



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO, ECONÓMICO Y
AMBIENTAL PARA LA INSTALACIÓN DE UNA
BIORREFINERÍA EN MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

SISTEMAS – INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

P R E S E N T A:

ANGÉLICA LEÓN MEJÍA

TUTOR:

ING. CELESTINO MONTIEL MALDONADO



2010



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente	Dr. Miguel Ángel Delgadillo Valencia
Secretario	M.I. José Antonio Ortiz Ramírez
Vocal	M.C. Leticia Lozano Ríos
1^{er.} Suplente	M.I. Carlos Villanueva Moreno
2^{do.} Suplente	Ing. Celestino Montiel Maldonado

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química, UNAM. Laboratorio de Simulación y Optimización de Procesos, Edificio E. Ciudad Universitaria 04510. México D.F.

Tutor de tesis:

Ing. Celestino Montiel Maldonado

Sustentante:

Angélica León Mejía

Agradecimientos

A Dios por permitirme lograr todo cuanto tengo y sentirme satisfecha.

Al CONACYT por la ayuda económica que me brindo para realizar la maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de una admirable universidad.

A mi Familia por estar conmigo siempre. A mi Mamá Carmen por ser mi ejemplo a seguir y la persona a la que más amo. A mis hermanos: Cesar, Hugo, Laura, Mauricio, Mariana y Liliana, por su apoyo, consejos, amistad y por ser ejemplos de responsabilidad, honestidad y tenacidad, los adoro hermanos. A mis sobrinos Alexa, Cristian, Leo, Santiago, Jorge, Francisco y Hugo, por brindar alegría y entusiasmo a la Familia y por el amor que difunden, los adoro chamacos. Y no menos importante, a mi más hermoso recuerdo, a mi abuelito Trifon, algún día nos encontraremos.

A mi Jurado, el Ing. Celestino Montiel, M. Carlos Villanueva y M. Leticia Lozano por sus valiosos comentarios para la revisión de esta tesis. Al M. Antonio Ortiz por su apoyo en la revisión de la tesis y por permitirme conocer a una persona con calidez humana y profesional. También al Dr. Miguel Ángel Delgadillo por su apoyo, consejos y conocimientos que me brindo, por ser una persona digna de admirar pero sobre todo por su amistad.

A mis amigos Elías, Rubén, Jorge, Lupita, Chema, David, Fabi, Juan, Cesar, Ana, Iván, Arturo y Pati, por todos los gratos momentos vividos y los que faltan!. En especial a Alma por ser mi confidente, por consentirme y por soportarme todos estos años, mil gracias amiga.

A mis compañeros y amigos de Corrosión del IMP, por los buenos momentos que he vivido durante estos meses. En especial al Ing. Guadarrama por su apoyo y confianza pero sobre todo por su amistad.

Índice

	Página
Resumen	1
Capítulo 1. Generalidades	2
1.1 Introducción	2
1.2 Problemática	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Metas	5
1.4 Hipótesis	5
Capítulo 2. Estudio de factibilidad técnico	6
2.1. Selección de materia prima	6
2.1.1 Bioetanol	7
I. Caña de azúcar	9
II. Biomasa lignocelulósica	11
III. Algas	13
2.1.2 Biodiésel	16
I. Palma Africana	18
II. Canola	19
III. Jatropha curcas L.	20
2.2 Selección de tecnología para la producción de bioetanol	23
2.2.1 Descripción del proceso	24
2.2.2 Simulación del proceso	27
2.3 Selección de tecnología para la producción de biodiésel	31
2.3.1 Descripción del proceso	33
2.3.2 Simulación del proceso	36
2.4 Ubicación de la biorrefinería	43
Capítulo 3. Estudio de factibilidad económico	44

3.1 Dimensionamiento de los equipos de proceso	44
3.2 Estimación económica	47
3.2.1 Método de Guthrie	47
3.2.2 Método de Turton	48
I. Costos capital	48
II. Costos operativos	48
III. Flujos de caja	51
3.3 Análisis de sensibilidad	53
3.4 Alternativa para producir etanol anhidro económicamente factible	55
3.5 Mezcla de combustibles	55
Capítulo 4. Estudio de factibilidad ambiental	57
4.1 Impacto ambiental en la producción de biocombustibles	57
4.2 Residuos generados en la producción de bioetanol y biodiésel	58
4.3 Balance de energía	60
4.3.1 Energía consumida en la producción de biocombustibles	60
4.3.2 Cantidad de energía contenida en el bioenergético	62
4.3.3 Calidad en el uso de biocombustibles	64
Conclusiones y Recomendaciones	66
Anexos	69
Bibliografía	76

Resumen

Se diseñaron y simularon dos procesos continuos para la producción de biocombustibles, empleando el simulador de procesos Aspen HYSYS. El primero de ellos, es el bioetanol a partir de la caña de azúcar con una producción de 98.5 millones de litros al año (1.7 Miles de barriles diarios). El segundo proceso, es el biodiésel a partir de una transesterificación del aceite de palma y metanol en medio básico con una producción de 125 millones de litros al año (2.2 Mbd). Las especificaciones obtenidas de la simulación, muestran que las propiedades del etanol anhidro y biodiésel cumplen con los requerimientos de calidad del estándar ASTM D6751, con excepción de la viscosidad. Sin embargo, en otras propiedades los procesos simulados cumplen con la Norma Europea que es, en general, más exigente en cuanto a requerimiento de calidad que el estándar ASTM. El análisis económico muestra que el proceso del bioetanol no es rentable. Mientras que el proceso de biodiésel presenta un costo de producción de \$5.79 pesos por litro con utilidades de \$0.55 centavos de pesos por litro y una Tasa Interna de Retorno de 146.7%. El análisis de sensibilidad establece que el precio de materia prima es la variable que determina la rentabilidad del proceso, por ello se plantearon diversos escenarios para hacer el proceso del bioetanol rentable. La primera alternativa es producir alcohol anhidro a partir de materia prima con un precio de \$4.37 pesos por litro esto es, que el precio de la materia prima represente no más del 50% del costo total de producción del biocombustible. La segunda iniciativa es la mezcla de combustibles, gasolina-bioetanol. Sin embargo, esta opción no es económica y técnicamente viable, por el alto costo de producción del biocombustible comparado con los oxigenantes utilizados convencionalmente y por cambios en las propiedades de la mezcla. Los beneficios ambientales que tiene el uso de biocombustibles son: reducción en emisiones de partículas causantes del efecto invernadero, no es tóxico y es biodegradable.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

La matriz energética mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles. Según datos de la World Energy, más del 80% del consumo de la energía primaria mundial se basa en energías no renovables y se espera que las necesidades de energía crezcan en forma sostenida en los próximos años. Hacia el 2030 se estima en un 50% el aumento en la demanda de energía con respecto a la actual; el 65% de este aumento en la demanda energética esperada, provendrá de los países en desarrollo donde el crecimiento económico y de la población es mayor [1]. Asimismo, la incertidumbre por la variación en el precio del petróleo, hace que muchos países dependientes de la importación de este recurso estén preocupados por la seguridad en la oferta futura y buscan sustituir la fuerte dependencia de hidrocarburos por recursos renovables y econonómicamente viables.

Otro de los motivos que llevan a promover el uso de energías renovales y limpias es la creciente preocupación y compromiso por preservar el ambiente. Algunos países han lanzado programas para la producción y/o uso de biocombustibles, con miras para abastecer la energía que consumen, volcar sus mercados internos o con planes a la exportación, como el caso de Brasil y Estados Unidos de Norteamérica, que producen el 70% del bioetanol del mundo. Hay otras naciones que han lanzado programas, como el caso de Canadá, Colombia, Perú y Argentina, con el objetivo de diversificar su matriz energética [19].

En este contexto, México posee una escasa diversificación de la oferta energética; el 90% de la energía primaria proviene de los hidrocarburos (9 553.762 Pj), principalmente del petróleo crudo; el resto lo aportan la electricidad primaria (4.6%), la biomasa (3.2%) y el carbón (2.2%) [23]. De acuerdo a estos porcentajes, es evidente que México necesita

diversificar las fuentes primarias de energía para obtener energías renovables que favorezcan el desarrollo tecnológico y económico del país.

Los hidrocarburos y en especial el petróleo, continuará siendo la fuente más importante de suministro de energía primaria en México. Ante este panorama se plantea una acción inmediata para disminuir la fuerte dependencia y cubrir la demanda nacional de hidrocarburos, es decir la producción y uso de energías alternas como son los biocombustibles. Sin embargo la producción, distribución y uso de biocombustibles no pretende la sustitución de combustibles fósiles, sino la combinación de estos, lo que ayudará en México a incrementar la capacidad instalada de refinación y a disminuir la dependencia de algunos derivados del petróleo, ya que por décadas el petróleo ha sido y seguirá siendo uno de los principales rubros de exportación y de generación de ingresos en México.

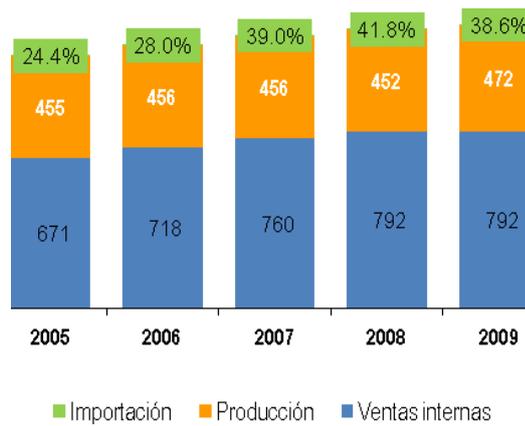
1.2 Problemática

En los últimos quince años, la capacidad instalada de refinación nacional ha permanecido sin cambios y las inversiones que se han realizado, han estado orientadas a la modernización de la infraestructura existente para incrementar el procesamiento de crudo pesado y el mejoramiento de la calidad ambiental de los combustibles. Así mismo, en este período, la producción de destilados (gasolinas y diesel) creció a un ritmo promedio anualizado de 1% mientras que las ventas internas lo hicieron al 3%. Para cubrir el déficit en el abasto de estos energéticos, el país ha recurrido a las importaciones, las cuales tan sólo en los últimos cinco años, han requerido una erogación en divisas cercanas a los 25 mil millones de dólares [35].

Las importaciones de gasolina han ido aumentando considerablemente desde los últimos seis años, en 2004 se importaron 127 mil barriles diarios (Mbd) de gasolina y para el 2008 aumentaron a 340 Mbd, lo que representa el 42% de las ventas internas a nivel nacional, **Fig. 1.1** [33]. Si el escenario continúa desalentador, se estima que un lapso de diez años, la demanda podría llegar a más de 1,100 Mbd, por lo cual las importaciones representaría más del doble del nivel de la producción nacional en 2009, de 472 Mbd [24]. A esto se suma que el costo de gasolina importada, representa casi el 30% del ingreso por exportación de petróleo crudo, lo que significa para la nación un déficit económico, ya que la comercialización de hidrocarburos en el plano internacional es un factor determinante

para la generación de divisas y de importantes contribuciones fiscales para el gobierno federal [33].

Fig. 1.1 Producción, importación y ventas internas de gasolina en México (Miles de barriles diarios, Mbd)



Fuente: Anuario Estadístico, PEMEX 2008 [33]

En lo que respecta al diesel las importaciones, en 2004, aumentaron de 15 Mbd a 53 Mbd en 2008, lo que representa cerca del 15% de las ventas internas [33]. Asimismo, se estima que en los próximos diez años, la gasolina y el diesel serán los combustibles que dominen la demanda de petrolíferos a nivel nacional. Bajo este contexto, las primeras crecerán a un ritmo promedio anualizado de 3 % y el diesel lo hará en 2.7 % [24]. Las cifras anteriores muestran el aumento sustancial de las importaciones de petrolíferos, fundamentalmente gasolinas, lo que representa un factor de riesgo para la soberanía energética del país, ya que no es posible disminuir las adquisiciones de hidrocarburos en el exterior sin poner en riesgo el abasto del mercado nacional; por tanto, es necesario realizar un plan estratégico de inversión para la producción de bioenergéticos que garantice la demanda nacional de combustibles en el futuro.

Otro factor que se suma a la inversión para la producción de los biocombustibles en México, son las altas emisiones de contaminantes del aire debido al uso de combustibles fósiles por los vehículos, lo que repercute negativamente en la salud de los habitantes, además de su impacto de cambio climático global.

1.3 Objetivo

Determinar si es factible producir biocombustibles en México que compitan con el precio y la calidad de la gasolina y el diesel.

1.3.1 Metas

- Establecer la tecnología óptima para la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiésel) en México.
- Plantear la localización de la biorrefinería.
- Proponer la capacidad de una planta productora de biocombustibles.
- Obtener el costo estimado para la instalación de una biorrefinería.
- Realizar un estudio de impacto ambiental para el uso y producción de biocombustibles.

1.4 Hipótesis

En México es viable instalar una biorrefinería, gracias a la diversidad de recursos naturales, condiciones climáticas y geográficas del país, se obtienen diversas materias primas para la producción de biocombustibles, factor que permite optimizar el costo de producción y por tanto, abastecer la demanda nacional de combustibles fósiles, con erogaciones menores a las que generan las importaciones de gasolina y diesel. Además, el uso de estos biocombustibles en el sector transporte contribuye a reducir los contaminantes atmosféricos.

Capítulo 2. Estudio de factibilidad técnico

2.1 Selección de materia prima

Figura 2.1 Mezclas de biocombustibles en Brasil



La materia prima utilizada en el proceso productivo de biocombustibles, adquiere especial relevancias por su incidencia en el costo final de elaboración. Según un informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la materia prima en el caso del bioetanol a partir de la caña de azúcar en Brasil, representa un poco más del 50%

del costo de producción. De igual manera, en el caso del biodiésel el costo del aceite vegetal utilizado, a menudo, representa alrededor del 70% del costo total de producción [1].

La producción mundial de bioetanol en 2008 fue de 70.5 billones de litros, de los cuales Brasil contribuyó con el 32%, Norte y Centro América 45.8%, Europa 9.2%, Asia y África 12.4% y América del Sur 0.6% [14].

La producción de etanol en Brasil ascendió a 5,227 millones de galones en 2007, a partir de la caña de azúcar, principalmente. Otro de los principales productores de etanol es la Unión Europea (UE). La producción de etanol en la UE ha disminuido en los últimos tres años a causa del incremento en los precios de la materia prima [14].

El panorama mundial sobre la producción de biocombustibles para los próximos años dependerá de diversos factores, entre los más importantes se encuentran: la disponibilidad de materias primas baratas, cambios tecnológicos que podrían reducir el costo de biocombustibles, continuidad en políticas públicas y disminución de reservas de petróleo [25].

2.1.1 Bioetanol

El bioetanol es un combustible obtenido a partir fermentación alcohólica de cultivos ricos en sacarosa, almidón o celulosa. Con el fin de reducir su contenido de agua, el etanol es destilado hasta llevarlo al grado de alcohol etílico anhidro. Es un sustituto del metil-terbutil-éter (MTBE) en la oxigenación de las gasolinas. La principal ventaja del bioetanol es que puede ser producido en el país a precios competitivos, para desplazar al MTBE importado [4].

El bioetanol ofrece diversas posibilidades de mezclas (**Figura 2.1**), conocidas con el nombre de "gasohol" o "alconafta", para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

E5: Significa una mezcla del 5% de bioetanol y el 95% de gasolina. Esta es la mezcla habitual y mezcla autorizada en la actualidad por la regulación europea.

E10: Es una mezcla del 10% de bioetanol y el 90% de gasolina. Esta mezcla es la más utilizada en Estados Unidos de Norteamérica, ya que hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación e incluso produce la elevación de octano en la gasolina, mejorando su resultado y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes.

E85: Mezcla de 85% de bioetanol y 15 % de gasolina utilizada en vehículos con motores especiales. En los Estados Unidos de Norteamérica, las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas.

E95 y E100: Mezclas hasta el 95% y 100% de Bioetanol son utilizados en algunos países como Brasil con motores especiales.

Los tres tipos de materia prima que se utilizan para la producción de etanol a gran escala, se enlistan a continuación:

- Sustancias con alto contenido de **sacarosa**
 - caña de azúcar
 - sorgo dulce
- Algas (biotecnología)
- Sustancias con alto contenido de **almidón** (cereales y tubérculos)
 - maíz
 - papa
 - yuca
- Sustancias con alto contenido de **celulosa**
 - madera
 - residuos agrícolas
 - pulpa de papel

En el hemisferio norte se utiliza preferentemente cereales para la producción de bioetanol y el hemisferio sur usa caña de azúcar [15]. En cuanto a porcentajes, en el mundo, más del 60% del etanol deriva de la caña de azúcar, siendo Brasil el mayor productor y un 32% aproximadamente, deriva de cereales [4].

En México, desde hace siglos se cultivan millones de hectáreas de maíz, caña de azúcar, trigo, yuca, remolacha y sorgo, con tecnología de “temporal” y de “riego” (mayoritariamente la primera en una relación de superficie de cuatro a uno). Sin embargo, hace algunas décadas México se convirtió en un importador de millones de toneladas de maíz, trigo y sorgo. Por el contrario, la azúcar de caña la exporta. En el periodo del 2004-2005 el país importó 6 millones de toneladas de maíz, 2.9 de sorgo, 3.7 de trigo, 0.55 de arroz, 3.5 de soya [7].

Por lo anterior, el estudio de factibilidad técnico tomará como materias primas para la producción de bioetanol, las siguientes propuestas:

I. Caña de azúcar

La caña de azúcar es una de las materias primas más atractivas de biomasa. Es una planta tropical y se desarrolla mejor en lugares cálidos y soleados [4].

La producción nacional de caña es de 5,137,700 toneladas y un consumo de 4,782,706 toneladas. Mientras que la producción de caña se realiza en 664 mil hectáreas que abastecen a 58 ingenios de 15 estados cañeros, siendo el Estado de Veracruz la región productora más importante, y contribuye con el 39% de la producción total de azúcar [20].

El principal productor de azúcar es Brasil (19.1%); Estados Unidos ocupa el cuarto lugar (5.2%) y México el sexto (3.8%). El valor generado en la producción de azúcar es por más de 3 mil millones de dólares anuales y el 57% se distribuye entre los 164 mil productores de caña. Esta actividad representa el 11.6% del valor del sector primario y el 2.5 del PIB manufacturero. Genera más de 450 mil empleos directos y beneficios directos a más de 2.2 millones de personas [20].

El etanol puede obtenerse como subproducto de la producción de la caña de azúcar (procesando melaza) o bien, procesando directamente el jugo de la caña (sin producción de azúcar). La composición de la caña de azúcar muestra que es un insumo viable para la producción de etanol y a esto se suma la actividad socio-económica que traería consigo la producción de biocombustibles (**Tabla 2.1**).

Tabla 2.1 Composición de la caña de azúcar

Componentes	Cogollos y	
	Tallos %	hojas %
Azúcares	15.43	2.18
Lignocelulosa	12.21	19.80
Cenizas y otros	1.36	4.02
Agua	71.00	74.00
Total:	100.00	100.00
Materia a Bioetanol	27.64	21.98

Fuente: Estudio de la Secretaría de Energía, 2006 [4]

El proceso más utilizado para producir etanol, en México, es a partir de la caña de azúcar. En este proceso se acostumbra utilizar el bagazo de caña (el residuo de la caña que queda después de ser molida para la extracción del jugo) como combustible para obtener la energía necesaria para la producción de azúcar y la conversión de los azúcares en etanol. El proceso usado en Brasil para la producción de etanol, utiliza directamente el jugo de caña para la producción de azúcar y etanol, pudiendo usar un 60% del jugo de la caña para la producción de azúcar, mientras que el 40% restante se usa para la producción de etanol [4].

En términos económicos, la caña de temporal es mejor alternativa para la producción de etanol, a partir de la caña de azúcar, ya que el costo de producción del cultivo es menor; el rendimiento por peso invertido es 1 a 4.6, como se muestran en la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Costo de producción de materia prima por tecnología utilizada

	Caña de riego. Huastecas y Balsas:	Caña de temporal. Huastecas y Veracruz Centro:
Costo de producción (cultivo) por tonelada de caña	\$ 103.47 pesos	\$ 92.39 pesos
Rendimiento de la caña (toneladas/hectárea)	61	111.50
Rendimiento por peso invertido	\$ 3.79 pesos	\$ 4.60 pesos

Fuente: Estudio de la Secretaria de Energía, 2006 [4]

El costo total estimado de etanol, a partir de la caña de azúcar es de \$4.64 pesos por litro, considerando que el costo de la materia prima es de \$238 pesos por tonelada. Sin embargo, los precios practicados en el mercado Mexicano para la caña de azúcar es de \$335 pesos por tonelada y por tanto, el costo del etanol a partir del jugo directo de caña pasaría a \$6.37 pesos por litro (37% más elevado) [4]. En ese sentido es esencial estudiar como los costos de las materias primas pueden ser reducidos. De hecho, para promover de modo sustentable el etanol combustible en México es imperativo bajar los costos de las materias primas.

De acuerdo a los estudios realizados, el balance de energía para la producción de etanol a partir de la caña de azúcar es positivo, lo que implica que la energía utilizada en el proceso de producción de bioetanol es muy inferior a la energía producida.

II. Biomasa lignocelulósica

La llamada biomasa lignocelulósica incluye: bagazo de caña, madera, pastos de crecimiento rápido, residuos forestales, rastrojo de maíz, aserrín, residuos de papel, entre otros. La biomasa lignocelulósica está formada de polímeros de carbohidratos muy complejos que no tienen un uso como alimento, estos son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Típicamente una tonelada seca de biomasa lignocelulósica está compuesta en peso por un 22% de lignina, 23% de hemicelulosa, y un 50% de celulosa, alcanzando un rendimiento teórico

máximo de 470 litros de etanol. Esta composición varía dependiendo de la materia prima,

Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Composición de diferentes materiales lignocelulósicos

	Peso de material seco (%)		
	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Rastrojo de maíz	28.1	36.5	10.4
Bagazo de caña	20.4	41.3	14.9
Periódico	16	61	21
Residuos sólidos municipales procesados	25	47	12

Fuente: García Bustamante C.A., 2007 [9]

Para la conversión a etanol se requiere un complejo proceso de pretratamiento para transformar los polímeros en azúcares fermentables. Una vez obtenidos los azúcares estos son convertidos en etanol por medio de levaduras o bacterias y posteriormente se concentran soluciones de etanol diluido para producir etanol anhidro.

En los últimos años se han estudiado algunos esquemas que involucran la integración en el proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica, de lo que han resultado muchas mejoras tecnológicas.

En general la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica consta de cinco etapas:

- **pretratamiento de la biomasa**
- **hidrólisis de celulosa y hemicelulosa**
- **fermentación**
- **separación**
- **tratamiento de efluentes**

La tecnología para la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica debe ser madura para mejorar los costos de producción, ya que estos están alrededor de \$4.37 pesos por litro [9].

El proceso de conversión de biomasa celulósica a etanol es sustentable energéticamente sólo en el caso en el que se utilicen los residuos del proceso, por ejemplo, la biomasa no fermentable se utilizaría para producir vapor y electricidad para el proceso, de lo contrario el proceso no sería energéticamente rentable.

III. Algas

Las algas son los organismos ideales para producir etanol u otros biocombustibles ya que constituyen la biomasa más diversa y abundante del planeta (**Tabla 2.4**).

Tabla 2.4 Composición general del alga	
	Contenido (Porcentaje)
Proteínas	55-70
Carbohidratos	15-25
Lípidos	4-47
Minerales	7-13
Humedad	3-7
Fibras	4-7

Fuente: Oilfox, 2008 [37]

Estos organismos utilizan la fotosíntesis como medio para capturar de manera eficiente la energía del sol para convertirla en azúcar intramolecularmente, lo que les proporciona la energía vital para crecer y reproducirse. Las algas duplican su población en cuestión de horas y pueden ser cultivadas en granjas permitiendo la producción de biocombustibles a nivel industrial. En el mundo hay 40 mil variedades de algas, por lo que el primer paso sería investigar cuáles son aptas en el país para la producción de biocombustibles. Sin embargo algunas investigaciones estiman que las algas producen aproximadamente 22712 litros por hectárea, con un costo de producción de \$11 pesos por litro [3].

Las algas pueden crear diez o veinte veces más biomasa por área que las plantas terrestres, y usar agua salada o residual e incluso si crecen en agua potable, utilizarán menos líquido en regiones áridas [3].

La tecnología consiste en la utilización de algas no tóxicas, para producir biocombustibles en un sistema totalmente confinado y por lo mismo seguro. Las algas son organismos unicelulares procariotas y autótrofos que llevan a cabo la fotosíntesis oxigénica y acumula glucógeno (azúcar) como la forma principal de carbono almacenado. La tecnología, optimiza el metabolismo del alga con el fin de lograr fermentación intracelular y crear una nueva vía para la utilización y fijación de carbono que resulta en la síntesis de etanol. El alga prolifera rápidamente y utiliza de manera eficiente la radiación solar, CO₂ y elementos inorgánicos, para la producción de etanol y otros biocombustibles [37].

Los biocombustibles de tercera generación ofrecen las siguientes ventajas:

- Estructura de costos no dependiente de insumos agrícolas
- Balance energético muy positivo
- Extensiones de terreno mucho menores en comparación a las tecnologías tradicionales
- Captura y recicla grandes cantidades de CO₂
- No utiliza agroquímicos ni pesticidas y no modifica la estructura del suelo
- Recicla la totalidad del agua en el proceso

En la **Tabla 2.5**, que se presenta a continuación, los valores reportados muestran que la caña de azúcar presenta ventajas con respecto a la biomasa lignocelulósica y las algas, como el rendimiento (toneladas de caña por hectárea), costo de materia prima y la disponibilidad de la misma, factores que son importantes pues determinan el costo final de producción y por tanto, lo posiciona en el mercado como una alternativa para poder competir como sustituto de la gasolina o aditivo, pero lo más importante lograr abastecer el consumo nacional. Esta propuesta también ayudaría a apoyar al campo Mexicano y a los ingenios azucareros, ya que podrían trabajar de manera conjunta generando importantes ingresos y una mejora tecnológica en la producción de azúcar y etanol.

Tabla 2.5 Tabla de comparación de tres insumos para la producción de bioetanol en México

Materia prima	Caña de azúcar	Biomasa lignocelulósica	Algas
Composición	celulosa 51.23%, hemicelulosa 24.11 % y lignina 20.67%	22% de lignina, 23% de hemicelulosa 50% de celulosa	Carbohidratos: 15-25 % Lípidos: 4-47 %
Disponibilidad de materia prima	58 ingenios azucareros en 15 estados de la República (caña de temporal)	Subproductos de la extracción forestal, industria maderera, azucarera, residuos sólidos municipales procesados, etc	En el mundo existen 40 mil variedades de algas
Balance energético	autosuficiente	autosuficiente (utilizando residuos)	autosuficiente
Costo de etanol por litro (pesos/litro)	Jugo directo de caña 4.64 - 6.37	4.37	11
Rendimiento (toneladas/hectárea)	111.50 (caña de temporal) 61 (caña de riego)	no se reporta	no se reporta
Precio de materia prima (pesos/tonelada)	238 - 357	costo por coleccionar materiales, procesarlos, transportarlos y adecuarlos para la obtención de etanol	no se reporta
Productividad bio-industrial (litros de etanol /tonelada)	138 (jugo más bagazo) 80 (guarapo)	470 litros (teórico máximo)	1,585
Compite con el mercado de alimentos u otras actividades	Compite con la industria azucarera	Compite con los mercados de celulosa y papel, principalmente	no
Subproductos agro-industriales	El bagazo se puede utilizar para cogenerar vapor y electricidad, para el proceso	lignina, la cual es quemada para cogeneración de vapor y electricidad en el proceso	no aplica
Tecnología para producción de etanol	Muy conocida y practicada	Poco conocida y aplicada	Conocida y poco aplicada
Conocimiento agronómico	alto	no aplica	no aplica

2.1.2. Biodiésel

Fig. 2.2 Planta productora de biodiésel



La definición de biodiésel propuesta por las especificaciones **ASTM** (American Society for Testing and Material Standard, asociación internacional de normativa de calidad) lo describe como **ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga** derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales [11].

El biodiésel está constituido principalmente por mezclas de ésteres metílicos, pero también puede contener restos de jabones, glicerina, glicéridos (mono-, di- y triglicéridos), ácidos grasos libres, restos de catalizadores y agua. La presencia de estos compuestos minoritarios en mayor o menor medida determina la calidad del biodiésel. El biodiésel sustituye como combustible limpio y renovable al diesel derivado del petróleo, y lo hace con ventaja ecológica ya que reduce las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero. Es la mejor opción para sustituir el diesel porque no se necesita ninguna modificación al motor diesel y tienen un alto contenido energético. Además de que no contienen azufre [11].

Actualmente, la Unión Europea es el líder mundial de la industria de biodiésel (**Figura 2.2**). La producción en 2007 fue de 6,719 millones de litros, lo que representó un aumento del 15% respecto al 2006, y se prevé llegue a 9,463 millones de litros en 2017. Se estima que en el Mundo el comercio de biodiésel se duplicará en la próxima década, impulsado principalmente por la fuerte demanda de la Unión Europea [8].

El biodiésel ofrece diversas posibilidades de mezclas para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

B20: Es una mezcla del 20% de Biodiésel y el 80% de diesel. El B20 es la mezcla de biocombustible de biodiésel mas comercializada en Estados Unidos y en otros países.

B100: Biodiésel al 100%, sin mezcla alguna con diesel normal. Es un producto 100% ecológico con altas reducciones de emisiones nocivas a la atmósfera.

El biodiésel puede elaborarse a partir de una amplia variedad de materias primas, más de 350 especies de plantas oleaginosas y miles de subespecies que incluyen aceite de maíz, semilla de algodón, aceite de ricino, aceite de coco, además del aceite usado para cocinar, este puede ser el sobrante de los restaurantes y grasas animales [6]. Sin embargo, cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse, aceites de fritura usado, sebo de vaca, grasa de pollo y de pescado, etc.

A continuación se enlistan las principales materias primas para la elaboración de biodiésel:

- Aceites vegetales convencionales
 - Aceite de girasol
 - Aceite de colza
 - Aceite de soja
 - Aceite de coco
- Grasas animales
 - Sebo de vaca
 - Grasa de pollo
 - Grasa de pescado
 - Manteca de cerdo
- Otros
 - Azafrán
 - Semilla de algodón
 - Aceite de frituras usado

Las materias primas usadas, convencionalmente, en la producción de biodiésel son los aceites de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos), el coco (Filipinas), la palma (Malasia e Indonesia) y la soya (México) [16].

Algunas investigaciones señalan que la producción de biodiésel, en gran parte del mundo, a partir de aceites extraídos de plantas oleaginosas es factible, principalmente de plantas como la palma, girasol y soya [11].

En cuanto a las grasas animales, como materia prima para la producción de biocombustibles, la mayoría de estas grasas contienen altos niveles de ácidos grasos saturados, que a temperatura ambiente generalmente son semisólidos o sólidos, lo que dificulta su manejo y utilización, además de que poseen una mayor cantidad de ácidos grasos libres (AGL) en comparación a los aceites vegetales [4].

Por lo anterior, se proponen las siguientes materias primas para la producción de biodiésel en México:

I. Palma africana

La producción de ***palma aceitera o africana*** es una planta del trópico húmedo, que requiere de suelos profundos y bien drenados.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) informó que en México existe, aproximadamente 2.5 millones de hectáreas con buen potencial para el cultivo de palma aceitera, localizadas en los estados de Chiapas, Campeche, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Veracruz. En el 2004, se encontraron bajo cultivo 36,374 hectáreas, en los estados de Chiapas, Veracruz, Campeche y Tabasco, de las cuales 30,603 son de temporal, destacando los rendimientos de Chiapas, con un poco más de 18 toneladas de racimos frescos por hectárea y un precio medio rural de \$628 pesos por tonelada de fruta fresca [4].

En México la Secretaría de Energía, realizó un análisis económico para la producción de biodiésel a partir de la palma aceitera el cual reportó los siguientes resultados [4]:

- La vida útil económica de la palma africana es de 23 años, con 21 años de producción que se inicia a los 3 años de plantada. La producción acumulada en su vida útil alcanza 433 toneladas por hectárea, con un promedio de 20.64 toneladas de cosecha por año. El valor, de este volumen de cosecha es \$271,924 pesos por hectárea.

- Una tonelada de aceite más 150 kilos de etanol, producen 1,050 kilos de biodiésel más 100 kilos de glicerina. Considerando solo los productos principales, tenemos que, una tonelada de aceite se produce 1,167 litros de biodiésel. El costo primo del racimo de palma por litro de Biodiésel es de \$1.18 pesos.

Otro estudio muestra que el costo de producción de biodiésel a partir de la palma, oscila entre los \$5.8 a \$6.1 pesos por litro [2]

El comercio mundial de la palma aceitera es atractivo, ya que es utilizado en diversos países para la producción de margarina, grasas para cocinar, productos alimentarios, jabones, velas, cosméticos, lubricantes, así como grasas para alimentos, helados, mayonesa, repostería, detergentes, además del biodiésel [2].

El cultivo de la palma aceitera compite ventajosamente con muchos otros cultivos establecidos en las zonas potenciales del país entre estos factores, se encuentra: el rendimiento (25 tonelada por hectárea), productividad industrial y costo de materia prima, principalmente.

II. Canola (*Brassica napus* L)

La **canola** es una variedad de colza desarrollada en Canadá apta para consumo humano y una de las fuentes de aceite vegetal más importantes del mundo. Es una planta anual o bianual de flores amarillas, adaptada a climas fríos.

En México los estados productores de colza reportados en el periodo 2004-5 son: Tamaulipas, Jalisco y Tlaxcala. En tanto, para el año 2005 el estado de Guanajuato se incorporó a la producción. En este periodo se cosecharon en México 1,228 hectáreas de colza, de las cuales 837 fueron de temporal y 371 de riego. Su rendimiento medio fue de: en riego 2,126 kilos por hectárea y de temporal 1,537 kilos por hectárea. El precio medio rural fue de \$3,489.00 pesos por tonelada [23].

En el mundo, los principales países productores de colza son: Canadá, Australia, China, India, Alemania y Francia [8].

La composición de la semilla de Colza contiene entre 380 y 400 kilos de aceite y entre 180 y 200 kilos de proteína por tonelada y al procesarla por el método de presión, no de solventes, se obtienen 369 kilos de aceite crudo y aproximadamente 500 kilos de torta o pasta con 200 kilos de proteína. Los 369 kilos de aceite al esterificarse con etanol, producirán 387 kilos de biodiésel, es decir aproximadamente 460 litros. Así, los productos principales de la transformación de una tonelada de semilla, serían: 460 litros de biodiésel y 500 kilos de torta o pasta con 40% de proteína.

El costo de producción reportado por la Secretaria de Energía, para el cultivo de colza en la zona de Cortazar, Guanajuato (durante el ciclo otoño-invierno) es de \$5,700 pesos por hectárea con financiamiento y maquinaria propios. El rendimiento recuperado es de 1,600 kilos por hectárea y el precio del producto de \$3200 pesos por tonelada. La ventaja de la colza es que necesita poca demanda de agua para lograrse.

III. *Jatropha Curcas L*

La ***Jatropha Curcas L***, ***Piñón o Piñoncillo***, es una planta oleaginosa, de cuya semilla se obtiene una almendra que contiene entre 35 a un 60% de aceite, además de contener cantidades importantes de proteínas (25-30%), con la cual se puede elaborar alimentos balanceados para animales. Es una planta muy resistente y de fácil adaptación en tierras marginales de baja fertilidad y arenosas, prácticamente puede adaptarse a cualquier suelo, usada para combatir la desertificación y rehabilitar tierras degradadas.

La planta empieza a producir desde el primer año, aunque con rendimientos moderados y éstos se incrementan durante los primeros cinco años y luego se estabilizan, con vida útil que puede alcanzar hasta 50 años [4]. Es un cultivo perenne que fructifica desde el primer año, poco susceptible a plagas y enfermedades y de fácil manejo. Su principal dificultad es que el fruto madura en forma escalonada, esto obliga a una recolección manual lo que implicaría dificultades logísticas y costos elevados.

La *Jatropha* se conoce en la Península de Yucatán como “Sikil-Te” y se distribuye en Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Guerrero, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tamaulipas, Sinaloa y Sonora. Es originaria de Centroamérica, y su cultivo se realiza actualmente en Brasil, Nicaragua, Colombia, México, India y Egipto [37].

Existen dos tipos diferentes de semillas de *Jatropha Curcas*, la tóxica y la no toxica, México es el único país que produce la no toxica. La toxicidad se le da un componente llamado éster de Phorbol, mismo que podría ser utilizado en la fabricación de bioinsecticidas.

La empresa Vecenergy Bida se propone instalar una planta productora de biodiésel, en México, con capacidad de 30,000 toneladas por año, lo que representa aproximadamente 83,000 litros de biocombustible diarios., los cuales mezclados con el biodiésel tradicional, permitirán la alimentación de alrededor de 25,00 unidades automotrices. Este y otros proyectos se resumen en la **Tabla 2.6**.

Tabla 2. 6 Características agronómicas de la jatropha

Nombre común y científico	Contenido de aceite	Rendimiento (kg/ha)	Litros de biodiésel por hectárea	Litros de aceite por hectárea	Fuente
Piñon <i>Jatropha Curcas</i>	24-34%	1,590	no se reporta	no se reporta	[2]
	55-60%	no se reporta	2,766 litros/tonelada	no se reporta	[37]
	no se reporta	90,000	39,030	31.41 tonelada/hectárea	[4]

En la **Tabla 2,7**, que se presenta a continuación, se presentan tres insumos para la producción de biodiésel. El aceite de palma es la mejor alternativa ya que presenta el menor costo de materia prima, mayor disponibilidad y mejor rendimiento, factores importantes para que el costo de producción sea viable y pueda ser comercializado en el mercado y colocarse competitivamente con el diesel producido a partir del crudo.

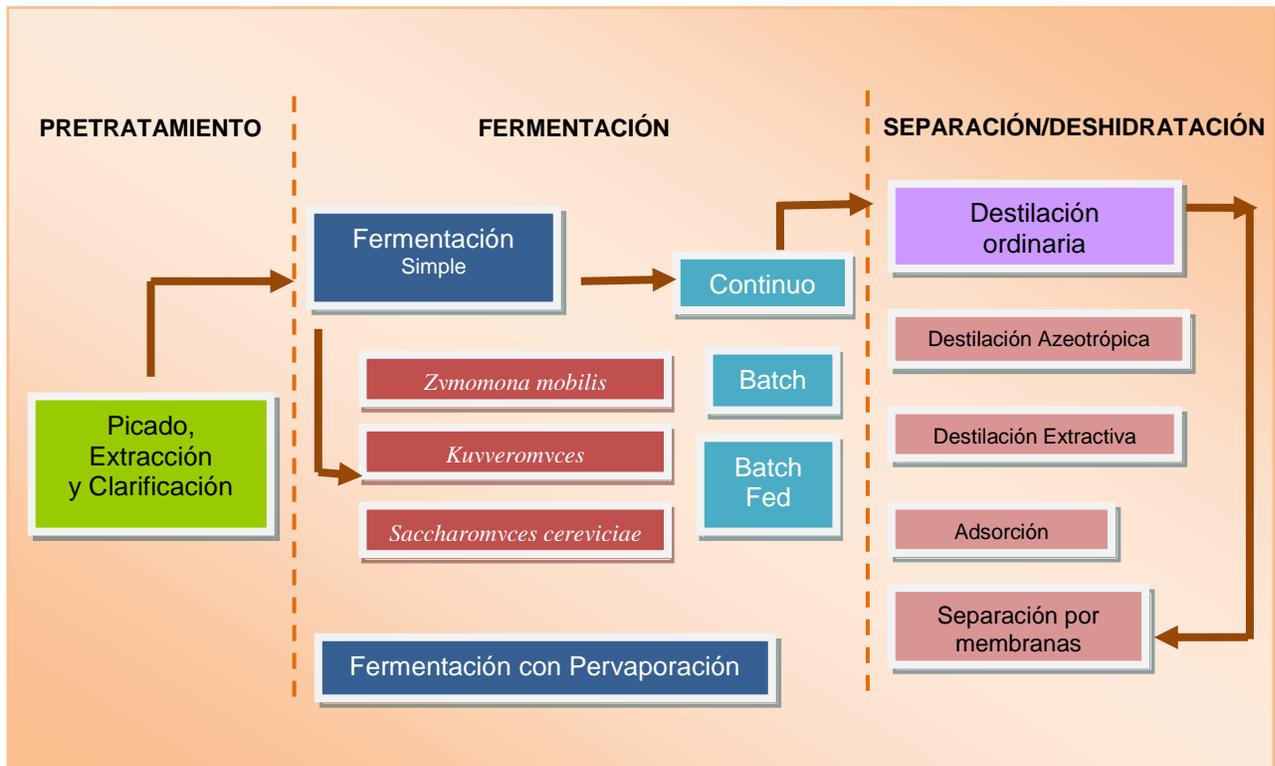
Tabla 2.7 Tabla de comparación de tres insumos para la producción de biodiésel en México

Materia prima	Aceite de palma	Aceite de canola	Jatropha
Composición (porcentaje del contenido de aceite)	45-55% (Perú) 20% (Argentina) 22% (México)	40 % (Perú) 44% (Argentina) 38-40% (México)	24-34% (Perú) 40-55% (Argentina) 35-60% (México)
Disponibilidad de materia prima	36,374 hectáreas en 2004 2.5 millones de hectáreas en 8 estados de la republica	1,228 hectáreas en los estados de Tamaulipas, Jalisco, Tlaxcala y Guanajuato	Se esta iniciando con el cultivo
Balance energético	autosuficiente	autosuficiente	autosuficiente
Costo por litro de biodiésel (pesos / litro)	5.8 - 6.1 (Perú)	5.08 (México)	No se reporta
Rendimiento (tonelada/ha)	5 (Perú) 25 (Argentina) 14.8 (México)	0.7-1.5 (Perú) 2.0 (Argentina) 1.6 -2.3 (México)	1.59 (Perú) 1.4 a 2.5 (Argentina) 2 (México)
Precio de materia prima (pesos / tonelada)	487 a 627 (México)	3,489 (México)	1,660 (México)
Productividad industrial (litros aceite / hectárea)	5,950 (Argentina)	946 (Argentina) 369 kg de aceite por hectárea (México)	1,505 (Argentina)
Productividad bio-industrial (litros de biodiésel / hectárea)	5,712 (Argentina)	908 (Argentina) 460 (México)	1419 - 1,445 (Argentina) 2,766 (México)
Subproductos agro-industrial	margarina, grasas para cocinar, productos alimentarios, jabones, velas, cosméticos, lubricantes, repostería, detergentes	diversos productos alimentarios, lubricantes, jabones, además del biodiésel	alimento para animales, jabón, velas, bioinsecticidas
Tecnología para producción de biodiésel	Muy conocida	Muy conocida	Poco conocida

2.2. Selección de tecnología para la producción de bioetanol

La producción de etanol anhidro en las destilerías en México, es bastante reciente y limitada; surge después de la investigación desarrollada por el Instituto Mexicano del Petróleo. Las experiencias en la producción de alcohol anhidro en México, es escasa y la tecnología de producción tradicional, puede considerarse con grandes atrasos tecnológicos. Por ello, en este estudio se propone la tecnología de **deshidratación del alcohol por medio de membranas**, elegida por los altos rendimientos, bajos requerimientos energéticos y además del bajo costo. Y como materia prima la caña de azúcar, resultado del análisis presentado al inicio del capítulo, por su alto rendimiento y simplicidad en el proceso para obtención de soluciones dulces fermentables, principalmente, **Figura 2.3**.

Figura 2.3 Alternativas tecnológicas para la producción de etanol



2.2.1. Descripción del proceso

La producción de etanol combustible puede ser descrito en cinco etapas: pretratamiento de la materia prima, hidrólisis, fermentación, destilación y deshidratación del etanol, y tratamiento de aguas residuales.

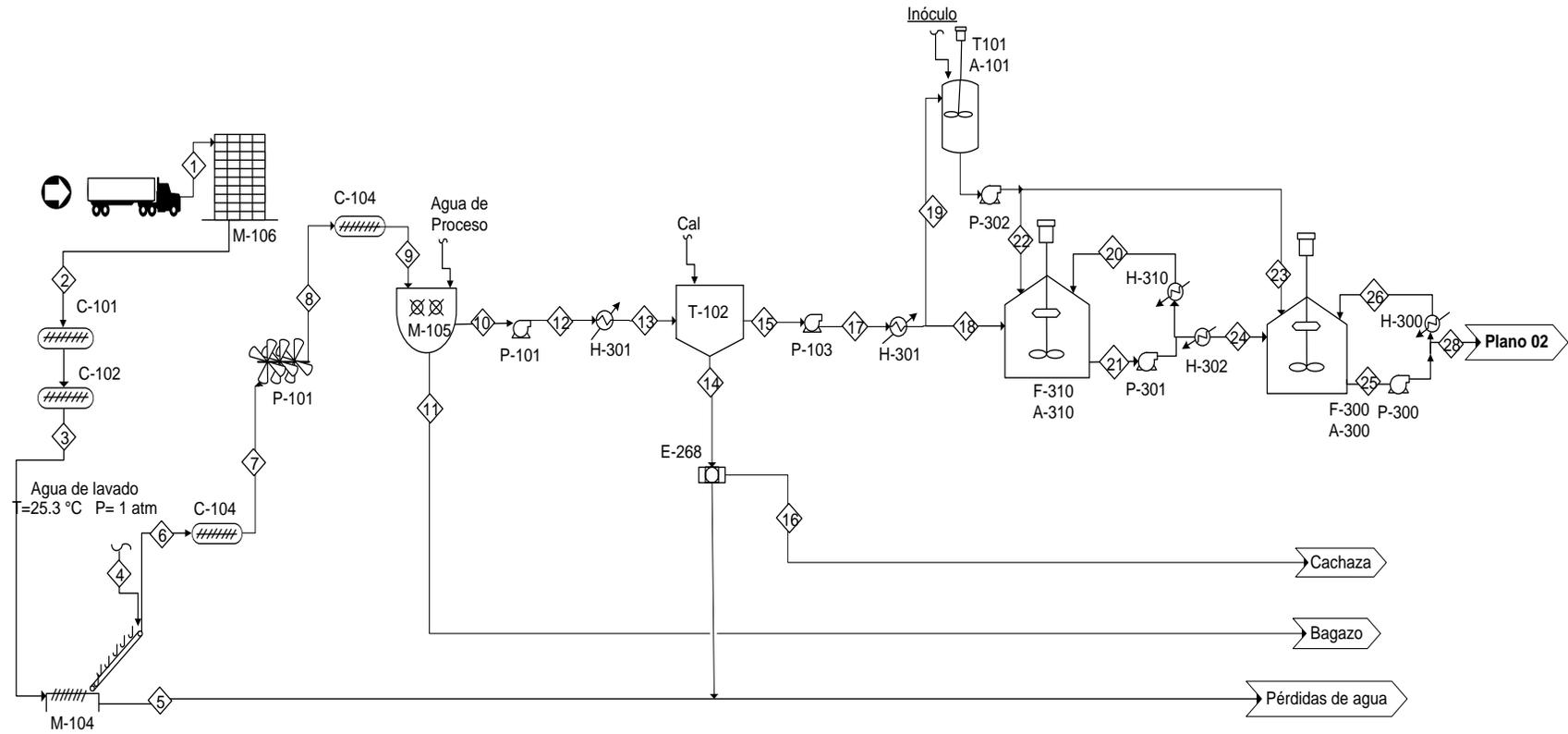
El **pretratamiento** consiste en el acondicionamiento de la materia prima y su hidrólisis. Para el material con un alto contenido de azúcares las tecnologías aplicadas son la extracción y clarificación del jugo cuando se parte de la biomasa sin procesar, **Figura 2.4**.

En la **molienda**, la caña es desmenuzada con cuchillas rotatorias y una desfibradora antes de molerla para facilitar la extracción del jugo que se hace pasándola en serie, entre los cilindros, o mazas de seis molinos. Se utiliza agua en contracorriente para ayudar a la extracción que llega a 94 ó 95% del azúcar contenida en la caña. El remanente queda en el bagazo residual puede ser utilizado como combustible en las calderas, o bien como materia prima para la obtención de etanol.

La **clarificación** consiste en calentar el jugo y decantarlo. La decantación se lleva a cabo en clarificadores en los cuales las impurezas, en forma de barro, van al fondo y el jugo clarificado se extrae por la parte superior. El barro o cachaza, contiene todavía azúcar por lo que requiere ser pasado por filtros rotativos al vacío de los cuales se recupera una cantidad de jugo, que retorna al proceso y se retira una torta de cachaza.

La **fermentación alcohólica** (denominada también como fermentación del etanol o incluso fermentación etílica) es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de aire (O_2), originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidrocarburos (azúcares como glucosa, fructosa, sacarosa y el almidón, entre otros) para obtener como productos finales alcohol en forma de etanol (CH_3-CH_2-OH), dióxido de carbono (CO_2) en forma de gas y moléculas de ATP (trifosfato de adenosina) que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico.

Figura 2.4 Tratamiento de la caña de azúcar para la producción de etanol



La fermentación alcohólica tiene como finalidad biológica proporcionar energía anaeróbica a los microorganismos unicelulares (levaduras) en ausencia de oxígeno, para ello disocian las moléculas de glucosa y obtienen la energía necesaria para sobrevivir, produciendo el alcohol y CO₂ como desecho, consecuencia de la fermentación. Las levaduras y bacterias causantes de este fenómeno son microorganismos que viven en ambientes completamente carentes de oxígeno.

Se puede decir que el 96% de la producción de etanol la llevan a cabo diferentes especies de levaduras, entre las que se encuentran principalmente *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces marxianus* y *Zymomonas mobilis*. Sin embargo, es la bacteria anaeróbica **Z. mobilis** la que presenta más ventajas, respecto a las anteriormente mencionadas, ya que es capaz de producir mayor cantidad de etanol.

Destilación y deshidratación, la fermentación produce una solución diluida de etanol en agua de menos 10% en peso de etanol, buscando obtener una concentración más elevada. La separación del etanol del vino se procesa en columnas de destilación que progresivamente concentran la solución alcohólica, hasta el estado azeotrópico (aproximadamente 95,6% en peso de etanol). Un subproducto importante de la destilación es la vinaza, un efluente con alto contenido de potasa que puede ser usado como abono, producido a razón de cerca de 10 a 16 litros por litro de etanol producido.

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 al ser mezclado a la gasolina debe contener menos que 0.5% en peso de agua. En ese caso no es posible utilizar procesos clásicos de destilación, siendo necesario emplear otras tecnologías no convencionales, como la deshidratación por membranas, para obtener la mayor cantidad de etanol anhidro.

2.2.2. Simulación del proceso

La capacidad de producción se estableció para cubrir parte del volumen de ventas en la zona metropolitana del país, con una producción anual de 98.5 millones de litros de etanol anhidro al año.

Para la simulación, se considero la composición de la corriente a la salida del fermentador. En la **Tabla 2.8** se muestra la composición de la corriente con la que se trabajó en la simulación. Dicha composición se obtuvo a partir de la composición reportada por Kafarov et. al. para producir etanol anhidro a partir de la caña de azúcar.

Los compuestos que participan en este proceso se encontraron en la librería de componentes de HYSYS.

El modelo termodinámico elegido para la fase líquida fue el modelo de actividad NRTL (nonrandom two liquids), ya que se tienen compuestos altamente polares. Para la fase vapor se empleó la ecuación de Peng-Robinson.

Tabla 2.8 Composición a la salida del fermentador para la producción de bioetanol

CORRIENTE DE SALIDA DEL FERMENTADOR		
		FERMENTADOS
Fracción vapor		0.0277
Temperatura	°C	21
Presión	kPa	101.33
Flujo molar	Kmol/h	5980.2
Flujo másico	Kg/h	1,1641e+05
		Fracción mol
Etanol		0.0269
H ₂ O		0.9464
CO ₂		0.0266
AceticAcid		3e-06
Glicerol		7e-6

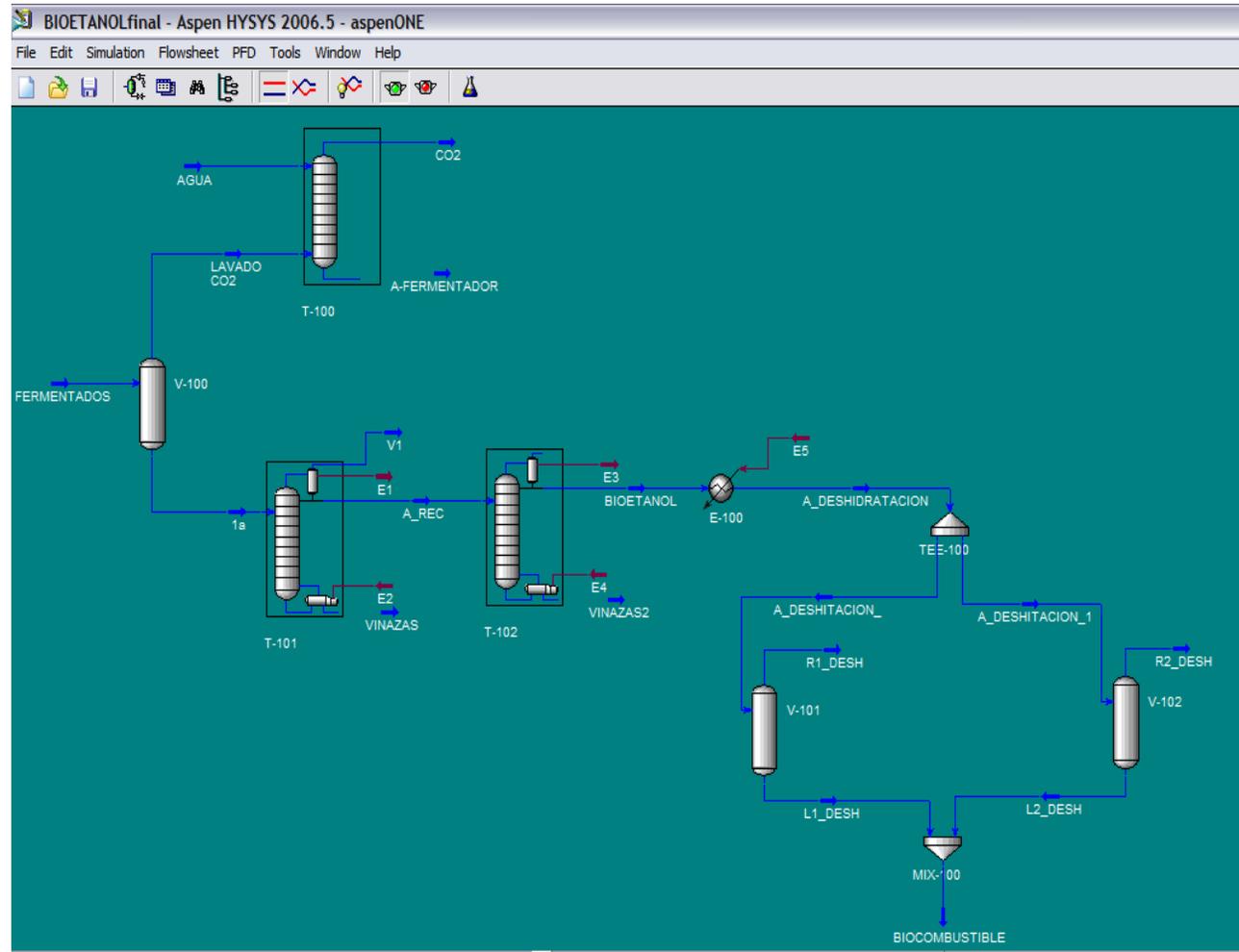
El etanol obtenido a la salida del rectificador, aún contenía gran cantidad de agua, por lo que fue necesaria la etapa de deshidratación, para asegurar que el etano anhidro obtenido cumpla con las especificaciones que establecen las normas para su comercialización. En la **Tabla 2.9** se establecen las condiciones a las que se encuentra el etanol anhidro a la salida del sistema de deshidratación.

Tabla 2.9 Propiedades del bioetanol obtenido de la simulación

		SALIDA DEL RECTIFICADOR	SALIDA DE LA SECCIÓN DE DESHIDRATACIÓN
		BIOETANOL	ETANOL ANHIDRO
Fracción vapor		0	0
Temperatura	C	67.55	78.00
Presión	kPa	100	101
Flujo molar	Kmol/h	204.6	197.6
FRACCIÓN MOL			
BIOETANOL		0.896	0.958
H ₂ O		0.101	0.041

La **Figura 2.7** muestra el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la deshidratación del etanol anhidro. Los productos de la fermentación son separados; el CO₂ obtenido en esta etapa es llevado a una columna de absorción (T-100) en la cual es removido. El etanol obtenido de la fermentación es llevado a etapas de destilación (T-101) y rectificación (T-102) en las cuales se concentra hasta alcanzar el punto azeotrópico (96%v) y abandona la torre por la parte superior, como vapor saturado, para entrar a la sección de deshidratación en donde se obtiene el etanol anhidro con menos del 0.5% en peso de agua.

Fig. 2.7 Simulación de un proceso continuo para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar



Las especificaciones del bioetanol obtenido en la simulación del proceso se muestran en la **Tabla 2.10**. El balance de materia del proceso de detalla en el **Anexo A**.

Tabla 2.10 Especificaciones del bioetanol obtenido en la simulación comparado con normas internacionales

Propiedad	Unidad	Valor obtenido	Límites		Estándar/norma
			Mínimo	Máximo	
Contenido de etanol	%vol	95.8	92.1		ASTM D-6730
Contenido de agua	%vol	<0.5	0.5	1.0	ASTM E-203
Contenido de metanol	%vol	<0.01		0.5	ASTM D-5501
Acidez (como ácido acético)	% masa	0		0.007	ASTM D-664

Como se muestra en la tabla, las propiedades del bioetanol anhidro obtenido de la simulación cumple con los requerimientos de calidad del estándar ASTM.

Las propiedades del bioetanol dependen tanto del proceso como de la naturaleza de la materia prima lo que proporcionará características particulares al combustible alterno. A continuación se describen de manera general algunas de las propiedades más importantes que determinan la calidad del bioetanol obtenido.

Contenido de etanol (% v/v): Es el índice más importante, permite conocer el contenido de impurezas (metanol, y otros alcoholes como el amílico o el iso- amílico) que disminuyen y/o distorsionan el índice de octano en las mezclas con gasolina.

Contenido de metanol, % v/v: El contenido máximo de metanol está limitado por constituir un contaminante inaceptable. El metanol incrementa la presión de vapores de las mezclas con etanol, es menos tolerante al agua y puede ser muy agresivo a ciertos metales y materiales elastoméricos que conforman el sistema de combustible de los vehículos.

Contenido de agua, % v/v: Las mezclas de etanol y gasolina, tienen un límite de solubilidad en presencia del agua. Esta solubilidad está influenciada, entre otros, por el contenido de etanol, la temperatura y el contenido de hidrocarburos aromáticos de la gasolina.

2.3. Selección de tecnología para la producción de biodiésel

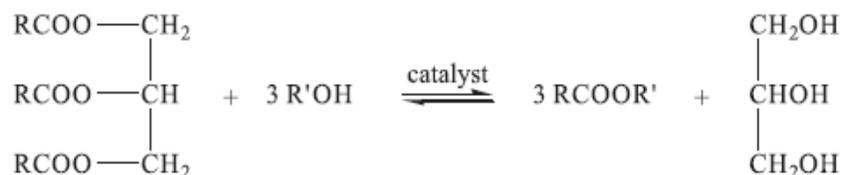
Existen diversas tecnologías para la producción de biodiésel como: transesterificación sin catalizador con metanol supercrítico o con co-solvente, craqueamiento térmico o pirólisis de las grasas, tecnologías biomasa a líquido o termoquímicos, entre otras. Sin embargo la transesterificación es el proceso más simple, conocido y económicamente viable. En la **Tabla 2.11** se muestra las ventajas y desventajas que presenta la producción de biodiésel de acuerdo al proceso seleccionado.

Tabla 2.11 Comparación de diferentes procesos para la producción de biodiésel

Método	Transesterificación alcalina	Esterificación acida y transesterificación alcalina	Transesterificación alcalina con etanol
Alcohol	Metanol	Metanol	Etanol
Catalizador	NaOH, KOH o metilato de sodio	H ₂ SO ₄ y NaOH, KOH o metilato de sodio	NaOH, KOH o metilato de sodio
Razón molar Alcohol : aceite	6:1	30-50:1 (esteric.) 6:1 (transesterific.)	9:1-12:1
Temperatura (°C)	50-80	50-80	30-70
Presión (bar)	1	1	1
Tiempo de reacción (min)	160-20	60+60	60
Sensibilidad a presencia de agua	Si	Si	Alta
Sensibilidad a AGL	Si	No	Si
Pretratamiento requerido	Neutralizar aceite	Esterificación ácida es pretratamiento	Neutralizado y secado de aceite
Remoción de catalizador	Neutralizado y lavado con agua	Neutralizado y lavado con agua	Neutralizado y lavado con agua
Remoción de jabones	Lavado con agua	Lavado con agua	Lavado con agua
Rendimiento en biodiésel	96%	97%	95%
Calidad de glicerol	Baja	Baja	Baja
Efluentes	Alcalinos, jabonosos	Ácidos, alcalinos y jabonosos	Alcalinos, jabonosos

Fuente: Castro Paula, 2007 [2]

La transesterificación se lleva a cabo la *reacción reversible* entre un aceite o grasa y un alcohol en un medio catalizado, para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol o glicerina. La reacción química que ocurre es:



En la práctica se necesita más de 3 alcoholes por cada triglicérido para desplazar el equilibrio al lado de los productos y de un catalizador para acelerar la reacción. Si no se usa exceso de alcohol, el producto obtenido no será biodiésel puro: consistirá en una mezcla de biodiésel, triglicéridos sin reaccionar, y productos intermedios como los monoglicéridos y diglicéridos. Estas impurezas pueden afectar las características del combustible, de manera que no cumpla con las normas técnicas de calidad.

En la mayoría de los procesos de producción de biodiésel se usa un catalizador para la reacción de transesterificación. La transesterificación alcalina es el proceso más conocido, simple y utilizado para fabricar biodiésel. En la **Tabla 2.14**, se muestran las ventajas que presenta la catálisis básica con respecto a otros métodos. Algunos autores recomiendan la catálisis ácida para aceites con alto contenido en ácidos grasos libres, sin embargo este método presenta algunas desventajas como: la cantidad de alcohol, se requieren treinta moles de alcohol por cada mol de triglicérido (razón molar de 30:1 hasta 50:1), mientras que la catálisis básica solo necesita una razón molar de 6:1 [31]. Otra desventaja que presenta la catálisis ácida es el uso de ácido sulfúrico: este insumo, por su alta corrosividad, requiere de tanques con materiales costosos (acero inoxidable de muy alta calidad), y además su utilización produce efluentes ácidos contaminantes. Es por esto, que la esterificación ácida se justifica sólo si las materias primas a utilizar tienen un alto contenido de ácidos grasos libres a pesar de procesos adicionales de pretratamiento que pueda darse a la materia prima, para producir biodiésel que cumpla las normas técnicas de calidad.

2.3.1 Descripción del proceso

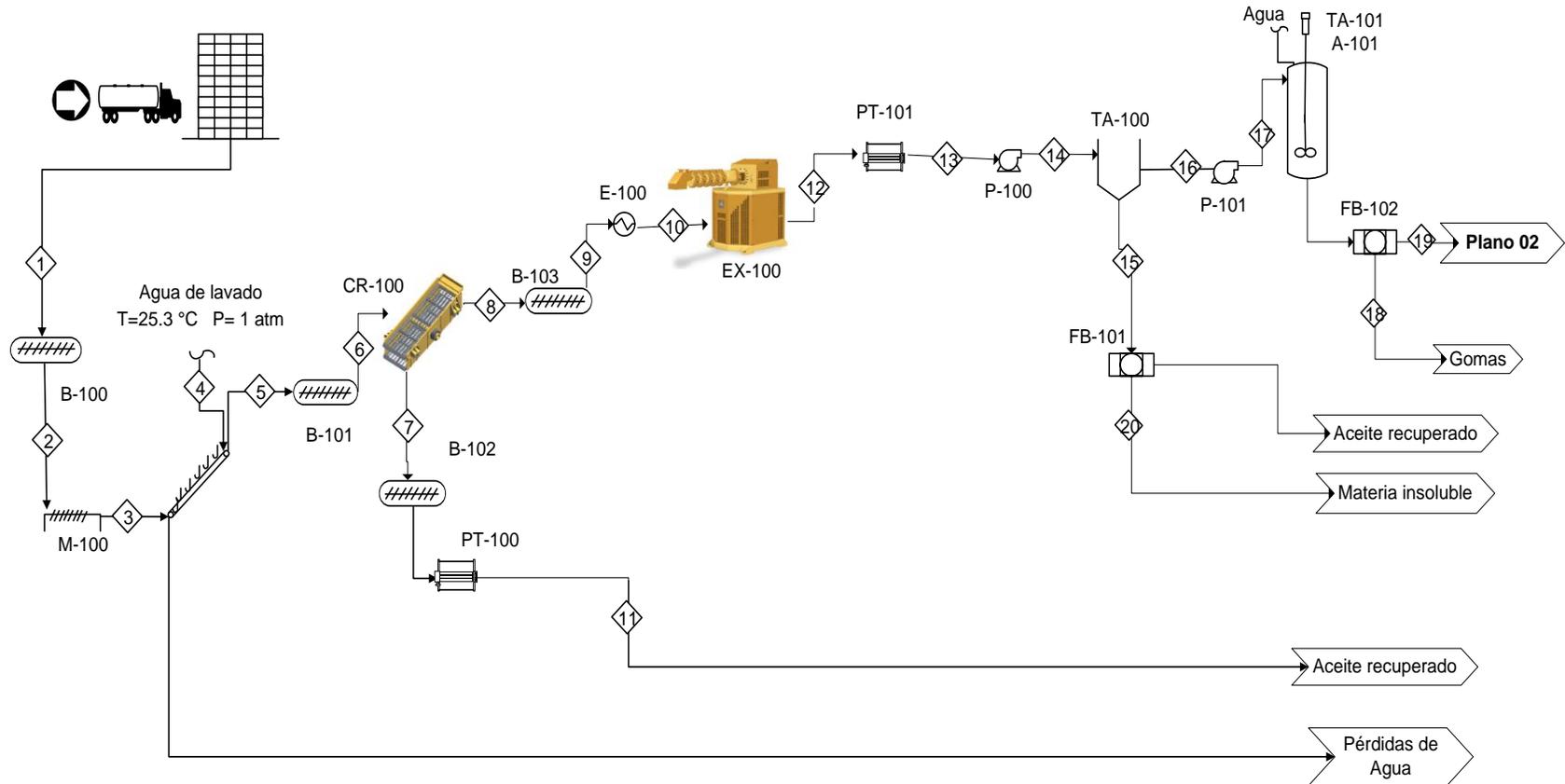
La primera etapa para la producción de biodiésel, es la extracción de aceite por solventes o por trituración mecánica, **Figura 2.11**. En la industria se recomienda la trituración mecánica para plantas de proceso pequeñas, de menos de 100.000 kg/día, debido al menor costo de inversión [27].

Antes de que el aceite pueda ser extraído, las semillas deben estar preparadas. Esto implica la eliminación de los tallos, hojas, piedras, arena, tierra y semillas de maleza. Después de la limpieza, las semillas oleaginosas se separan de las vainas gruesas por cribado o aspiración, se puede llevar a cabo la extracción de aceite de las vainas ya que contienen poca cantidad de aceite, (menos del 1%) en una prensa de tornillo. La extracción de aceite puede aumentar debido a que la vaina absorbe cierta cantidad de aceite.

En la alternativa a la extracción mecánica o aplastamiento, los granos son en general precalentados para destruir las enzimas en una extrusora de expansión. Este dispositivo comprime los granos a muy alta presión para que la temperatura se eleve, lo suficientemente alta como para desactivar las enzimas. La extrusión también libera aceite. Después de la cocción o de extrusión, las semillas oleaginosas, están normalmente para alimentar a una prensa de tornillo donde se comprimen a alta presión.

Posterior a la extrusión de la semilla, el aceite crudo contiene impurezas que pueden ser clasificados en dos categorías: el aceite insoluble y aceite soluble. El aceite insoluble impuro consiste en fragmentos de semillas, agua e hidrocarburos de cadena larga o ceras. La mayoría de este material puede ser removido por filtración. La materia soluble en aceite son los ácidos grasos libres, fosfátidos, sustancias gomosas o mucilaginosas, proteínas, cetonas y aldehídos.

Figura 2.11 Diagrama de proceso para la extracción del aceite de palma



La etapa de refinado está diseñada para eliminar los fosfolípidos y ácidos grasos libres del aceite crudo. La razón principal para eliminar estos fosfolípidos es que algunos de los compuestos son fuertes emulsionantes. Si estos compuestos están presentes durante la última etapa de neutralización alcalina, se inhibe la separación de los jabones y disminuye el rendimiento del aceite neutro.

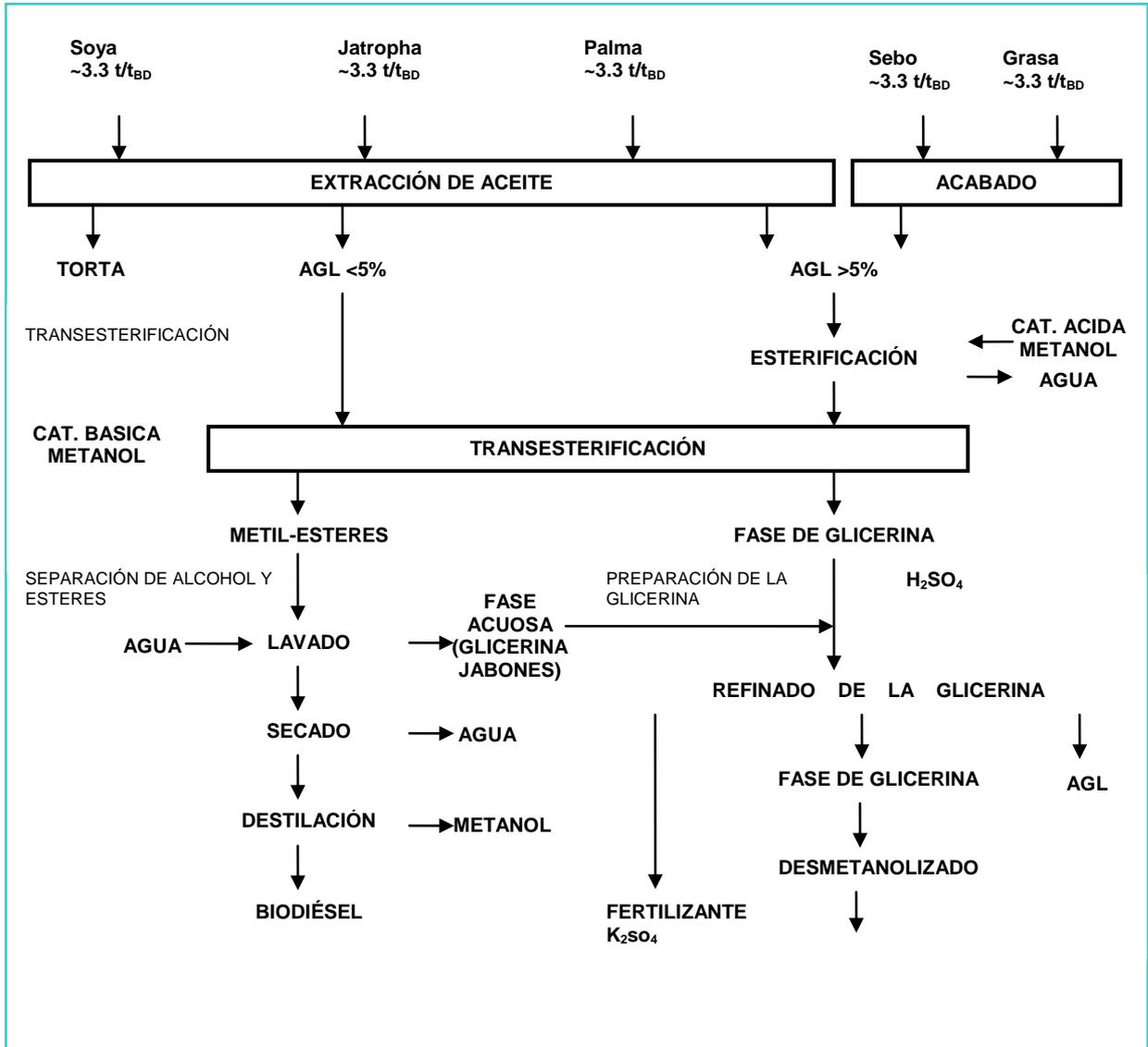
La refinación puede constar de dos pasos. El primer paso es el desgomado, en este paso el aceite crudo se mezcla con agua y la mezcla se agita durante algunos minutos a una temperatura de 70 °C para ser separados por sedimentación, filtración o centrifugación. El subproducto de desgomado de agua, tiene un valor como materia prima para la producción de lecitina.

La segunda fase de refinado es la neutralización. Este proceso consiste en eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo. Una solución alcalina, generalmente hidróxido de sodio, se añade como reactante con los ácidos grasos libres para producir jabones. Los jabones son insolubles en el aceite y se separan fácilmente mediante lavado con agua. La solución alcalina también neutraliza el ácido que queda de la etapa de desgomado. Otra alternativa para eliminar los ácidos grasos libres, es la esterificación ácida.

La esterificación ácida es otra manera de «deshacerse» de los ácidos grasos libres en el aceite, pero permite, al contrario de la neutralización, reaprovecharlos para producir biodiésel también a partir de ellos. Al aceite caliente se agrega metanol en cantidad adecuada para reaccionar con los AGL, utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Luego de la reacción, se separa el agua mediante decantación o centrifugación, y lo que queda es una mezcla de aceite (triglicéridos) y biodiésel con menos de 1% de ácidos grasos libres.

En general, la producción de biodiésel a partir de aceites o grasas consiste en tres etapas esenciales: la transesterificación, el procesamiento de ésteres y la purificación de la glicerina como subproducto. En la **Figura 2.11** se muestra un esquema general del proceso de producción de biodiésel. En este estudio se eligió **el aceite de palma africana** como materia prima y la **transesterificación con catálisis básica** como proceso para la producción del **metiléster**, asegurándonos que el aceite refinado presenta un porcentaje de ácidos grasos libres menor al 5%.

Figura 2.11 Esquema general del proceso de producción de biodiésel



Fuente: Estudio de la Secretaria de Energía, 2006 [16]

2.3.2 Simulación del proceso

La capacidad de producción es modular y se estableció de acuerdo al estudio de la SENER con el propósito de generar el 10% en volumen de las importaciones de combustibles fósiles, con una producción de 125 millones de litros de biodiésel al año.

En la **Tabla 2.12** se muestra la composición con la que se trabajó en la simulación. Dicha composición se obtuvo a partir de la composición reportada por Zapata et al. para el aceite crudo de palma, despreciando los porcentajes de los otros triglicéridos que se encuentran en menor cantidad en el aceite [29]. También se consideró que el aceite contiene un porcentaje menor al 5% de ácidos grasos libres. La composición típica del aceite de palma es de tripalmitina, trioleína, trilinoleína y ácido palmítico de 47.14, 37.52., 11.54 y 3.8% en peso, respectivamente [16]. Sin embargo para la simulación, se considera solo un triglicérido: trioleína con las siguientes propiedades:

Componente	Peso molecular	Densidad (kg/m ³)
Trioleína (C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆)	885.45	910

La mayoría de los compuestos que participan en la producción del biodiésel, se encontraron en la librería de componentes de HYSYS. Para los compuestos no disponibles, se empleó la herramienta Hypo Manager con el fin de crear los mismos a partir de sus propiedades. Se crearon seis compuestos hipotéticos: un fluido (trioleína, un triglicérido) y dos sólidos: ácido fosfórico (H₃PO₄) y fosfato de sodio (Na₃PO₄).

El modelo termodinámico elegido para la fase líquida fue el modelo de actividad NRTL, ya que se tienen compuestos altamente polares como el metanol y la glicerina [31]. Para la fase vapor se empleó la ecuación de Peng-Robinson.

Los coeficientes de interacción binaria no disponibles en la librería del simulador fueron estimados con el método UNIFAC (Universal Funcional Group Activity Coefficient) para equilibrio líquido-líquido.

El modelo considera la reacción global de conversión, como reversible y tiene la siguiente forma:

Reacción de transesterificación (conversión al 96%, respecto al triglicérido)

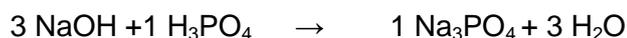


Se prefirió utilizar el NaOH como catalizador en lugar de KOH, a pesar de que el uso del KOH genera una sal como subproducto y puede ser aprovechada para producir fertilizantes, sin embargo el NaOH es menos costoso y requiere menores cantidades para alcanzar

niveles de conversión similares [31]. Además, el KOH no se encuentra disponible en la librería de componentes del simulador HYSYS.

La relación molar propuesta es de seis moles de alcohol por mol de aceite de palma (representado por la trioleína) el exceso de alcohol se requiere para desplazar el equilibrio a la derecha o productos dado que es una reacción reversible. El biodiésel obtenido de la simulación es un metiléster correspondiente al triglicérido: metil oleate (C₁₉H₃₆O₂).

La segunda reacción de conversión, es la de neutralización (conversión al 100% respecto al NaOH), dada por la siguiente reacción química:



En la **Tabla 2.12** se muestra las condiciones de operación a las que se encuentran todas las corrientes de entrada en el proceso, necesarias para la producción de biodiésel.

Tabla 2.12 Composición de las corrientes de entrada en el proceso para la producción de biodiésel

CORRIENTES DE ENTRADA AL PROCESO						
		OIL	METANOL	NaOH	AGUA	H ₃ PO ₄
Fracción vapor		0	0	0	0	0
Temperatura	°C	25	25	25	25	25
Presión	kPa	101	101	101	120	101
Flujo molar	Kmol/h	13.07	40.09	2.9	8.3	1
Flujo másico	Kg/h	1.1508e+04	1285	116	150	98

El proceso para la producción de biodiésel, inicia por la corriente OIL (trioleína) la cual es precalentada en el intercambiador E-100 para aumentar la temperatura de 25 a 60°C. Por otra parte, el metanol fresco se mezcla con la corriente de NaOH formando la corriente 102A; mientras que el flujo másico de la corriente 103 es ajustado para cumplir la relación molar de 6 moles de metanol por mol de aceite. Estas dos corrientes (101B y 103) entran al reactor de conversión (CRV-100) a 60°C y 400 kPa. A estas condiciones, el triglicérido (trioleína) reacciona con el alcohol (como catalizador el NaOH) para formar el metiléster (m-oleate) y glicerol. Posteriormente, continúa la zona de separación compuesta por tres sub-zonas.

La primera es la recuperación del metanol, en esta etapa se utilizó una la torre de destilación T-201 con 5 etapas teóricas y una relación de reflujo de 2, de esta manera se logró recuperar el 94 % del metanol entrante a la T-201 y recirculado puro al reactor en la corriente 201.

La segunda zona, es separa el metiléster (m-oleate) del glicerol. En la torre de extracción líquida T-301 de 5 etapas teóricas, se logró recuperar el 99.8% de flujo másico de metilésteres de la corriente 203 utilizando agua como solvente extractor con un flujo dese especificó en 100 kg/h.

El metil éster obtenido de la simulación, se refina en un separador X-301 para eliminar el glicerol y otros componentes y por último pasan (corriente 301A) a una torre de destilación T-401 para salir con una pureza de 99.93%. La corriente BIODIÉSEL tiene una composición de 99.98 %wt metil-oleato, 0.003% %wt agua y 0.007% %wt metanol.

En la última etapa se purifica el glicerol, subproducto de la reacción de transesterificación. Los fondos de la torre T-301 y la corriente ácido fosfórico (H_3PO_4), cuyo flujo másico se especificó de manera tal que neutralizara todo el hidróxido de sodio presente en la corriente 303, pasan al reactor CRV-101 para llevar a cabo la reacción de neutralización y luego pasa al separador sólido/líquido X-100 en el que se separa todo el fosfato sódico generado en la reacción.

Por último, la corriente 305 de composición 80.03 %wt glicerol y 13.48 %wt agua pasa una torre de destilación T-501 en el que se recupera el 100% del flujo másico del glicerol, obteniéndose 1155.5 kg/h de glicerol al 96.8 %wt como subproducto. El balance de materia del proceso se detalla en el **Anexo B**.

Las condiciones de operación del proceso diseñado están sujetas a las restricciones de descomposición térmica de los compuestos, del biodiésel de 250°C y la glicerina, de 204.44°C [29].

En la **Figura 2.12** se muestra la simulación del proceso de biodiésel a partir del aceite de palma con una producción de 11,140 kilogramos por hora equivalente a 96,249 toneladas al año considerando 360 días de operación de la planta, 1,194 kilogramos por hora ó 10,316 toneladas anuales de glicerol y 159 kilogramos por hora ó 1,373 tonelada al año de fosfato de sodio, productos que generan importantes ingresos.

En la **Tabla 2.13** se presenta las condiciones a las que se obtuvo el biodiésel y glicerol mediante la simulación realizada en HYSYS, a partir del aceite de palma.

Tabla 2.13 Condiciones a las que se encuentran los productos, obtenidos de la simulación

		TORRE DE REFINACIÓN DEL BIODIÉSEL			REFINACIÓN DEL GLICEROL	
		401	BIODIÉSEL	402	501	GLICEROL
Fracción vapor		0.9999	0	0.0078	0	0
Temperatura	C	157	157	157	52	184
Presión	kPa	20	20	30	30	40
Flujo molar	Kmol/h	0.5230	37.6	0.5467	12.09	13.64
Flujo másico	Kg/h	12.10	1.114e+04	470	250.1	1194
FRACCIÓN MOL						
BIODIÉSEL		0	0.9988	0.0436	0	0.0048
GLICEROL		0	0	0	0	0.9200
OIL		0	0	0.9564	0	0
H ₂ O		0.7653	0.0005	0	0.8094	0.0751
MeOH		0.2347	0.0007	0	0.1906	0

La calidad del biodiésel es generalmente definida en base a ciertos parámetros físicos y químicos establecidos por normas técnicas. Las principales normas técnicas para el biodiésel son la europea y la estadounidense. Es importante mencionar que los estándares de calidad deben estar de acuerdo con la realidad nacional, copiar estándares extranjeros puede constituir una barrera, ya que en muchos casos estos estándares son diseñados con el objetivo de controlar el mercado en lugar de facilitar su implementación.

Las especificaciones del biodiésel obtenido en la simulación del proceso se muestran en la **Tabla 2.14**. La única propiedad que no cumple con el valor mínimo requerido por la norma es la viscosidad cinemática, seguramente debido a la simplificación en la composición del aceite, realizada con el fin de facilitar el modelo de simulación, a esto se suma que en HYSYS no se especifica la temperatura a la que se encuentra esta propiedad. Sin embargo en otras propiedades, el proceso simulado cumple con la Norma europea EN 14214 que es, en general, más exigente en cuanto a requerimientos de calidad que el estándar ASTM D 6751.

Tabla 2.14 Especificaciones del biodiésel obtenido de la simulación comparado con normas internacionales

Propiedad	Unidad	Valor obtenido	Límites		Estándar/norma
			Mínimo	Máximo	
Contenido de alquilésteres	%wt	99.98	96.5	-	EN 14214
Contenido agua	%vol	0.0026	-	0.05	ASTM D 6751
Viscosidad cinemática a 40°C	(cSt)	1.026	1.9	6	ASTM D 6751
Contenido de metanol	%wt	0.0077	-	0.2	EN 14214
Densidad a 15°C	Kg/m ³	876.9	860	900	EN 14214
Glicerol total	%wt	0	-	0.25	EN 14214
Número de ácido	mg KOH/g	0	-	0.5	EN 14214

Es importante recordar que las propiedades físicas y químicas del biodiésel dependen del origen del aceite o grasa y alcohol, utilizados como reactivos, así como de las condiciones de reacción [11].

A continuación se describen de manera general algunas de las propiedades que determinan la calidad del biodiesel [11]:

Ácidos grasos libres (AGL ó FFA: Free Fatty Acids). Medida significativa de la calidad del biodiesel, ya que indica el nivel de hidrólisis y se utiliza como punto de referencia para conocer la calidad de aceites y grasas; varía dependiendo de las características físicas, aunque en general se encuentran alrededor de 20, mientras que para aceites y grasas refinadas se tiene un FFA superior a 1.0.

Miscibilidad. El biodiesel es ligeramente más denso que el diesel convencional, ya que tienen un peso específico de 0.88 comparado con el 0.85 del diesel. En consecuencia el biodiesel debería, al mezclarse con diesel, adicionarse en segundo lugar, para así obtener una mezcla adecuada.

Índice de Yodo. Esta propiedad indica la tendencia a la oxidación que posee el biodiesel, esto debido a que este índice determina el grado de insaturaciones que poseen los ésteres

en su estructura química; entre mayor sea el índice de yodo existirá un mayor número de dobles enlaces en los aceites y grasas.

Viscosidad. Esta propiedad se ve altamente afectada por efecto de la temperatura, por lo que el combustible debe poseer una viscosidad mínima, así por otro lado se evitan pérdidas de potencia, debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector, además que le proporciona cierta lubricidad al sistema de combustible.

Glicerina libre. Determina el nivel de glicerina presente en el biodiesel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biocombustible.

Algunas de estas propiedades se tomaron como referencia para determinar la calidad del biodiésel obtenido de la simulación.

2.4 Ubicación de la biorrefinería

El estado de Veracruz es la propuesta de ubicación de la biorrefinería. La selección del sitio se sustenta fundamentalmente en criterios económicos y geográficos. El estado cuenta con una extensa superficie de área cultivada de caña de azúcar con una producción de 2,010,889 toneladas de caña de azúcar en 22 ingenios azucareros y 36,374 hectáreas de palma africana, producción óptima para la producción de biocombustibles, cercanía inmediata a las fuentes de suministro de crudo (para probables mezclas), amplia infraestructura, vías de comunicación que serán útiles para el transporte de productos y con gran experiencia en actividades petroleras y agroindustriales. Además, se localiza cerca del mercado objetivo, tiene suficiente mano de obra y disponibilidad de servicios, agua y electricidad, principalmente [34].

Capítulo 3. Estudio de factibilidad económica

El objetivo del presente capítulo es realizar una evaluación financiera de cada uno de los procesos diseñados y determinar la viabilidad económica para la instalación de una biorrefinería en México. Además de un posterior análisis de sensibilidad para determinar la variable en la rentabilidad del proceso de producción de biocombustibles.

3.1 Dimensionamiento del equipo

Como paso previo y necesario para la evaluación financiera, se realizó el dimensionamiento del equipo incluido en ambos procesos. En esta etapa se utilizó la herramienta de HYSYS “Aspen Icarus” para el dimensionamiento de equipo como: reactores, cambiadores de calor, equipo mecánico y recipientes a presión. La dimensión de cada equipo es determinada por la herramienta del programa HYSYS y se fundamenta en las condiciones de operación del proceso y del balance de materia.

El análisis económico parte del tratamiento de materia prima, el cuál comprende a partir de la limpieza de la palma africana hasta la extracción del aceite para la producción de biodiésel. Para la producción del bioetanol se considera la limpieza de la caña de azúcar hasta la obtención del etanol. Para ambos procesos se propuso el tratamiento de materia prima en base a los estudios realizados por Van Gerpen J. [27].

El costo de equipo para el tratamiento de materia prima, caña de azúcar y palma africana, utilizado para la producción de bioetanol y biodiésel, se realizó con la regla de los seis décimos o exponencial, los resultados se presentan en los **Anexos C y D**.

En la **Tabla 3.1** se muestra el costo del equipo para la producción de bioetanol. En esta tabla no se especifica las dimensiones del equipo para la estimación de costos, ya que el cálculo lo realiza el simulador con las especificaciones del proceso. En el **Anexo F** se muestra la figura que ejemplifica el costo de los equipos calculados por el simulador.

Tabla 3.1 Lista de equipo para la producción de etanol anhidro				
Código	Equipo	Tipo	Material	Costo de equipo (USD)
V-100	Separador de CO ₂ y etanol-agua	Recipiente horizontal	acero inoxidable	128,800
T-100	Absorbedor para lavado de CO ₂	Absorbedor	acero inoxidable	165,800
T-101	Torre de destilación etanol-agua	Torre de destilación de 30 platos	acero inoxidable	1,222,000
T-102	Torre de rectificación etanol-agua	Torre de rectificación de 20 platos	acero inoxidable	841,300
E-100	Cambiador de calor a la entrada de deshidratación			77,100
Total				2,435,000

El material de construcción elegido en la mayoría de los equipos para ambos procesos, es acero al carbón ya que puede emplearse a las condiciones de operación: temperatura, presión y concentración de agentes oxidantes. Sin embargo, existen zonas en las que es necesario utilizar el material de acero inoxidable y por tanto el costo del equipo aumenta considerablemente. Por ejemplo, para el proceso del bioetanol la etapa de deshidratación del alcohol es necesario utilizar acero inoxidable para separar CO₂, etanol y agua. Mientras que el proceso del biodiésel sólo se requiere en la etapa en donde se utilizan agentes oxidantes como hidróxido de sodio y ácido fosfórico.

El proceso del biodiésel requiere de equipo como separadores sólido-líquido y líquido-líquido para la separación de productos y mezcladores. El cálculo para el costo de estos equipos se realizó con la regla de las seis décimas debido al desconocimiento de algunas propiedades; por ejemplo, el separador sólido-líquido en donde resulta indispensable conocer el tamaño de partícula, como se muestra en el **Anexo E**.

Tabla 3.2 Lista de equipo para la producción de biodiésel				
Código	Equipo	Tipo	Material	Costo de equipo (USD)
Reactores				
CRV-100	Reactor transesterificación	CSTR	a. carbón	86,400
CRV-101	Reactor de neutralización	CSTR	a.inoxidable	41,900
Recipientes a presión				
T-201	Torre de destilación de recuperación de metanol	Torre de 5 platos	a. carbón	84,100
T-401	Torre de destilación de biodiésel	Torre de 5 platos	a. carbón	256,900
T-501	Torre de destilación de glicerina	Torre de 5 platos	a. carbón	80,100
T-301	Torre de extracción líquida	Torre de 5 platos	a. carbón	36,700
Intercambiadores de calor				
E-100	Intercambiador de calor	Coraza y tubos	a. carbón	31,400
E-101	Intercambiador de calor	Coraza y tubos	a. carbón	20,900
Equipo mecánico				
P-100	Bomba alimentación aceite	Centrifuga	a. colado	5,800
P-101	Bomba Metanol-NaOH	Centrifuga	a.inoxidable	7,500
P-102	Bomba de recirculación de metanol	Centrifuga	a. colado	3,600
P-103	Bomba fondos de destilación	Centrifuga	a. colado	4,100
Otros				
X-100	Separador sólido-líquido	Recipiente vertical	a. carbón	100,000
X-301	Separador líquido-líquido	Recipiente vertical	a. carbón	100,000
MX-100	Mezclador NaOH-Metanol		a. carbón	100,000
MX-101	Mezclador NaOH-Metanol fresco y recirculado		a. carbón	100,000
MX-102	Mezclador de fondos		a. carbón	100,000
TOTAL				1,159,400

Como resultados generales se observa que el Proceso de bioetanol requiere una inversión para la adquisición de equipo de \$11,565,700 USD, mientras que para el Proceso de biodiésel es de \$ 4,148,000 USD. Para ambos procesos se incluye el costo de equipos del tratamiento de materia prima.

3.2 Estimación económica

Existen métodos para el cálculo del costo de inversión para plantas industriales tales como: método de los porcentajes, método de Lang, método de Guthrie, por mencionar algunos. Sin embargo a continuación se presentan dos propuestas de cálculo, que nos servirá de punto de comparación y permitirá presentar un análisis económico para la instalación de una biorrefinería.

3.2.1 Método de Guthrie

La primera estimación económica se realizó por el método de costos modulares de Guthrie y se fundamenta en la relación que existe entre el costo capital de una planta química y el costo de adquisición de sus equipos. En la **Tabla 3.3** se presenta el costo de inversión para una biorrefinería que produce 98.5 millones de litros anuales de bioetanol y 125 millones de litros de biodiésel al año ubicada en el Estado de Veracruz.

Tabla 3.3 Costo de inversión para la instalación de una biorrefinería por el método de Guthrie

Concepto	Factor	Costo Bioetanol (USD)	Costo Biodiésel (USD)
Costo total de equipo		11,565,700	4,148,000
Instalación de equipo y tubería	0.39	4,510,623	1,617,720
Instrumentación y control (instalación)	0.13	1,503,541	539,240
Tubería (instalación)	0.31	3,585,367	1,285,880
Eléctrico (instalación)	0.10	1,156,570	414,800
Construcción	0.29	3,354,053	1,209,920
Terreno	0.06	693,942	248,880
Costo Total		26,369,796	9,464,440
Contingencias y honorarios	18% del costo total	4,746,563	1,703,599
Costo total de inversión		\$ 42,284,398 USD	

3.2.2 Método de Turton

La segunda estimación económica, propuesta por Turton et al. utiliza como información la lista de todos los equipos principales [26]. Esta estimación considera el costo capital, costos operativos, costos por tratamiento de residuos industriales y de servicios auxiliares. A continuación se detalla la secuencia de cálculo para la segunda evaluación económica.

I. Costo capital

El costo total de capital se calcula multiplicando el costo total de los equipos por ciertos factores para tener en cuenta otros costos como la mano de obra de instalación, materiales asociados a la instalación, contingencias, terreno e instalaciones auxiliares, como se determino por el método de Guthrie.

Como resultados generales se observa que el Proceso de bioetanol requiere una Inversión de Costo Fijo (ICF) de \$31,116,359 USD mientras que para el Proceso de biodiésel es de \$11,168,039 USD.

II. Costos operativos

El cálculo de costos operativos se realizó siguiendo la metodología expuesta por Turton, la cual se fundamenta en la relación que existe entre la inversión de capital fijo (ICF), el costo de materias primas (CMP), el costo de tratamiento de residuos (CTR), el costo de servicios industriales (CSI) y el costo de mano de obra operativa (CMOO) [32].

El consumo anual de las materias primas, residuos industriales y servicios auxiliares se tomaron de la simulación del proceso.

El precio de las materias primas se cálculo como un valor promedio de los reportados en medios electrónicos y artículos citados en la bibliografía. El precio del aceite de palma se tomó con un valor promedio de \$452.5 dólares por tonelada y \$270 dólares por tonelada para el metanol. Mientras que la caña de azúcar se considero con un precio promedio de \$529 dólares por tonelada. El precio del resto de las materias primas para la producción de biocombustibles se muestra en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.4 Costos por materia prima para la producción de biocombustibles

Biodiésel			
Materia prima	Consumo anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Aceite crudo de palma	91,713,600	0.4525	41,500,404
Metanol	10,177,200	0.27	2,747,844
Hidróxido de sodio	918,720	0.733	673,422
Ácido fosfórico	776,160	0.862	669,050
Total (\$/año)			45,590,720

Bioetanol			
Materia prima	Consumo anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Caña de azúcar	713,768,116	0.529	377,583,333
Acido sulfúrico	6,140	0.09	552
inoculo	35,688,400	0.60	21,413,040
Total (\$/año)			398,996,926

El consumo de materia prima para la producción de biocombustibles y residuos industriales generados en el proceso, se tomaron de la simulación del proceso.

Tabla 3.5 Costo por tratamiento de residuos industriales

Biodiésel			
	Generación anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Agua con glicerol	142,560	0.04428	6,313
Total (\$/año)			6,313

Bioetanol			
	Generación anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Vinaza	88,660,000	0.13284	11,777,594
Total (\$/año)			11,777,594

El costo por residuos industriales se tomaron del artículo de Zapata et.al. y se actualizaron con el índice de precios, como se muestra en la **Tabla 3.5** [30].

El consumo de servicios auxiliares se tomó de la simulación del proceso. Sin embargo, es pertinente aclarar que aún falta considerar el agua de enfriamiento, vapor de alta y baja

presión, energía eléctrica, principalmente, necesarios para el proceso, no obstante esta estimación económica sólo considera el equipo principal del proceso asumiendo las cantidades que se muestran en la **Tabla 3.6**, y por ello es conveniente un análisis de sensibilidad para determinar la rentabilidad del proceso.

Tabla 3.6 Costos de servicios auxiliares			
Biodiésel			
Tipo	Consumo anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Agua de proceso (solvente)	1,188,000	0.0000492	58
Energía eléctrica	180,759	0.0862	15,581
Total (\$/año)			15,639
Bioetanol			
Tipo	Consumo anual (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Costo anual (\$USD/año)
Agua de proceso	221,712,000	0.0000492	10,908
Total (\$/año)			10,908

El cálculo para el costo por mano de obra operativa considera el número de equipos principales (N_k) de ambos procesos multiplicados por un factor que asigna Turton et. al. en función de las condiciones de operación $Ls(k)$ [26]. La planta opera 360 días al año, lo que conduce a un valor de 1080 turnos de operación al año (τY) y una cantidad de trabajo por operario al año ($LY(op)$) de 245 turnos con un salario anual promedio por operario (Sop) de \$8,300 USD [30]. La planta de biodiésel se requieren 22 operarios trabajando tiempo completo y uno medio tiempo y 26 operarios trabajando tiempo completo y uno medio tiempo para el proceso de bioetanol, como se muestra en la **Tabla 3.7**.

Tabla 3.7 Costo de mano de obra operativa (CMOO)						
Proceso	Biodiésel			Bioetanol		
	N_k	$Ls(k)$	$Ls(k) * N_k$	N_k	$Ls(k)$	$Ls(k) * N_k$
Equipos						
Reactores	3	0.5	1.5	2	0.5	1.0
Recipientes	7	0.35	2.45	9	0.35	3.15
Intercambiadores	3	0.1	0.3	7	0.1	0.7
Bombas	6	0	0	8	0	0
Separadores	4	0.2	0.8	5	0.2	1.0
Mezcladores	3	0	0	0	0	0
$\Sigma Ls(k) * N_k$			5.05			5.95
τY			1,080			1,080
$LY(op)$			245			245
Nop			22			26
Sop			\$8,300			\$8,300
Total COOM (\$/año)			\$182,600			\$215,800

III. Flujos de caja

En la **Tabla 3.8** se muestran los flujos de caja para ambos procesos, se obtuvieron considerando un precio promedio de productos y subproductos referidos en artículos citados en la bibliografía.

Tabla 3.8 Ingresos por venta de productos y subproductos			
Biodiésel			
Tipo	Producción (kg/año)	Precio (\$USD/kg)	Ventas anuales (\$USD/año)
Biodiésel	88,189,200	0.57	50,267,844
Glicerol	9,155,520	1.2	10,986,624
Fosfato de sodio	1,259,280	0.73	919,274
Total (\$/año)			\$62,173,742
Bioetanol			
Bioetanol	74,000,000	0.81	60,000,000
Total (\$/año)			\$60,000,000

Los flujos de efectivo para los procesos de biodiésel y bioetanol se muestran en la **Tabla 3.9**. Para ambos procesos se proyectó un año de construcción de la planta a una tasa de interés del **35%** y un horizonte de recuperación de inversión a 20 años.

Tabla 3.9 Flujos de efectivo para ambos procesos					
Periodo n	Biodiésel			Bioetanol	
-1	Inversión	\$11,168,039 USD		\$31,116,359 USD	
	Gastos		Ingresos	Gastos	Ingresos
1	Materia prima	\$45,590,720	\$62,173,742	\$398,996,926	\$60,000,000
	Residuos Industriales	\$6,313		\$11,777,594	
	Servicios auxiliares	\$15,639		\$10,908	
	Mano de obra operativa	\$182,600		\$215,800	
	Amortización anual	\$3,918,506		\$10,917,731	
Total (\$USD/año)	\$49,713,778 USD		\$62,173,742 USD	\$421,918,959 USD	\$60,000,000 USD
... n=20					

Los resultados para el proceso de biodiésel resulta una inversión atractiva puesto que la Tasa Interna de Retorno (TIR) tiene un valor de 146.7%, mayor a la tasa de interés, y un valor presente (VP) positivo de \$35,511,839 dólares por lo tanto, esto muestra que en cuatro años se recupera la inversión. La producción de biodiésel resulta una inversión rentable con un amplio margen. Esta conclusión está sujeta a la suposición de que todos los productos y sub-productos podrán ser comercializados y vendidos a los precios establecidos.

La inversión para el proceso de producción de bioetanol presenta un valor de TIR menor a la tasa de interés y tiene un Valor Presente negativo de \$-1,031,496,361 dólares. La producción de bioetanol no resulta rentable y por tanto, el precio del biocombustible tendría que ser subsidiado por el gobierno para justificar la producción del mismo.

En la **Tabla 3.10** se muestra la rentabilidad de los procesos para la producción de biodiésel y bioetanol. De acuerdo a los valores presentados se determina que la producción de bioetanol no resulta factible puesto que el costo de producción es muy alto en comparación al precio de venta y por tanto no es una alternativa económicamente viable como sustituto de la gasolina importada. Por otro lado, el proceso de biodiésel genera importantes ingresos presentando ganancias de 0.55 centavos de pesos por litro.

Tabla 3.10 Rentabilidad de los procesos					
Tipo	Capacidad (MM litros/año)	Costo de inversión (MM USD)	Costo de producción (\$pesos/litro)	Precio de venta (\$pesos/litro)	Tasa Interna de Retorno (%)
Biodiésel	125	57	5.79	6.34	146.7
Bioetanol	98.5	442	56.98	8.2	No es rentable

En base a los resultados obtenidos se establece que el estimado de inversión para la instalación de una biorrefinería ubicada en el Estado de Veracruz es de **499 millones de dólares (equivalentes a 6337 millones de pesos)** con una producción anual de 125 millones de litros de biodiésel y 98.5 millones de litros de bioetanol.

En la **Tabla 3.11** se compara los resultados obtenidos de la estimación económica realizada por el método de Turton respecto a proyectos que están por desarrollarse en México, mostrando que el costo de inversión son similares, lo que prueba que el método tiene un rango de exactitud aceptable.

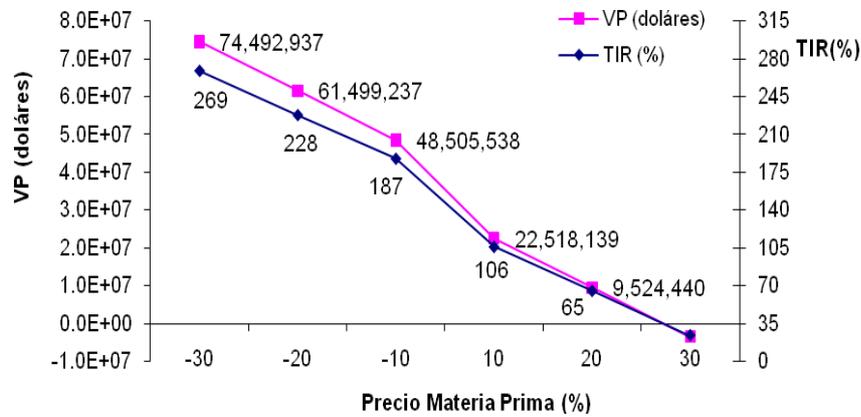
Tabla 3.11 Comparación del método de Turton				
Localización	VERACRUZ	GUADALAJARA	VERACRUZ	Monterrey Grupo Energéticos
Biocombustible	Etanol anhidro	Etanol	Biodiésel	Biodiésel
Capacidad (MM litros/año)	98.5	176	125	3.6
Costo de inversión (MM pesos)	5,613 caña de azúcar	6,748 caña de azúcar	724 Aceite de palma	16 AGL <3%
Precio (pesos/litro)	57	8.2	8.2	no se reporta

3.3 *Análisis de sensibilidad*

El precio de la materia prima es la principal variable que afecta el costo de producción y la rentabilidad del proceso [32]. A continuación se analiza el efecto de ciertas condiciones y variables sobre la rentabilidad de los dos procesos diseñados.

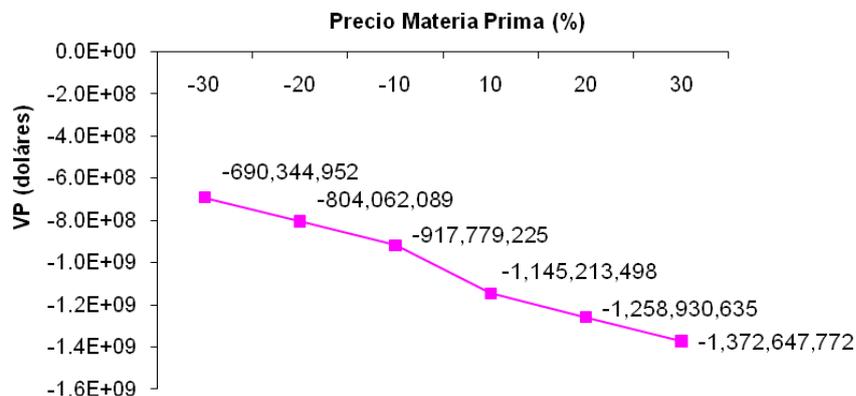
En la **Figura 3.1** se muestra el efecto del precio de la materia prima sobre la rentabilidad del proceso. Para este análisis se consideró el precio de la palma africana con una variación del -30, -20, -10, +10, +20 y +30 por ciento respecto al precio de compra de \$452.5 dólares por tonelada. El resto de los componentes que participan en la reacción para la producción de biodiesel, se dejaron constantes así como las demás variables que definen los flujos de caja. La gráfica muestra que, aún cuando el precio de la materia prima aumente un 20% su precio de \$452.5 dólares por tonelada, el proceso es rentable.

Fig. 3.1 Efecto del precio de la materia prima sobre la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente (VP)



El proceso de bioetanol para este caso de estudio no es rentable aún bajo el supuesto que el costo de materia prima presente un precio menor al 30% tomando como referencia 529 dólares por tonelada, como se muestra en la **Figura 3.2**, la tasa interna de retorno continua con un valor menor a la tasa de interés y con un valor presente negativo. El resultado muestra que el costo de producción de alcohol anhidro a partir de la caña de azúcar no resulta una materia prima viable por el precio de venta que varia constantemente e incrementa. A esto se suma la cantidad de tierra cultivable que se necesita de 6,401 hectáreas para producir 98.5 millones de litros al año de etanol anhidro, considerando un rendimiento agrícola de 111.5 toneladas de caña por hectárea y un rendimiento industrial de 138 litros de bioetanol por tonelada. Por tanto, se sugiere como alternativa elegir una materia prima de menor precio y mejor rendimiento para que el proceso sea rentable.

Fig. 3.2 Efecto del precio de la materia prima sobre el Valor Presente



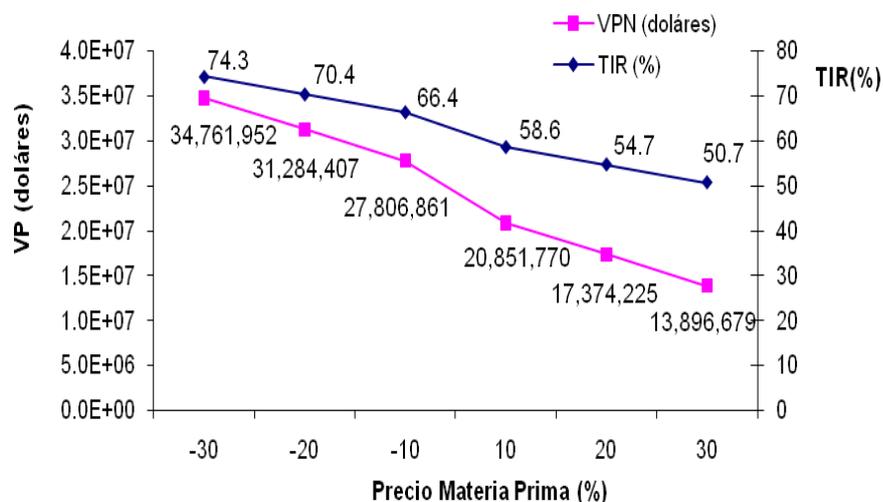
3.4 Alternativa para producir etanol anhidro económicamente factible

La alternativa para que el proceso sea rentable es que el precio de la materia prima no sea mayor al 50% del precio de venta del biocombustible. Por tanto, de acuerdo a los valores reportados en el capítulo anterior se muestra que la biomasa lignocelulósica es la alternativa que presenta menor costo y mejor rendimiento.

La opción para producir etanol anhidro económicamente viable que compita con el precio de venta de la gasolina Premium de \$9.91 pesos por litro considera que el precio de la biomasa lignocelulósica sea de \$0.344 dólares por litro (\$4.37 pesos por litro) para producir 98.5 millones de litros de biocombustible. El cálculo de la Tasa Interna de Retorno del proceso es de 62.5% y un Valor Presente de \$24,329,316 dólares.

La **Figura 3.3** muestra que, aún cuando el precio de la materia prima aumente o disminuya un 30% el proceso es rentable.

Fig. 3.3 Efecto del precio de la materia prima sobre la rentabilidad del proceso



3.5 Mezcla de combustibles

Existe otra alternativa para satisfacer la demanda de combustibles fósiles, la mezcla de gasolina-alcohol anhidro y diesel-biodiésel.

La opción de realizar mezclas de gasolina con etanol implicaría una variación en el costo del producto final y en la calidad de la mezcla obtenida [4]. En lo que respecta a la segunda idea, la diferencia en la calidad de las mezclas en comparación con las gasolinas,

según algunas investigaciones reportan que para obtener el porcentaje requerido de oxígeno en el combustible, de 1.5 por ciento en peso de oxígeno, se requiere del orden de 4.3 por ciento en volumen de etanol y otros componentes para satisfacer las especificaciones, lo que incrementa el costo de producción en función del producto empleado para lograr el contenido de oxígeno. La mezcla de gasolina-etanol también presenta cambios en algunas propiedades como el número de octano de mezclado superior a los éteres (éter metil terbutílico y éter metil teramílico, conocidos por sus siglas en inglés como MTBE y TAME, respectivamente) y un valor en la Presión de Vapor Reid mayor [4]. A esto se suma, que la mezcla de gasolinas con alcohol no puede ser llevado a cabo en las refinerías, por lo que se deberán considerar las inversiones para poder realizar esta operación en cada una de las terminales de almacenamiento y distribución, esto representa una erogación por cada instalación, tanque de almacenamiento del etanol, el sistema de mezclado, la adecuaciones a las instalaciones, entre otros [4].

En tanto para la mezcla de diesel y biodiésel, en términos generales este tipo de mezcla no requiere de una infraestructura particular, sólo se necesita de un sistema de mezclado y de un tanque para almacenar el biodiésel. En lo que respecta al cambio de propiedades las mezclas no presentan gran variación en cuanto a la calidad del combustible obtenido [4].

3.12 Comparación económica biocombustible-oxigenante		
Precio del Combustible (pesos/litro)	Precio del Biocombustible (pesos/litro)	Precio del Oxigenante (pesos/litro gasolina)
Gasolina Magna 8.36 Gasolina Premium 9.91	8.2 a 14	0.072 (MTBE - TAME)

En la **Tabla 3.12** el precio de venta del biocombustible en comparación con los oxigenantes, MTBE y TAME, utilizados convencionalmente en las gasolinas Magna y Premium que se comercializan en la zona metropolitana del país. Asumiendo que se realicen mezclas de E10 y B10, mezcla sugerida para operar convencionalmente sin ninguna modificación al motor, el costo de la mezcla sería superior al precio de venta del combustible tradicional (gasolina y diesel) por lo que esta opción no es viable económicamente.

Capítulo 4. Estudio de factibilidad ambiental

En este capítulo se realizará el estudio de factibilidad ambiental para la instalación de una biorrefinería en México, esperando que el impacto ambiental en la producción y uso de biocombustibles, sea inferior al que produciría el combustible no renovable.

4.1 Impacto ambiental en la producción de biocombustibles

En general la obtención de combustibles fósiles tiene un importante y complejo impacto ambiental. Este impacto se debe a que la combustión de estos compuestos genera gases como el CO₂ e hidrocarburos residuales, que pueden ir a la atmósfera en estado gaseoso, a veces sin quemar, impactando muy negativamente al medio ambiente generando una especie de bóveda opaca sobre la superficie terrestre, que opera produciendo lo que se conoce como “*efecto invernadero*”. Si continúa el incremento de estos gases de efecto invernadero en la atmósfera, se estima que la temperatura del planeta continuará aumentando con consecuencias climáticas muy negativas [12].

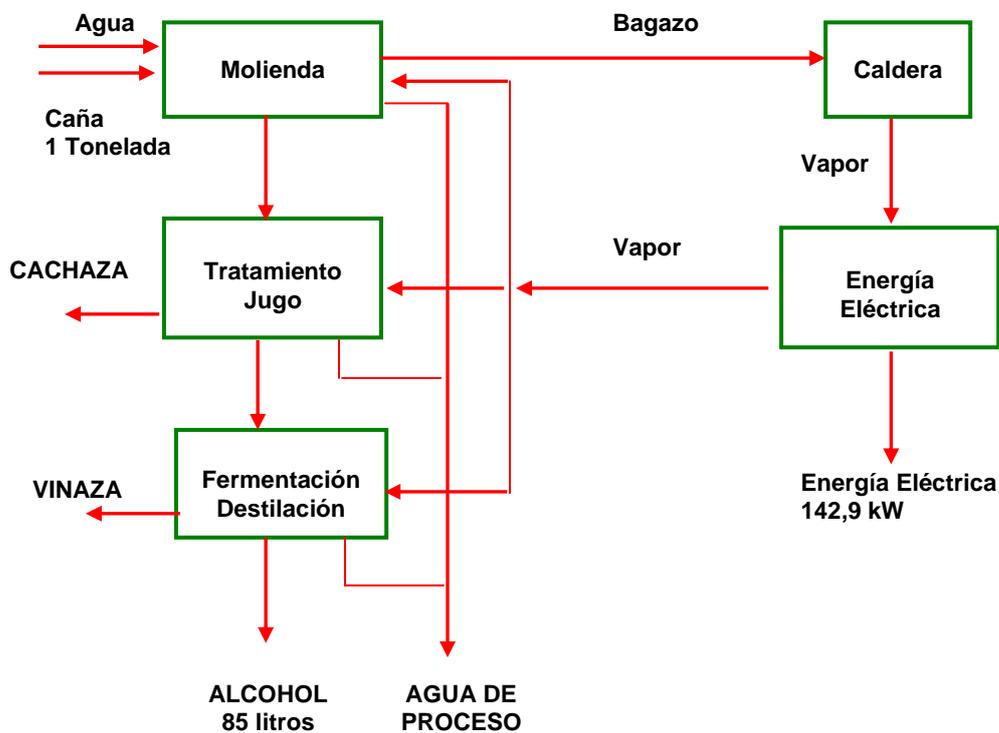
Desde hace algunos años se ha estudiado que los biocombustibles pueden contribuir a la reducción de emisiones contaminantes de vehículos y por ende, a combatir el efecto invernadero y cambio climático. Ante esa alternativa, a continuación se evaluará la generación de gases para producción de biocombustibles (bioetanol y biodiésel) esperando que sea inferior a la generada por los combustibles de origen fósil que reemplazarán, teniendo presente además contabilizar los residuos generados por todas las actividades necesarias para su adecuación y/o transformación.

4.2 Residuos generados en la producción de bioetanol y biodiésel

Los efluentes que se generan en la producción de biocombustibles se consideran a partir de la etapa agrícola (para biocombustibles de 2da. generación) hasta su arribo a los centros de distribución, como a continuación se detalla cada uno de los procesos.

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar tiene tres corrientes principales de efluentes producidas por el proceso, indicadas en la **Fig. 4.1**, es la cachaza, residuo sólido que puede emplearse como abono en los cañaverales, otro está constituido por las aguas de limpieza de fábrica y otras corrientes líquidas que deba desecharse, las que pueden emplearse para riego, con o sin un tratamiento previo en lagunas, y el tercero es la vinaza, residuo líquido que queda al destilar el mosto de jugo fermentado y que constituye una corriente de alto nivel contaminante.

Figura 4.1 Diagrama de bloques para la producción de bioetanol

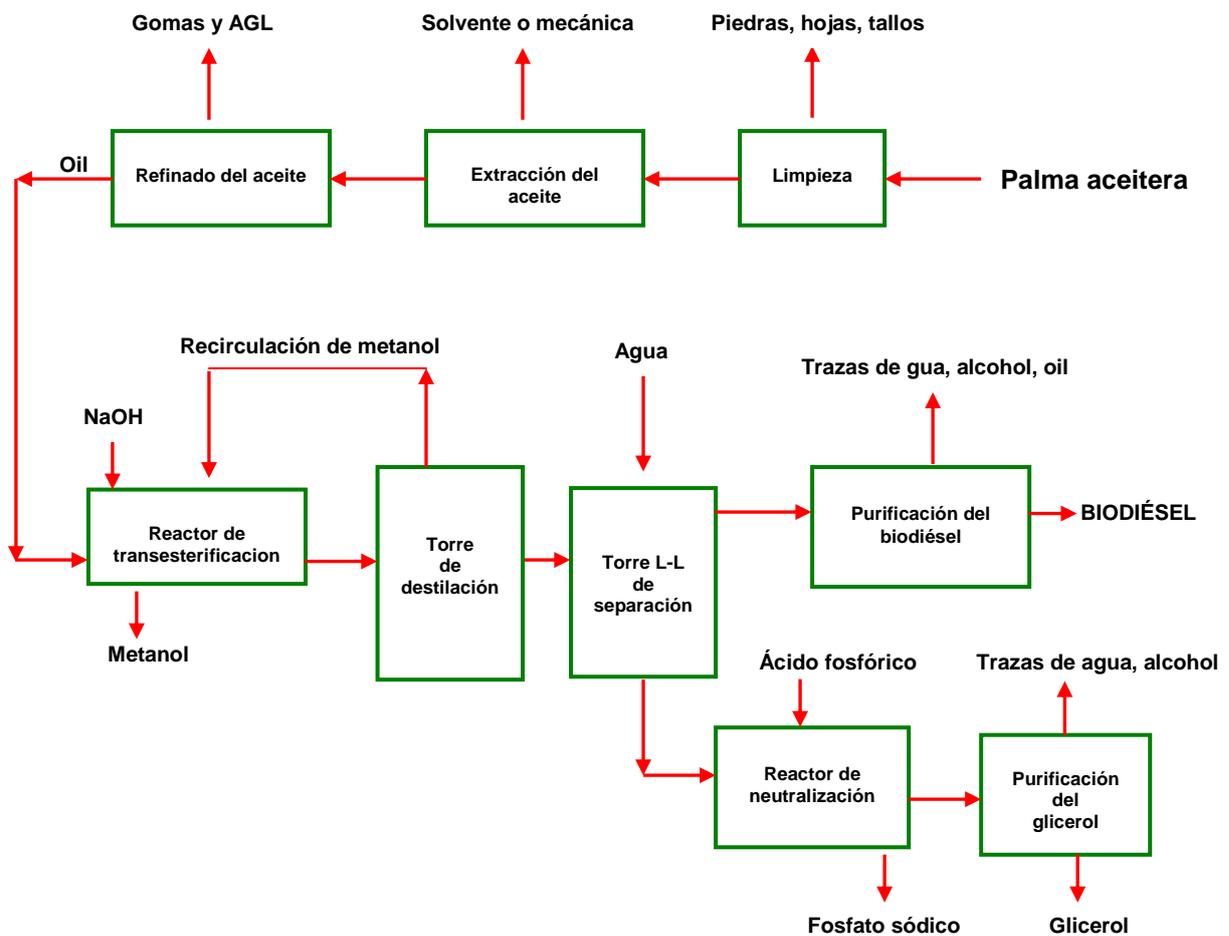


Fuente: Secretaría de Energía, 2006

La vinaza es rica en potasio ya que contiene entre 2.05 – 3.97 kg de óxido de potasio por tonelada de caña y contiene además entre 3.53 – 8.31 kg de carbono que puede emplearse para producir biogas o para ser quemado previa concentración. Esto puede producir un extra de energía y en el caso de recuperarse el potasio, representaría un ingreso por la comercialización del potasio. Es posible entonces definir a la cachaza y a la vinaza como subproductos si se emplean convenientemente.

Los efluentes generados para la producción de biodiésel son cinco, **Fig. 4.2**, el primer efluente es el generado en la etapa de extracción del aceite crudo y este dependerá del tipo de extracción elegida, ya sea mecánica o por solvente; la alternativa de extracción mecánica o aplastamiento, los residuos generados principalmente son sólidos, mientras que la extracción por solvente el efluente generado será el solvente que se somete a recuperación para recircularlo en el proceso de extracción.

Figura 4.2 Diagrama de bloques para la producción de biodiésel



El segundo efluente se genera en el refinado del aceite crudo, en donde las gomas, insolubles en aceite pueden ser separadas por sedimentación, filtración o centrifugación. Mientras que los ácidos grasos libres (AGL) pueden ser eliminados por esterificación ácida o neutralización. El tercer efluente, es el fosfato sódico, generado en la reacción de neutralización, entre el hidróxido de sodio y el ácido fosfórico, etapa previa para la purificación del glicerol. El cuarto efluente está constituido por agua y alcohol, obtenido de la torre de purificación de la glicerina. Y el quinto son los componentes que no reaccionaron en el reactor de transesterificación, como es el alcohol y el aceite, así como cierta cantidad de agua, obtenidos en los fondos de la torre de destilación para la purificación del biodiésel.

4.3 Balance de energía

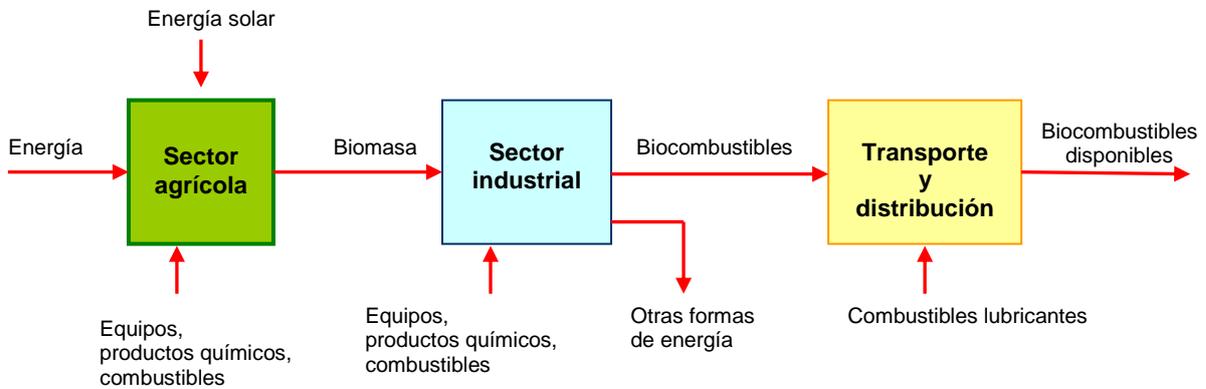
La cantidad de energía o balance de energía es otro factor importante en un estudio de factibilidad ambiental para la producción de biocombustibles, ya que permite evaluar tres variables: la cantidad de energía consumida para producir el biocombustibles, la cantidad de energía contenida en el producto final del bioenergético y la calidad en el uso del biocombustibles, que resulta comparado a la calidad del combustible fósil. Algunas investigaciones sugieren que el proceso toma tanta o más energía de origen fósil (en las formas de gas diesel, natural y de carbón) para crear una cantidad equivalente de energía bajo la forma de biocombustible.

4.3.1 Energía consumida en la producción de biocombustibles

Para visualizar de manera escueta el balance energético para la producción de biocombustibles, se ha expuesto en tres bloques, como se ilustra en la **Figura 4.3**.

El primer bloque es el sector agrícola o etapa agrícola. En este bloque se considera la producción de materia prima del proceso (biomasa), en donde se contabiliza como insumos energéticos tanto al combustible empleado en las tareas de siembra, cultivo, recolección y transporte de la biomasa producida hasta la planta de procesamiento, como la energía que demandó la construcción de los equipos industriales empleados en esta etapa y en la fabricación de los fertilizantes y otros productos químicos usados en la producción agrícola.

Fig. 4.3 Esquema propuesto del balance de energía para la producción de biocombustibles



En el segundo bloque, correspondiente a la etapa industrial o de transformación de la biomasa en biocombustibles. Se considera todas las incorporaciones de energía que requiera el proceso, como son: la energía necesaria para la elaboración de los productos químicos que el proceso pudiera demandar, y la energía empleada en la fabricación y mantenimiento de los equipos industriales. En este caso, es necesario considerar todas las formas posibles de energía que ingresen a la planta donde se lleva a cabo la transformación de la biomasa.

La tercera etapa del proceso, considera la energía de transporte del biocombustible hasta los centros de distribución a los usuarios finales. Sin embargo, por razones prácticas se discriminara esta última etapa y se presentara el balance de energía considerando los dos primeros bloques.

Continuando con el esquema del balance de energía presentado anteriormente, el balance para la producción de etanol a partir de caña de azúcar es sumamente positivo. Como se indica en la **Tabla 4.1**, la energía que puede producir una tonelada de tallos de caña y 180 kg de Residuos Agrícola de Cosecha (RAC), que bien manejados constituyen un buen combustible para las calderas de una destilería de bioetanol de caña. Se puede producir no solo 85 litros de bioetanol anhidro, sino también 142,9 Kw a partir de cogeneración usando como combustibles el bagazo y los RAC. Todo eso equivale a 552.130 Kcal/ton de tallos de caña [4].

Tabla 4.1. Balance de energía en la producción de bioetanol

ENERGIA PRODUCIBLE			
	Alcohol	Bagazo	RAC
Rendimiento	85 litros	300 kilos	180 Kilos
		142.9 Kw/Tc	
Kcal/ton caña	429250	122880	
TOTAL	552130 Kcal/ton caña		
ENERGÍA CONSUMIDA			
	Sector agrícola	Industria	Total
caña	55733 Kcal/ ton	11841 Kcal/ ton	69356 Kcal/ton caña
BALANCE = 552130 Kcal/ton / 69356 Kcal/ton caña = 7.96			

Fuente: Secretaria de Energía, 2006 [4]

La energía que demanda esa producción, sin considerar la energía a emplear en el transporte hasta las bocas de expendio, es de 55.733 Kcal/ton en el sector agrícola y 11.841k Kcal/ton en la etapa industrial, con valores en destilería. Todo esto indica que se obtienen 7,96 unidades de energía por cada unidad consumida en el proceso para las condiciones enunciadas. Este valor es muy importante y se considera de los mejores entre los que puede lograrse en procesos empleando otras especies vegetales para producir biocombustibles [4].

El balance energético del biodiésel, considerando la diferencia entre la energía que produce 1 Kg. de biodiésel y la energía necesaria para la producción del mismo, desde la fase agrícola hasta la fase industrial es positivo al menos en de 30%. Por lo tanto, desde el punto de vista energético no agota los recursos de la naturaleza [2].

4.3.2 Cantidad de energía contenida en el bioenergético

El etanol, combustible oxigenado, tiene una mayor "calor latente de vaporización" que la gasolina y puede contribuir a reducir la temperatura de combustión (para ayudar a reducir los NOx); además, el efecto "solvente" (limpia los depósitos de la cámara de combustión) podría ayudar a evitar el aumento de NOx con la acumulación de millas o incluso reducir NOx después de la limpieza haya finalizado [12].

Tabla 4.2 Comparación de propiedades de Gasolina-Etanol

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
Poder Calórico inferior	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32,180	22,350
	Kg/litro	0,72-0,78	0,792
Octanaje RON (Research Octane Number)	-	90-100	102-130
Octanaje MON (Motor Octane Number)	-	80-92	89-96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330-400	842-930
Relacion aire/combustible estequimétrica		14,5	9,0
Presión de vapor	kPa	40-65	15-17
Temperatura de ignición	C	220	420
Solubilidad en agua	% en volumen	0	100

Las principales ventajas que presenta el etanol en gasolinas son: reduce las emisiones de CO₂, es mayor el índice de octano, es menos inflamable, reduce las emisiones de CO cuando se usa como aditivo y tiene baja toxicidad, **Tabla 4.2** [4].

Tabla 4.3 Comparación de propiedades de Diesel-Biodiésel.

Parámetro	Unidad	Diesel	Biodiésel
Número de cetano	-	54.1	> 51
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	2.7	3.5-5.0
Contenido de agua	mg/kg	64	<500
Número de ácido	mg KOH/g	-	<0.5
Contenido de metanol	% masa	-	<0.20

En general las ventajas que presenta el biodiésel, respecto al diesel, son: la mejora en lubricidad, reduce las emisiones de Hidrocarburos (HC) y CO, así como de material particulado y tiene mayor punto de inflamación, **Tabla 4.3** [12].

4.3.3 Calidad en el uso de biocombustibles

La experiencia de Brasil, a gran escala, en mezclas de etanol con gasolina desde 1977, y con motores que operan con etanol puro indican los importantes beneficios para el medio ambiente. Según datos reportados por la Secretaria de Energía, la flota automotriz Brasileña, de 1978 a 2004, muestran que el uso de motores de etanol puro y mezclas de etanol con gasolina (E22), ha producido importantes reducciones en emisiones de CO, HC y NOx de 1980 a 1994.

Independientemente de los avances tecnológicos aplicados por la industria del automóvil y tecnologías para el control de emisiones los vehículos de etanol puro (E-100) reducen más las emisiones de CO, NOx e HC de los vehículos que utilizan la mezcla de etanol con gasolina (E-22). Según datos presentados por la Secretaria de Energía en 2006, muestra que en Brasil, para vehículos de la misma etapa tecnológica, el uso de E-22 en lugar de gasolina pura, para la toda la flota, reduce las emisiones de CO (- 39%) y de HC (- 33%). Sin embargo, NOx aumenta un 10%. El mismo estudio muestra que el etanol puro (anhidro) presenta menos CO (-65%), menos de HC (58%) y ningún cambio en cuanto a los NOx, con respecto a la utilización de gasolina [4].

Las emisiones de NOx pueden variar sustancialmente en función de diseño de los vehículos, las características del motor y calibración, de control de emisiones de la tecnología, el mantenimiento y las condiciones de funcionamiento del vehículo.

En la **Tabla 4.4** se muestran las emisiones contaminantes que se reducen en la combustión de bioetanol E100 y E22 con respecto a la gasolina, según estudio realizado en Australia [4]:

Tabla 4.4 Reducción de emisiones de contaminantes con el uso de bioetanol

Tipo de emisión	E100 (%)	E22 (%)
Hidrocarburos	-65	-33
Monóxido de Carbono (CO)	-58	-39
Óxidos de Nitrógeno	0	+10

Diferentes estudios han demostrado que el biodiésel reduce substancialmente la emisión de partículas sólidas menores a 10 micrones (PM10), monóxido de carbono (CO) y óxidos de azufre (SOx) y partículas contaminantes de la atmósfera. (Tabla 4.5). Al ser un combustible oxigenado, el biodiésel tiene una combustión más completa que el diésel, mejorando por eso la composición de las emisiones. El biodiésel contiene, aproximadamente un 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre [11].

Tabla 4.5 Reducción de emisiones de contaminantes con el uso de biodiésel

Tipo de emisión	B100 (%)	B20 (%)
Hidrocarburos totales sin quemar	-68	-14
Monóxido de Carbono (CO)	-50	-13
Partículas en suspensión	-40	-8
Óxidos de Nitrógeno	+6	+1

El biodiésel se degrada cuatro veces más rápido que el diesel convencional. Por eso, al mezclar el diesel con biodiésel se acelera la biodegradabilidad del combustible. Por ejemplo, el B20 se degrada dos veces más rápido que el diesel solo. El B100, en 28 días se degrada entre el 85 y 88% en agua. Esta característica convierte al biodiésel en el combustible ideal para embarcaciones fluviales, especialmente en zonas acuáticas sensibles y/o protegidas.

En general, varias investigaciones reportan que el uso de biocombustibles produce importantes reducciones en emisiones de partículas de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos, principalmente.

Conclusiones y Recomendaciones

Las especificaciones obtenidas en la simulación, realizada con HYSYS, muestran que las propiedades del etanol anhidro, cumple con los requerimientos de calidad del estándar ASTM D-6730, con excepción de la viscosidad cinemática para el proceso de biodiésel, esto se debe posiblemente al aceite y alcohol que se utilizó, ya que las propiedades físicas y químicas del biodiésel dependen directamente del aceite o grasa del cual provengan y del alcohol que se emplee para su elaboración, a esto se suma que en HYSYS no se especifica la temperatura a la que se encuentra esta propiedad. Sin embargo en otras propiedades, el proceso simulado cumple con la Norma Europea EN 14214 que es, en general, más exigente en cuanto a requerimientos de calidad que el estándar ASTM D-6751.

El análisis económico permitió analizar los procesos individualmente, y por tanto se concluye que la producción de biodiésel es rentable aún en el supuesto que la materia prima, aceite de palma africana, aumente su precio un 20%, de \$452.5 dólares por tonelada, con valores positivos de Tasa Interna de Retorno de 146.7% y Valor Presente de \$35,511,839 dólares. En tanto, la producción de etanol anhidro no es un proceso rentable pues el costo de materia prima, caña de azúcar, incrementa significativamente los costos de producción y por tanto, en los flujos de caja se muestra como los gastos superan a los ingresos pues el precio de venta del biocombustible es de \$8.2 pesos por litro mientras que el proceso simulado en este trabajo presenta un costo final del producto de \$57 pesos por litro.

El análisis de sensibilidad establece que la principal variable que determina la rentabilidad del proceso es el precio de la materia prima. Éste análisis también permite asegurar que el método de Turton es robusto y con un rango de exactitud aceptable.

Existen alternativas para producir etanol económicamente factible, como lo es en principio considerar que el precio de la materia prima represente el 50% del costo total de producción del biocombustible. Esta idea la cumple la biomasa lignocelulosa, teóricamente ya que no existen plantas que operan con este esquema de rendimiento de materia prima, sin embargo se realizó la evaluación del proyecto a partir de los flujo de efectivo obteniendo resultados con valores de TIR y VP positivos aún en el supuesto que la materia prima incrementa su precio un 30%, de \$4.37 pesos por litro, por lo que con este precio puede competir con el precio de la gasolina Magna de \$8.36 pesos por litro.

Otra alternativa para hacer el proceso de bioetanol rentable y lograr abastecer el consumo de combustibles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), es la mezcla de gasolina-etanol, sin embargo esta opción no es viable económica y técnicamente, a pesar de que se ha planteado en varias investigaciones realizadas en México. Pues la mezcla de gasolina-alcohol presenta cambio en las propiedades del mezclado y se requiere mayor cantidad de volumen de etanol, además de otros componentes, para obtener el porcentaje de oxígeno requerido lo que incrementa el costo de producción del combustible. Las mezclas recomendadas, sin modificación al motor, son hasta de E10 (10% de bioetanol y el 90% de gasolina). Sin embargo, el alcohol solo actuaría como oxigenante de la gasolina por el volumen que aportan al combustible por lo que estaría compitiendo con el éter metil terbutílico y éter metil teramílico, conocidos por sus siglas en inglés como MTBE y TAME, respectivamente, y que son utilizados convencionalmente como oxigenantes en las gasolinas Magna y Premium. La comparación en costo es significativamente mayor, pues en promedio, producir oxigenantes tiene un costo de \$0.072 pesos por litro de gasolina, mientras que el precio del etanol anhidro es de \$8.2 pesos por litro, sin considerar el precio de la gasolina para la mezcla, lo que incrementaría el costo de inversión para impulsar el uso de mezclas de combustibles.

El proceso diseñado produce 98.5 millones de litros al año (1.7 Mbd) de etanol anhidro lo que contribuye aproximadamente al 1% del consumo de gasolina de la zona metropolitana del país con ventas de aproximadamente 37.8 millones de litros diarios. El proyecto desarrollado es modular y para que sea significativo se pueden instalar diez unidades con una producción aproximada de 39 Mil barriles diarios de bioetanol y biodiésel.

El escenario de satisfacer la demanda de gasolinas importadas de 49 millones de litros diarios (308 Miles de barriles diarios), considerando el precio del etanol anhidro de \$8.2 pesos por litro se tendría un erogación de 402 millones de pesos, sin embargo hay

que considerar que hay una gran posibilidad de disminuir el costo de producción al aumentar la producción del biocombustible. Además de las ventajas ambientales que tiene el uso de biocombustibles en el sector transporte, como son: la reducción en emisiones de partículas causantes del efecto invernadero, son biodegradables y no son tóxicos.

El proceso de biodiésel es rentable por lo que es recomendable iniciar en la producción para compensar el diesel importado. En tanto el etanol anhidro no es rentable a partir de la caña de azúcar, a pesar de que en varios estudios realizados en México optan por esta materia prima, sin embargo podría trabajarse de manera conjunta con ingenios azucareros para optimizar el proceso y mejorar el costo de producción, dado que la caña de azúcar tiene un buen rendimiento, se cuenta con la tecnología y se conoce el proceso. Existen otras opciones para satisfacer la demanda nacional de gasolina, sin embargo el análisis económico muestra que el alcohol anhidro como sustituto de la gasolina no es viable económicamente pues el precio del alcohol anhidro no compite con el precio de la gasolina de \$8.36 pesos. Es imperioso iniciar en la producción de biocombustibles ya que en algunos años la extracción y refinación del crudo se elevará considerablemente y finalmente, terminará por agotarse.

Anexo A

Balace de materia para producir 108 millones de litros de bioetanol, a partir de la caña de azúcar.

		FERMENT	LAVADO CO2	1a	AGUA	CO2	A-FERMENT
Fracción Vapor		0.0277	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura	°C	21.64	21.64	21.64	25.0	21.85	21.49
Presión	kPa	101.3	101.3	101.3	3.245	100	100
Flujo Molar	Kgmol/h	5980	165.7	5815	5.0	165.6	5.016
Flujo Masico	Kg/h	1.164E+05	7192	1.092e+05	90.08	7188	94.18
		VINAZAS	V1	A_REC	BIOETANOL	VINAZAS2	A_DESH_
Fracción Vapor		0.0	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0436
Temperatura	°C	99.69	67.8	67.8	67.62	99.41	78.0
Presión	kPa	101.0	101.0	101.0	100.0	100.0	101.0
Flujo Molar	Kgmol/h	5600	8.076e-03	214.6	204.6	9.995	102.3
Flujo Masico	Kg/h	1.009e+05	0.3358	8324	8144	180.1	4072
		A_DESH_1	BIOCOMB	R1_DESH	L1_DESH	R2_DESH	L2_DESH
Fracción Vapor		0.0435	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0
Temperatura	°C	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0	78.0
Presión	kPa	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0
Flujo Molar	Kgmol/h	102.3	195.7	4.459	97.83	4.459	97.83
Flujo Masico	Kg/h	4072	7853	182.9	3889	182.9	3889
		A_DESHI_					
Fracción Vapor		0.0436					
Temperatura	°C	78.00					
Presión	kPa	101.0					
Flujo Molar	Kgmol/h	204.6					
Flujo Masico	Kg/h	8144					

Anexo B

Balance de materia para producir 125 millones de litros de biodiesel, a partir del aceite de palma y metanol, en presencia de catálisis básica.

		OIL	101A	101B	NaOH	102A	102B
Fracción Vapor		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura	°C	25.0	25.37	60.0	25.0	25.0	25.14
Presión	kPa	101.3	400	400.0	101.3	101.3	400
Flujo Molar	Kgmol/h	13.07	13.07	13.07	2.9	42.99	42.99
Flujo Masico	Kg/h	1.158E+04	1.158e+04	1.158E+04	116.0	1401	1401
		103	V1	104	201	202	203
Fracción Vapor		0.0	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura	°C	43.08	60.0	60.0	63.2	174.5	60.0
Presión	kPa	400	400	400	96.33	106.3	110.0
Flujo Molar	Kgmol/h	81.32	0.0	94.39	38.32	56.07	56.07
Flujo Masico	Kg/h	2629	0.0	1.42e+04	1228	1.298e+04	1.298e+04
		AGUA	301	301A	201A	1101	METANOL
Fracción Vapor		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura	°C	22.0	59.08	60.0	63.35	63.35	25.0
Presión	kPa	101.3	101.3	101.3	400	400	101.3
Flujo Molar	Kgmol/h	8.326	55.0	38.67	38.32	38.33	40.09
Flujo Masico	Kg/h	150	1.235E+04	1.162E+04	1228	1228	1285
		H3PO4	V2	303	301B	302	305
Fracción Vapor		0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura	°C	25.0	60.1	60.0	60.0	60.0	603.0
Presión	kPa	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
Flujo Molar	Kgmol/h	1.000	0.0	25.72	16.33	9.392	25.72
Flujo Masico	Kg/h	98.0	0.0	1507	729.2	778.1	1444

		306	304	GLYCEROL	501	401	BIODIESEL
Fración Vapor		0.0	0.0	0.0	0	0.9999	0.0
Temperatura	°C	60.76	60.10	184.1	51.6	157.5	157.2
Presión	kPa	101.3	101.3	40.0	30.0	20.0	20.0
Flujo Molar	Kgmol/h	1.0	26.72	13.64	12.09	0.5230	37.6
Flujo Masico	Kg/h	161.7	1605	1194	250.0	12.11	1.114e+04
		402	202A				
Fración Vapor		0.0077	0.0				
Temperatura	°C	157.5	174.5				
Presión	kPa	30.0	110.0				
Flujo Molar	Kgmol/h	0.5464	56.07				
Flujo Masico	Kg/h	469.9	1.298e+04				

Anexo C

Lista de equipo para el tratamiento de la materia prima, caña de azúcar, para la producción de bioetanol.

Lista de equipo para el tratamiento de la caña de azúcar			
Código	Equipo	Tipo	Costo de equipo (USD)
Reactores			
F-301	Tanque fermentador (4)	Tanque atmosférico, API	2,467,000
F-300	Tanque fermentador (4)	Tanque atmosférico, API	2,467,000
Recipientes			
T-102	Tanque clarificador	Tanque	135,000
T-101	Tanque del inculo	Tanque vertical	100,000
Cambiadores de calor			
H-200	Enfriador del clarificador	Tubos y coraza	24,000
H-300	Enfriador del Fermentador	Tubos y coraza	41,000
H-301	Cambiador de calor entrada al fermentador	Tubos y coraza	70,900
H-302	Enfriador del Fermentador (4)	Tubos y coraza	76,300
H-310	Enfriador del Fermentador (4)	Tubos y coraza	24,000
Equipo mecánico			
P-101	Bomba de la tabla de lavado (2)	Centrifuga	60,000
P-13	Bomba de alimentación al fermentador (2)	Centrifuga	98,800
P-300	Bomba de recirculación del fermentador (2)	Centrifuga	48,000
P-301	Bomba de recirculación del fermentador (2)	Centrifuga	48,000
P-302	Bomba de recirculación del fermentador	Centrifuga	72,000
Otros			
M-106	Estructura de concreto		450,600
M-104	Tabla de lavado (2)		208,000
M-105	Molino (4)		1,208,000
C-101-102	Banda transportadora		300,000
C-104	Banda transportadora (2)		120,000
A-101	Agitador del tanque del inculo		25,300
A-300	Agitador del fermentador (4)		98,400
A-301	Agitador del fermentador (4)		98,400
S-205	Filtro		490,000
R-101	Trituradora		400,000
TOTAL			9,130,700

Anexo D

Lista de equipo para el tratamiento de la materia prima, Palma africana, para la producción de biodiesel.

Lista de equipo para el tratamiento de la palma africana			
Código	Equipo	Tipo	Costo de equipo (USD)
Recipientes			
TA-100	Tanque de separación	Tanque vertical	100,000
TA-101	Tanque de mezclado	Tanque	150,000
Cambiadores de calor			
E-100	Cambiador de calor	Tubos y coraza	70,000
Equipo mecánico			
P-100	Bomba a la entrada del Tanque de separación	Centrifuga	50,000
P-101	Bomba a la salida del Tanque de separación	Centrifuga	50,000
Otros			
M-106	Estructura de concreto		450,600
M-104	Tabla de lavado (2)		208,000
A-101	Agitador del tanque del mezclado		20,000
B-100/101/102/103	Banda transportadora (4)		240,000
CR-100	Cribado		200,000
EX100	Extrusora		350,000
PT-100/101	Prensa de tornillo (2)		500,000
FB-101/102	Filtro (2)		600,000
TOTAL			2,988,600

Anexo E

Estimación de costo de los equipo para el tratamiento de la materia prima producción de bioetanol y biodiesel, utilizando la regla de seis décimos o exponencial.

Exponencial o de los seis décimos.

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^n$$

Donde:

C_2 = Costo de la planta nueva

C_1 = Costo de la planta de referencia

Q_2 = Capacidad de la planta nueva

Q_1 = Capacidad de la planta de referencia

n = Exponente

Datos:

Nombre del equipo y código: Mezclador NaOH-Metanol, MX-100

Material: Acero al Carbón

$C_1=73,100$ dólares

$Q_1=1010$ kg/h

$Q_2=1401$ kg/h

$n=$ este valor sé tomo del índice de costos de Nelson-Farra, del apartado de bombas, compresores, etc, para el 2005, año en el que se cotizo el costo del equipo de referencia, con un valor de 1,721.8 y el índice actual del 2009 es de 1,791.7 el cociente de estos valores da un resultado de 0.96.

Por tanto:

$C_2= 100,000$ dólares

Anexo F

Estimación de costo de los equipo para la producción de bioetanol y biodiesel, utilizando la herramienta "Aspen Icarus".

The screenshot displays the Aspen HYSYS 2006.5 interface. The main window shows a process flow diagram (PFD) for biodiesel production. The diagram includes several units: MIX-100 (mixer), P-101 (pump), ADJ-1 (adjuster), CRV-100 (column), T-201 (tower), and various pumps (P-100, P-102, P-103) and heat exchangers (E-100, E-1, E-P1, E-P2, E-P4). The flow starts with METANOL and NaOH entering MIX-100, followed by OIL entering P-100 and E-100. The process continues through several stages of mixing and separation.

The Cost Estimation window is open, showing the following results:

Currency: USD			
Block	CRV-100		
	Flow Sheet	_other_object_	
	Equipment	CRV-100	
		Equipment Cost	86400.00
		Direct Cost	212600.00
	Total		
		Equipment Cost	86400.00
		Direct Cost	212600.00
Block	E-100		
	Flow Sheet	_other_object_	
	Equipment	E-100	
		Equipment Cost	31400.00
		Direct Cost	78200.00
	Total		
		Equipment Cost	31400.00
		Direct Cost	78200.00
Block	P-100		
	Flow Sheet	_other_object_	
	Equipment	P-100	
		Equipment Cost	5800.00
		Direct Cost	58100.00
	Total		
		Equipment Cost	5800.00
		Direct Cost	58100.00
Capital Cost:		1803040.32	
Operating Cost:		1206403.06	

Buttons: Estimate, Configuration, Select Objects, Results, Delete, Calculations Complete.

Bibliografía

- [1] Almada, Miguel. **“Análisis de la producción de materias primas para la elaboración de bioetanol y biodiesel, y de estos biocombustibles, presente y esperada hasta 2020, en países potencialmente proveedores de Chile”**. Estudio realizado durante una estadía profesional en la FAO. Diciembre de 2006.
- [2] Castro Paula, Coello Javier y Castillo Liliana (2007). **“Opciones para la producción y uso de biodiesel en el Perú”**. Soluciones practicas-ITDG. Agosto de 2007. Perú.
- [3] El mundo del Petróleo (2008). **“Las algas Florecen de nuevo”**. Febrero de 2008. Núm. 26.
- [4] Estudio de la Secretaria de Energía (2006). **“Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México”**. México, Noviembre 2006.
- [5] Demirbas, A. (2007). **“Progress and recent trends in biofuels”**. Progress Energy Combust. Sci., vol. 33 (2007), Pp 1 – 18.
- [6] Díaz Fernández A. (2006). **“Biodiesel como sustituto del gas natural o diesel en calentadores a fuego directo”**. Tesis Profesional (Ingeniería Química), Facultad de Química, UNAM. México, D.F.
- [7] Fundación Mexicana para la investigación agropecuaria y Forestal, A. C., Financiera rural y SAGARPA (2006) **“Generación comercial de bioetanol a partir de caña de azúcar”**. Plan de Negocio. México 2006.
- [8] Food and Agricultural Policy Research Institute, **FAPRI 2008**. U.S. AND WORLD AGRICULTURAL OUTLOOK. January 2008.
- [9] García Bustamante C. A. (2007). **“Escenarios de emisiones atmosféricas del etanol al usarse como oxigenante de las gasolinas en la ZMVM”**. Tesis de Maestría en Ingeniería (Energía y Ambiente), Centro de investigación en ingeniería, UNAM. Temixco, Morelos.
- [10] Gobierno del Estado de Guadalajara, SAGARPA, et. al (2008). **“Primer congreso internacional de biocombustibles”**. Mayo de 2008; Guadalajara.
- [11] Hernández Hipólito, P. y Mendoza Nieto, J. A. (2008). **“Esterificación de ácido oleico en condiciones de catálisis homogénea y heterogénea. Diseño experimental y análisis estadístico”**. Tesis Profesional (Ingeniería Química), Facultad de Química, UNAM. México, D.F.

- [12] Hill Jason, Nelson Erik, Tilman David, Polasky Stephen, and Tiffany Douglas (2006). ***“Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels”***. Departments of Ecology. June 2, 2006.
- [13] Horta Nogueira H. (2006). ***“Producción y utilización de Etanol y ETBE en México: situación actual y perspectivas”***. Proyecto BID ME-T1007. UNIFEI, Brasil. Reunión de Consultores, Agosto de 2006.
- [14] IMP y PEMEX Refinación (2008). ***“XIV Foro de avances de la industria de la refinación”***. México, D.F. Septiembre de 2008.
- [15] Innovaciones Tecnológicas agropecuarias (2008). ***“Insumos para la producción de biocombustibles. Estudio exploratorio”***. Estudio exploratorio N° PSA028/07. Argentina. Marzo de 2008
- [16] Martínez Hernández E. (2007). ***“Análisis de alternativas de proceso de producción de biodiesel”***. Trabajo de servicio social, Facultad de Química. UNAM. México, D.F, Enero de 2007.
- [17] Martínez M. Enrique (2007). ***“Energía, Medio Ambiente y Alimentos”***, Publicación Electrónica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, Enero de 2007.
- [18] Murray Danielle (2005). ***“El potencial del etanol: mirando más allá del maíz”***. Earth Policy Institute. Julio de 2005
- [19] SAGARPA, SENER, SEMARNAT, SE y SHCP (2008). ***“Estrategia Intersecretarial de los bioenergéticos”***. Documento de Trabajo. Mayo 2008.
- [20] SAGARPA (2007). ***“Programa Nacional de la Agroindustria de la caña de azúcar 2007-2012”***. México.
- [21] SAGARPA (2008). ***“Programa de producción Sustentable de Insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico”***. Documento de Trabajo. Mayo 2008.
- [22] Sánchez, J. Óscar y Cardona A. Carlos (2005). ***“Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas”***. Asociación interciencia, Caracas, Venezuela. Vol. 30 (Nov-2005). No. 011, pp.671-678.
- [23] Secretaria de Energía (2006). ***“Balance Nacional de Energía 2006”***.
- [24] Secretaria de Energía (2007). ***“Programa sectorial de energía 2001-2006”***. Plan Nacional de Desarrollo. México, 2007.
- [25] Secretaria de Energía (2008). ***“Programa de Introducción de bioenergéticos”***. Documento de Trabajo. Mayo 2008
- [26] Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A., (2003). ***“Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes”***, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [27] Van Gerpen J. (2005). ***“Biodiesel processing and production”***. Fuel Processing Technology 86: 1097–1107.

- [28] Kafarov V., Ojeda K., Sánchez E. (2007) "**Diseño de producción conjunta biodiesel – bioetanol**". Revista Energía y Computación Vol. 15 No. 1 Junio de 2007. Pp. 9 – 14.
- [29] Zapata C.D., Martínez I.D., et.al. (2007). "**Producción de Biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos**". Dyna 2007, No. 151. Pp. 71-82.
- [30] Zapata C.D., Martínez I.D., et.al. (2007). "**Producción de Biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 2. Evaluación económica**". Dyna 2007, No. 151. Pp. 83-96.
- [31] Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., Kates, M. (2003). "**Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment**". Bioresource Technology 89. Pp. 1–16.
- [32] Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., Kates, M. (2003). "**Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis**". Bioresource Technology 90. Pp. 229–240.
- [33] PEMEX (2008). "**Anuario Estadístico 2008**".
- [34] PEMEX (2008). "**Estudio de viabilidad para construir una nueva refinería en México**". Julio 30, 2008
- [35] PEMEX Exploración y Producción (2008). "**Las reservas de Hidrocarburos de México**". Evaluación al 1 de Enero de 2008.
- [36] PEMEX (2009). "**Cómo tomó PEMEX la decisión de la localización de la nueva refinería, una secuencia de eventos**". Abril 14 de 2009.
- [37] www.biofuel-systems.com