la producción de etanol depende fuertemente del precio de su producto, como se podría esperar.

Buscando complementar el análisis precedente, se efectuó un breve estudio de sensibilidad del costo del etanol frente a variaciones de los principales parámetros que afectan ese valor, como las inversiones y los costos de energía, como presentado en las Figuras 7.3 y subsecuentes. Por supuesto que para costos distintos de los costos de referencia, se alteran proporcionalmente los indicadores de factibilidad. Así, esos gráficos permiten evaluar cuales podrían ser los aspectos prioritarios a tener en cuenta para mejorar los indicadores de una tecnología eventualmente todavía poco atractiva en términos económicos.

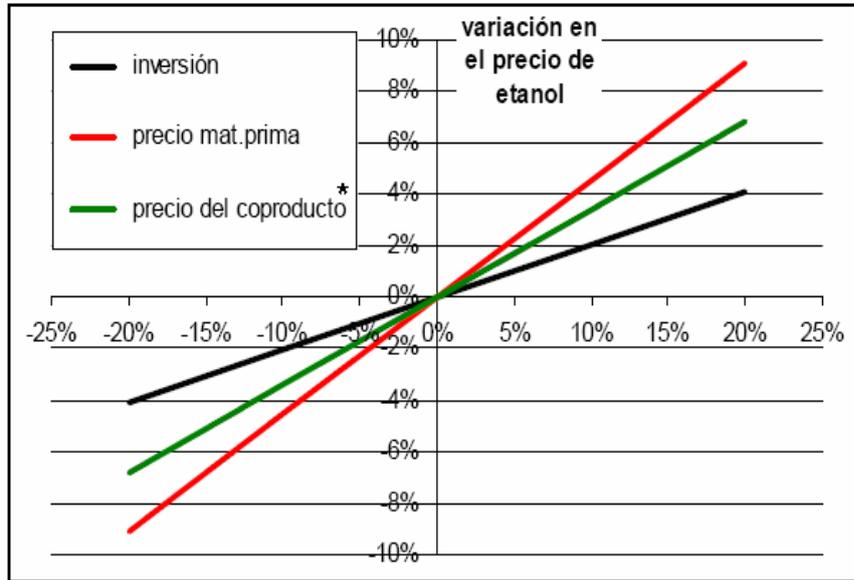
GRÁFICA 7.2: Beneficio neto total del Etanol (i=12%, vu=10 años).



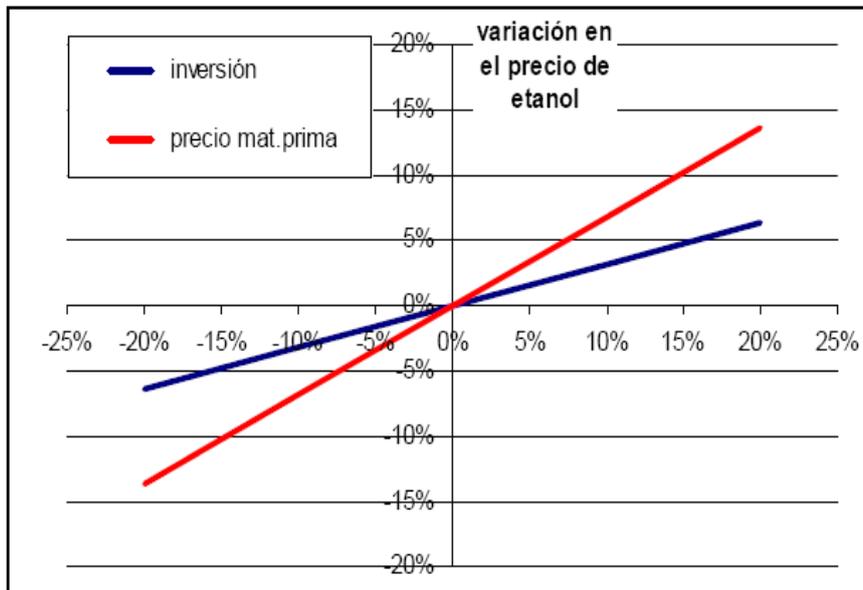
GRÁFICA 7.3: Sensibilidad del costo del Etanol producido de miel pobre de Caña.



GRÁFICA 7.4: Sensibilidad del costo del Etanol producido de miel rica de Caña *



GRÁFICA 7.5: Sensibilidad del costo del Etanol producido de Jugo directo de Caña.



En las gráficas anteriores se observa como, de una manera general, las variaciones en el precio de la materia prima afecta bastante el precio final del etanol. Eso es más evidente para los contextos adonde la inversión no es tan relevante, sea porque se trata de una destilería anexa, casos del uso de las mieles. Otro punto a comentar es la manera como los coproductos afectan: para la miel rica de caña, el azúcar que se deja de producir es una pérdida, y por lo tanto, altos precios significan mayores pérdidas.

Las inversiones presentadas reflejan únicamente los costos de capital para la planta agroindustrial y no consideran los costos agrícolas, de desarrollo de plantaciones, evidentemente necesarios para promover la producción de materia prima. Estos costos están contabilizados en la formación del precio de la materia prima, cuyo precio debe tomar en cuenta todos los costos efectivamente incurridos.

De esa forma, es correcto y más sencillo adoptar la biomasa utilizada a precios exógenos y considerar como un insumo de producción. Sin embargo, es interesante reconocer que la formación de campos de cultivo, incluyendo por ejemplo preparación de suelo, eventualmente obras de drenaje o riego, puede representar costos significativos. Como una referencia que indica la magnitud relativa de tales costos, en Brasil, las inversiones permanentes para producción de caña son consideradas como formación de capital fijo agrícola y valen 47% de las inversiones industriales (Consecana, 2006).

C O N C L U S I O N E S

Finalmente se puede concluir que México presenta condiciones adecuadas para promover la producción y uso de etanol combustible, con potenciales ventajas económicas (desarrollo del sector agrícola y viabilidad económica), sociales (generación de empleos) y ambientales (reducción de gases contaminantes). Desde el punto de vista de la demanda, la adopción del etanol ofrece la posibilidad de sustituir o disminuir el consumo de gasolina y componentes oxigenantes (MTBE y TAME), productos importados en volúmenes crecientes. Además, esos aditivos son compuestos ambientalmente cuestionados y progresivamente prohibidos en Estados Unidos por ser considerados como cancerígenos. Por el lado de la oferta, condiciones favorables de clima y disponibilidades de tierra, conjugadas a oportunidad de dinamizar actividades agroindustriales y mejorar la participación de fuentes renovables en la matriz energética, son algunos de los factores que tienden a impulsar el etanol combustible en México.

Comparando las tecnologías de producción de etanol a partir de biomasa, se destaca favorablemente a la caña de azúcar, por no competir en la demanda de áreas bajo riego, por no ser tan elemental en la alimentación, por su productividad y perspectivas de perfeccionamiento. Así es recomendable que las otras alternativas sean consideradas de menor prioridad por lo menos en el horizonte de los próximos años.

De las tres rutas tecnológicas analizadas anteriormente se puede decir que, la más viable es, a partir de melazas agotadas ya que la producción de caña para obtener etanol no debe competir con la producción de caña para extraer azúcar puesto que es un coproducto tan importante como lo es el etanol. La ventaja que tiene esta ruta tecnológica es que no hay pérdidas en la producción de azúcar ya que inevitablemente estas mieles se producen y pueden ser empleadas para obtener etanol, sin embargo, el rendimiento es más bajo (8.8l/ton caña) que en mieles intermedias (17.1l/ton caña) y jugo directo (80 l/ton caña).

Las etapas clave en la maximización del rendimiento de obtención de etanol son la molienda con extracción del jugo, la fermentación y la selección del método más adecuado para obtención de etanol anhidro.

En la descripción del proceso del capítulo IV se recomienda un tren de molienda constituido por cuchillas, una desmenuzadora y una desfibradora ya que de esa manera se obtiene la mayor cantidad de jugo posible.

En cuanto a la fermentación, se eligió como microorganismo fermentador la levadura *Saccharomyces diastaticus*, la cual es una variedad de la *Saccharomyces cerevisiae*, que presenta las siguientes características: Es altamente floculante, resistente a la concentración de alcohol, presenta una alta velocidad de crecimiento celular, así como una alta productividad de alcohol formado por gramo de sustrato.

La fermentación se realiza en continuo en dos CSTR(Reactor Continuo de Tanque agitado) con reciclo por que se logran mayores productividades que en los sistemas Batch, se disminuye el volumen de los reactores, permite la obtención de un producto uniforme, así como facilita la automatización del proceso. Además reciclar la levadura, permite tener altas concentraciones de levadura en los fermentadores (83g/L), lo cual acelera el procesos de fermentación lográndose un incremento de productividad de hasta diez veces sobre los procesos continuos sin reciclo.

Para obtener al alcohol anhidro se eligió una destilación azaotrópica ya que es una tecnología madura, disponible comercialmente para cualquier escala y con suficiente información para ser fácilmente modelada y simulada, también permite la separación parcial del “entrainer” en el tope de la columna azeotrópica, con lo cual se disminuye el costo operativo, ya que se usa una nueva mezcla azeotrópica con un punto de ebullición menor a la obtenida por una destilación extractiva, además de que existe una amplia gama de entrainers disponibles: Hidrocarburos alifáticos, aromáticos y cíclicos. El requisito principal es la inmiscibilidad con el agua.

En cuanto a la viabilidad económica de la producción de etanol anhidro en nuestro país, depende de varios aspectos a considerar:

- Costo de la materia prima a emplear
- Autosuficiencia energética, a partir del bagazo de la caña. Cero petróleo.
- Economía de escala (mayor tamaño de las destilerías).
- Incorporación de la *Cogeneración*, con entrega de electricidad a la red pública en el ingenio.
- Introducción de la biotecnología para mejorar los procesos de fermentación.
- Subsidios a la agricultura (producción de caña destinada para etanol y/o exportación de azúcar al mercado mundial).

Considerando los resultados, costos de producción y demás criterios se puede decir finalmente que México presenta una alta perspectiva para la introducción de etanol combustible a corto plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Montoya, R. María, Isabel; Quintero Julián Andrés; Sánchez, T., Oscar, Julián; Cardona, A., Carlos, Ariel, Evaluación Económica del Proceso de Obtención de Alcohol Carburante a partir de Caña de Azúcar y Maíz, Septiembre 2005.
- Michael S. Graboski, Fósil Energy, Use in Manufacture of Corn Ethanol , Colorado School of Mines- August, 2002.
- A. Villamar, Elementos de la Estrategia Política y Económica de los Promotores de Etanol, Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio (RMALC), Julio, 2007.
- Manuel G. Cerpa, Producción de Etanol Anhidro como Aditivo para la Gasolina a partir de la Caña de Azúcar de la región del río Huallaga, Universidad de Valladolid, 2005.
- Potenciales y Viabilidad del uso de Bioetanol y Biodisel para el transporte en México, SENER, Noviembre 2006.
- Dra. Meilyn González Cortés, Dr. Carlos Galian, Dra. Gretel Villanueva Ramos, Vigilancia en la Asimilación de Tecnologías para Producción y Uso de Bioetanol como Combustible y Materia Prima, Argentina, 2002.
- Arjona Diego, Combustibles y Biocombustibles, Seminario Internacional de Biocombustibles, Organización Latinoamericana de Energía, Brasil, Abril, 2006.
- Ing. Manuel Enríquez Poy, Producción de Etanol Anhidro en Ingenios Azucareros, México, 2005.

- Merrick & Company, Wastewater Treatment Options for the Biomass- To Ethanol Process, Colorado, USA, 1998.
- Dr. Erenio, González, Suarez; Dra. Meilyn González Cortés, Proyección de Ciencia e Innovación en la Ingeniería Química con vista en las Producciones de Biocombustibles, México, 2006.
- Sánchez, Julián, Óscar; Cardona, Carlos, Ariel, Producción Biotecnológica de Alcohol Carburante I: Obtención A partir de Diferentes Materias Primas, Venezuela, 2005.
- Bellester, Ferran; Díaz, Julio; Moreno, José, Manuel, Cambio Climático y Salud Pública: Escenarios después de la entrada en Vigor del Protocolo de Kioto, España, Enero 2008.
- Dias de Oliveira, Marcelo; Vahugan, Burton; Rikyel, Edward, Etanol As Fuel, Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint, July, 2005.
- Marlon, Arraes, Jardim, II Seminario Latinoamericano y del Caribe de Biocombustibles: El Uso Integral de la Caña de Azúcar, San Salvador, Septiembre, 2007.
- Hugot, E. Manual para Ingenieros Azucareros. Editorial Continental S.A. México, 1973.
- Bastidas, E., Arellano. Diseño Preliminar de un Proceso basado en Fermentación Extractiva para Fabricación de Etanol, Escuela de Ingeniería Química. Universidad del Valle. Cali, 2001.
- Sucromiles S.A. Biotecnología de los Procesos de Fermentación para la Producción de Etanol y Ácido Cítrico. 1980.

- Padilla, A., Mejoramiento del Proceso de Fermentación Alcohólica por medio de la Adición de Nutrientes A partir del Uso de Melazas en Sucromiles S.A en 1996. Tesis, Universidad Católica de Manizales. Manizales. 1996.
- Serra A, et al. Recuperación del Etanol Producido por Fermentación A partir de biomasa. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos. Volumen 27 No. 3,1987.
- Ruiz, C., Coronilla. Separación por membranas, Preevaporación, Material de Ingeniería de Proyectos II. Universidad del Valle.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de azúcar, México, Agosto, 2005.
- Infante, Roblejo, Ramiro; Vázquez, Carranza, Xiomara, Planificación Eficiente del Proceso de Recolección de la Caña de azúcar, Revista de Economía y Desarrollo No. 2, Vol. 129, Universidad de Granma, Junio, 2002.
- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, Eficiencia Energética y Costos Económicos de la Producción de Biocombustibles, Mayo, 2007.
- Cunningham, Roberto E.; López, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; Universidade de Santiago de Compostela, España: 1994

ANEXO I.

COMPUESTOS CONTENIDOS EN LAS NAFTAS Y SUS EFECTOS AL AMBIENTE.

MTBE- Metil-Tri-Butil-Eter

Es un compuesto que se agrega a los combustibles derivados del petróleo para su oxigenación, que eleva el octanaje de los mismos y reduce las emisiones de humo.

Se fabrica partiendo del metano, derivado del gas natural, y del isobutileno, un producto del refinado del petróleo.

El MTBE ha sido usado extensamente en la composición de las naftas tanto en usa como en el resto del mundo y es el principal competidor del etanol en el mercado de los oxigenantes.

Hasta el año 2000, un tercio de las naftas comercializadas en U.S.A. utilizaban este compuesto como oxigenante, pero luego de comprobarse que el mismo ha contaminado las aguas subterráneas y que tiene un potencial peligro de ser cancerígeno, se ha comenzado a legislar sobre su uso.

Originalmente el MTBE se impuso como oxigenante frente al etanol en las naftas reformuladas, porque se transporta más fácilmente por medio de ductos, puesto que el etanol absorbe la humedad existente en los ductos *.

ETBE- Etil-Tributil-Eter

Es un compuesto químico elaborado apartir de la reacción del etanol y del isobutileno, un subproducto derivado del proceso de refinación del petróleo.

Es más costoso que el MTBE, siendo superior técnicamente.

* EPA, The report The Fate and Transport of Ethanol Blended Gasoline in the Environment

El ETBE tiene características superiores a otros éteres para su mezcla con las naftas: es miscible con las naftas en todas las condiciones, no aumenta la volatilidad, tiene un mayor poder calorífico y relación estequiométrica más próxima a la de las naftas, muy baja solubilidad en agua, un poder corrosivo muy menor al de los alcoholes, puede producirse en las plantas actuales de MTBE, mejora el índice de octano, logra menores consumos, es menos contaminante, menores emisiones de monóxido de carbono frente a los hidrocarburos.

Efectos ambientales del etanol y las naftas.

Hidrocarburos (HC).

El petróleo y las naftas consisten en mezclas de más de 250 hidrocarburos diversos. Muchos de estos son tóxicos, algunos, tales como el benceno, son carcinógenos. Los hidrocarburos se escapan al aire durante la carga del tanque y durante la operación normal del motor. Los transportes explican del 30 al 50% de todas las emisiones de hidrocarburos a la atmósfera, aún cuando la industria del automóvil ha desarrollado y está utilizando desde hace varios años sistemas que controlan las emisiones de HC. Los HC también contribuyen a la formación del ozono a nivel del suelo. El etanol al ser un producto basado en el alcohol, no produce HC al ser quemado o durante su evaporación.

Ozono.

El ozono se forma en el aire, a nivel de la corteza terrestre, cuando los hidrocarburos, el monóxido de carbono o los óxidos de nitrógeno reaccionan en la presencia de la luz del sol y del calor. El ozono al nivel del suelo afecta la capacidad respiratoria del hombre, daña las plantas y los árboles y reduce las cosechas. El ozono formado a nivel del suelo tampoco aumenta la concentración de ozono en la estratosfera que protege la tierra contra la radiación ultravioleta del sol.

Aldehídos.

Las emisiones de aldehídos son generalmente más altas en las mezclas con etanol que al utilizarse naftas sin mezclar. Las concentraciones son extremadamente pequeñas y son reducidas por el convertidor catalítico de tres vías existente en todos los vehículos recientes. El formaldehído, el componente principal en emisiones de aldehídos, es considerado un potencial agente cancerígeno.

Monóxido de Carbono (CO).

El monóxido de carbono es un gas venenoso producido por la combustión incompleta. Se produce al quemarse combustibles derivados del petróleo que no contienen oxígeno en su estructura molecular. Los vehículos que funcionan en temperaturas más frías, durante el calentamiento del motor o en los embotellamientos, producen cantidades significativas de este gas mortal. Por tal razón, en muchos países se ha legislado por el uso obligatorio en las áreas urbanas de naftas oxigenadas con el objeto de reducir las emisiones del monóxido de carbono.

Dióxido de Carbono (CO₂).

El dióxido de carbono, no es un producto tóxico, pero contribuye al efecto invernadero.

Todos los combustibles derivados del petróleo aumentan el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera. Por el contrario, el uso de combustibles renovables, como el etanol, no aumenta el nivel de éste gas. El dióxido de carbono liberado durante la combustión es balanceado con el capturado durante el crecimiento de las plantas usadas para producir el etanol, que además en ese proceso emiten oxígeno.

Óxidos de Nitrógeno (NOx).

Varios componentes de la nafta que originan las emisiones de NOx, incluyendo los compuestos aromáticos, son reemplazados por el etanol, pero los estudios de la EPA indican que el uso de las mezclas con etanol puede aumentar levemente las emisiones de NOx, pero el grado de ese aumento y sus efectos son inciertos.

ANEXO II

LAS REGIONES CAÑERAS DE MÉXICO.

Las regiones cañeras de la vertiente del Océano Pacífico están limitadas en cuanto a su latitud desde Tapachula, Chis., a Los Mochis, Sin y de Chetumal, Q. Roo hasta Llera, Tamps. En la vertiente del Golfo de México y el Caribe. Debido a la orografía tan accidentada de nuestro territorio, la altitud es un factor delimitante para su cultivo y en varias zonas de Jalisco y Michoacán situadas a más de 1,250 msnm, la caña durante el invierno (diciembre a febrero) está expuesta a bajas temperaturas sufriendo daños por heladas. La diferencia de altura a que se encuentran las regiones cañeras producen tipos de climas distintos en temperatura, entre el cálido y el templado, pero las mayores variantes se deben principalmente a la precipitación pluvial; así observamos que a partir de las regiones de Tabasco y Papaloapan que tiene las mayores precipitaciones pluviales, las lluvias van disminuyendo hacia todos los rumbos y marcadamente al noroeste determinando condiciones de humedad muy distintas, como en Sinaloa donde la caña solo puede cultivarse con agua de riego. De acuerdo con el Prof. Contreras (SENER,2006), los límites que encierran la porción en que quedan comprendidas las 14 regiones dedicadas al cultivo comercial de la caña para la fabricación de azúcar son:

- I. Sinaloa
- II. Nayarit
- III. Jalisco
- IV. Colima
- V. Michoacán
- VI. Balsas
- VII. Tehuacán
- VIII. A. Istmo
- VIII. B. Papaloapan
- IX. Chiapas
- X. Yucatán
- XI. Tabasco
- XII. Veracruz Central
- XIII. Costa Veracruz
- XIV. Huastecas

ANEXO III

DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DE DESHIDRATACIÓN DE ETANOL.

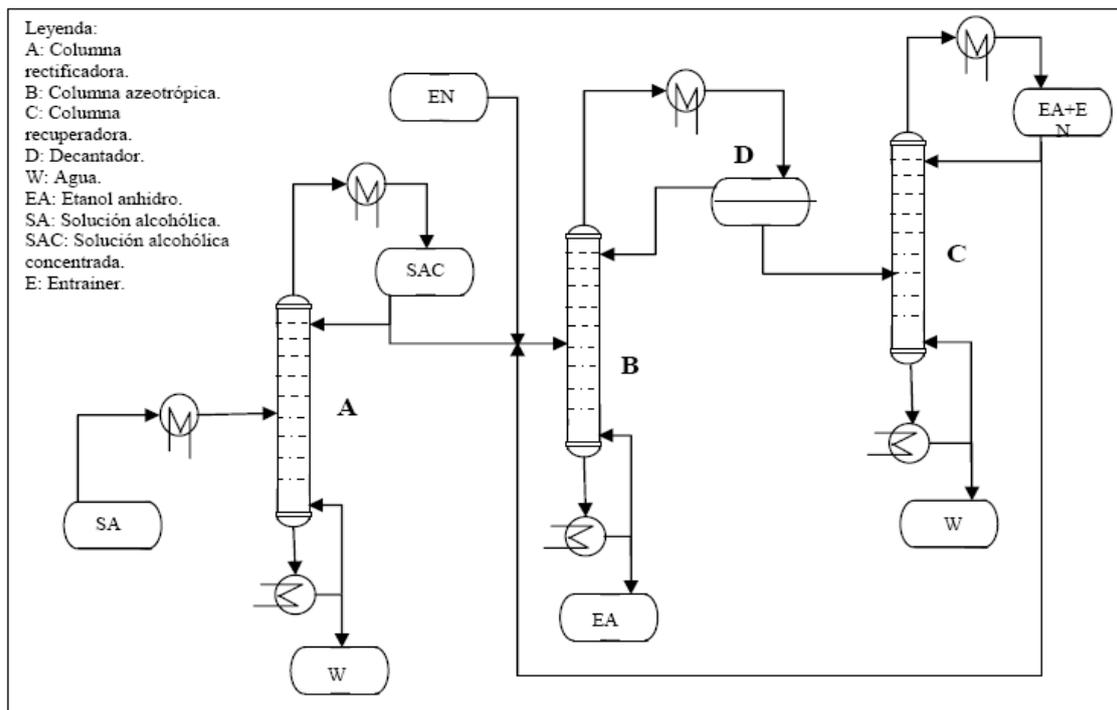
Destilación azeotrópica:

Consiste en adicionar un compuesto químico, llamado “modificador”, a una mezcla de alimentación azeotrópica en una columna de destilación fraccionada, para formar un nuevo azeótropo ternario heterogéneo (ATH) con uno de los componentes de la alimentación. Luego, este ATH es removido como destilado en la columna.

La corriente de solución alcohólica de 1 a 6% molar de etanol se rectifica en una columna de destilación fraccionada para obtener agua (fondo) y una solución alcohólica concentrada de 86% molar (cabeza). Parte de esta segunda corriente regresa a la columna como reflujo, mientras el resto es enviada a otra columna de destilación llamada azeotrópica, donde se mezcla con el modificador (benceno o ciclohexano), produciendo el ATH y liberando al EA de la alimentación, obteniéndose como producto de fondo. El ATH es condensado como producto de cabeza y se le decanta para obtener dos fases inmiscibles.

La fase orgánica, rica en el modificador, regresa a la columna azeotrópica como reflujo, mientras la fase acuosa es bombeada a una tercera columna de destilación fraccionada llamada recuperadora, donde se separa el modificador alcohólico del agua. El primero es obtenido como producto de cabeza y es reciclado a la alimentación de la columna azeotrópica, mientras que el agua es utilizado junto con la corriente obtenida en la columna rectificadora, como alimentación para otras etapas del proceso. La figura III.1 describe el diagrama de flujo de toda esta operación.

FIG.III.1: Diagrama de flujo de la destilación Azeotrópica del Etanol.



Ventajas:

- a. Es una tecnología madura, disponible comercialmente para cualquier escala y con suficiente información para ser fácilmente modelada y simulada.
- b. Permite la separación parcial del “entrainer” en el tope de la columna azeotrópica, con lo cual se disminuye el costo operativo, ya que se usa una nueva mezcla azeotrópica con un punto de ebullición menor a la obtenida por una destilación extractiva.
- c. Existe una amplia gama de entrainers disponibles: Hidrocarburos alifáticos, aromáticos y cíclicos. El requisito principal es la inmiscibilidad con el agua.

Limitaciones:

- a. Cualquier pérdida del modificador en las corrientes acuosas puede crear problemas ambientales.
- b. El proceso es difícil de operar y controlar, ya que las columnas azeotrópicas frecuentemente se comportan erráticamente dentro de ciertos rangos de operación en sus parámetros de control. Estas columnas pueden exhibir múltiples estados estables.
- c. El uso de solventes orgánicos tóxicos o cancerígenos, como “entrainers” genera fuertes restricciones sanitarias.

Destilación extractiva:

Consiste en adicionar un solvente no volátil, de alto punto de ebullición y miscible a una mezcla de alimentación azeotrópica, en una columna de destilación fraccionada, para alterar las volatilidades de los componentes claves sin la formación de un nuevo azeótropo.

Consta de tres columnas de destilación fraccionada. La primera columna es la rectificadora y es similar a la descrita para la destilación azeotrópica. La segunda columna, llamada extractiva, recibe la solución alcohólica rectificada y al solvente, usualmente etilenglicol, en contracorriente. En el tope de la columna, el EA es condensado y obtenido como producto principal.

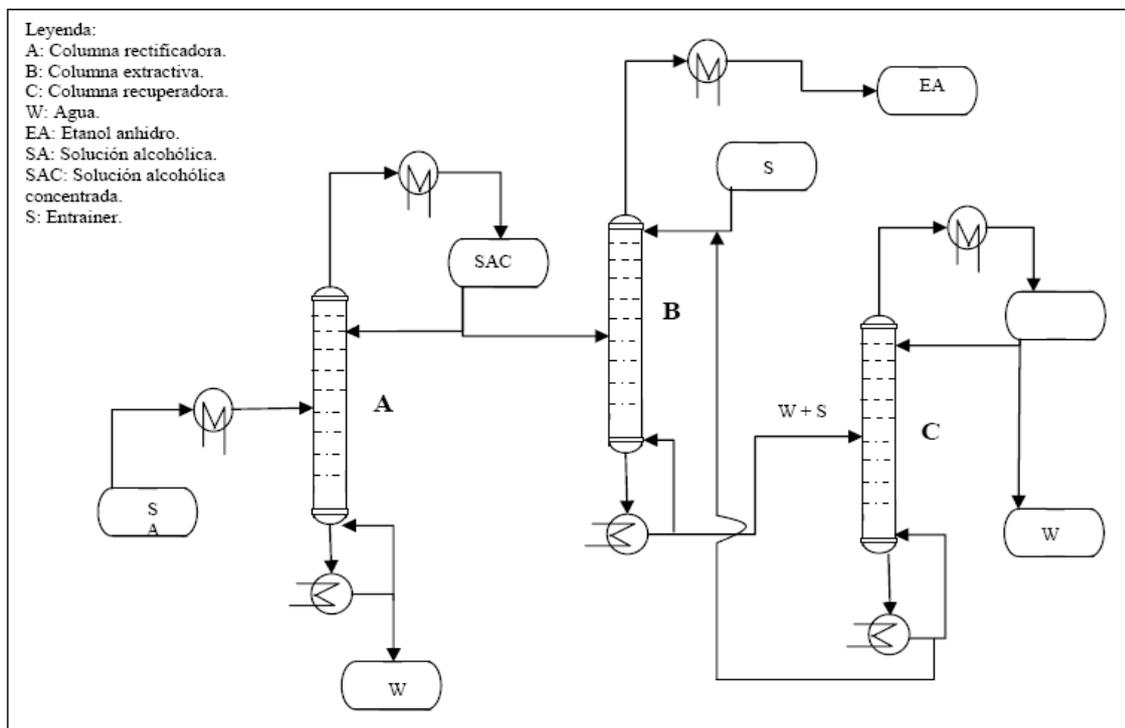
En la región entre la alimentación del solvente y la de la solución, el agua es absorbida por el solvente, que desciende a la base de la columna.

Una corriente de fondo de la columna, constituida de agua y solvente, se alimenta a una tercera columna, llamada recuperadora; donde el agua es separada del solvente como producto de cabeza y es enviada como alimentación de otras etapas del proceso.

El solvente agotado sale de la columna, como producto de fondo y es reciclado a la columna extractiva, junto con la corriente de alimentación. Algunas modificaciones aplicadas a este proceso se basan en un análisis energético del mismo y han sugerido circuitos adicionales para los subproductos, logrando aumentar la eficiencia y el rendimiento del proceso.

La figura III.2 describe el diagrama de flujo de esta operación.

FIG III. 2: Diagrama de flujo de la destilación Extractiva del Etanol.



Ventajas:

- a. Se evita la formación de un ATH, puesto que el solvente interactúa más fuertemente con uno de los componentes de la mezcla que con los demás, permitiendo la separación.
- b. El sistema de recuperación del solvente trabaja independientemente de la operación de la columna extractiva, por ello puede servir a varias columnas extractivas simultáneamente.

c. El solvente no es inflamable en condiciones ambientales, es poco tóxico, no es corrosivo ni cancerígeno. Es biodegradable en bajas concentraciones y puede ser disperso en agua sin causar daños ambientales.

Limitaciones:

a. Es complicada la selección del solvente para una determinada mezcla, ya que hallar un compuesto con una estructura química afín, con una alta solubilidad en la mezcla, con una alta selectividad en la solvencia con respecto al componente clave y otros factores adicionales, limitan el uso de muchos solventes comerciales.

b. La mezcla acuosa del solvente suele tener un alto calor de vaporización, mayor al entrainer acuoso, usado en la destilación azeotrópica, lo cual constituye un mayor consumo de energía para la columna de recuperación.

c. La relación de reflujo del destilado en la columna extractiva puede presentar límites mínimos o máximos, los cuales disminuyen el grado de separación del compuesto clave de la mezcla alimentada y conlleva a establecer un rango fijo para esta relación.

Destilación extractiva salina

Es un proceso análogo a la destilación extractiva, con la diferencia de que el agente es una sal iónica, no volátil y soluble en la mezcla de alimentación.

Una corriente de solución alcohólica rectificada (86% molar de etanol) alimenta a una columna de destilación fraccionada, llamada destiladora salina, donde se mezcla con la sal iónica (acetato de potasio). Se obtiene una solución concentrada de la sal como producto de fondos, la cual es enviada a una etapa de recuperación. Como destilado se obtiene etanol anhidro.

La etapa de recuperación, consta de un secador por atomización, que permite obtener la sal en estado sólido y reciclarla a la columna destiladora salina. La figura III.3 describe el diagrama de flujo de toda esta operación.

Limitaciones

a. Se necesitan nuevos modelos termodinámicos para establecer o predecir el equilibrio de fases involucrado (solución iónica-vapor). Ya que los existentes pierden precisión cuando se consideran sales iónicas en un medio acuoso. Esta limitación conduce a carecer de la información clave para el diseño y simulación de esta operación.

b. Es complicado seleccionar la sal iónica para una mezcla alimentada, ya que la necesidad de realizar pruebas experimentales previas de solubilidad y de determinación de sus propiedades físicas, al estar disueltas en agua o en la mezcla, conlleva a elevar los costos pre-operativos y a necesitar de investigaciones científicas.

c. Existe la posibilidad de aumentar la corrosión interna de los equipos y tuberías del circuito de la solución salina. El uso del acero inoxidable o materiales similares disminuye esta limitación pero aumenta el capital requerido para invertir en esta operación.

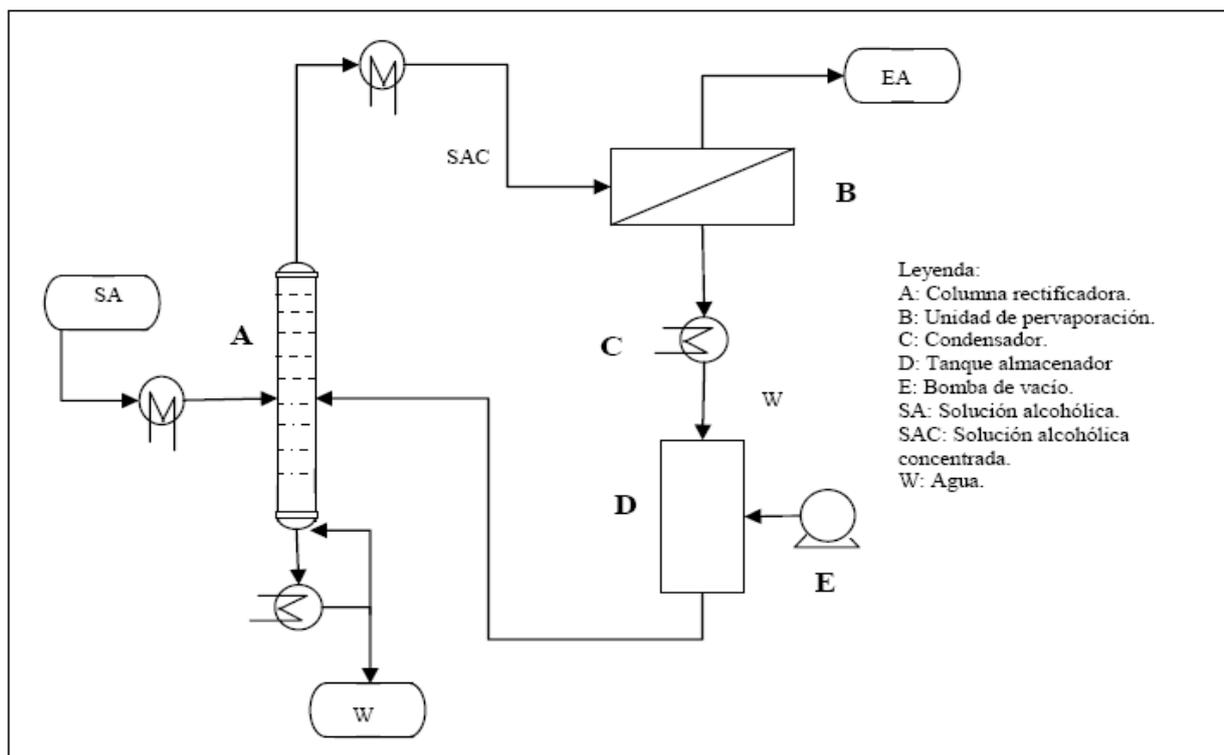
Pervaporación

Es un proceso de separación en el cual una mezcla líquida se pone en contacto con una membrana polimérica permeable microporosa y selectiva. Uno de los componentes de la mezcla es transportado preferentemente a través de la membrana, en estado vapor (permeado), siendo condensado y recuperado. El término pervaporación es una contracción de permeación y evaporación. La permeación es inducida por una disminución de la presión parcial del componente permeable, mediante vacío o por una corriente de un gas inerte. Es sabido, que la pervaporación puede ser usada solamente cuando la selectividad del permeado es muy superior a la detectada en una vaporización ordinaria.

La corriente del tope de una columna rectificadora de la solución alcohólica, considerada en los procesos previos, es enviada a una unidad de pervaporación, donde el permeado (solución alcohólica diluida) es obtenido al reducir la presión del otro lado de la membrana hidrofílica. El EA es deshidratado y obtenido como producto de la unidad. El permeado es condensado y enviado a un tanque almacenador, de donde es reciclado a la columna rectificadora. La generación del vacío para este proceso se realiza después del condensador, ya que se usa una corriente de vapor, en vez de una de líquido, como es usual en otros procesos de pervaporación. Según este caso, se obtiene mejoras en el desempeño de la separación y manejo de los subproductos.

La figura III.4 describe el diagrama de flujo de toda esta operación.

FIG. III. 4: Diagrama de flujo de la Pervaporación del Etanol.



Ventajas

- a.** La selectividad en la separación del EA es alta e independiente del equilibrio de fases termodinámico, restricción física presente en las otras operaciones, lo cual permite variar los parámetros de operación según las necesidades del proceso.

- b.** Mayor ahorro energético que los anteriores procesos, ya que no se necesita de procesos auxiliares para la recuperación del agente de separación.

- c.** Mínimo impacto ambiental, puesto que no usa solventes ni sales orgánicas, y las membranas pueden ser recicladas, después de su tiempo de servicio.

Limitaciones

- a.** Se necesitan membranas de alta selectividad, lo cual eleva el costo de las unidades de pervaporación o conlleva a buscar constantemente nuevos tipos de membranas (14).

- b.** Se necesitan nuevos modelos fenomenológicos para simular y diseñar estas unidades, ya que esta operación está regida por la transferencia de masa y la adsorción, en vez del equilibrio de fases termodinámico, como es el caso de las destilaciones azeotrópica y extractiva (14). Esto restringe las posibilidades de diseñar y simular las unidades a medida de las necesidades del proceso.

- c.** Sus costos operativos son mayores a las demás operaciones, ya que se necesita alcanzar bajas temperaturas para lograr la condensación del permeado y los flujos efluentes de la unidad suelen ser bajos, limitando la producción del EA.

ANEXO IV

PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES A SEGUIR.

El principal efluente que se tiene por la producción de etanol a partir de caña de azúcar es el conocido como vinazas.

Es importante señalar que algunas personas le atribuyen como elemento negativo a la Caña

De Azúcar, la limitante de producir Vinazas como residuo del proceso de Fermentación;

Sustancia que por sus características químicas se constituye en un poluyente con fuerte

Potencial contaminante si no se adoptan las medidas preventivas y correctivas necesarias.

Hay que reconocer sin embargo, que la Vinaza es el resultado del proceso de Fermentación, por lo que su producción no es exclusiva apenas de la Caña; sino que se origina también a partir de otros productos, como lo indica la tabla IV.1 para tres materias específicas.

TABLA IV.1: Producción de efluentes provenientes de la fermentación, en la fabricación de Etanol a partir de tres rutas tecnológicas.

COMPONENTE	UNIDAD	MELAZA	YUCA	SORGO AZUCARERO
pH	---	4,40	3,50	4,50
DBO – 5 Días	g / l	25,8	31,4	46,0
DQO	g / l	48,0	81,1	79,9
Sólidos Totales	g / l	68,0	44,5	34,1
Sólidos Solubles	g / l	57,1	40,4	---
Sólidos Fijos	g / l	48,4	4,1	---
Sólidos en Suspensión	g / l	38,7	---	---
Materia Orgánica	g / l	19,5	37,1	---
Carbohidratos	g / l	8,0	21,1	3,4
Nitrógeno Total	g / l	0,82	0,65	0,8
Fosfatos Totales	g / l	0,48	0,38	0,1
Cenizas	g / l	10,7	10,5	6,1

La composición es muy variable, pero como promedio cada metro cúbico de vinaza aporta: 1,8 kilogramos de Nitrógeno (N_2), 1,5 kilogramos de pentóxido de difósforo (P_2O_5) y 4,5 kilogramos de óxido de potasio (K_2O), por lo que la aplicación de 60 metros cúbicos por hectárea garantiza los nutrientes necesarios para la fertilización de la caña _108 kilogramos por hectárea de (N_2), 30 de (P_2O_5) y 270 de (K_2O). Además, su contenido de materia orgánica es elevado, fluctuando entre 6,5 y 7,5 por ciento.

Ante la decisión de destinar los jugos de caña energética para la producción de bioetanol, es necesario estudiar el efecto del uso de una nueva materia prima en el proceso y dentro de este contexto su impacto en la generación de residuales líquidos (vinazas), su composición, viabilidad técnico – económica en el uso de las alternativas de tratamiento y disposición de las mismas, y en su defecto, la búsqueda de nuevas alternativas de solución. Por lo que, caracterizar estas nuevas vinazas, valorar alternativas de usos, disposición constituye un valioso aporte en el complemento de la información necesaria para el uso de la caña energética como alternativa energética viable en un concepto de gestión medio ambiental e integradora.

Para el propósito de la disposición de los efluentes de la planta de etanol, construida en el municipio de Tlaquepaque se considerarán los siguientes tratamientos:

Aplicación al suelo como fertilizante

De acuerdo con ensayos realizados por científicos, este producto es un excelente acondicionador de terrenos; además recupera las tierras que han perdido sus atributos por acción de las sales y el sodio.

Este nuevo fertilizante contiene una composición nutricional, química y biológica que lo convierten en un desecho con inmenso potencial fertilizante para uso agropecuario. Entre los elementos que posee este compuesto se encuentran el calcio, magnesio, nitrógeno, fósforo y potasio.

De igual manera, el uso de las vinazas le ahorra al agricultor casi un ciento por ciento de sus costos en fertilizantes. Una tonelada de urea cuesta alrededor de 270 mil pesos.

Concentración por evaporación

La evaporación de la vinaza se lleva a cabo por evaporador simple o de doble efecto, en estos equipos la evaporación se hace mediante lotes de agua, los cuales al contacto con sistemas de calentamiento de tipo aceite caliente o bien mediante serpentines conteniendo vapor de agua, se realiza la transferencia de calor, evaporando la vinaza obteniendo vapor de agua enviándolo a la atmósfera, las desventajas en éste tipo de proyecto es que se eliminan el total de los contaminantes a través de la evaporación de la vinaza, enviando el vapor a la atmósfera pero quedando un licor concentrado de azúcares, además para este sistema se requiere vapor de agua procedente de una caldera donde los consumos de vapor generados por la caldera representan cantidades exageradas de consumo de combustible así como grandes cantidades de vapor, o bien resistencias eléctricas para evaporar el caudal de la vinaza generada. Además aplicando este sistema se envía a la atmósfera un vapor como neblina ácida dañando también los equipos de proceso.

Fermentación anaeróbica para la producción de Metano.

- La producción de metano a partir de desechos orgánicos (animales y vegetales) mediante fermentación anaeróbica ha proporcionado una serie de ventajas adicionales a la producción misma del recurso energético conocido como biogás. Entre estas cabe mencionar las siguientes:
- Se ha desarrollado un tipo de reactor, UASB (reactor de flujo ascendente con lechos de lodo), sencillo en su construcción, operación y eficiencia de tratamiento de residuales y producción de biogás.

- Con perturbaciones en la carga aplicada del 25 al 50 % la digestión responde bien y retorna a las condiciones normales de operación en 10-15 días.
- Reduce olores en la utilización de los desechos.
- Evita la contaminación ambiental y la propagación de malos olores.
- Reduce la población de elementos portadores de enfermedades (tales como moscas y otros insectos).
- Deja un residuo sólido inodoro de excelentes características fertilizantes.
- Resulta un tratamiento efectivo, reduciendo en un 75 % la carga contaminante.
- Se obtiene un combustible en forma de biogás, equivalente a 2 790 ton de petróleo al año, con el cual se podría satisfacer del 30 al 45 % de la demanda energética de la destilería.
- Requerimientos de área mínima.
- Bajo o ningún requerimiento de energía.
- Baja producción de lodo.

El biogás tal como se genera es combustible, siendo el metano el que le da las cualidades energéticas.

Humedales:

Los humedales constituyen un procedimiento de tratamiento de efluentes de bajo costo

De instalación y operación, que no altera el medio ambiente y puede construirse en diversos tipos de terrenos. Se basa en reproducir artificialmente el comportamiento de zonas pantanosas, logrando por medios naturales la estabilización de la materia orgánica y la disminución del contenido de algunos compuestos minerales produciendo a su salida, efluentes que pueden ser descargados en cursos de agua. Constructivamente son cubetas de profundidades del orden del metro y de longitud y ancho variables, cuyo fondo y paredes deben estar impermeabilizados para evitar la contaminación de acuíferos. Se rellenan con suelo de porosidad adecuada y en su superficie se implantan vegetales apropiados. Cuentan con un sistema de distribución del efluente, el que ingresa por debajo del nivel del suelo y se distribuye a lo largo del humedal. Estos depuradores naturales son altamente eficientes.

Procesos Anaeróbicos y Aeróbicos:

Son tratamientos biológicos de los efluentes, en los que se reduce su carga orgánica,

Con la intervención de organismos vivos. En el sistema de lagunas se logra una degradación de la materia orgánica con la inoculación de flora microbiana en condiciones naturales. El proceso anaeróbico o conducido en ausencia de aire, es una fermentación propiamente dicha, en donde la materia orgánica se transforma en metano; dióxido de carbono y lodos. El efluente resultante con pH neutro, conserva los nutrientes, pudiendo ser utilizado como abono. En el proceso aeróbico, se produce una oxidación de los compuestos orgánicos.

Se considera oportuno estudiar el comportamiento de las lagunas anaeróbicas y aeróbicas; su viabilidad y rendimiento, con el agregado de líquidos cloacales como inoculante, tal como se hace con los efluentes del Ingenio Marapa.

Comprobada su eficiencia como medio de biodegradación, esta alternativa resulta de gran interés; puede ser adoptada por la mayoría de las fábricas azucareras, pues éstas cuentan con terrenos para construir lagunas, las que demandan una baja inversión de capital.

Como se puede observar, hay diferentes tipos de tratamientos para los efluentes producidos por la planta de producción de etanol. Sin embargo no se cuenta con un tratamiento 100% efectivo ya que cada uno de las alternativas aunque muestra algunas virtudes, también es claro que cada uno de ellos tiene sus respectiva desventajas, por lo que para el caso de la planta en estudio, considerando las características y disponibilidad del terreno, es posible aplicar un tratamiento aerobio o anaerobio que requiere un bajo costo de inversión y mantenimiento además de que proporciona resultados de tratamiento bastante efectivos.