



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

Producción de etanol como biocombustible a partir de
residuos vegetales no alimenticios

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

CARLOS ALVAREZ MACIEL

TUTOR PRINCIPAL:

M.I. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES, FACULTAD DE INGENIERÍA-UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

mayo 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. José Luis Fernández Zayas**
Secretario: **Dr. José Ángel De La Vega Navarro**
Vocal: **M. en I. Augusto Sánchez Cifuentes**
1er. Suplente: **Dr. Rodolfo Herrera Toledo**
2do. Suplente: **M. en I. Guillermo Sánchez Liévano**

Lugar donde se realizó la tesis: **Posgrado de Ingeniería, Facultad de Ingeniería,
Ciudad Universitaria, Cd. Mx.**

TUTOR DE TESIS:

M.I. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES

Firma

AGRADECIMIENTOS:

A Dios y a María de Guadalupe, por acompañarme en las buenas y en las malas.

A mi familia, por su paciencia y apoyo en todas mis actividades diarias.

A mis amigos, por ser siempre la chispa de energía (y la exergía) necesaria en la vida.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería, por abrirme siempre sus puertas de forma generosa para desarrollarme profesionalmente, exigiéndome sólo a cambio trabajo y estudio.

Al profesor Augusto Sánchez Cifuentes, por sugerirme y permitirme desarrollar este tema de tesis; muchas gracias por su enorme paciencia y apoyo en la terminación del mismo.

Al profesor Ángel De la Vega Navarro, por brindarme el mejor cauce de este tema que tanto interés despertó; gracias al excelente foro por usted presidido y al cual me invitó, esta tesis posee anexos.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas, por ser una luz y aspiración para mi desarrollo profesional; gracias por permitirme formar parte del proyecto que llevó a la Torre de Ingeniería a conseguir el Premio Nacional de Ahorro de Energía.

A Guillermo Sánchez Liévano, por ser siempre un amigo que se presentó en los momentos más necesarios de este proceso; muchas gracias por todo el apoyo brindado.

A los profesores Antonio Díaz y Agustín Texta, por ser los pilares que siempre me apoyaron y motivaron a emprender este noble proceso; muchas gracias por su ejemplo, sus sabios consejos y, sobre todo, su amistad.

A la maestra Virginia Corral y al Comité Académico del Posgrado de Ingeniería, muchas gracias por permitirme finalizar este proceso.

Al Conacyt y a México, por facilitar mis estudios de posgrado mediante el otorgamiento de una beca.

A todas las personas que se han involucrado en mi vida y que por razones de espacio me es imposible mencionar como se debe, muchas gracias por su apoyo y aliento.

Índice General

	Página
Índice General	1
Listado de Tablas	3
Listado de Figuras	4
Objetivo	7
Alcance	7
Justificación	7
Metodología de Investigación	9
<hr/>	
Capítulo 1) Introducción	10
Definición de Biocombustibles	11
Generación Cero	11
Primera Generación	12
Segunda Generación	12
Tercera Generación	13
Cuarta Generación	16
Etanol	16
Fuentes de Información	18
<hr/>	
Capítulo 2) Desarrollo del etanol como biocombustible	20
Introducción	21
Desarrollo del Etanol en Brasil	21
Desarrollo del Etanol en Estados Unidos	28
Desarrollo del Etanol Biocombustible en el Resto del Mundo	35
Comercio Internacional de Etanol como Biocombustible	39
Situación Actual del Etanol en México	41
Fuentes de Información	50
<hr/>	
Capítulo 3) Tecnologías de producción de etanol a partir de residuos vegetales no alimenticios	54
Material Lignocelulósico	55
Molienda	58
Sacarificación	59
1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)	60
2) Hidrólisis con ácido sulfúrico diluido (proceso NREL)	62
3) Explosión por vapor	64
4) Tratamiento con amoniaco	65
5) Tratamiento con cal	69
6) Tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno	69
7) Oxidación húmeda	70
8) Fraccionamiento con solventes orgánicos (proceso Organosolv)	71
9) Fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado	72
10) Fraccionamiento con líquidos iónicos	73
Hidrólisis Enzimática	75
Fermentación	76
Destilación	80
Fuentes de Información	85

	Página
Capítulo 4) Análisis energético de la producción de etanol	88
Selección de la Tecnología de Sacarificación del Material Lignocelulósico	89
Selección del Material Lignocelulósico como Insumo	94
Molienda del Material Lignocelulósico	96
Sacarificación del Material Lignocelulósico	96
1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)	97
3) Explosión por vapor	107
4b) Tratamiento con amoníaco: Proceso SAA	113
Fermentación de los Azúcares Producidos	121
1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)	123
3) Explosión por vapor	125
4b) Tratamiento con amoníaco: Proceso SAA	126
Destilación del Etanol Producido	127
Servicios Energéticos Auxiliares	137
Resultados del Análisis Energético de la Producción de Etanol	139
Fuentes de Información	141
Capítulo 5) Conclusiones	144
Análisis de Resultados	145
Consecuencias de los Resultados	146
Recomendaciones	154
Fuentes de Información	157
Capítulo 6) Anexos	159
Anexo 1. Verificación de la frase pronunciada por Henry Ford en 1925 (Coloquio de la Cátedra Extraordinaria Maestro José María Luis Mora del 26 de junio de 2009)	160
Anexo 2. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional (Cátedra Extraordinaria Maestro José María Luis Mora 2008-2009 de la Facultad de Economía, UNAM)	178
Anexo 3. Biocombustibles en México (Proyecto Santander-Universidad Autónoma de Madrid, España 2010)	222

Listado de Tablas

Tabla	Página
1.1 Biocombustibles de Primera Generación	13
1.2 Biocombustibles de Segunda Generación	14
1.3 Biocombustibles de Tercera Generación	14
1.4 Poderes caloríficos inferiores del etanol	17
2.1 Factores de emisión de gases de efecto invernadero de los motores Otto según tipo de combustible	27
2.2 Producción y consumo de etanol biocombustible en Europa	36
3.1 Líquidos iónicos disolventes de celulosa	75
4.1 Análisis técnico horizontal-vertical de las tecnologías de sacarificación de biomasa lignocelulósica	93
4.2 Composición química de los insumos lignocelulósicos para producción de etanol	95
4.3 Consumo energético en la molienda de los insumos lignocelulósicos	96
4.4 Densidad de los insumos lignocelulósicos	97
4.5 Consumo energético por unidad de masa en el proceso completo centrado en la hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (Proceso 1)	140
4.6 Consumo energético por unidad de masa en el proceso completo centrado en la explosión por vapor (Proceso 3)	140
4.7 Consumo energético por unidad de masa en el proceso completo centrado en el tratamiento con amoniaco (Proceso 4b)	140
5.1 Cantidad total de etanol producido por unidad de biomasa por tipo de insumo en las tres rutas tecnológicas analizadas	145
5.2 Consumo energético total por unidad de masa por tipo de insumo en las tres rutas tecnológicas analizadas	145
5.3 Ganancia energética de cada proceso de producción de etanol por tipo de insumo lignocelulósico	147
5.4 Matriz energética del proceso centrado en la hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (Proceso 1)	148
5.5 Matriz energética del proceso centrado en la explosión por vapor (Proceso 3)	148
5.6 Matriz energética del proceso centrado en el tratamiento con amoniaco (Proceso 4b)	149
5.7 Consumo energético para producir electricidad en México y factores de emisión de GEI de cada insumo	150
5.8 Emisión de GEI por energético introducido a los procesos de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica	151
5.9 Emisión de GEI por proceso de producción de etanol y por cada tipo de insumo lignocelulósico	152
5.10 Potenciales de calentamiento global (GWP) para los gases de efecto invernadero emitidos por la combustión, a un horizonte de 20 años	152

	Tabla	Página
5.11	Emisiones totales de gases de efecto invernadero emitidos durante el procesamiento de la biomasa lignocelulósica en cada proceso de producción de etanol	153

Listado de Figuras

	Figura	Página
1.1	Ejemplos de microalgas y de macroalgas con potencial de obtención de etanol como biocombustible de tercera generación	15
1.2	Estructura molecular del etanol	17
2.1	Regiones productoras de caña de azúcar y etanol en Brasil	23
2.2	Estados productores de etanol anhidro en Brasil	24
2.3	Estados productores de etanol hidratado en Brasil	24
2.4	Precios por unidad de energía del etanol anhidro y de la gasolina en Brasil	25
2.5	Consumo de gasolina y etanol en el sector transporte de Brasil	26
2.6	Consumo anual de etanol en el sector transporte de cada entidad federativa de Brasil	26
2.7	Emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte con motores Otto en Brasil	27
2.8	Estados productores de etanol en Estados Unidos	31
2.9	Precios por unidad de energía de la mezcla E85 y de la gasolina en Estados Unidos	32
2.10	Consumo de gasolina y etanol en el sector transporte de Estados Unidos	33
2.11	Consumo anual de la mezcla E85 en el sector transporte de cada estado de Estados Unidos	34
2.12	Emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte con motores Otto en Estados Unidos	34
2.13	Países productores y consumidores de etanol biocombustible actuales y futuros en el mundo	38
2.14	Consumo de etanol por región del mundo	39
2.15	Magnitud de los principales mercados de etanol en el mundo de acuerdo al consumo	40
2.16	Comercio internacional de etanol biocombustible	40
2.17	Plantas productoras y proyectos de producción de etanol en México	42
2.18	Proyectos de producción de etanol por insumo en México	42
2.19	Producción de insumos potenciales para obtener etanol en México	43
2.20	Estados productores de caña de azúcar en México	44
2.21	Estados productores de maíz en México	44

	Figura	Página
2.22	Estados productores de maíz amarillo en México	45
2.23	Estados productores de maíz blanco en México	45
2.24	Estados productores de maíz de color en México	46
2.25	Estados productores de sorgo en México	46
2.26	Estados productores de remolacha o betabel en México	47
2.27	Consumo de gasolina en México	48
2.28	Consumo anual de gasolina en el sector transporte en México por entidad federativa	48
2.29	Consumo estimado de oxigenantes de las gasolinas en México expresado como MTBE	49
2.30	Emisiones de GEI en el sector transporte con motores Otto en México	49
3.1	Estructura molecular de la celulosa	56
3.2	Estructura molecular de la hemicelulosa	56
3.3	Estructura molecular de la lignina	57
3.4	Diagrama de bloques del proceso global de conversión de la biomasa lignocelulósica en etanol	57
3.5	Molinos empleados para biomasa lignocelulósica	58
3.6	Azúcares fermentables obtenidos de la sacarificación de la biomasa lignocelulósica	59
3.7	Diagrama de flujo del proceso Arkenol	61
3.8	Diagrama de flujo del proceso NREL	62
3.9	Diagrama de flujo de la destoxificación con hidróxido de calcio	63
3.10	Diagrama de flujo de la destoxificación mediante intercambio aniónico	64
3.11	Diagrama de flujo del proceso de explosión por vapor	65
3.12	Diagrama de flujo del proceso ARP	66
3.13	Diagrama de flujo del proceso SAA	67
3.14	Diagrama de flujo del proceso AFEX	68
3.15	Diagrama de flujo del proceso de tratamiento con cal	69
3.16	Diagrama de flujo del proceso de tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno	70
3.17	Diagrama de flujo del proceso de oxidación húmeda	71
3.18	Diagrama de flujo del proceso Organosolv	72
3.19	Diagrama de flujo del proceso de fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado	73
3.20	Diagrama de flujo del proceso de fraccionamiento con líquidos iónicos	74
3.21	Bacterias productoras de etanol a partir de glucosa	76
3.22	Ruta Embden-Myerhof-Parnas para la producción de etanol en <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	77
3.23	Ruta Entner-Doudoroff para la producción de etanol en <i>Zymomonas mobilis</i>	79
3.24	Torre de destilación convencional	80
3.25	Proceso de deshidratación de etanol con benceno como agente de arrastre	82

	Figura	Página
3.26	Proceso de deshidratación de etanol con tricloroetileno como agente de arrastre	83
3.27	Proceso de deshidratación de etanol con una mezcla de etilenglicol y cloruro de calcio como agente de arrastre	84
3.28	Proceso de deshidratación de etanol mediante pervaporación	85
4.1	Sistemas de clasificación del riesgo por exposición a sustancias químicas	92
4.2	Etapas del proceso de hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)	98
4.3	Etapas del proceso de explosión por vapor	108
4.4	Etapas del proceso de tratamiento con amoníaco (proceso SAA)	113
4.5	Destilación convencional	128
4.6	Diagrama McCabe-Thiele para la destilación convencional de la mezcla etanol-agua	132
4.7	Diagrama Ponchon-Savarit para la destilación convencional de la mezcla etanol-agua	135
5.1	Balance global de energía y emisiones de gases de efecto invernadero para la transformación del insumo 3 (cultivos maderables de rápido crecimiento) en etanol vía el proceso 3 (explosión por vapor)	155
5.2	Balance global de energía y emisiones de gases de efecto invernadero para la transformación del insumo 3 (cultivos maderables de rápido crecimiento) en etanol vía el proceso 1 (hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado)	156

OBJETIVO

Proponer una o varias alternativas de obtención de etanol en México a partir de residuos vegetales agroindustriales no aprovechables en la producción de alimentos.

ALCANCE

Elaborar un estudio comparativo de obtención de etanol a partir de desechos vegetales de las industrias de la caña de azúcar, del maíz y de otros cultivos altamente demandados por la población mexicana.

JUSTIFICACIÓN

La explotación y utilización generalizada de combustibles fósiles durante los últimos dos siglos ha provocado un aumento en la concentración de anhídrido carbónico (CO₂) en la atmósfera terrestre, además de haber emitido partículas y sustancias contaminantes de la atmósfera, el océano y la tierra. Aunado a esta explotación, el tiempo natural de formación de estos recursos energéticos es mucho mayor a los tiempos de consumo por parte del ser humano, por lo cual se les considera finitos. Se ha observado una disminución considerable en las reservas mundiales de estos recursos, sin poderse vislumbrar nuevos yacimientos que permitan evitar el abatimiento de su disponibilidad en el mediano o largo plazo.

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

La producción de etanol es conocida por el ser humano desde hace varios milenios. Los egipcios producían cerveza y vino mediante la fermentación de granos de cebada y de uvas, respectivamente, desde hace más de cinco mil años. Otras civilizaciones, como la grecorromana en Europa y la mesoamericana en América, obtenían bebidas alcohólicas a partir de vegetales desde hace un par de milenios. El etanol era utilizado entonces sólo como bebida festiva y ritual, según la civilización. Con las revoluciones industriales de los siglos diecinueve y veinte, se le encontró al etanol un uso energético, además de profiláctico y como reactivo de proceso.

El etanol es una sustancia volátil, incolora y de olor característico, consistente en una cadena de dos átomos de carbono saturados de átomos de hidrógeno, y un grupo hidroxilo en uno de los carbonos. La cadena de carbono es la parte combustible y miscible con hidrocarburos, y el grupo hidroxilo facilita la combustión, además de darle su característica de solvente polar y miscibilidad con el agua.

La materia vegetal está constituida por diversos compuestos como el agua, sales minerales y por sustancias orgánicas, entre las cuales destacan los polisacáridos. La pared de las células vegetales está conformada por fibras de polisacáridos, los cuales son la celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos compuestos pueden ser transformados, mediante la acción química de otras sustancias o de microorganismos, en etanol. Debido a que el hombre puede cultivar plantas en una o dos temporadas anuales, la disponibilidad de este material es alta, por ende, la producción de etanol a partir de materia vegetal se da en tiempos mucho más cortos que la formación natural de recursos energéticos fósiles.

México es un país productor de petróleo, por lo cual su economía está basada en este recurso fósil. Sus reservas petrolíferas han disminuido en los últimos años y no ha habido descubrimientos importantes de yacimientos que permitan prolongar el status quo de la economía mexicana. Se hace necesaria una independencia del petróleo sólida y duradera, por esta razón en los últimos años el gobierno del país ha mostrado interés en fomentar la producción de etanol a partir de recursos vegetales. México cuenta con una gran variedad de cultivos potencialmente aprovechables en la nascente industria energética etílica. La caña de azúcar y el maíz son dos de los vegetales ampliamente cultivables en el país. La falta de inversión en el campo mexicano ha provocado una disminución en la producción de estas plantas y de otras más consumidas por los mexicanos. Esto ha provocado la creciente importación de maíz y otros productos agrícolas desde el extranjero, principalmente provenientes de Estados Unidos.

Brasil y Estados Unidos son dos países que han desarrollado tecnologías propias sólidas para la obtención de etanol a partir de productos vegetales. Desde hace más de veinte años, Brasil produce etanol a partir de los residuos de la caña de azúcar, y lo emplea con fines energéticos. En fechas recientes, Estados Unidos ha desarrollado y puesto en práctica tecnologías de obtención de etanol a partir de granos de maíz, como sustituto o aditivo oxigenante para combustibles derivados de petróleo. La desventaja de esta última tecnología es el desvío de cultivos alimenticios para satisfacer las necesidades energéticas de la población estadounidense. Este desvío produce, en países como México, cuya base alimentaria es el maíz y que lo importan de Estados Unidos, el aumento del precio del cereal conllevando un perjuicio económico en la sociedad.

El desarrollo de alternativas tecnológicas de obtención de etanol permitirá a México su independización energética del petróleo y gas natural. Además si estas alternativas no están basadas en la porción alimenticia de los cultivos vegetales de alta demanda alimentaria, con la implementación de estas tecnologías se evitará dañar la economía de la sociedad mexicana y, en general, se logrará un beneficio

a la macroeconomía del país al poderse establecer un mercado energético del etanol, ajeno a los problemas del mercado petrolero mundial.

Entre los retos que tiene el País para el uso masivo de la bioenergía se encuentra la necesidad de minimizar la competencia con otros usos del suelo y evitar la competencia con cultivos para alimentos, el de evitar la deforestación para el establecimiento de cultivos bioenergéticos y la necesidad de asegurar un índice energético positivo, así como de la mitigación de los “gases de efecto invernadero” (GEI). Es importante poner énfasis en la necesidad del uso de residuos y sistemas híbridos en primera instancia y de buscar que las ganancias se distribuyan socialmente.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para este estudio se realizarán las siguientes actividades:

- Adquisición de datos de producción de las industrias mexicanas de la caña de azúcar, de maíz y de cultivos de alta demanda.
- Investigación de tecnologías de producción de etanol a partir de biomasa.
- Análisis técnico-económico de cada una de las tecnologías.
- Selección de una o varias tecnologías de producción de etanol.
- Realizar el balance energético de cada tecnología de producción de etanol seleccionada.
- Elaboración de la propuesta de producción de etanol en México a partir de residuos vegetales no alimenticios.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se definen los biocombustibles y se les clasifica de acuerdo a sus materias primas y a las tecnologías empleadas en su producción, y se finaliza con el biocombustible objetivo de esta tesis que es el etanol.

Definición de Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión.

El párrafo anterior es una propuesta de definición de los biocombustibles, en la que se hace énfasis en la temporalidad de producción de la biomasa. Los combustibles fósiles como el carbón mineral y el petróleo son producto de la descomposición de ciertas biomazas (como plantas terrestres y árboles en el caso del carbón, y algas marinas en el caso del petróleo) durante miles o millones de años, proceso en el cual no intervino el ser humano. Como la materia que dio origen a los combustibles fósiles fue producida por seres vivos, podrían considerarse también como biocombustibles si el factor tiempo no es tomado en cuenta. Además, en el caso de los biocombustibles, la intervención del ser humano permite controlar las rapidezces de producción y consumo de estos recursos energéticos convirtiéndolos en renovables, lo que no sucede en el caso de los combustibles fósiles.

Como la finalidad de los biocombustibles es ser quemados para liberar su energía almacenada en forma química, se les utiliza mayoritariamente en el sector transporte para suplir parcial o totalmente a los combustibles fósiles. También se les emplea en el sector doméstico para la cocción de alimentos, la calefacción y la iluminación. En el sector industrial pueden suplir al diesel y al combustóleo en los equipos de proceso que requieran combustible.

A los biocombustibles también se les denomina “bioenergéticos” y, si la materia prima es biomasa de procedencia agrícola, “agrocombustibles”. Existen varios tipos de biocombustibles, a los cuales se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. Debido a los avances en la tecnología de transformación de la biomasa en combustibles, esta clasificación a su vez es realizada por generaciones.

Generación Cero

Consiste en el uso directo de la biomasa sin procesamiento alguno, mas que la sola recolección y el transporte de la misma por parte del ser humano. Ejemplos de esta biomasa son la leña, la paja de trigo, el rastrojo (desechos agrícolas) de otras plantas de cultivo, el estiércol del ganado y el carbón vegetal. Este tipo de energéticos ha sido utilizado por la humanidad desde hace varios miles de años, para la calefacción de los hogares, la cocción de alimentos y la iluminación interior y exterior de las edificaciones. Se les llegó a usar en las primeras fábricas inglesas durante la Primera Revolución Industrial, pero fueron sustituidos por carbón mineral, un combustible fósil, debido a que éste posee una densidad energética mayor a la biomasa. En la actualidad, en algunos países europeos y norteamericanos son

producidos pellets y briquetas de madera mediante la compresión de residuos forestales e industriales maderables, con fines energéticos. Aunque no son propiamente biocombustibles según la definición expuesta con anterioridad, hago mención de este tipo de combustibles para mostrar la base a partir de la cual surgieron histórica y tecnológicamente los biocombustibles.

Primera Generación

Algunos de los insumos son de procedencia agrícola y están conformados por las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Ejemplos de estas materias son el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de la remolacha o betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maíz, aceite de maní o cacahuate, entre otros. También se emplea como insumos a las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos.

Los biocombustibles son producidos empleando tecnología convencional como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios sólidos orgánicos). Los aceites vegetales puros y los aceites y grasas usados también son empleados de forma directa para fines energéticos, previa refinación. De todos estos procesos son obtenidos los biocombustibles de la tabla 1.1.

Las ventajas de estos biocombustibles son su facilidad de procesamiento, sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (con excepciones como en el caso del maíz, donde el balance global de estas emisiones durante su procesamiento es casi nulo) y un balance positivo en dichas emisiones, pero tienen como desventajas el desvío de recursos alimenticios hacia la producción de energéticos, con un consecuente incremento en los precios de los alimentos vegetales y animales, y una mayor demanda de suelo y agua para la agricultura, en perjuicio de los ecosistemas y las sociedades.

Segunda Generación

Los insumos son residuos agrícolas y forestales compuestos por celulosa (cadena polimérica de glucosa, principal carbohidrato usado en la producción de biocombustibles de primera generación), hemicelulosa y lignina (heteropolímeros amorfos que junto a la celulosa dan estructura a las plantas y conforman la biomasa "lignocelulósica"). Ejemplos de estos insumos son el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera, así como papel usado, desperdicios de la industria del papel, y otros desperdicios celulósicos industriales.

Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto que los de primera generación, y como ejemplos destacan la sacarificación-fermentación y el

proceso Fischer-Tropsch. Este último proceso también recibe los nombres de proceso GTL y proceso BTL, cuyas siglas en inglés provienen de “Gas-To-Liquids” y “Biomass-To-Liquids” respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. En la tabla 1.2 se enumeran y describen los biocombustibles obtenidos de estos procesos.

La ventaja principal en la producción de estos biocombustibles es la inexistencia de desviaciones de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético, pero su desventaja es la poca ganancia en disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el procesamiento de los insumos, respecto a los biocombustibles de primera generación.

Tercera Generación

Los insumos son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas (ver figura 1.1), a las cuales se les clasifica en macroalgas (algas marinas macroscópicas) y microalgas (algas microscópicas y cianobacterias). Algunos de estos cultivos energéticos son organismos genéticamente modificados y otros fueron desarrollados mediante una reproducción selectiva de los organismos con una mayor producción de carbohidratos o lípidos (aceites y grasas), además de tener un menor tiempo de crecimiento y una mayor resistencia a condiciones adversas (clima extremo, plagas y enfermedades).

Los procesos de obtención de estos biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo, sin embargo, se ha logrado producir biodiesel y etanol a nivel planta piloto. La tabla 1.3 presenta los procesos actuales de obtención de estos combustibles; la mayor parte de ellos son muy diferentes a los de segunda generación, aunque sus nombres sean semejantes.

Tabla 1.1. Biocombustibles de Primera Generación

Biocombustible	Descripción	Insumo	Proceso de producción
Metanol Etanol n-Butanol	Alcoholes de cadena lineal saturada, puros o hidratados	Azúcares de los jugos de caña de azúcar y remolacha, y de grano de maíz	Fermentación
Aceites puros	Aceites vegetales puros y aceites de desecho usados en la preparación de alimentos	Palma de aceite, semillas de girasol, soya, ricino, algodón, maíz y colza; coco, cacahuate, etc.	Extracción y refinación

Biocombustible	Descripción	Insumo	Proceso de producción
Biodiesel	Mezcla de ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos	Aceites vegetales puros, grasas animales y, aceites y grasas de desecho usados en la preparación de alimentos	Transesterificación
Biogás	Mezcla de metano (gas natural) y anhídrido carbónico (dióxido de carbono, CO ₂)	Desperdicios orgánicos sólidos (cáscaras de frutas, restos de comida, excremento, etc.) y lodos de las aguas negras	Digestión anaerobia
ETBE	Etil-terbutiléter	Etanol de biomasa	Síntesis química

Elaborado a partir de información de diversas fuentes.

Tabla 1.2. Biocombustibles de Segunda Generación

Biocombustible	Descripción	Insumo	Proceso de producción
Etanol	Alcohol alifático puro o hidratado	Bagazo de caña de azúcar, rastrojo de maíz, papel	Sacarificación y fermentación
Metanol Biodiesel Diesel BTL DME	Combustibles sintéticos (DME = Dimetiléter)	Residuos agrícolas y forestales	Proceso Fischer-Tropsch (gasificación y síntesis catalítica)
Biopetróleo	Mezcla de hidrocarburos, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, alcoholes y compuestos aromáticos	Residuos agrícolas y forestales	Pirólisis rápida
DMF	2,5-dimetilfurano	Fructosa y glucosa	Proceso Fischer-Tropsch (gasificación y síntesis catalítica)
Gas de síntesis	Mezcla de anhídrido carbonoso (monóxido de carbono, CO) e hidrógeno	Residuos agrícolas y forestales	Gasificación

Elaborado a partir de información de diversas fuentes.

Tabla 1.3. Biocombustibles de Tercera Generación

Biocombustible	Insumo	Proceso de producción
Etanol	Cultivos energéticos de origen agrícola	Sacarificación y fermentación*
	Microalgas	Proceso Algenol
	Macroalgas	Sacarificación y fermentación

Biocombustible	Insumo	Proceso de producción
Biodiesel	Cultivos energéticos de origen agrícola	Proceso Fischer-Tropsch (gasificación y síntesis catalítica)*
	Microalgas	Extracción de aceites y transesterificación
Biogás	Macroalgas	Digestión anaerobia
Hidrógeno Metano	Microalgas	Fotosíntesis anaerobia

*Procesos de segunda generación, pero los insumos son de tercera generación.
Elaborado a partir de información de diversas fuentes.

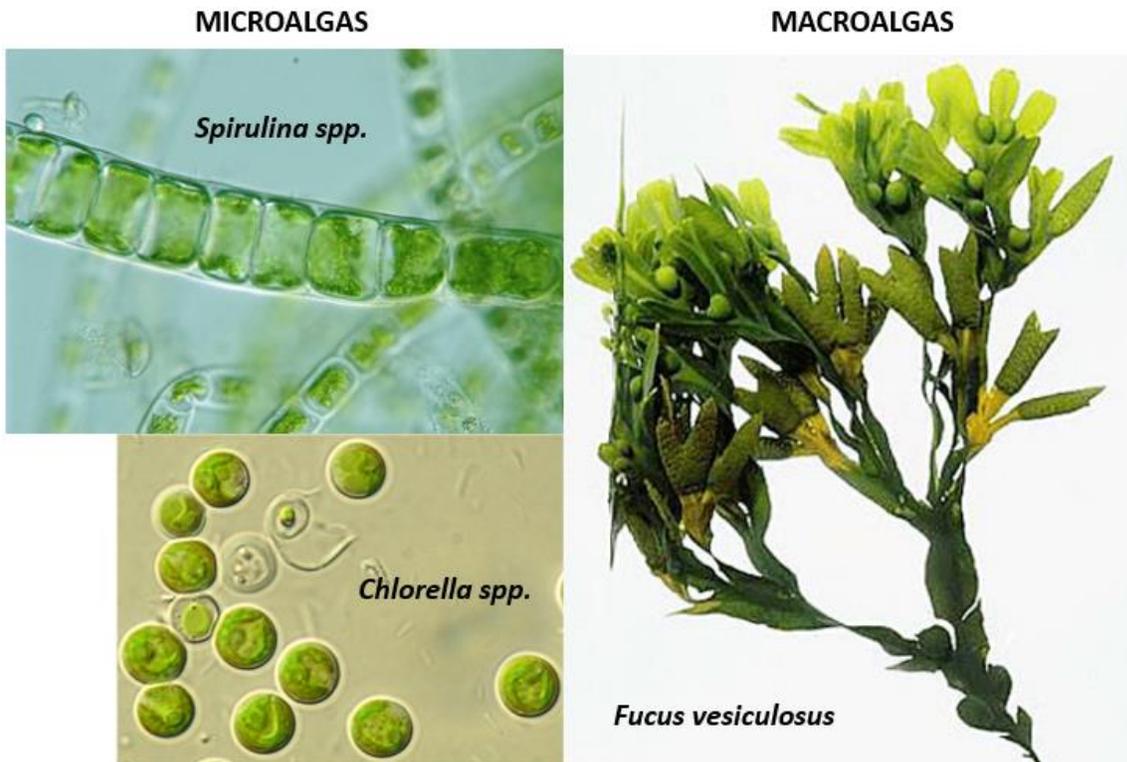


Figura 1.1. Ejemplos de microalgas y de macroalgas con potencial de obtención de etanol como biocombustible de tercera generación

Las ventajas de estos biocombustibles son el secuestro de anhídrido carbónico (CO₂) para la producción de los insumos y un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero, pero su principal desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas que pueden ser reproducidas en el mar o en desiertos y tierras dañadas por sustancias industriales. Para evitar esta desventaja se ha propuesto emplear tierras erosionadas y degradadas para sembrar cultivos energéticos. Otra de las desventajas es una posible contaminación genética y bioquímica hacia otras especies (vegetales o animales) por parte de los organismos genéticamente modificados.

Cuarta Generación

Los biocombustibles son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO_2) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles.

A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles.

Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, sólo se conocen las posibles rutas de síntesis de etanol y octano a partir de anhídrido carbónico, sin embargo, depende totalmente del desarrollo de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes.

Etanol

También conocido como “alcohol etílico” o “alcohol de caña”, es un alcohol de cadena lineal de dos carbonos saturada de hidrógeno, con un grupo hidroxilo (OH), cuya estructura molecular es mostrada en la figura 1.2. A semejanza del agua, forma puentes de hidrógeno intermolecularmente entre el oxígeno del grupo hidroxilo y cualquiera de los hidrógenos de las cadenas de carbonos, lo cual permite al etanol estar en fase líquida a temperatura ambiente. Debido a la presencia de la cadena de carbonos en su molécula, es un líquido más volátil que el agua y, por ende, puede separarse el etanol del agua aplicando un proceso de destilación. Además, estos carbonos y sus hidrógenos asociados pueden reaccionar exotérmicamente con el oxígeno del aire para producir óxidos de carbono (CO y CO_2) y vapor de agua, es decir, el etanol es una sustancia combustible. El etanol también forma puentes de hidrógeno con el agua, por lo que al tratar de separar ambas sustancias mediante una destilación simple, se obtiene una mezcla etanol-agua inseparable por este método; a esta mezcla se le denomina “azeótropo”. La separación completa de ambas sustancias es efectuada mediante diversas técnicas, destacando entre ellas la destilación azeotrópica y el filtrado molecular.

Durante la combustión del etanol se libera energía térmica que puede ser utilizada para diversos fines dependiendo de la cantidad de energía demandada como uso final. La energía liberada por el etanol al quemarse, propiedad conocida como “poder calorífico”, es función de su contenido de agua y del aprovechamiento de esta energía, la cual es absorbida por los gases de combustión (vapor de agua, CO y CO_2). Si el vapor de agua producto de la combustión es liberado junto con los otros gases (CO y CO_2), a la energía emitida por esta reacción se le llama “poder calorífico inferior”. Si el vapor de agua es condensado para extraerle su calor latente de vaporización, dicha energía recibe el nombre de “poder calorífico superior”. Los poderes caloríficos inferiores para el etanol puro (anhidro, sin agua) y el etanol

azeotrópico (hidratado, con 4% de agua en volumen, comúnmente conocido como “alcohol de 96”) son proporcionados en la tabla 1.4.

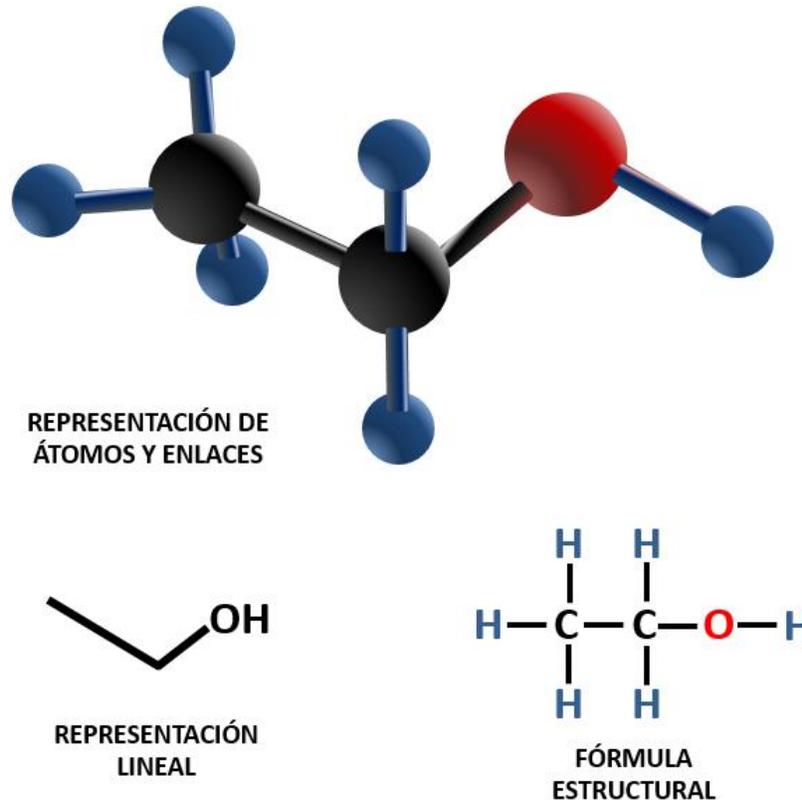


Figura 1.2. Estructura molecular del etanol

Tabla 1.4. Poderes caloríficos inferiores del etanol

Tipo de Etanol	Poder Calorífico Inferior	
	MJ/kg	MJ/L*
Anhidro	28.26	22.35
Hidratado	26.38	21.34

*A temperatura ambiente.

Fuente: Balanço Energético Nacional 2008 (Brasil), pág. 164.

Como estos poderes caloríficos son comparables, aunque un poco inferiores, a los de la gasolina (43.54 MJ/kg ó 32.22 MJ/L a temperatura ambiente) y del queroseno (43.54 MJ/kg ó 34.40 MJ/L a temperatura ambiente), el etanol normalmente es usado como sustituto parcial o total de estos combustibles líquidos derivados del petróleo y, por ende, es empleado en el sector transporte en países como Brasil y Estados Unidos, mayores productores y consumidores de etanol biocombustible (también llamado “bioetanol” por obtenerse de biomasa), y en el sector doméstico para cocción de alimentos, calefacción e iluminación.

Aunque el etanol también puede ser obtenido de materias primas inorgánicas como el carbón mineral (mediante el proceso Fischer-Tropsch) y del petróleo (a partir de derivados petroquímicos como el eteno, comúnmente conocido como etileno), la presente tesis se enfoca sólo a la producción de etanol a partir de materia orgánica, es decir, trata exclusivamente de bioetanol. A continuación expondré brevemente el desarrollo del uso de este tipo de etanol como energético en los sectores transporte y doméstico en Brasil, Estados Unidos y el resto del mundo, y haré énfasis en la situación actual respecto a este biocombustible en México.

Fuentes de Información

ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION (APEC); Biofuels:
<http://www.biofuels.apec.org/index.html>

BIOFUELS PLATFORM, Production of bioethanol in Switzerland (Suiza):
<http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/ch-bioethanol.php>

BIOFUELS RESEARCH ADVISORY COUNCIL; Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond; European Commission, Bélgica: 2006:
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels_vision_2030_en.pdf

BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM (Europa): <http://www.biofuelstp.eu/>

EUROPEAN BIOETHANOL FUEL ASSOCIATION, Statistics (Europa):
<http://www.ebio.org/statistics.php>

EUROPEAN COMMISSION'S MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY; Europe's energy position - present & future; European Commission, Bélgica: 2008:
http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2008_moe_maquette.pdf

INSTITUTO DE ESTUDOS DO COMÉRCIO E NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS; Potential and challenges in the international market for ethanol and bio-diesel; Seminar on Biofuels Study in Mozambique, 11-12 de julio de 2007: <http://www.iconebrasil.com.br/arquivos/noticia/1455.pdf>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Balanco Energético Nacional 2008; MME-EPE, Brasil: 2008

ROTHKOPF, Garten; A Blueprint for Green Energy in the Americas; Inter-American Development Bank, USA: 2007: <http://www.iadb.org/biofuels/>

SASOL (Sudáfrica): <http://www.sasol.com/>

SUSTAINABLE ENERGY IRELAND; A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuel in Ireland; SEI, Irlanda: 2009

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (Estados Unidos):
<http://www.energy.gov> , <http://www.doe.gov>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Energy Efficiency and Renewable Energy
(EERE) (Estados Unidos):
<http://www.eere.energy.gov/>

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA) (Estados Unidos):
<http://www.eia.doe.gov>

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL ETANOL COMO BIOCOMBUSTIBLE

En este capítulo se comentan los hitos y hechos más importantes en cuanto a la producción y uso del etanol haya realizado la humanidad. Se da énfasis a los países y regiones del mundo que más han contribuido a la industria y al comercio del etanol biocombustible.

Introducción

El etanol ha sido un bien de consumo muy apreciado por la humanidad desde su descubrimiento accidental hace más de cinco mil años, pero fue siempre ingerido como parte de alguna bebida alcohólica. Tras la invención de los primeros alambiques en la Edad Media, con los que se logró separar la parte alcohólica de las bebidas fermentadas y así obtener un líquido mayoritariamente compuesto por etanol, fue apreciada la cualidad combustible de esta sustancia. Así surgieron las lámparas de alcohol, únicos dispositivos cuyo objetivo era usar al etanol como combustible para poder iluminar los interiores de los edificios y, posteriormente, sus exteriores, creándose incluso los primeros sistemas de alumbrado público en las grandes ciudades de los siglos XVIII y XIX.

En 1896, Henry Ford fue uno de los pioneros en usar el etanol como combustible para el transporte, y lo empleó en su primer automóvil. A pesar de que posteriormente abandonó al etanol y lo sustituyó por gasolina, siempre fue un entusiasta del potencial de este biocombustible, denominado así pues a fines del siglo XIX e inicios del XX se le obtenía únicamente de materia orgánica recién cosechada. En 1925, en una entrevista con un reportero del periódico estadounidense New York Times, dijo: *“Hay combustible en cada trozo de materia vegetal que pueda ser fermentada. Hay suficiente alcohol en la cosecha anual de un acre de papas como para mover la maquinaria necesaria para cultivarlas durante cien años”*. Aunque de acuerdo a cálculos basados en datos recientes, efectuados por el autor de esta tesis (ver el anexo 1), indican que el etanol proveniente de fermentar la cosecha anual de un acre de papas sólo lograría mover la maquinaria agrícola en su cosecha durante 2.74 años, esta cifra habla de un excedente energético en la producción del biocombustible, el cual ha sido aprovechado para sustituir parcial o totalmente a la gasolina en el sector transporte durante el siglo XX e inicios del siglo XXI.

Desarrollo del Etanol en Brasil

El desarrollo de la tecnología de producción, aprovechamiento y uso final del etanol en Brasil tiene origen en el periodo 1905-1925 con las primeras pruebas del alcohol como combustible en vehículos automotores. A semejanza de Francia, en 1931 el gobierno estableció un decreto que obligaba a mezclar 5% de etanol en la nafta importada. En 1937, la producción de etanol ascendió a más de 50 millones de litros, cifra equivalente al 7% del consumo nacional de combustibles. En 1938, el decreto 737 extendió el mezclado de etanol a la nafta producida en Brasil con petróleo extranjero. Durante la Segunda Guerra Mundial, la producción de etanol creció hasta 77 millones de litros anuales y se alcanzaron niveles de mezclado con gasolina de 50% en 1943. Después de la Segunda Guerra Mundial, el empleo de estas mezclas casi no creció (mas no dejó de usarse) debido a los bajos precios del petróleo, aunque la totalidad de éste era importado.

En 1975, tras la primer crisis petrolera mundial, el gobierno brasileño organizó el Programa Nacional del Alcohol, conocido en portugués como Proálcool, cuyos objetivos principales eran:

- 1) Introducir en el mercado brasileño una mezcla combustible de gasolina con alcohol.
- 2) Incentivar el desarrollo de los motores con capacidad de funcionar quemando alcohol hidratado y mezclas de gasolina con alcohol anhidro.

En 1979, fueron lanzados al mercado interno dos tipos de etanol:

Anhidro (100% etanol), para mezclarse con la gasolina en proporciones que iban de 20 a 25% en volumen de etanol.

Hidratado (96% etanol, 4% agua), para uso directo en motores de ciclo Otto en automóviles modificados.

Ambos tipos de etanol fueron y son producidos mediante la fermentación del jugo de caña de azúcar, una tecnología de primera generación. A las mezclas de etanol con gasolina también se les conoce con el nombre de “gasohol”. En ese mismo año, la compañía automotriz Fiat comercializó el primer automóvil movido sólo por etanol de tipo hidratado.

El periodo de 1995 al 2002 se caracterizó por una serie de reformas legales y constitucionales en materia de desregulación paraestatal y de liberalización de precios de energéticos. Esto motivó la creación y fortalecimiento de un mercado interno para los biocombustibles, el cual compite con el de productos petrolíferos.

En 2003, tras una alianza estratégica efectuada entre el gobierno brasileño y compañías extranjeras ensambladoras de automóviles con instalaciones en Brasil, se comenzaron a fabricar vehículos con la capacidad de funcionar a base de cualquier mezcla de gasolina con etanol anhidro (desde un 0% hasta un 100% de etanol), a los cuales se les denominó “flex-fuel”. En mayo de ese año, Volkswagen comercializó en el mercado el primer automóvil flex-fuel: Gol 1.6 Total Flex, con tecnología diseñada por Bosch. Dos meses después, Chevrolet sacó a la venta el Corsa 1.8 Flexpower, con un motor especial diseñado por Fiat. En la actualidad, entre las compañías fabricantes de automóviles flex-fuel están Volkswagen, Chevrolet, Ford, Fiat, Renault, Peugeot, Mitsubishi, Honda, Toyota y Citroën, y han sido vendidos de 2003 hasta marzo de 2010 unos 10.3 millones de vehículos, lo que equivale aproximadamente al 35% del parque vehicular automotor de Brasil no mayor a diez años de antigüedad.

En 2007, se dejaron de fabricar automóviles movidos sólo por etanol, pues por ser éste hidratado, no puede mezclarse con gasolina como en el caso de los autos flex-fuel, los cuales dominarán el mercado automotriz en la próxima década.

En 2008, Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. (Embraer) fabricó y probó la primer aeronave brasileña movida sólo por etanol. Es una avioneta monoplaza

utilizada en áreas agrícolas y puede usar como combustible gasolina o etanol, mas no sus mezclas, por el momento.

Actualmente (2008-2009) existen 355 ingenios azucareros (conocidos como “usinas de açúcar”) que destilan etanol para su uso como biocombustible. Para transportar al etanol hacia el Océano Atlántico desde los centros de producción, Brasil cuenta con 800 km de ductos, que conforman una red de poliductos denominados alcoholductos (álcooldutos en portugués), y está en proyecto la expansión de esta red hacia la zona central del país y hacia Venezuela, donde Petrobras se ha asociado con PDVSA para desarrollar un mercado venezolano del etanol como combustible. En la figura 2.1 se muestra la ubicación de las regiones cañeras y de las destiladoras de etanol en Brasil, así como la infraestructura de transporte del etanol para su exportación.

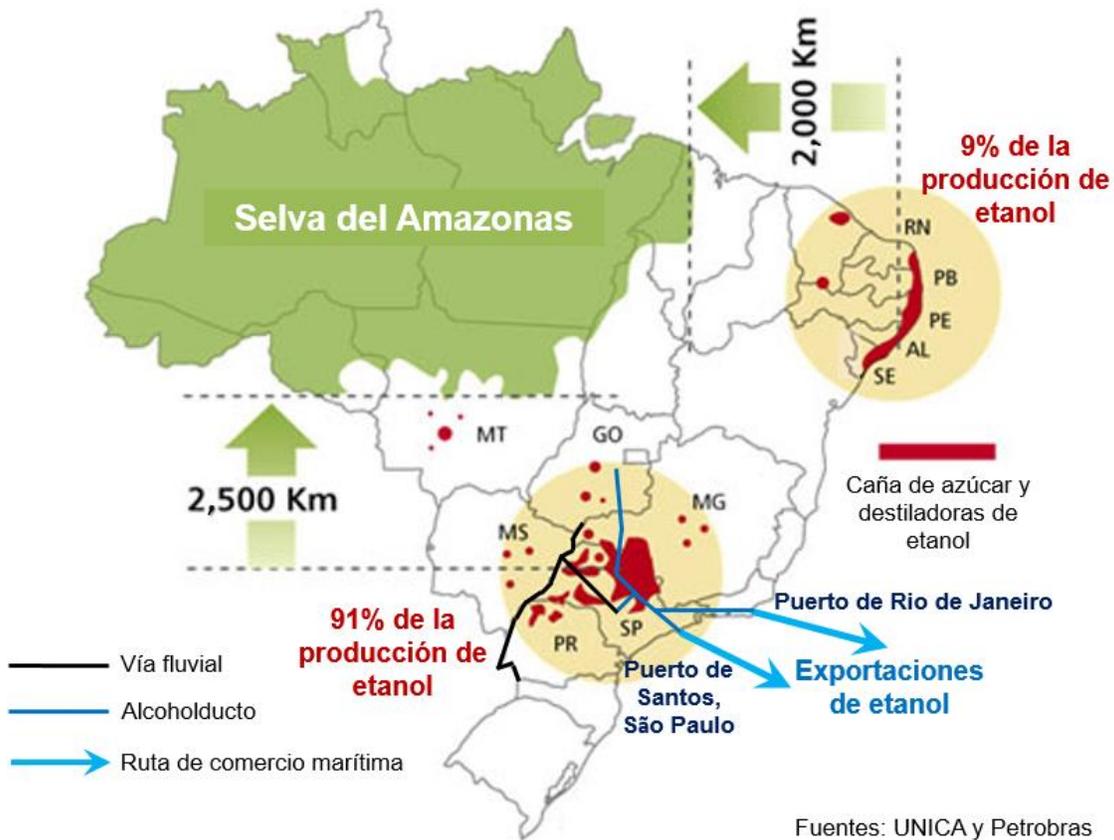
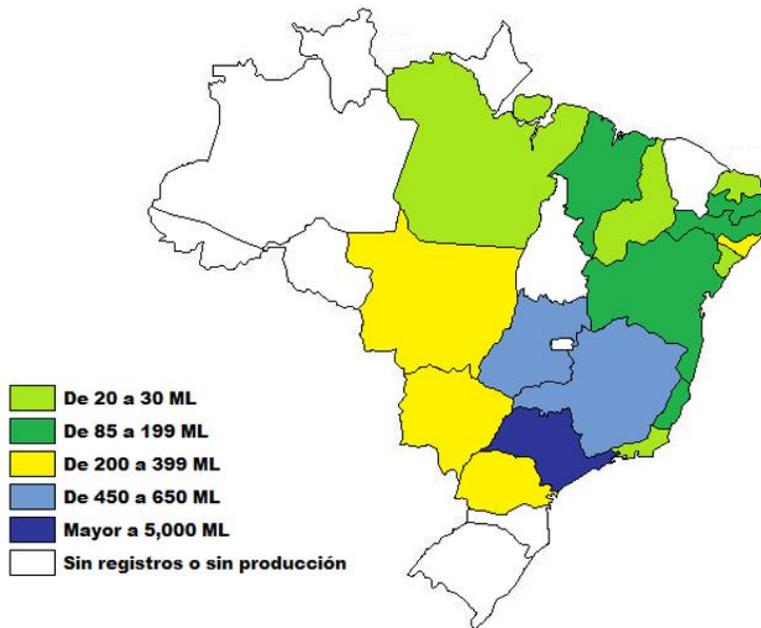


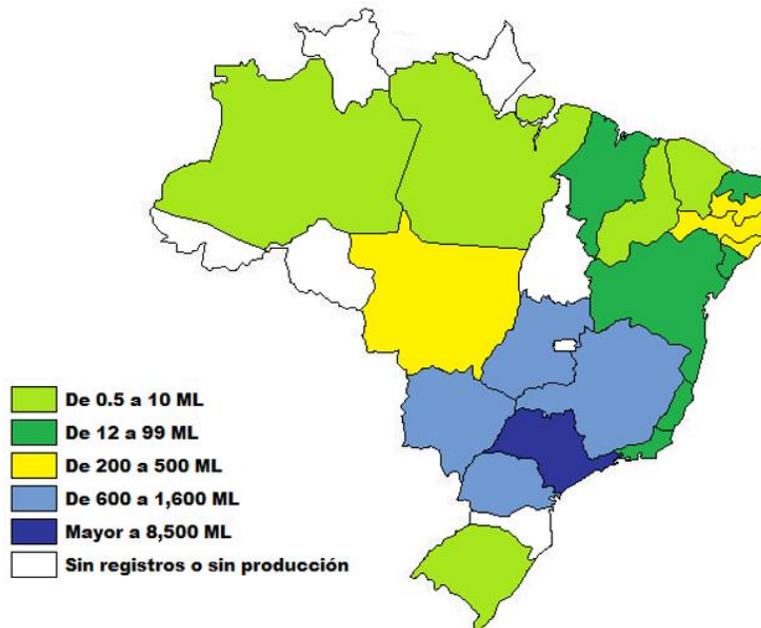
Figura 2.1. Regiones productoras de caña de azúcar y etanol en Brasil (2007)

En el año 2007, Brasil produjo 22,557 millones de litros (ML) de etanol, consumió 16,593 ML para fines energéticos y 17,276 ML en total, y exportó 3,533 ML de etanol principalmente a Europa (Suecia y Países Bajos, mayoritariamente), Estados Unidos, Trinidad y Tobago, El Salvador y Costa Rica. En 2008, produjo 24,500 ML de etanol, por lo que se mantiene como el segundo mayor productor del mismo, después de Estados Unidos. En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran las regiones de Brasil donde se produce etanol, tanto anhidro como hidratado.



Elaborado con datos de: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2008; ANP: 2008

Figura 2.2. Estados productores de etanol anhidro en Brasil (2007).



Elaborado con datos de: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2008; ANP: 2008

Figura 2.3. Estados productores de etanol hidratado en Brasil (2007).

Petrobras es el principal comprador y distribuidor de etanol en Brasil, pues sólo produce combustibles fósiles y lo mezcla para su venta en el mercado interno, en el cual comercializa las gasolinas A y C en sus variantes Comum (común en portugués,

con octanaje de 87) y Premium (con octanaje de 91). La gasolina A no contiene etanol y la gasolina C es una mezcla E20, E23 ó E25 (gasolina con 20%, 23% ó 25% de etanol anhidro, respectivamente). Además de la gasolina C, el etanol comúnmente es expendido en el mercado brasileño en forma anhidra en las gasolineras, para que el cliente pueda mezclarlo libremente con la gasolina, o en forma hidratada para ser consumida por los automóviles sin mezclarse con gasolina. Los precios de la gasolina y el etanol por unidad de energía son muy cercanos entre sí, por ende el precio del biocombustible es atractivo para el consumidor final (ver figura 2.4). La unidad de energía empleada para el gráfico de la figura 2.4 es el “galón de gasolina equivalente” (GGE, siglas en español e inglés), la cual corresponde a la cantidad de energía extraída de un galón de gasolina durante su combustión, es decir, un GGE es igual a 121.96 MJ. De esta forma, un GGE equivale a 1.44 galones de etanol anhidro, equivalencia debida a la diferencia existente entre los poderes caloríficos de la gasolina y del etanol (ver tabla 1.4 y el texto adyacente).

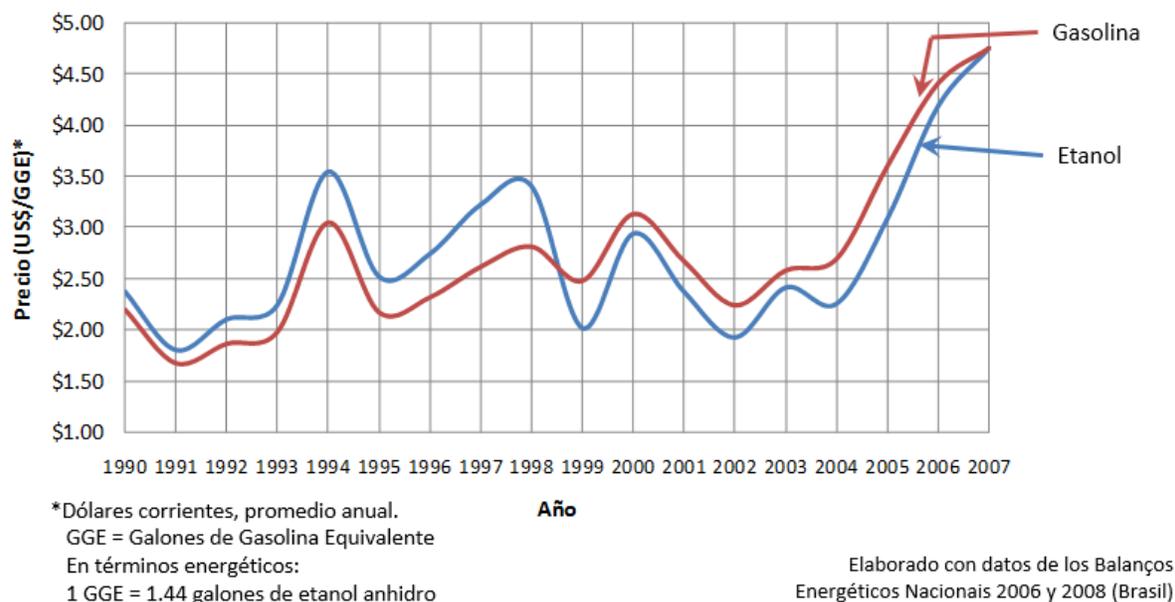


Figura 2.4. Precios por unidad de energía del etanol anhidro y de la gasolina en Brasil

Como puede observarse en la figura 2.4, el etanol es más barato que la gasolina por unidad de energía desde el año 1999, pero sólo por unos 20 centavos de dólar en promedio. Debido a esta cercanía en precios, el consumo de etanol se ha mantenido casi constante de 1999 a 2007, de forma semejante al comportamiento del consumo de la gasolina (ver figura 2.5). El etanol ha sido consumido en Brasil mayoritariamente hidratado o como gasolina C, siendo São Paulo la entidad federativa con el mayor consumo de ambos (ver figura 2.6).

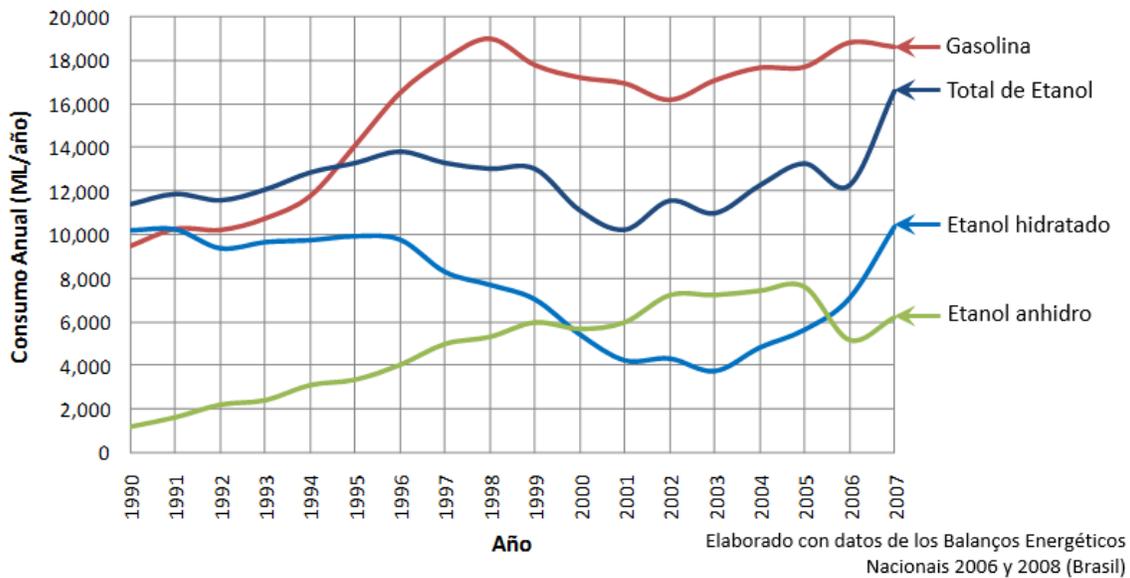


Figura 2.5. Consumo de gasolina y etanol en el sector transporte de Brasil

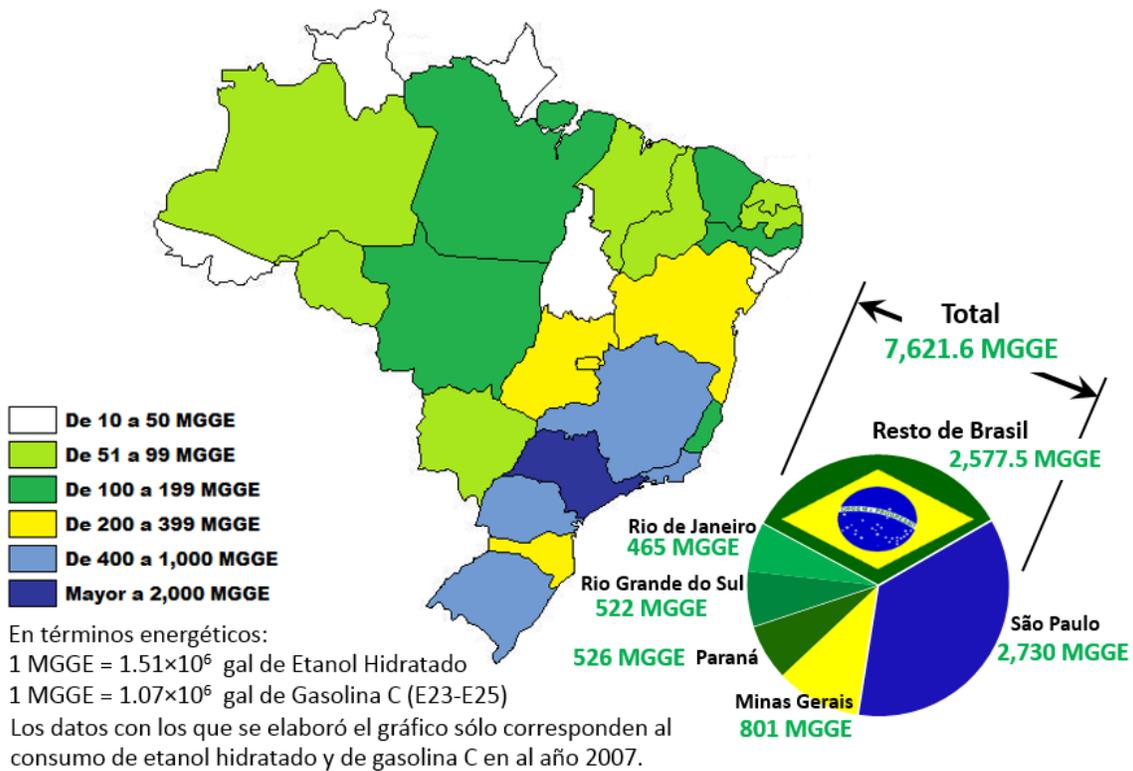


Figura 2.6. Consumo anual de etanol en el sector transporte de cada entidad federativa de Brasil (2007)

El uso de etanol puro o mezclado con gasolina en los motores de combustión interna de los vehículos brasileños ha permitido disminuir las emisiones de gases de efecto

invernadero generadas por el sector transporte con motores Otto, como se muestra en la figura 2.7.

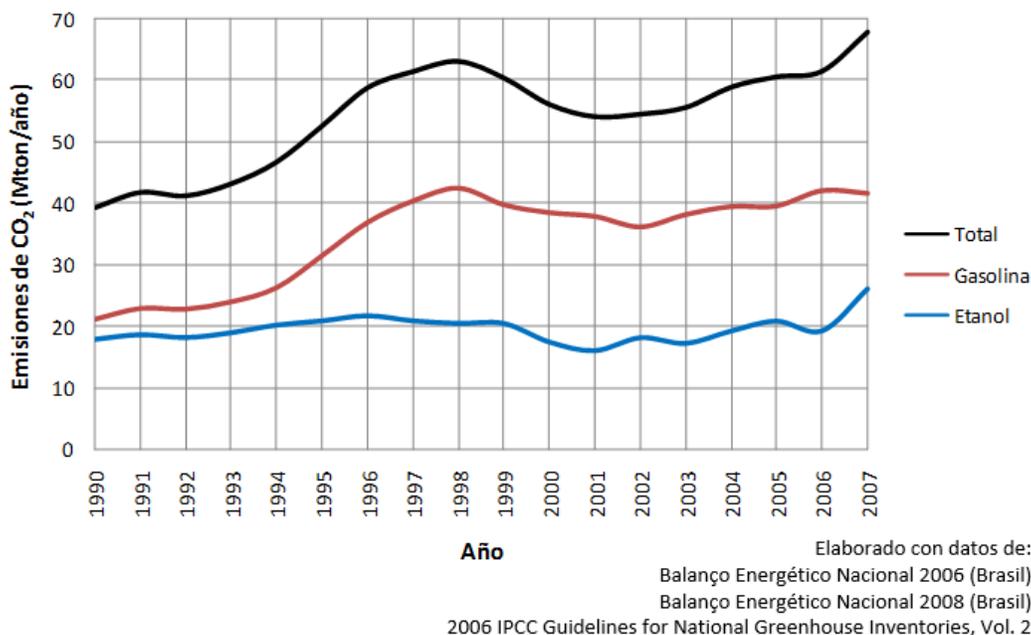


Figura 2.7. Emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte con motores Otto en Brasil

Comparando las figuras 2.5 y 2.7 puede notarse que a pesar de un consumo de etanol similar en magnitud al de gasolina, las emisiones de CO₂ por el uso del alcohol son de alrededor de la mitad de las emisiones de CO₂ provenientes de la gasolina. Esto se debe a que el etanol tiene un menor contenido de carbono y, por ende, de energía por unidad de volumen, por lo que a pesar de tener un factor de emisión de CO₂ por unidad de energía ligeramente superior al de la gasolina, por unidad de volumen emite menos CO₂ respecto al combustible fósil. En la tabla 2.1 se presentan los factores de emisión de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI, siglas en español; greenhouse gases, GHG, en inglés; gases de efeito estufa, GEE, en portugués) de los combustibles utilizados en motores de ciclo Otto.

Tabla 2.1. Factores de emisión de gases de efecto invernadero de los motores Otto según tipo de combustible

Combustible	Toneladas de GEI / PJ de combustible consumido ¹		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gasolina	69,300 (2.23)	33 [#] (1.1x10 ⁻³)	8 ^{***} (3x10 ⁻⁴)
Etanol anhidro ²	70,800 (1.58)	18* (0.4x10 ⁻³)	41 ^{**} (9x10 ⁻⁴)

1) Las cifras entre paréntesis están en kg de GEI / L de combustible consumido, a temperatura ambiente.

2) Con un mayor contenido de carbono que el etanol hidratado, por lo que emite una mayor cantidad de GEI.

*Corresponde sólo a automóviles brasileños.

**Corresponde a camiones estadounidenses solamente. Para automóviles se estima de 6 (1x10⁻⁴).

***Corresponde a vehículos con convertidor catalítico. Sin este dispositivo, el factor es 3.2 (1x10⁻⁴).

[#]Corresponde a vehículos sin convertidor catalítico. Con este dispositivo, el factor es 25 (0.8x10⁻³).

Fuente: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2, tablas 1.4 y 3.2.2.

Desarrollo del Etanol en Estados Unidos

El etanol como biocombustible comenzó a ser utilizado en Estados Unidos a finales del siglo XIX, aunque a nivel experimental en motores de combustión. El primer automóvil que construyó Henry Ford en 1896, llamado "Quadricycle", utilizaba etanol como combustible. Después él mismo lo reemplazó por gasolina, pues se percató de que tiene un 43.8% mayor contenido energético por unidad de volumen que el etanol. En 1906 fueron aprobadas una serie de medidas legales para exentar de impuestos la producción y venta de etanol para uso energético en las granjas del centro-este de Estados Unidos, ya que se buscaba crear un nuevo mercado para los productos agrícolas, además había una preocupación por el futuro agotamiento de los combustibles fósiles al no ser renovables. Dichas medidas no surtieron efecto debido a diversos factores, siendo el más importante la baja competitividad del precio del etanol frente a los precios de la gasolina y el queroseno. Una situación similar se presentó a finales de la década de 1920 e inicios de la década de 1930. Después de estos intentos, el etanol no fue empleado como combustible en Estados Unidos casi todo el siglo XX, excepto en periodos de escasez de petróleo como en las crisis petroleras de 1973 y 1979, durante los cuales se le mezclaba con gasolina para estirar existencias.

En 1978, surge la primer ley actual aplicada al etanol para fines energéticos: Ley del Impuesto a la Energía (Energy Tax Act, en inglés), donde se exenta del 10% del impuesto de 4 centavos de dólar de la gasolina federal a las mezclas de etanol con gasolina, además otorga un crédito de 10% al equipo de conversión de biomasa en etanol. Tras esta ley, se aprobaron muchas otras más relacionadas con el etanol y otros biocombustibles en lo restante del siglo XX y el inicio del siglo XXI.

Para la producción de etanol, fueron desarrolladas diversas líneas tecnológicas de primera generación para la obtención del biocombustible, las dos más usadas tienen al grano de maíz como materia prima. La primera de éstas, conocida como de molienda seca, consiste en moler los granos de maíz para producir harina, a la cual se le añaden agua y enzimas para cocerla. Luego se agrega levadura para fermentar la harina de maíz y obtener etanol por destilación. Esta es la ruta tecnológica más empleada actualmente en Estados Unidos, pues las plantas productoras de etanol por molienda seca constituyen (en 2008) el 80% de la capacidad de producción.

La segunda tecnología, conocida como de molienda húmeda, consiste en cocer el grano de maíz en agua caliente para separar la proteína del almidón. La fracción que contiene al almidón es molida y se le separa el almidón para secarlo. Éste es empleado para obtener azúcares los que son fermentados para obtener etanol. Aunque fue la primer ruta tecnológica en ser desarrollada, está declinando debido a su menor productividad respecto a la de molienda seca.

En 1993, fue creado el Programa Ciudades Limpias (Clean Cities Program, en inglés) en respuesta a los requerimientos establecidos en la Ley de Política Energética (Energy Policy Act, EPAAct, en inglés) de 1992. Este programa es una

colaboración entre gobierno e industria para reducir la dependencia estadounidense de petróleo del exterior en el sector transporte mediante la promoción del uso de vehículos alternativos, el mezclado de combustibles fósiles con biocombustibles, y la mejora de la economía de los combustibles en vehículos automotores, entre otras medidas.

En el año 2000, fue publicada la Ley de Investigación y Desarrollo de la Biomasa (Biomass Research and Development Act, en inglés) en la que los departamentos gubernamentales de energía (Department of Energy, DOE) y de agricultura (Department of Agriculture, USDA) tienen como mandato la coordinación a nivel federal de las actividades de investigación y desarrollo relacionados con los biocombustibles y subproductos asociados a la transformación de la biomasa.

A partir de entonces, se han estado desarrollando otras rutas tecnológicas de obtención de etanol, principalmente de segunda generación, las cuales en general consisten en producir el biocombustible mediante la hidrólisis enzimática de la celulosa de pastos y otras plantas fibrosas que crecen ampliamente en el territorio estadounidense. No se contempla la utilización de caña de azúcar debido a que es un cultivo no apto al clima de Estados Unidos, salvo en ciertas regiones del sur.

En 2004, el Congreso de Estados Unidos aprobó la Ley de Creación de Empleos Estadounidenses (American Jobs Creation Act, en inglés, o ley H.R. 4520), en cuyo título III subtítulo A fue establecido el Crédito sobre Impuestos al Contenido Volumétrico de Etanol (Volumetric Ethanol Excise Tax Credit, VEETC, en inglés). Este crédito entró en vigor el 1 de enero de 2005 y está constituido por dos incentivos, uno a las mezclas de etanol con algún combustible fósil como la gasolina, y otro a las mezclas de biodiesel con diesel fósil. El primero de estos incentivos consiste en:

Crédito a las Mezclas Combustibles de Alcohol (Alcohol Fuel Mixture Credit): descuento fiscal de 51 centavos de dólar por galón de etanol o de 60 centavos de dólar por galón de cualquier otro alcohol (generalmente metanol o algún éter) que sea mezclado con gasolina u otro combustible fósil. Aplica para productores de alcohol que comercialicen o hagan uso de estas mezclas para fines energéticos, e incluye al etil-terbutiléter (ETBE) y otros éteres derivados del etanol y el metanol, pero excluye a aquellos alcoholes producidos a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón y turba). Expira el 31 de diciembre de 2010.

En 2005, entró en vigor una nueva versión de la Ley de Política Energética (Energy Policy Act, EAct, en inglés), cuya sección 1501 establece una norma sobre combustibles renovables (Renewable Fuel Standard, RFS, en inglés) en la que se hace obligatoria la incorporación de 7.5 mil millones de galones (28.4 mil millones de litros) de biocombustibles a la gasolina para 2012. Además, esta ley provee una serie de incentivos fiscales a la producción y uso de biocombustibles, entre los cuales están los siguientes:

Crédito al Pequeño Productor de Etanol (Small Ethanol Producer Tax Credit): descuento fiscal al ingreso de 10 centavos de dólar por galón de etanol producido en instalaciones con capacidad de producción anual menor a 60 millones de galones. Expira el 31 de diciembre de 2009, aunque este plazo podría ampliarse.

Crédito a la compra de equipo surtidor de combustibles alternativos: crédito de 30% del costo del equipo, con un límite en el crédito de US\$ 30,000, para negocios, sean o no gasolineras. Para sector doméstico, se otorga un crédito de US\$ 1,000. Válido para equipo instalado después del 31 de diciembre de 2005. Expira el 31 de diciembre de 2009, con altas probabilidades de extender este plazo, pues el espíritu de la ley EPAct es el fomentar la producción y uso de combustibles alternativos no provenientes de fuentes fósiles, como los biocombustibles.

En 2006, entró en vigor el Crédito al Vehículo Automotor Alternativo Calificado (Qualified Alternative Fuel Motor Vehicle Tax Credit, en inglés), consistente en un incentivo económico para los compradores de vehículos (nuevos o modificados) que utilicen biocombustibles o cualquier otra fuente de energía renovable, previa certificación del vehículo por parte del fabricante ante el Internal Revenue Service (IRS, siglas en inglés del órgano federal recaudador de impuestos en Estados Unidos).

En marzo de 2007, los presidentes de Estados Unidos y de Brasil firmaron un memorándum de entendimiento para establecer una asociación energética con la finalidad de impulsar el uso del etanol y el biodiesel en Norteamérica y Sudamérica. Asimismo, en ese año inició un esfuerzo entre sociedades químicas, universidades, empresas e instituciones gubernamentales de ambos países para fomentar la investigación y desarrollo de los biocombustibles. De esta forma, ambos gobiernos buscan convertir al etanol en un commodity mundial.

En diciembre de 2007, entró en vigor la Ley de Seguridad e Independencia Energéticas (Energy Independence and Security Act, en inglés), cuya sección 202 estipula los porcentajes mínimos de mezcla de combustibles fósiles con biocombustibles, con lo que se reformula la norma RFS de 2005.

En 2009, para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, el gobierno federal comenzará a invertir, con un horizonte de diez años, US\$ 150 mil millones en investigación y desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y menos contaminantes, entre las cuales están los biocombustibles.

En la época actual, el uso del etanol en Estados Unidos ha sido incentivado no sólo por el aumento en los precios del petróleo de la década de 1970, sino también debido a prohibiciones en la adición a las gasolinas de tetraetilo de plomo (el cual fue sacado del mercado gradualmente de 1976 a 1986 por la Agencia de Protección al Ambiente, EPA, siglas en inglés) y de metil-terbutiléter o MTBE (el cual sustituyó originalmente al tetraetilo de plomo en la década de 1980, pero fue prohibido en dos de los mayores consumidores de gasolina que son California y Nueva York el 1 de

enero de 2004, y en otros estados desde 2002). La adición de etanol a las gasolinas cumple dos propósitos:

- 1) Disminuir las emisiones de contaminantes provenientes de los motores de combustión interna de gasolina mediante una adecuada oxigenación con etanol.
- 2) Aumentar el octanaje de la gasolina, propiedad del etanol conocida desde 1915.

La producción de etanol actualmente (a julio de 2009) se efectúa en 174 plantas, y están en construcción 17 destiladoras. La figura 2.8 muestra un mapa de Estados Unidos donde se indica la cantidad de plantas productoras de etanol por estado, tanto en operación como en construcción. Nótese la gran cantidad de plantas existentes en la región central, correspondiente al denominado “Cinturón del Maíz” (Corn Belt, en inglés), zona donde mayoritariamente es producido el maíz estadounidense, principal insumo para producir etanol. En 2007, Estados Unidos produjo 24,600 ML de etanol, consumió 26,069 ML e importó 1,703 ML. En 2008, produjo 34,962 ML de etanol, consolidándose como el mayor productor mundial del biocombustible, pero importó 1,963 ML con lo que sigue siendo el principal importador de etanol en el mundo.

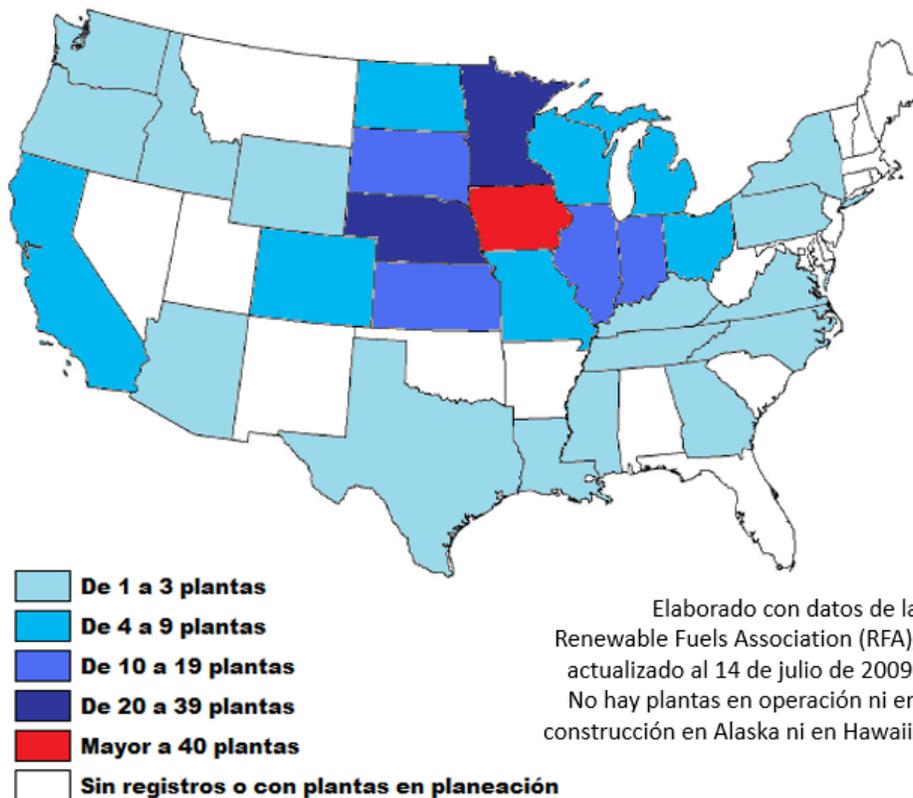


Figura 2.8. Estados productores de etanol en Estados Unidos (2009)

En el mercado energético estadounidense se comercializa una mezcla de gasolina con 85% de etanol llamada E85. En 2008, existían más de 1,600 estaciones de servicio que expendían E85 y otras mezclas con biocombustibles. Los precios por

unidad de energía de la gasolina (conocida en inglés como “gasoline” o “petrol”) y de su mezcla con etanol E85 han tenido una diferencia promedio de US\$ 0.50, desde el año 2000 (ver figura 2.9). También son comercializadas otras mezclas gasolina-etanol como la E10; sin embargo, no tienen una participación importante en el mercado como sucede con la E85.

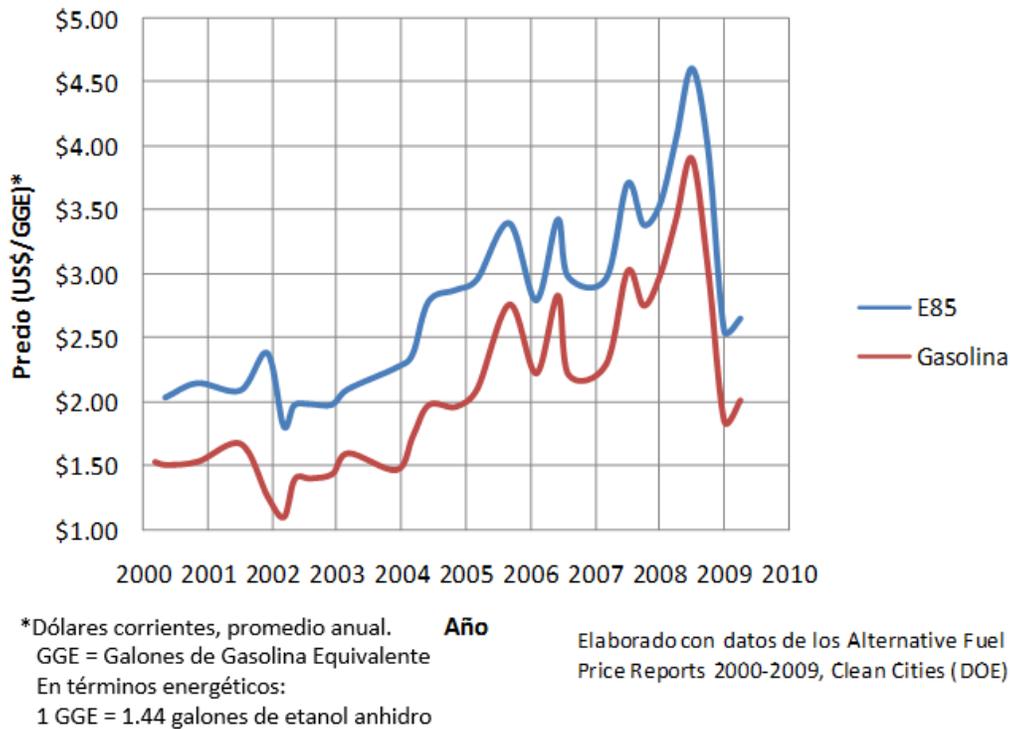
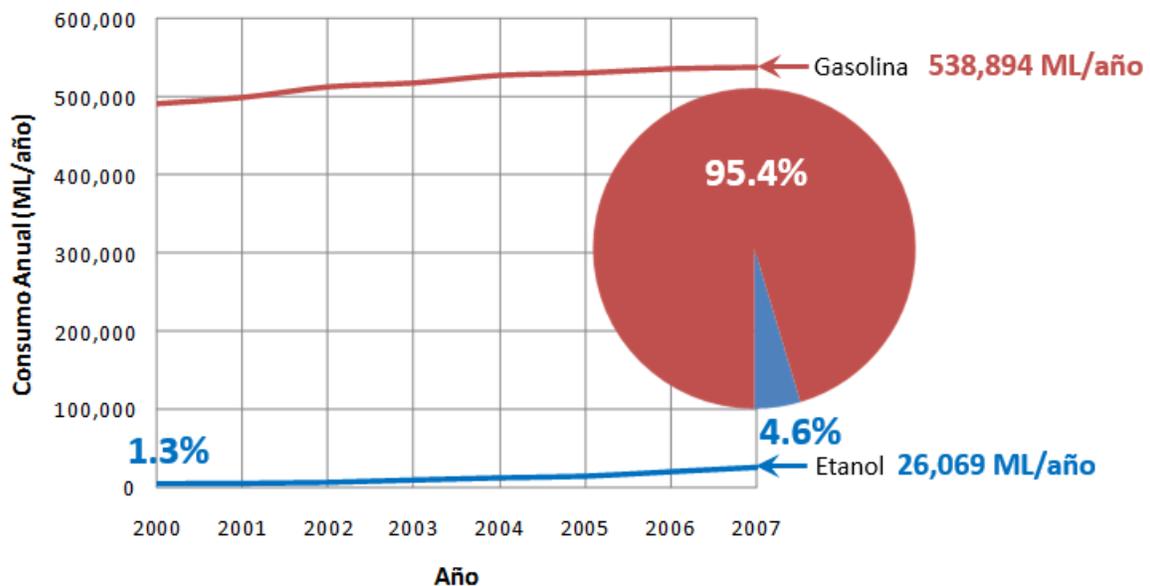


Figura 2.9. Precios por unidad de energía de la mezcla E85 y de la gasolina en Estados Unidos

Los principales consumidores de etanol en Estados Unidos son los vehículos flex-fuel (conocidos como “flexible fuel vehicles”, FFV por sus siglas en inglés, o simplemente “flexifuel”), los cuales totalizaban 4.4 millones de unidades en 2007, mientras que había 1,133 gasolineras expendiendo al menos E85, aparentemente casi 4,000 vehículos flex-fuel por cada gasolinera con E85, pero éstas se encuentran distribuidas inequitativamente en todo el territorio estadounidense. El gobierno federal sigue apoyando con incentivos fiscales a las empresas y gobiernos estatales para transformar la infraestructura de uso final de la energía y así poder expandir el mercado de biocombustibles, para cumplir con los objetivos fijados por el presidente Barack Obama en su Ley de Recuperación y Reinversión Estadounidenses (American Recovery and Reinvestment Act, en inglés) del 2009.

La figura 2.10 presenta una gráfica con los datos del consumo anual de gasolina y de etanol biocombustible en Estados Unidos para el periodo 2000-2007, en el que además se muestra la participación de ambos combustibles en el mercado de los vehículos con motores Otto. Obsérvese el incremento en esta participación para el etanol, pues pasó de compartir un 1.3% del mercado con la gasolina en el año 2000,

a una penetración de mercado del 4.6% en 2007. El consumo anual de la mezcla E85 es mostrada en un mapa en la figura 2.11, donde cabe resaltar a California como el mayor consumidor de este combustible, pues en 2007 consumió 5,594 miles de galones de gasolina equivalente (kGGE), cifra correspondiente al 10.34% del consumo nacional de Estados Unidos. Alaska y New Hampshire son los estados con la menor demanda de E85, pues consumieron 3,000 GGE y 8,000 GGE, respectivamente, en el año 2007.

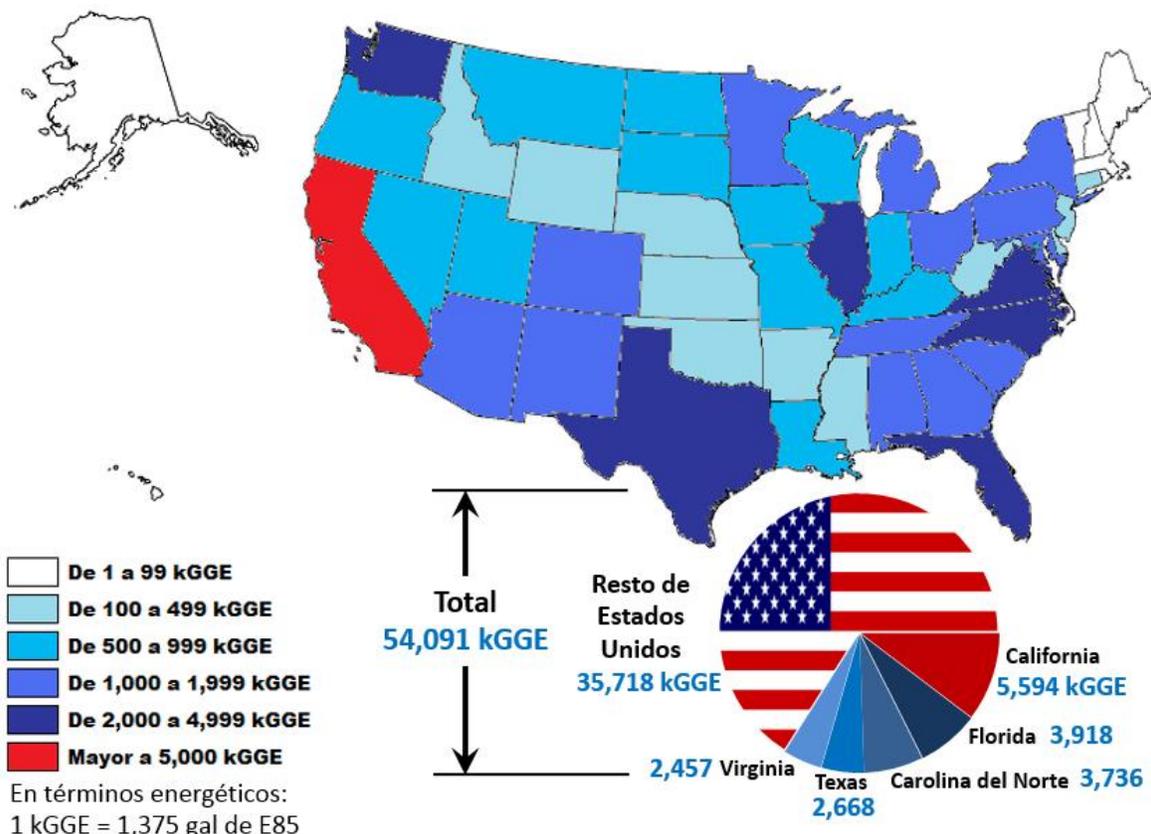


Fuente: Energy Information Administration (EIA)

Figura 2.10. Consumo de gasolina y etanol en el sector transporte de Estados Unidos

Nótese en la figura 2.11 que el consumo anual de E85 en el año 2007 fue de 54,091 kGGE, equivalente a 239.3 ML de etanol, cifra muy inferior a los 26,069 ML de etanol consumidos en ese mismo año. La diferencia en ambos números radica en el uso dado al etanol como constituyente del combustible de transporte. En la gasolina E85, el etanol es el mayor componente del combustible; en cambio, el etanol restante (25,829.7 ML) fue empleado como oxigenante de las gasolinas comunes en sustitución del MTBE, uso en el cual el etanol no sobrepasa el 10% de la mezcla con la gasolina.

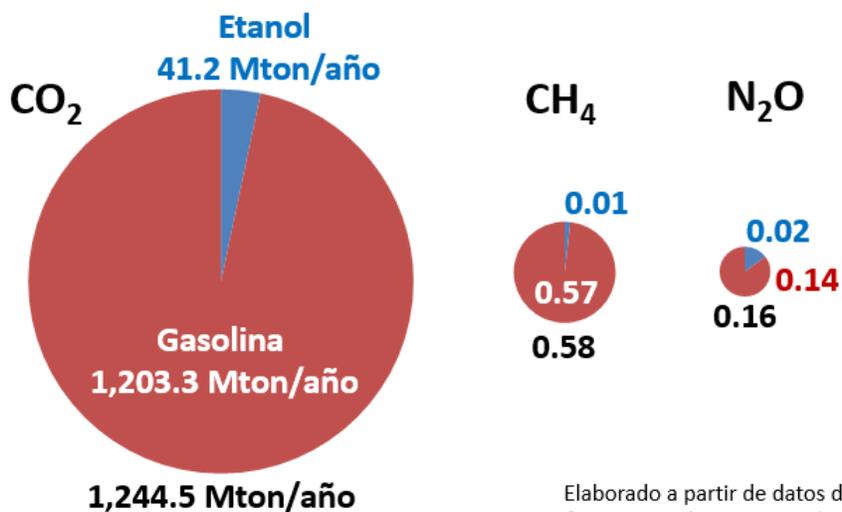
En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la aún pequeña participación del etanol en la oferta energética estadounidense, la mayor parte de las emisiones de estos gases en vehículos automotores de ciclo Otto proviene de la combustión de la gasolina. La figura 2.12 presenta un comparativo no a escala de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, principales gases de efecto invernadero presentes en las emisiones vehiculares.



Alaska y Hawaii no están a la misma escala de Estados Unidos continental.

Elaborado con datos de: Alternatives to Traditional Transportation Fuels 2007; EIA: 2009

Figura 2.11. Consumo anual de la mezcla E85 en el sector transporte de cada estado de Estados Unidos (2007)



Elaborado a partir de datos de:
 Energy Information Administration (EIA)
 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol.2

Figura 2.12. Emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte con motores Otto en Estados Unidos (2007)

Desarrollo del Etanol Biocombustible en el Resto del Mundo

Fuera de Brasil y Estados Unidos, las regiones donde principalmente se ha dado un desarrollo de la industria y el mercado del etanol como biocombustible son Europa, Asia (excepto Medio Oriente), América Latina, África (Subsahariana y Occidental) y Oceanía. Aunque en la actualidad América es el principal productor y consumidor de etanol, el uso de esta sustancia como combustible inició en Europa a mediados del siglo XIX. En 1860, el inventor alemán Nikolaus August Otto usó etanol en su primer motor de combustión interna; posteriormente otros inventores europeos realizaron pruebas con etanol en motores de su propia fabricación. Durante la Primera Guerra Mundial, Alemania utilizó etanol en la mayor parte de su parque vehicular. A raíz de una escasez de suministros de petróleo ocurrida durante esta guerra, Francia inició un programa de investigación en el Instituto Pasteur para desarrollar tecnología de obtención de etanol a partir de diversas fuentes biomásicas, entre las cuales se encontraban las algas marinas. En 1921 y 1923, el gobierno francés hizo obligatorio el mezclado de gasolinas con etanol en proporciones de 20% a 50%. Este modelo francés para el etanol fue emulado en aquella época por otras naciones del mundo, entre ellas Brasil. Otras naciones europeas como Inglaterra e Italia realizaron pruebas de obtención y uso de alcoholes mezclados con gasolina para el transporte a inicios de la década de 1920. En Finlandia, Noruega y Suecia, en la década de 1930, el etanol era producido a partir de los licores de la pulpa de papel, con lo que los costos de su papel se redujeron 20%.

Durante la Segunda Guerra Mundial, casi toda la industria europea del etanol se dedicó a abastecer a la industria armamentaria, por lo que prácticamente no hubo producción de alcohol en Europa. Con el fin de esta guerra en 1945 y con los precios del petróleo muy bajos, el etanol dejó de utilizarse para fines energéticos. Tras las crisis petroleras de la década de 1970 y para cumplir los compromisos adquiridos con la firma y aprobación del Protocolo de Kyoto a finales de la década de 1990, diversos gobiernos europeos iniciaron planes y esfuerzos tendientes a la incorporación de combustibles renovables en su mercado energético con la finalidad de disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero y su dependencia petrolera.

En la actualidad, Francia, Alemania, España, Polonia y Ucrania son los mayores productores de etanol en Europa, cuyas materias primas son principalmente trigo, remolacha (también conocida como betabel), centeno, cebada, vino o residuos de la uva vinífera, entre otros. En la tabla 2.2 se presenta una lista con todos los países europeos productores y consumidores de etanol biocombustible, así como las materias primas con las cuales lo producen.

Como puede observarse en la tabla 2.2, el consumo de etanol biocombustible es mayor que su producción, por lo que Europa, en general, es un consumidor neto. Para satisfacer su demanda, estos países importan etanol de Brasil, Paquistán, Sudáfrica y Ucrania.

Tabla 2.2. Producción y consumo de etanol biocombustible en Europa (cifras de 2007 en ML/año)

País	Producción	Consumo	Materias Primas***
Alemania	394	581	Trigo, centeno, cebada, remolacha y carbón
Austria	15	34	Trigo, maíz y remolacha
Bulgaria	*	0	Maíz
Dinamarca	*	10	*
Eslovaquia	30	24	*
Eslovenia	*	1.6	*
España	348	255	Vino, centeno, trigo, remolacha, cebada y maíz
Estonia	*	0.026	*
Finlandia	*	3.3	Residuos de industria de alimentos
Francia	539	534	Remolacha, trigo, vino, residuos de uva vinífera y melazas
Hungría	30	53	Granos
Irlanda	7	10	Trigo y remolacha
Italia	60	0	Vino, remolacha, maíz y frutas (manzana)
Letonia	18	0.0078	Granos
Lituania	20	23	Granos
Luxemburgo	*	2.3	*
Países Bajos	14	173	Remolacha
Polonia	155	141	Papa, trigo, maíz, cebada, centeno y melazas
Reino Unido	20	153	Trigo, remolacha, colza
República Checa	33	0.23	Granos
Suecia	120	357	Vino y granos
Suiza	3.2	3.2	Pulpa de papel
Ucrania	100**	*	Colza, trigo y melazas

* Dato no disponible.

**Estimado a partir de información y datos de las fuentes abajo citadas.

***El término "Granos" se refiere principalmente al trigo, aunque puede incluir al centeno, cebada y maíz.

Fuente: Biofuels Platform; Production of bioethanol in Switzerland

Biofuels Technology Platform

EurObserv'ER; Le Baromètre des Biocarburants; Julio 2009, Tablas 3 y 1, respectivamente

European Bioethanol Fuel Association (eBIO)

ROTHKOPF, Garten; A Blueprint for Green Energy in the Americas; IADB, USA: 2007

En América, además de Estados Unidos y Brasil, los países que producen etanol como biocombustible son Canadá (800 ML en 2007), Colombia (284 ML), El Salvador (277 ML), Costa Rica (149 ML), Perú (30 ML), Argentina (20 ML) y Paraguay (18 ML). Otros países como Guatemala (79 ML en 2006), México (49 ML), Cuba (45 ML), Ecuador (45 ML) y Nicaragua (30 ML), también producen etanol pero no tiene un uso final como biocombustible. En América Latina, el etanol es obtenido principalmente del jugo de la caña de azúcar, aunque en Paraguay también se le produce a partir de trigo, maíz y cassava (también conocida como yuca o mandioca). En Canadá, el 73% del etanol es producido a partir de maíz, el 17% de trigo y el 3% de cebada.

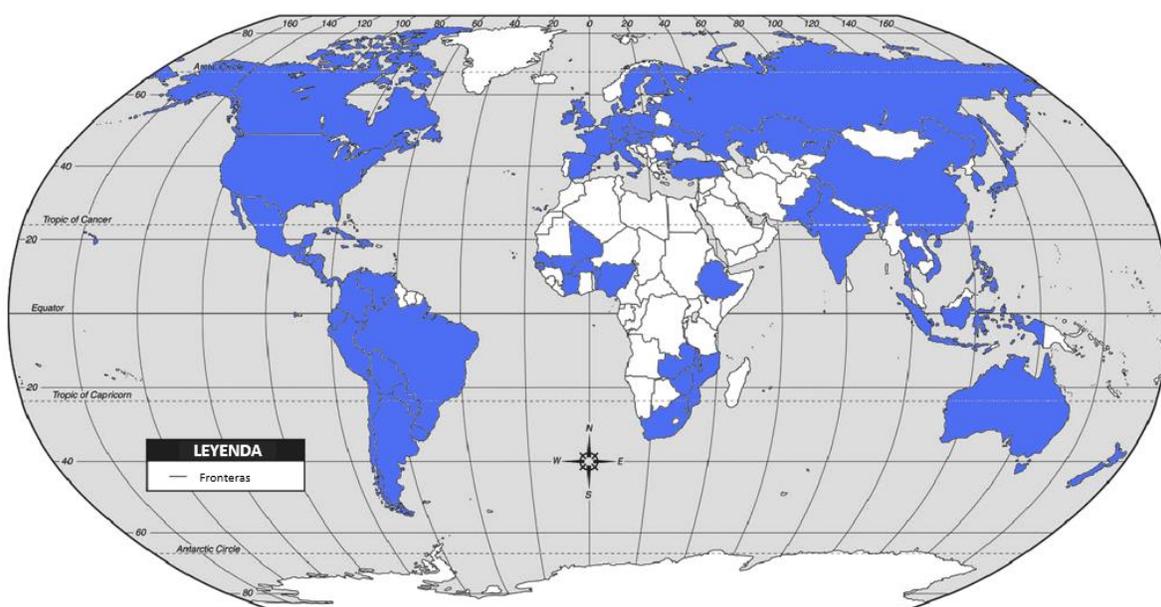
En Asia, la producción y uso de etanol biocombustible se remonta a inicios del siglo XX, pues en la década de 1930 Filipinas, China e Indochina Francesa (actuales Vietnam, Cambodia y Laos) comercializaban mezclas combustibles con etanol. Durante la Segunda Guerra Mundial, en China e India fue usado etanol puro en vehículos militares como combustible de emergencia a falta de petróleo. Asimismo, Japón usó etanol puro o parcialmente mezclado con gasolina y otros petrolíferos, para mover la mayor parte de sus jeeps, tanques, camiones militares, barcos de guerra y aviones de combate. El etanol biocombustible dejó de producirse y usarse a fines de la década de 1940 e inicios de la década de 1950 debido a los bajos precios del petróleo. Indochina Francesa dejó de usar etanol debido a la destrucción de toda su industria alcoholera durante la guerra. A inicios de los años 1950, India prohibió el empleo de granos y tubérculos en la obtención de etanol para evitar el desvío de alimentos hacia la producción de combustibles. Tras las crisis petroleras de 1973 y 1979, surgieron iniciativas gubernamentales para introducir los biocombustibles en sus mercados energéticos internos. En la actualidad, los mayores productores de etanol en Asia son China (1,840 ML en 2007), Tailandia (300 ML), India (250 ML), Turquía (60 ML) y Paquistán (35 ML), donde es obtenido de caña de azúcar, maíz, trigo, sorgo, cassava (yuca o mandioca), remolacha (betabel) y patata dulce (camote). Otros productores de etanol son Japón, Indonesia y Filipinas, aunque estos países son importadores netos del energético.

En África, la historia del etanol biocombustible inicia en la Primera Guerra Mundial, cuando debido a una escasez de petróleo en Sudáfrica, el gobierno colonial británico desarrolló y comercializó una mezcla E60, con etanol de melazas de caña de azúcar. En la actualidad, los únicos países que producen etanol para uso energético son Etiopía, Malawi y Sudáfrica. Etiopía lo obtiene de la fermentación del jugo de la caña de azúcar y lo mezcla con queroseno en un 50% (K50, sigla en inglés) para uso doméstico (cocción de alimentos, iluminación y calefacción). Malawi produce etanol a partir de las melazas del procesamiento de la caña de azúcar, y lo ha mezclado con gasolina en un 12% (E12) desde 1982 para uso en el sector transporte. Sudáfrica ha producido etanol de forma sintética desde la década de 1950, mediante los procesos GTL y BTL, pero también lo produce a partir de la fermentación de las melazas de la caña de azúcar. Malawi y Sudáfrica también producen y comercializan una mezcla de etanol con celulosa y agua denominada "gelfuel", el cual es un gel combustible empleado en el sector doméstico para la cocción de alimentos. Se le ha usado como sustituto del gas licuado de petróleo (LP) en Malawi y del queroseno en Sudáfrica. Aunque tiene varias ventajas en materia de seguridad y transporte, su precio no es competitivo con el del queroseno y es 25% mayor respecto al precio del etanol líquido, para el que se han desarrollado estufas eficientes y baratas.

En Oceanía, Australia es el único país productor y consumidor de etanol biocombustible en la actualidad, sin embargo, Nueva Zelanda, Fiji y Papúa Nueva Guinea planean introducirlo en sus mercados energéticos en el corto y mediano plazos. En Australia comenzó a producirse etanol y usarse desde 1927, cuando en la provincia nororiental de Queensland fueron comercializadas algunas mezclas de

gasolina con etanol de caña de azúcar para el sector transporte, las cuales dejaron de utilizarse en 1957. En la década de 1990 volvió a mezclarse la gasolina con etanol en las provincias orientales. En 2007, el país-continente produjo 140 ML de etanol a partir de caña de azúcar, trigo y sorgo, a la vez que fue comercializado el primer vehículo flex-fuel: el SAAB 9-5 BioPower. Actualmente, en 2009, existen 3 plantas productoras de etanol con una capacidad instalada de 243 ML anuales.

A manera de resumen de lo arriba expuesto, en la figura 2.13 es mostrado un mapa con los países productores y consumidores de etanol biocombustible, y además se incluyen aquellos países donde la industria y el mercado del etanol son incipientes o están en fase de planeación por parte de sus respectivos gobiernos. En la figura 2.14 se presentan datos de consumo de etanol para uso energético por región, con cifras correspondientes al año 2007. Asimismo, la participación del consumo de etanol en el sector transporte con motores Otto es mostrada en la figura 2.14 como porcentaje de un mezclado equivalente con el consumo de gasolina.

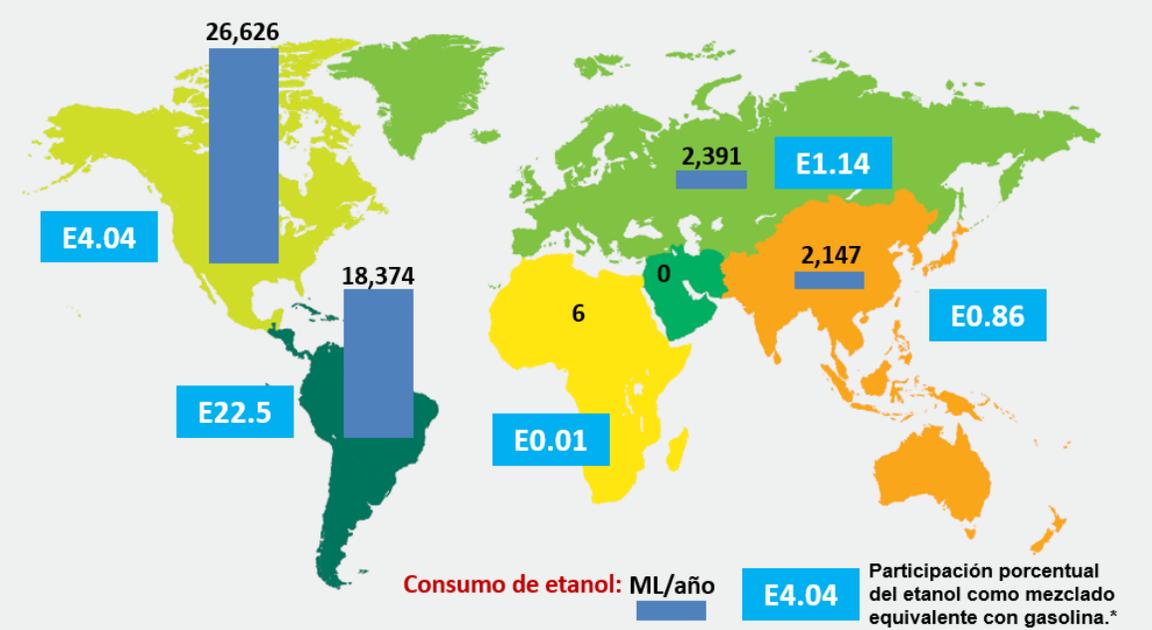


Elaborado con datos de diversas fuentes correspondientes a 2007

Figura 2.13. Países productores y consumidores de etanol biocombustible actuales y futuros en el mundo (2007)

En la figura 2.14 puede observarse que Norteamérica y Sudamérica son las regiones con mayor consumo de etanol biocombustible, pues en conjunto su consumo corresponde al 90.8% del total mundial. Dentro de ambas regiones, los principales consumidores del energético son Estados Unidos y Brasil, respectivamente. Europa y la exURSS conforman la región no americana con el mayor consumo de alcohol etílico, seguido de la región Asia-Pacífico. Dentro de Europa, Alemania, Francia, Suecia y España son los principales consumidores de etanol, y en Asia-Pacífico el mayor mercado de etanol biocombustible está en China. La región de Medio Oriente no consume etanol para fines energéticos. En la figura

2.15 hago una comparación del tamaño del consumo de este combustible en Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea. En este gráfico destaca el estado de California, Estados Unidos, por ser el tercer mayor consumidor de etanol en el mundo, después del resto de Estados Unidos y de Brasil. La Unión Europea y China son el cuarto y quinto mayores consumidores del alcohol, y dentro de la primera sobresale Alemania, país que ocupa la sexta posición en el consumo de este biocombustible.



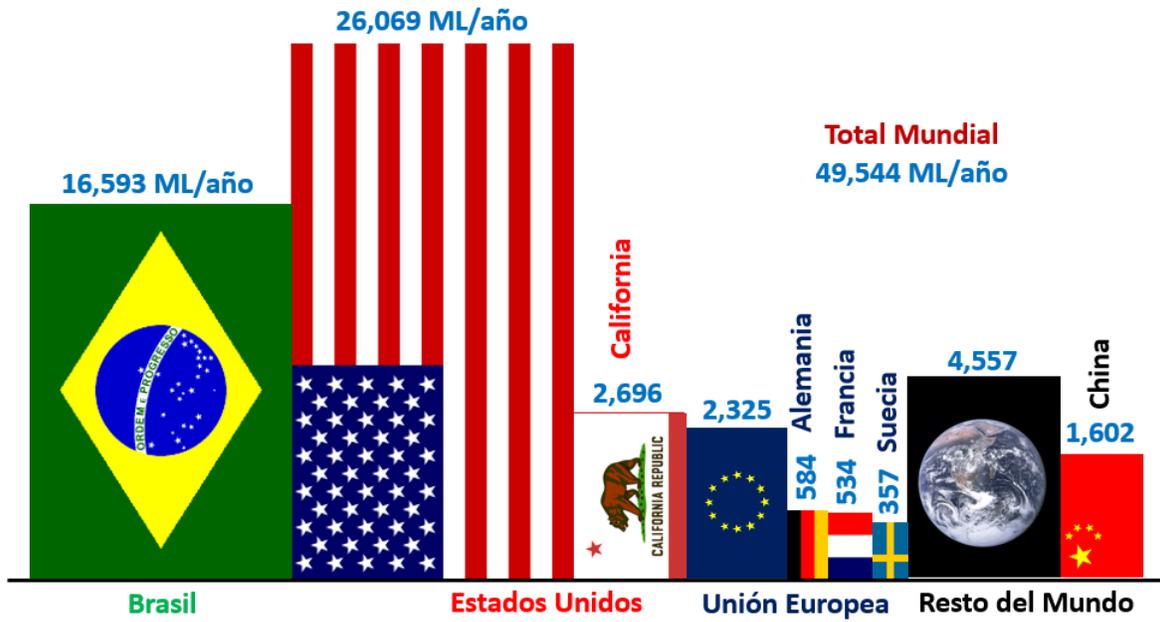
*Estimaciones propias del consumo de gasolina para el año 2007 basadas en datos del EIA.
Elaborado con datos del Energy Information Administration (EIA), USA

Figura 2.14. Consumo de etanol por región del mundo (2007)

Comercio Internacional de Etanol como Biocombustible

A partir de datos de producción y consumo de etanol, y de flujos y destinos de importaciones y exportaciones del energético, he catalogado a los países en productores netos y consumidores netos de etanol. En el gráfico de la figura 2.16 se muestran las vías en que se desarrolla el comercio internacional de este biocombustible.

En la figura 2.16, he destacado en azul claro las exportaciones de Brasil, y se puede observar la existencia de ciertas regiones netamente importadoras de etanol biocombustible, como son Estados Unidos, Unión Europea y Japón. Los intercambios comerciales mostrados mediante flechas son los de mayor importancia por su volumen de flujo, por ende, hay otras vías de comercio internacional menos importantes no representadas en la figura 2.16.



Elaborado con datos de:
 Energy Information Administration (EIA) (Estados Unidos)
 Balanço Energético Nacional 2008 (Brasil)
 EurObserv'ER; Le Baromètre des Biocarburants, 2008 (Europa)

Figura 2.15. Magnitud de los principales mercados de etanol en el mundo de acuerdo al consumo (2007)

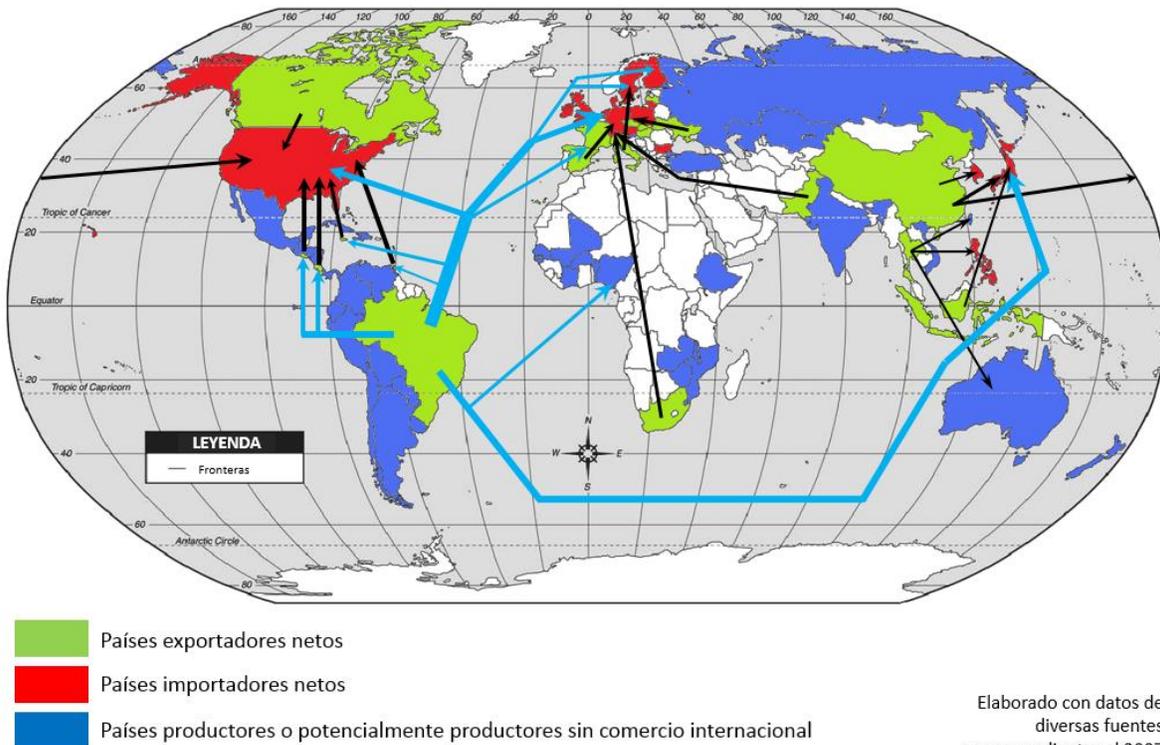


Figura 2.16. Comercio internacional de etanol biocombustible (2007)

Situación Actual del Etanol en México

El uso del etanol como biocombustible en México es inexistente aún, no obstante el país produce etanol para su uso en bebidas alcohólicas, productos farmacéuticos y alimenticios, y como solvente y reactivo industriales. El etanol producido actualmente proviene del jugo de la caña de azúcar y se obtiene en algunos ingenios azucareros, a través de la fermentación del jugo y la destilación.

El gobierno de México inició una serie de medidas tendientes a crear un mercado interno de etanol biocombustible, para elevar los niveles de eficiencia en el uso final de la energía y para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. El 22 de agosto de 2005 fue publicada la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, en la cual se fundan los lineamientos para el aprovechamiento futuro de la caña de azúcar como energético. Esta ley menciona la creación del Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Caña de Azúcar (CICTCAÑA), el cual elaborará estudios y proyectos de desarrollo y aprovechamiento del etanol como carburante y oxigenante de gasolina a partir de mieles, así como del aprovechamiento del bagazo de caña con fines de industrialización para la cogeneración de energía y la obtención de gas sintético.

A principios de 2007, el Congreso de la Unión elaboró la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual entró en vigor el 2 de febrero de 2008. Las líneas actuales de desarrollo de biocombustibles en México, de acuerdo a esta ley y diversos estudios de la Secretaría de Energía, parten de dos materias primas con niveles altos de producción en el país, que a saber son la caña de azúcar y el maíz amarillo. Se plantea la utilización de trigo, sorgo, yuca y remolacha azucarera o betabel, además de algas verdes, para la obtención de biocombustibles, principalmente el etanol. En el artículo 11 de esta ley, fracción VIII, se estipula el otorgamiento de permisos para la producción de biocombustibles a partir de granos de maíz, pues los mismos sólo serán otorgados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) cuando existan inventarios excedentes de producción interna de maíz para satisfacer el consumo interno.

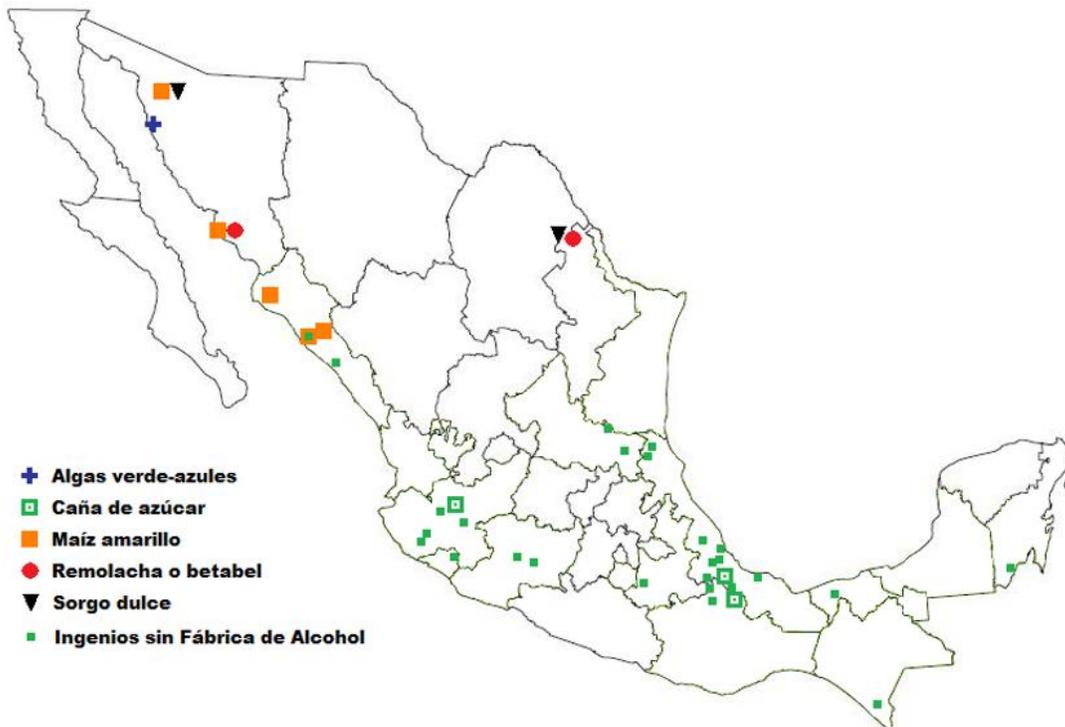
El 19 de junio de 2009 entró en vigor el Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

Actualmente (2009) existen diez proyectos para producir etanol a partir de diversos insumos, cuya ubicación se muestra en la figura 2.17, junto con los 57 ingenios azucareros productores o no de etanol. En la figura 2.18 se indica el insumo de cada uno de los proyectos de plantas productoras de etanol, y son mostrados los ingenios azucareros sin destiladora de alcohol, pues son productores potenciales del energético.



Elaborado a partir de datos de CNIAA y de otras fuentes.

Figura 2.17. Plantas productoras y proyectos de producción de etanol en México (2008)



Elaborado a partir de datos de CNIAA y de otras fuentes.

Figura 2.18. Proyectos de producción de etanol por insumo en México (2008)

Como se observa en la figura 2.18, las materias primas biomásicas para la producción de etanol en México son la caña de azúcar, maíz, remolacha o betabel y sorgo, además de las algas verde-azules. La producción nacional de estos insumos es mostrada en la figura 2.19 y por Estado de la República en las figuras 2.20 a 2.26. La figura 2.21 corresponde a la producción total de maíz, por lo que incluye a todas las variedades cultivadas en México, clasificadas en sus diferentes tipos:

Maíz amarillo: es destinado principalmente para el consumo animal; es usado como forraje para ganado y aves de granja, y para la obtención de gluten y almidón para las industrias de alimentos, cosmética y farmacéutica.

Maíz blanco: se le destina exclusivamente para consumo humano, por lo que su empleo como insumo para el etanol está prohibido por la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Se le emplea para la producción de nixtamal y de harinas de nixtamal, los cuales se usan para la elaboración de alimentos como tortillas, tamales y atole. También es consumido en grano, previa cocción.

Maíz de color: es cultivado principalmente para consumo humano; incluye a los maíces de grano azul, rojo y morado. Se le emplea para la producción de nixtamal a nivel doméstico. También es consumido en grano, previa cocción o torrefacción (para elaborar pinole).

La SAGARPA contabiliza por separado a los maíces pozolero y palomero, variedades pertenecientes al maíz blanco. Estos tipos de maíz no están contemplados para la producción de etanol como energético, por ende, no presento sus mapas respectivos como los de las figuras 2.22 a 2.24.

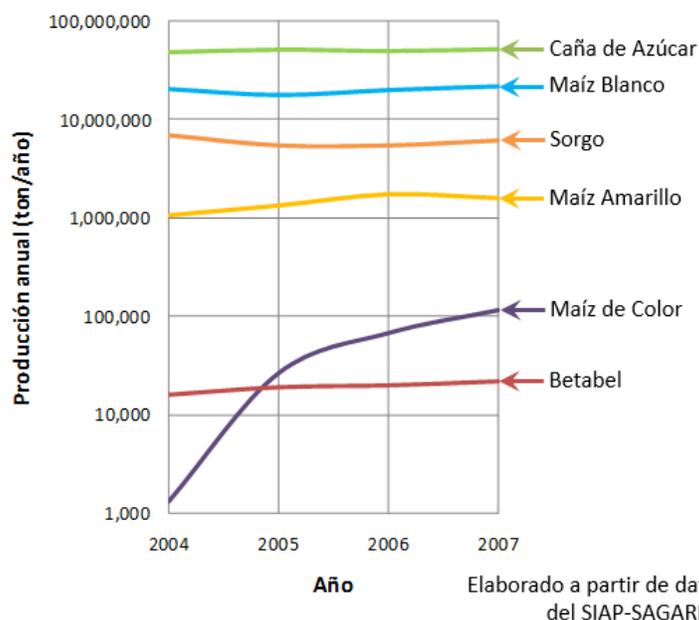
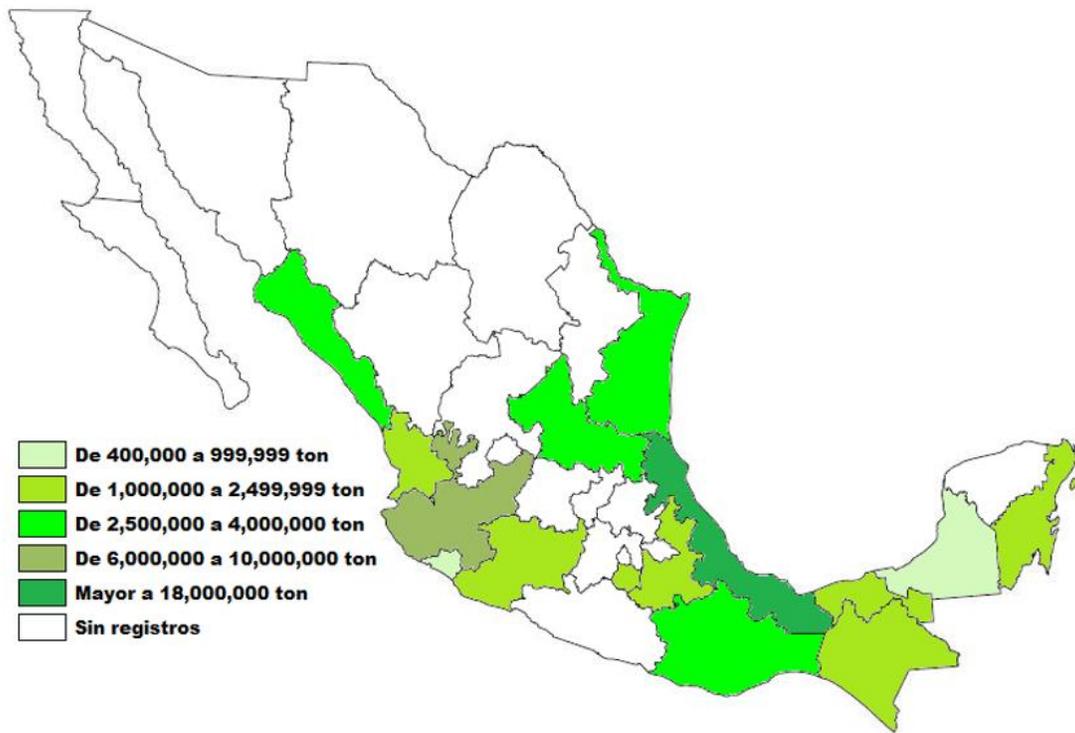
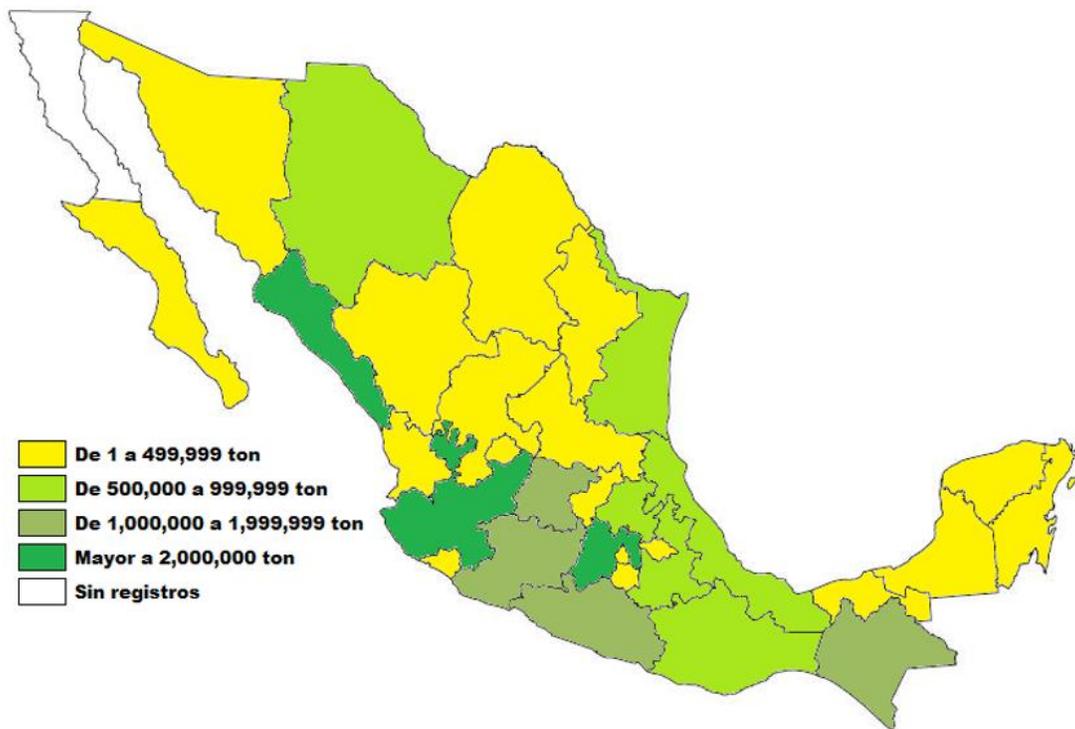


Figura 2.19. Producción de insumos potenciales para obtener etanol en México



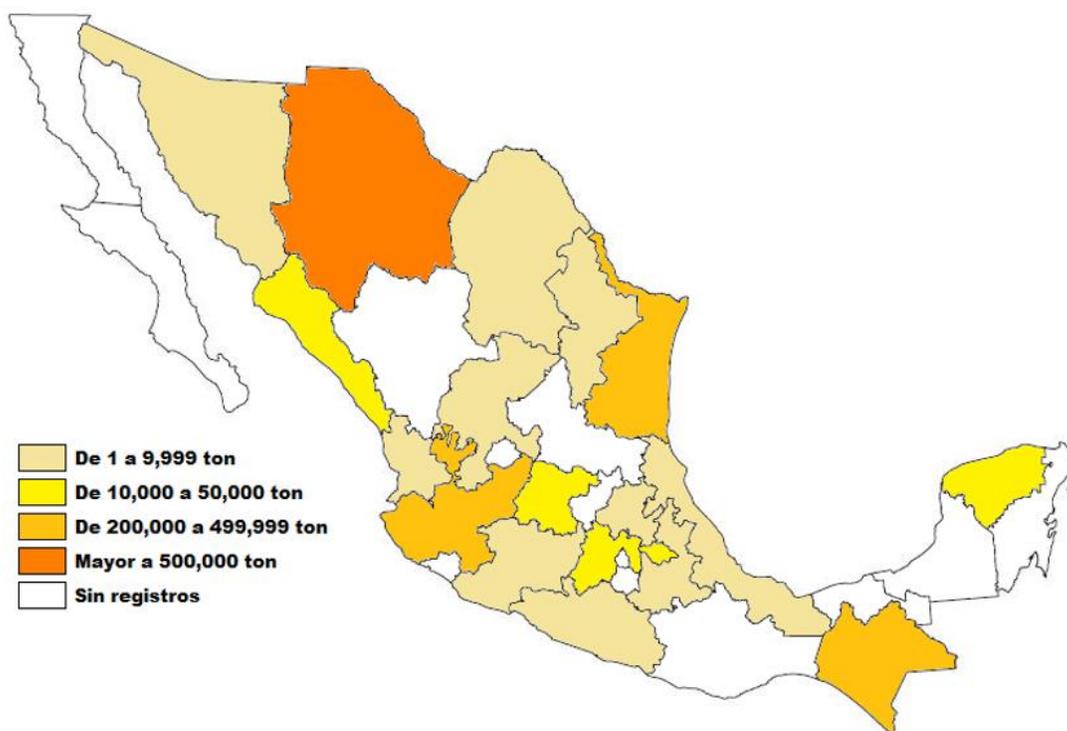
Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.20. Estados productores de caña de azúcar en México (2007)



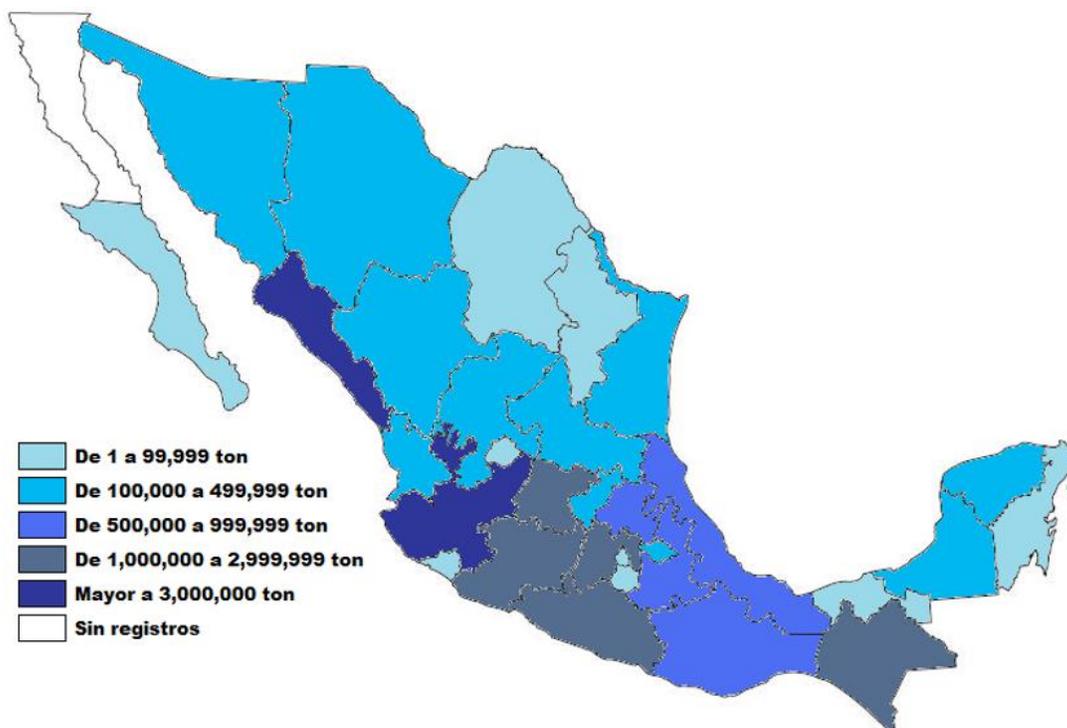
Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.21. Estados productores de maíz en México (2007)



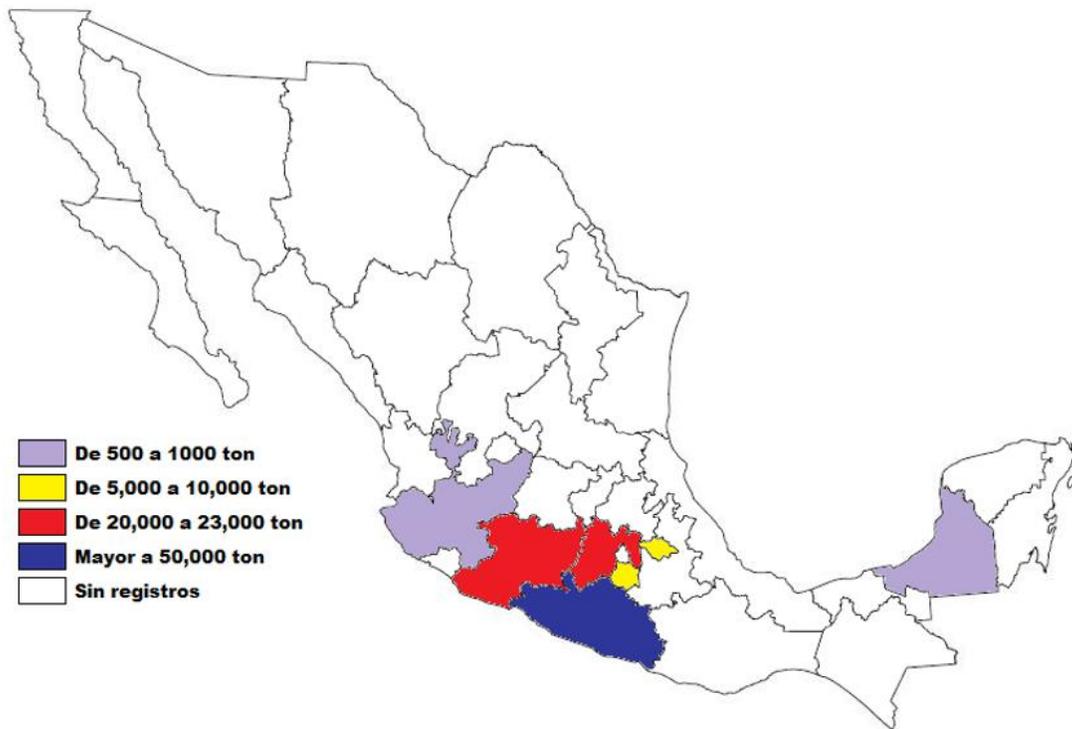
Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.22. Estados productores de maíz amarillo en México (2007)



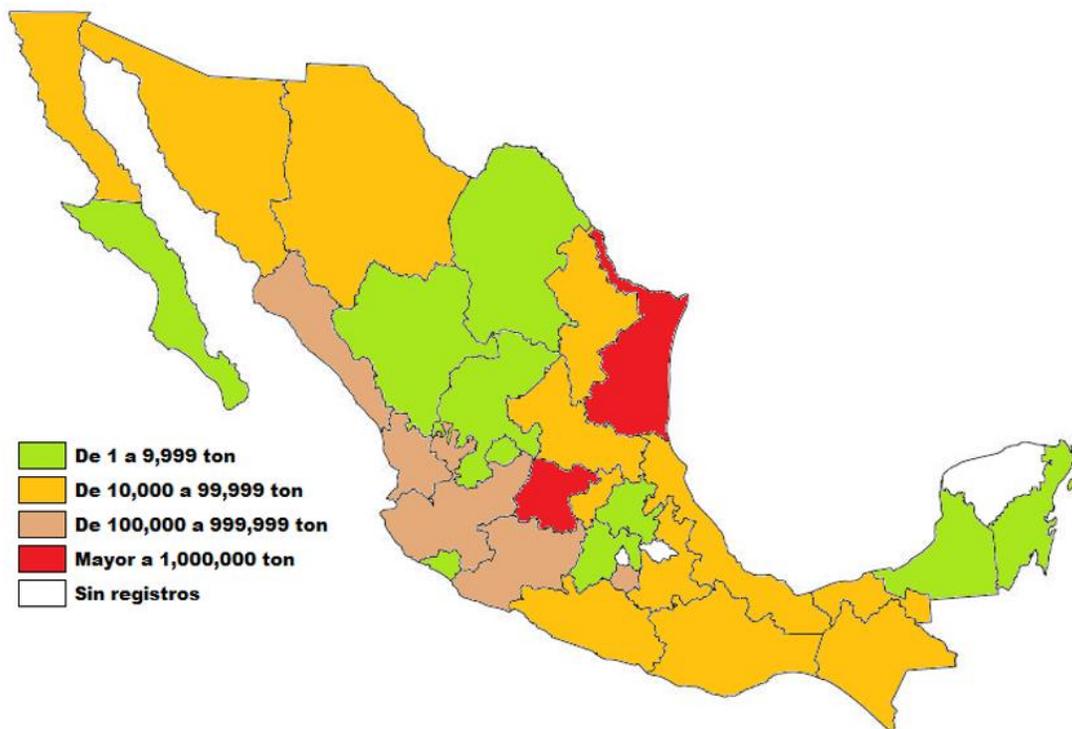
Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.23. Estados productores de maíz blanco en México (2007)



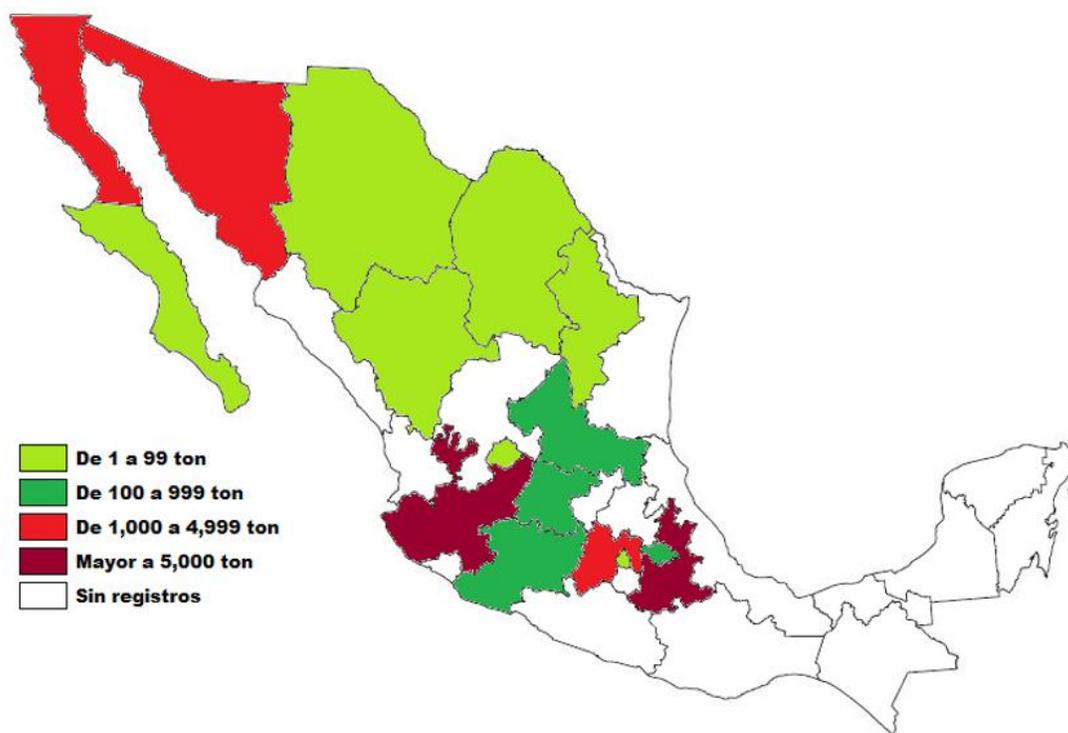
Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.24. Estados productores de maíz de color en México (2007)



Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.25. Estados productores de sorgo en México (2007)



Elaborado a partir de datos del SIAP-SAGARPA.

Figura 2.26. Estados productores de remolacha o betabel en México (2007)

En 2010, Petróleos Mexicanos (Pemex) introducirá gasolinas mezcladas en un 10% con etanol en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco, mediante un convenio de inversión en dos ingenios azucareros próximos a esa ciudad. Se estima una demanda de 200 ML anuales de etanol. También se contempla la producción de etil-terbutiléter (ETBE) y teramil-etiléter (TAEE), en lugar de sus respectivas sustancias homólogas metiladas, para los mismos fines.

En 2011, entrará en operaciones una planta productora de etanol a partir de algas verdes de la empresa mexicana BioFields, cuya tecnología fue desarrollada por la compañía estadounidense Algenol Biofuels, estará ubicada en Puerto Libertad, Sonora y su producción será destinada principalmente al mercado de Estados Unidos, específicamente el del estado de California.

Con la producción y consumo de etanol biocombustible en México se busca sustituir el uso de metil-terbutiléter (MTBE) y teramil-metiléter (TAME) como antidetonantes y oxigenantes de las gasolinas producidas por Pemex, con lo cual además se pretende disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte mexicano. En la figura 2.27 se muestra la evolución del consumo de gasolina en México para el periodo 1990-2008, donde se observa una tendencia ascendente, pues el consumo total de gasolina mexicana ha crecido un 78.6% de 1990 a 2008. La figura 2.28 muestra el nivel de consumo de gasolina del sector transporte por entidad federativa, donde cabe resaltar que México, Jalisco, Distrito Federal, Puebla y Nuevo León son los estados con el mayor consumo de este

energético fósil y representan el 34.2% del total nacional. Asimismo, la figura 2.29 presenta una estimación de consumo de oxigenantes de las gasolinas, cifras expresadas como MTBE por ser el principal aditivo oxigenante y antidetonante presente en las gasolinas mexicanas. Obsérvese que el consumo de dichos agentes químicos se incrementó considerablemente en 1997 con la desaparición de las gasolinas con tetraetilo de plomo como aditivo antidetonante.

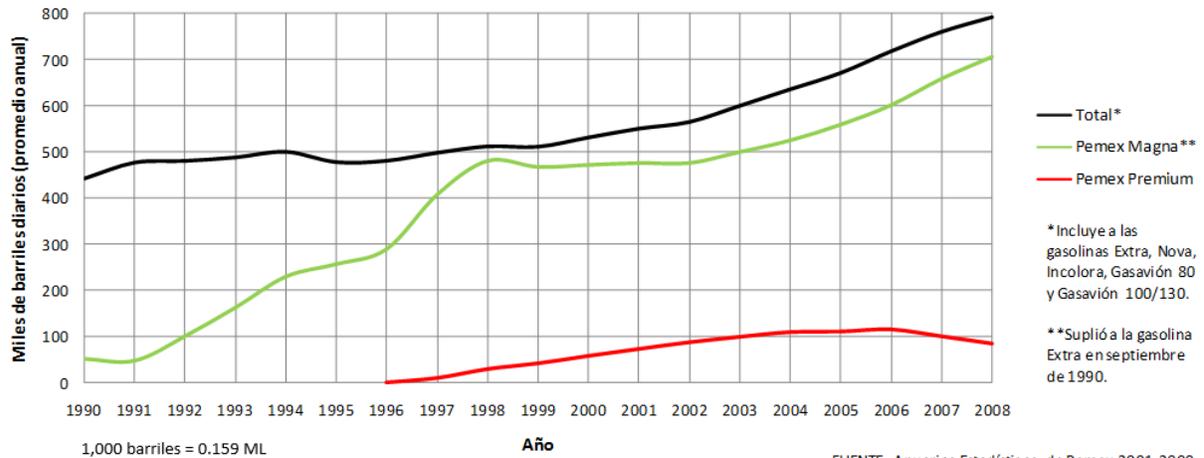


Figura 2.27. Consumo de gasolina en México

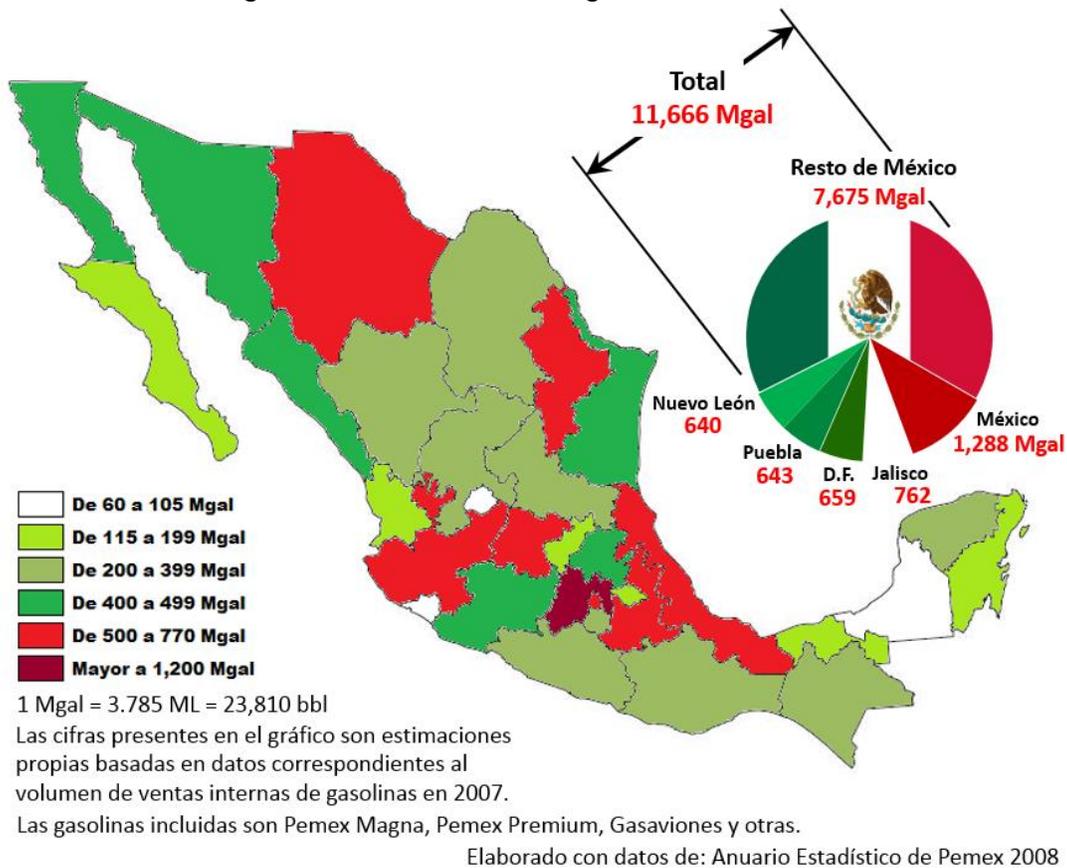


Figura 2.28. Consumo anual de gasolina en el sector transporte en México por entidad federativa (2007)

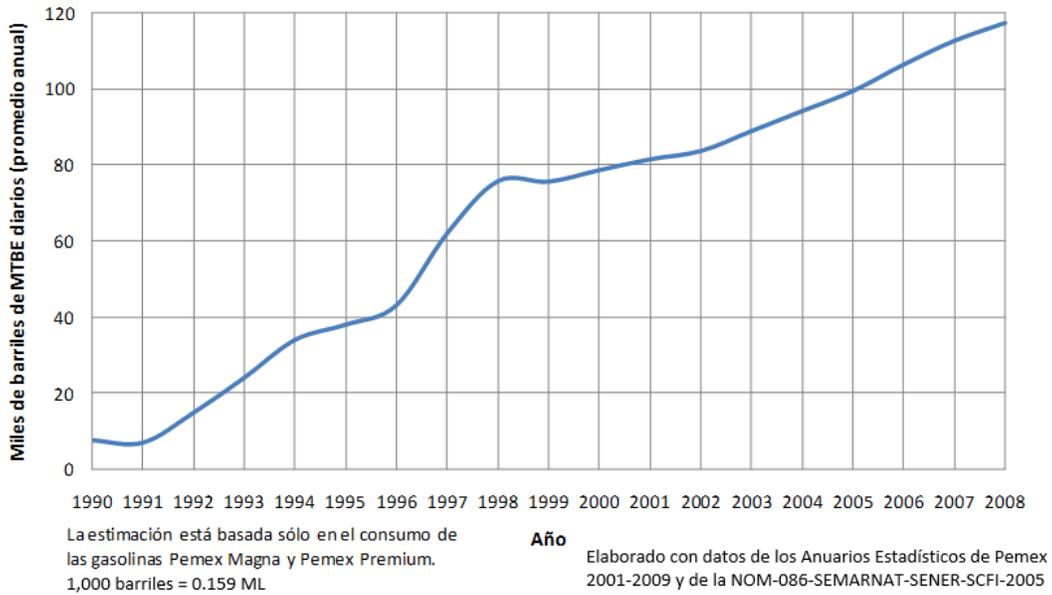


Figura 2.29. Consumo estimado de oxigenantes de las gasolinas en México expresado como MTBE

Respecto a los gases de efecto invernadero, su emisión por parte del sector transporte con motores Otto se ha incrementado un 50.6% en el periodo 1996-2007. Por consumo de combustibles fósiles, lo cual incluye al diesel y a otros combustibles como el carbón mineral, gas natural, gas LP y queroseno, entre otros, en los sectores transporte, energético e industrial, las emisiones de GEI han aumentado un 22% (ver figura 2.30).

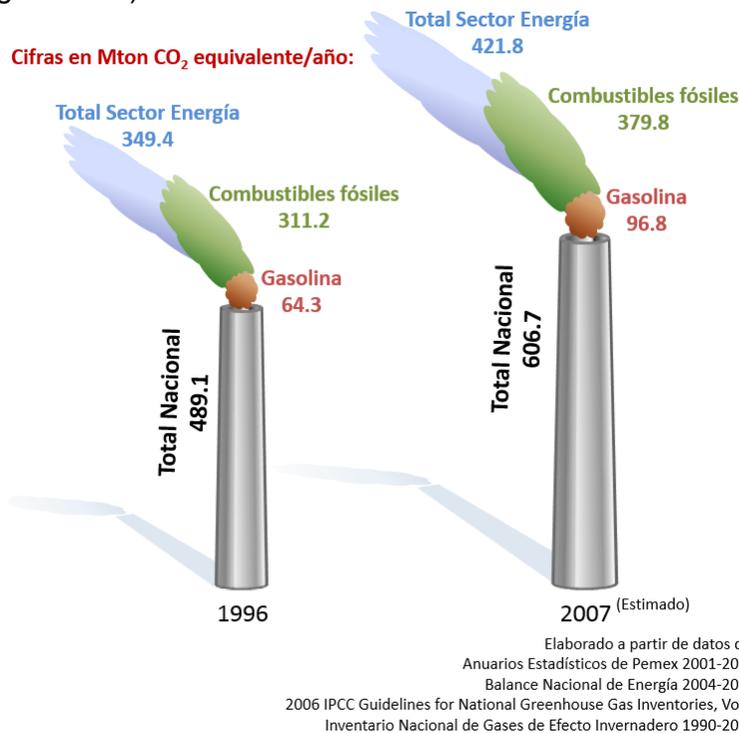


Figura 2.30. Emisiones de GEI en el sector transporte con motores Otto en México

Fuentes de Información

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP) (Brasil): <http://www.anp.gov.br>

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS; Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2008; ANP, Brasil: 2008

ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION (APEC); Biofuels: <http://www.biofuels.apec.org/index.html>

BIOFIELDS (México): <http://www.biofields.com>

BIOFUELS PLATFORM, Production of bioethanol in Switzerland (Suiza): <http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/ch-bioethanol.php>

BIOFUELS RESEARCH ADVISORY COUNCIL; Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond; European Commission, Bélgica: 2006: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels_vision_2030_en.pdf

BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM (Europa): <http://www.biofuelstp.eu>

BIOMASS RESEARCH AND DEVELOPMENT BOARD; National Biofuels Action Plan; DOE-USDA, USA: 2008

CÁMARA NACIONAL DE LAS INDUSTRIAS AZUCARERA Y ALCOHOLERA (CNIAA) (México): <http://www.camaraazucarera.org.mx/>

CHIARAMONTI, D.; TONDI, G.; Stationary Applications of Liquid Biofuels; ETA Renewable Energies, Italia: 2003: http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/biofuels/2002_pta_biofuels_final.pdf

COMISIÓN NACIONAL PARA EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE) (México): <http://www.conae.gob.mx> , <http://www.conuee.gob.mx>

CURTIS, Brian; U.S. Ethanol Industry: the next inflection point; DOE, USA: 2008: <http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/2007ethanolreview.pdf>

DE NORA SOUTO, João José; Política Nacional de Biocombustíveis; Ministerio de Minas e Energia, Brasil: 2006: <http://www.mme.gov.br>

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION; Alternatives to Traditional Transportation Fuels 2007; EIA-DOE, USA: 2009, tabla C4

- EUROOBSERV'ER; "Le Baromètre des Biocarburants"; en *Le Journal des Énergies Renouvelables*, No. 179, mayo 2007: http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro179_b.pdf
- EUROOBSERV'ER; "Le Baromètre des Biocarburants"; en *Le Journal des Énergies Renouvelables*, No. 185, junio 2008: http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro185_b.pdf
- EUROPEAN BIOETHANOL FUEL ASSOCIATION, Statistics (Europa): <http://www.ebio.org/statistics.php>
- EUROPEAN COMMISSION'S MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY; Europe's energy position - present & future; European Commission, Bélgica: 2008: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2008_moe_maquette.pdf
- INDÚSTRIA AERONÁUTICA NEIVA; Aeronave Ipanema (Brasil): http://www.aeroneiva.com.br/site/content/produtos/produtos_ipanema_apresentacao.asp
- IEA BIOENERGY; Market Evaluation: Fuel Ethanol; Unicamp, Brasil: 2007: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/finalreportethanolmarkets.pdf>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (Brasil): <http://www.ibge.gov.br>
- INSTITUTO DE ESTUDOS DO COMÉRCIO E NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS; Potential and challenges in the international market for ethanol and bio-diesel; Seminar on Biofuels Study in Mozambique, 11-12 de julio de 2007: <http://www.iconebrasil.com.br/arquivos/noticia/1455.pdf>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) (México): <http://www.inegi.gob.mx>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE; 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; IGES, Japón: 2006, Vol. 2, cap. 1 y 3
- LEY DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CAÑA DE AZÚCAR (México) (texto vigente publicado en DOF 22-08-2005, última modificación publicada en DOF 20-10-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDSCA.pdf>
- LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS (México) (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 01-02-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil): <http://www.mme.gov.br>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA;
Balanço Energético Nacional 2006; MME-EPE, Brasil: 2006

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA;
Balanço Energético Nacional 2008; MME-EPE, Brasil: 2008

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis; Marzo 2010

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass as feedstock for a bioenergy and byproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply; DOE-USDA, USA: 2005

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass Energy Data Book: Edition 1; DOE-EERE, USA: 2006:
<http://cta.ornl.gov/bedb>

PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX) (México): <http://www.pemex.com/>

PEMEX; Anuario Estadístico 2008; PEMEX, México: 2008

PEMEX; Uso de etanol como oxigenante en gasolinas; Mayo 2008:
<http://www.pemex.com/files/content/etanol.pdf>

PETROBRAS (Brasil): <http://www2.petrobras.com.br>

REGLAMENTO DE LA LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS (México) (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 18-06-2009)

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (Estados Unidos): <http://www.ethanolrfa.org>

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, Ethanol: Industry Statistics (Estados Unidos): <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>

ROTHKOPF, Garten; A Blueprint for Green Energy in the Americas; Inter-American Development Bank, USA: 2007: <http://www.iadb.org/biofuels/>

SECRETARÍA DE ENERGÍA (México): <http://www.sener.gob.mx>

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA); Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (México):
<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT), INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE); Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002; INE, México: 2006

SENER; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; SENER-GTZ-BID, México: 2006:
http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf

SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA (México): <http://sie.energia.gob.mx>

THE WHITE HOUSE; Energy & Environment (Estados Unidos):
http://www.whitehouse.gov/issues/energy_and_environment/

THOMAS, Valerie; KWONG, Andrew; “Ethanol as a lead replacement: phasing out leaded gasoline in Africa”; en *Energy Policy* **29** (2001) 1133-1143

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA) (Brasil):
<http://www.unica.com.br/>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (Estados Unidos):
<http://www.energy.gov> , <http://www.doe.gov>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Alternative Fuels & Advanced Vehicles Data Center (Estados Unidos):
<http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/index.html>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Clean Cities Program (Estados Unidos):
<http://www1.eere.energy.gov/cleancities/index.html>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) (Estados Unidos):
<http://www.eere.energy.gov/>

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA) (Estados Unidos):
<http://www.eia.doe.gov>

CAPÍTULO 3

TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE RESIDUOS VEGETALES NO ALIMENTICIOS

En este capítulo se trata la producción de etanol desde las materias primas de origen vegetal y de carácter residual, hasta su purificación, con especial énfasis a las rutas tecnológicas desarrolladas en la actualidad para este fin.

Material Lignocelulósico

Para producir un biocombustible, sea éste sólido, líquido o gaseoso, es necesario seleccionar tanto el insumo como la tecnología de producción. En el capítulo 1, se hizo mención de los diferentes tipos de biocombustibles clasificados por generaciones de acuerdo a estos dos parámetros. En la presente tesis, se analizarán a continuación las tecnologías de producción de etanol de segunda generación, es decir, aquellas cuyo insumo es la biomasa lignocelulósica.

La biomasa lignocelulósica o material lignocelulósico es materia vegetal fibrosa, cosechada o recolectada recientemente, que está compuesta mayoritariamente por lignocelulosa, la cual es una estructura polimérica de carbohidratos conformada por celulosa, hemicelulosa y lignina. La lignocelulosa es formada por las plantas para darse soporte y estructura a sí mismas, y se le encuentra principalmente en tallos y hojas de hierbas y pastos, en la madera de los árboles, en residuos vegetales agrícolas como paja, cascarilla de granos y olote de maíz, y en residuos industriales como el bagazo de caña de azúcar, aserrín y papel, pues es el constituyente principal de la pared de las células vegetales.

La celulosa es un homopolisacárido (polímero de un solo tipo de carbohidrato) cuyo monómero es la celobiosa, un disacárido formado por dos moléculas de D-glucosa (ver figura 3.1). Las moléculas de celulosa se orientan aleatoriamente formando puentes de hidrógeno intra e intermolecularmente, lo que resulta en una agregación molecular para constituir microfibrillas. Estas a su vez se unen para dar lugar a dos tipos de celulosa: cristalina y amorfa. La celulosa cristalina surge de la unión altamente ordenada y densa de las microfibrillas de celulosa, es relativamente inerte a los tratamientos químicos y es insoluble en la mayoría de los solventes. En cambio, la celulosa amorfa es el resultado de la unión poco ordenada y de baja densidad de las microfibrillas de celulosa, característica que la hace muy susceptible a degradación química y aumenta su solubilidad en diversos solventes.

La hemicelulosa es un heteropolisacárido (polímero conformado por varios tipos de carbohidratos) construido a partir de hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa), pentosas (D-xilosa, L-arabinosa y D-arabinosa) y desoxihexosas (L-rhamnosa y L-fucosa), además de pequeñas cantidades de ácidos urónicos (ver figura 3.2). La estabilidad química y térmica de la hemicelulosa es menor que la correspondiente a la celulosa debido a su falta de cristalinidad. Al degradarse por tratamiento químico libera una mayor cantidad de pentosas que de hexosas.

La lignina es un heteropolímero formado por tres monómeros: alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol coumarílico, los cuales no son carbohidratos (ver figura 3.3). A pesar de que posee grupos funcionales altamente reactivos, no puede ser depolimerizada como la celulosa, es decir, no puede ser descompuesta en sus monómeros constituyentes. Esta característica le permite proteger a la lignocelulosa del ataque de insectos. La lignina y la hemicelulosa forman un escudo que rodea y protege a la celulosa.

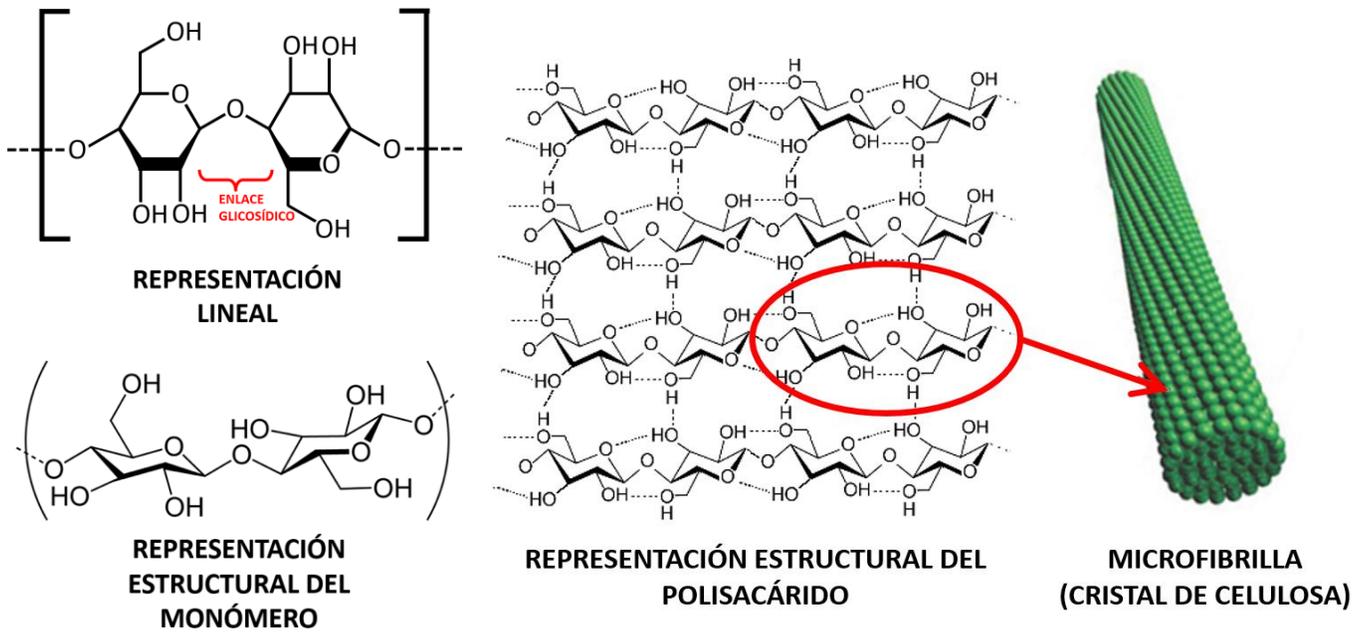


Figura 3.1. Estructura molecular de la celulosa

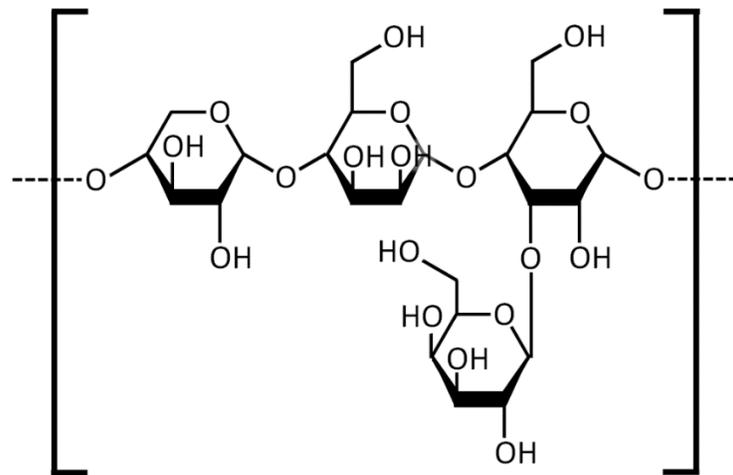


Figura 3.2. Estructura molecular de la hemicelulosa

La biomasa lignocelulósica también está constituida por otros compuestos químicos: resinas, grasas, ácidos grasos, fenoles, fitosteroles, entre otros, los cuales pueden ser extraídos mediante solventes orgánicos o por agua. Estas sustancias tienen la función de proteger a la planta del ataque de microbios e insectos, y pueden ser valiosos subproductos del procesamiento industrial de la biomasa, como la trementina (turpentine en inglés) y el aceite de resina (también conocido como “tall oil” tanto en inglés como en español).

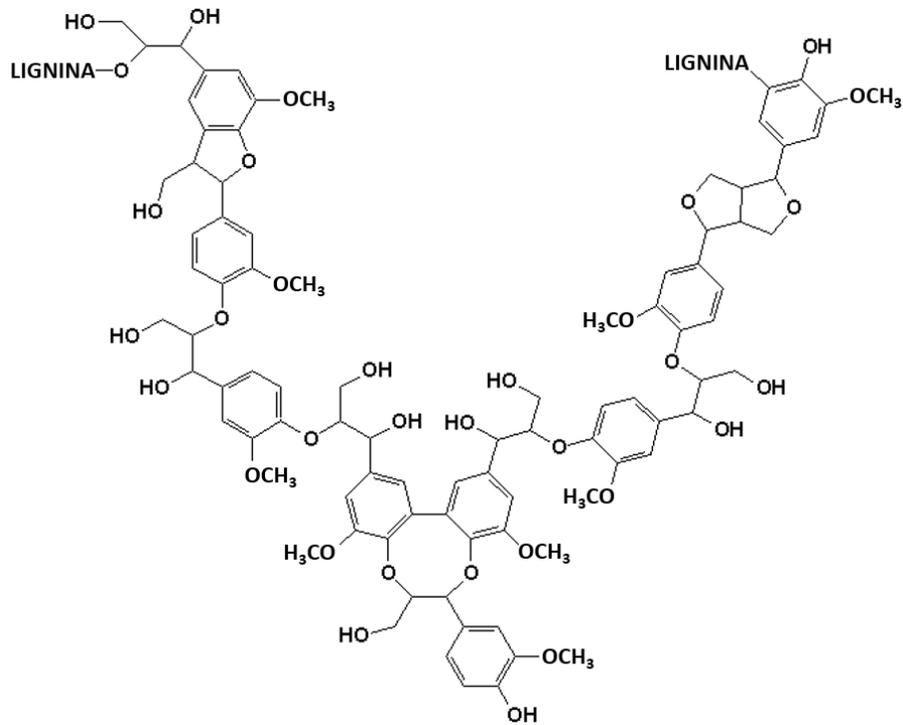


Figura 3.3. Estructura molecular de la lignina

Para poder transformar la biomasa lignocelulósica en etanol es necesario efectuar primero un tratamiento químico conocido como “sacarificación”, el cual consiste de dos etapas: pretratamiento e hidrólisis (ver figura 3.4). Mediante este procesamiento se degradan los polisacáridos de la lignocelulosa en monosacáridos (mejor conocidos como “azúcares”, de aquí la palabra sacarificación), obteniéndose así glucosa y otros carbohidratos que serán sujetos a fermentación. En el proceso de fermentación, los monosacáridos son ingeridos por microorganismos cuya función es convertir estos azúcares en etanol, el cual será separado de las demás sustancias mediante la destilación.

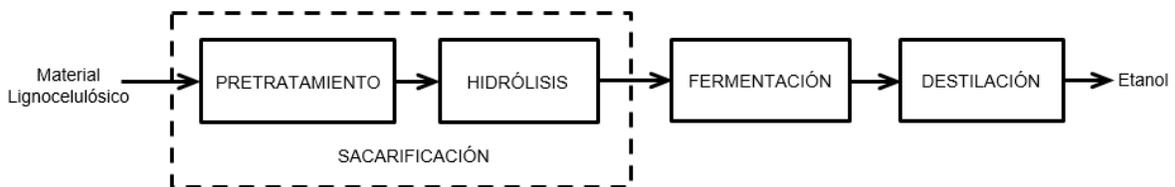


Figura 3.4. Diagrama de bloques del proceso global de conversión de la biomasa lignocelulósica en etanol

Previo al tratamiento químico de la biomasa, ésta debe ser reducida de tamaño en un molino. Al disminuir el tamaño de las partículas de la biomasa lignocelulósica, se incrementa su área superficial susceptible a ser atacada por el agente químico que la va a sacarificar; de esta forma se incrementa también la cantidad de azúcares obtenidos de la biomasa, y a su vez se disminuye el tiempo de exposición al agente.

Molienda

En la industria, se emplean tres tipos de molinos para procesar biomasa lignocelulósica: de cuchillas, de martillos, y de rodillos. Los molinos de cuchillas y de martillos se usan para reducir el tamaño de partícula de muchos tipos de biomasa: tallos, paja, olotes y madera (ver figura 3.5). En cambio, los molinos de rodillos se emplean principalmente para moler papel de desperdicio.

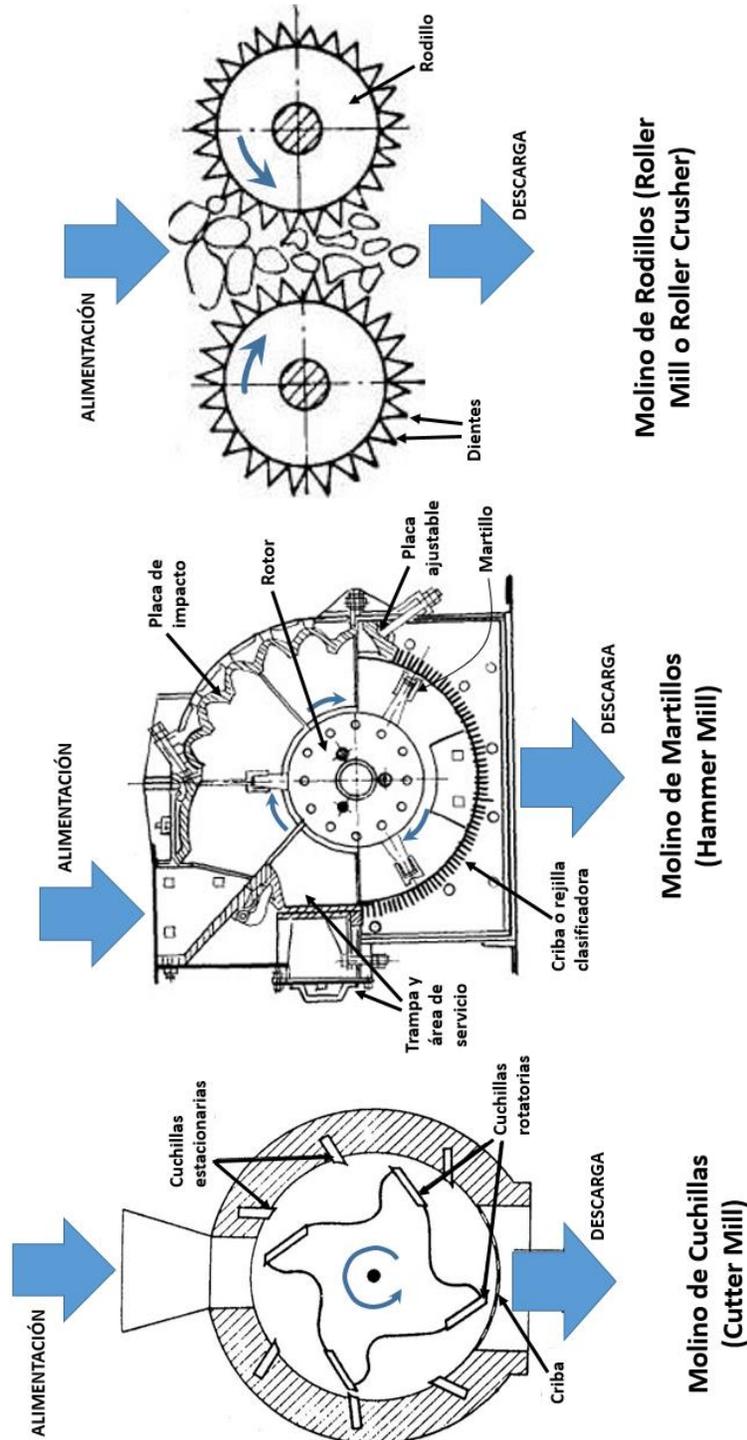


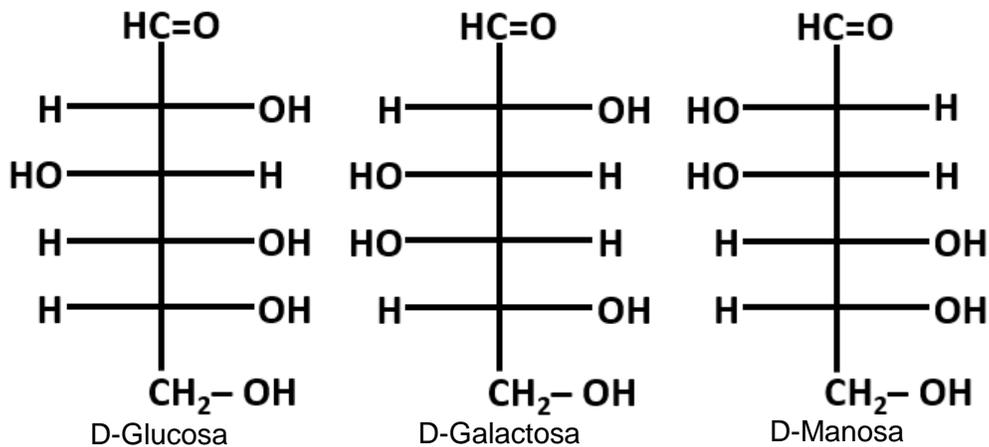
Figura 3.5. Molinos empleados para biomasa lignocelulósica

El tamaño de partícula final tras la molienda de la biomasa es en general de 3 mm, aunque para madera se recomienda un tamaño de partícula de 1.5 mm, pues debe quedar como aserrín. Entre más pequeño es el tamaño de las partículas de biomasa, más eficiente es su proceso de sacarificación.

Sacarificación

Es el proceso en el cual el material lignocelulósico es convertido en azúcares fermentables mediante su degradación mecánica y química. Consta de dos etapas, siendo la primera el “pretratamiento”, consistente en una disminución de tamaño (degradación mecánica) vía molienda o cortado, y posteriormente en un tratamiento químico o termoquímico (degradación química) donde la celulosa es separada de la hemicelulosa y de la lignina. La segunda etapa es la “hidrólisis”, proceso químico, termoquímico o enzimático que descompone a la celulosa en glucosa, aunque también puede liberar azúcares fermentables de la hemicelulosa, como la xilosa, arabinosa, galactosa y manosa (ver figura 3.6), siempre y cuando la hemicelulosa haya sido degradada parcial o totalmente durante el pretratamiento.

HEXOSAS (C6):



PENTOSAS (C5):

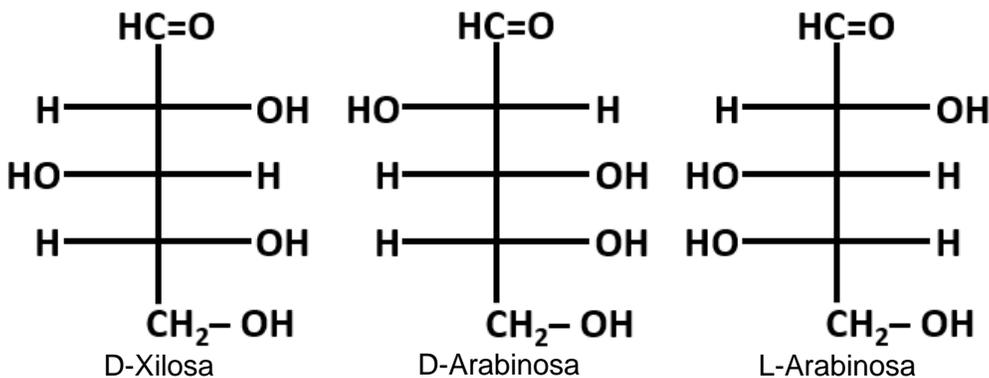


Figura 3.6. Azúcares fermentables obtenidos de la sacarificación de la biomasa lignocelulósica

Los azúcares fermentables mostrados en la figura 3.6 son clasificados de acuerdo al número de átomos de carbono presentes en la molécula (si tiene 6 carbonos se le llama azúcar C6 ó hexosa, y si posee 5 carbonos, azúcar C5 ó pentosa). Estas moléculas son los bloques más simples que constituyen a los polisacáridos, por esta razón se les denomina monómeros de azúcar o monosacáridos.

Dependiendo del insumo lignocelulósico, existen varias rutas tecnológicas para efectuar la sacarificación, siendo las principales o las más usadas:

- 1.- Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol).
- 2.- Hidrólisis con ácido sulfúrico diluido (proceso NREL).
- 3.- Explosión por vapor.
- 4.- Tratamiento con amoníaco:
 - 4a.- Proceso ARP
 - 4b.- Proceso SAA
 - 4c.- Proceso AFEX
- 5.- Tratamiento con cal.
- 6.- Tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno.
- 7.- Oxidación húmeda.
- 8.- Fraccionamiento con solventes orgánicos (proceso Organosolv).
- 9.- Fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado.
- 10.- Fraccionamiento con líquidos iónicos.

Estas rutas tecnológicas pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

I) *Tratamiento ácido*: rutas 1, 2, 9

II) *Tratamiento alcalino*: rutas 4a, 4b, 5

III) *Ruptura termoquímica*: rutas 3, 4c

IV) *Oxidación*: rutas 6, 7

V) *Tratamiento con solventes*: rutas 8, 10

A continuación se dará una descripción de las diferentes rutas tecnológicas de sacarificación de la lignocelulosa.

1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol).

Este proceso consta de cinco etapas, como se muestra en la figura 3.7. En la primera etapa, la celulosa y la hemicelulosa de la biomasa son decristalizadas mediante la adición de ácido sulfúrico acuoso, con una concentración entre 70 y 77% en volumen. La biomasa es previamente desecada hasta alcanzar un 10% de humedad, y el ácido es añadido en una proporción de 1.25:1 respecto del total de celulosa y hemicelulosa, mientras la temperatura es mantenida a 50°C. En esta etapa, el ácido concentrado rompe los puentes de hidrógeno existentes entre las

cadena de celulosa que conforman un cristal, lo que la transforma en celulosa amorfa, la cual es muy susceptible de hidrolizarse.

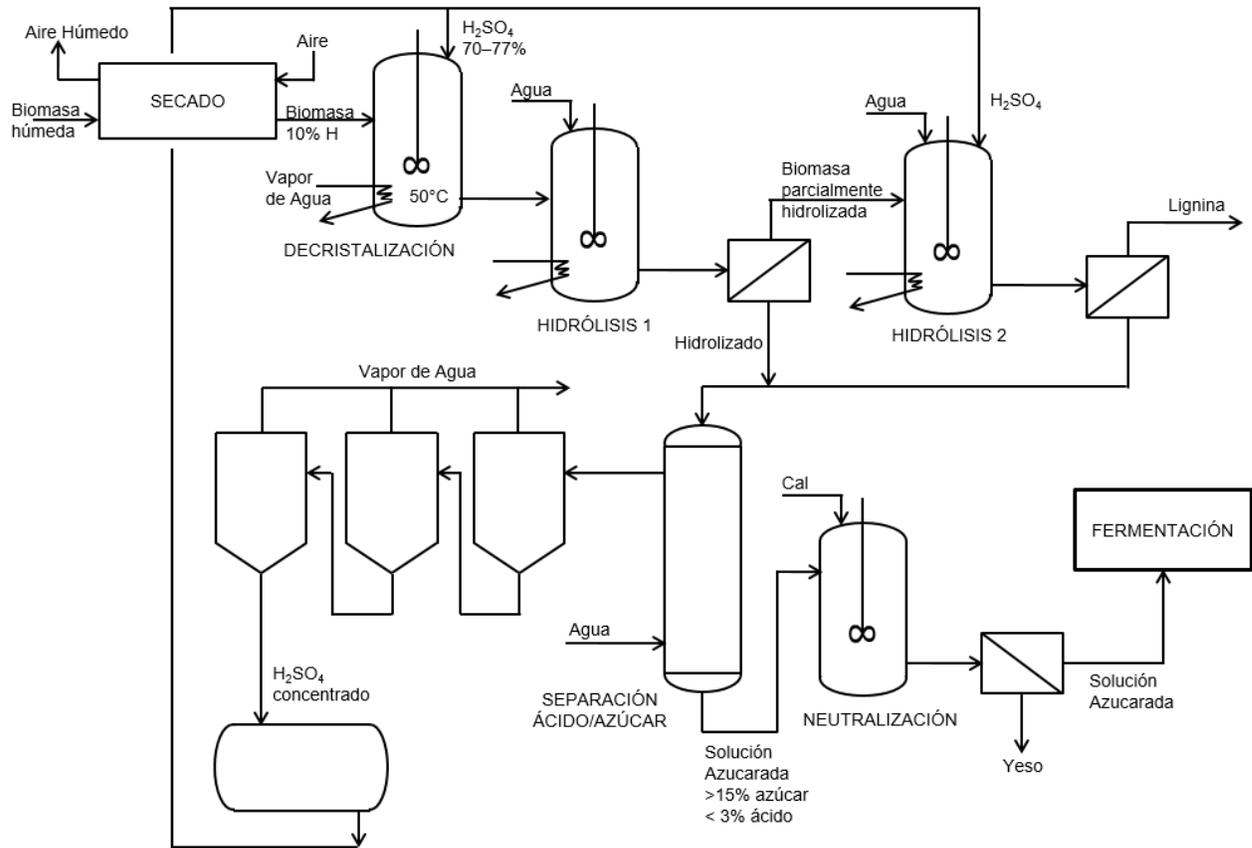


Figura 3.7. Diagrama de flujo del proceso Arkenol

En la segunda etapa, la mezcla ácida proveniente de la decristalización es diluida hasta alcanzar entre un 20 y 30% de ácido. Esta dilución produce la hidrólisis de la celulosa amorfa y de la hemicelulosa, y las transforma en sus monosacáridos constituyentes, lo que conforma un líquido denominado “hidrolizado”, el cual es separado del resto de la biomasa aún sin hidrolizar mediante un filtro prensa.

Posteriormente, la biomasa parcialmente hidrolizada es sometida a una segunda hidrólisis, bajo condiciones similares a la anterior. En esta tercera etapa, el resto de la celulosa y hemicelulosa es transformado en los azúcares monoméricos que la constituyen, por lo que es necesario separar al nuevo hidrolizado del resto de la biomasa, conformada ya casi exclusivamente de lignina.

En la cuarta etapa, el hidrolizado entra a una columna de lecho fluidizado que contiene una resina de intercambio catiónico, donde se efectúa la separación de los azúcares del ácido sulfúrico, y se obtiene un producto con al menos 15% de azúcares y con una concentración de ácido menor a 3%. Esta operación permite recuperar al ácido mediante un evaporador de triple efecto, para luego ser recirculado hacia la primera y la tercera etapas.

Finalmente, la solución azucarada es neutralizada empleando cal (hidróxido de calcio), por lo que se genera yeso (sulfato de calcio), el cual es removido mediante un filtro prensa. El líquido generado es una solución de azúcares fermentables.

2) Hidrólisis con ácido sulfúrico diluido (proceso NREL).

Este proceso, cuyas siglas provienen del National Renewable Energy Laboratory, dependiente del Departamento de Energía de Estados Unidos, comienza con una primera etapa de impregnación ácida (ver figura 3.8), en la cual la biomasa entra en contacto con ácido sulfúrico diluido, cuya concentración está entre 0.2% y 2.5% masa. Luego, la biomasa es desecada para aumentar su contenido de sólidos, de entre 30 y 35% masa hasta entre 40 y 60% masa. Después la biomasa tratada entra a un reactor donde se le aplica vapor de agua para ser hidrolizada a una temperatura constante de entre 130 y 220°C, y se le descarga hacia un tanque flash, en el cual se efectúa la separación del vapor de agua y la biomasa parcialmente hidrolizada, a una temperatura de entre 120 y 140°C. Posteriormente, la biomasa tratada es lavada con agua en un extractor a contracorriente, donde se recupera al menos el 95% de los azúcares liberados durante esta primer etapa del tratamiento químico.

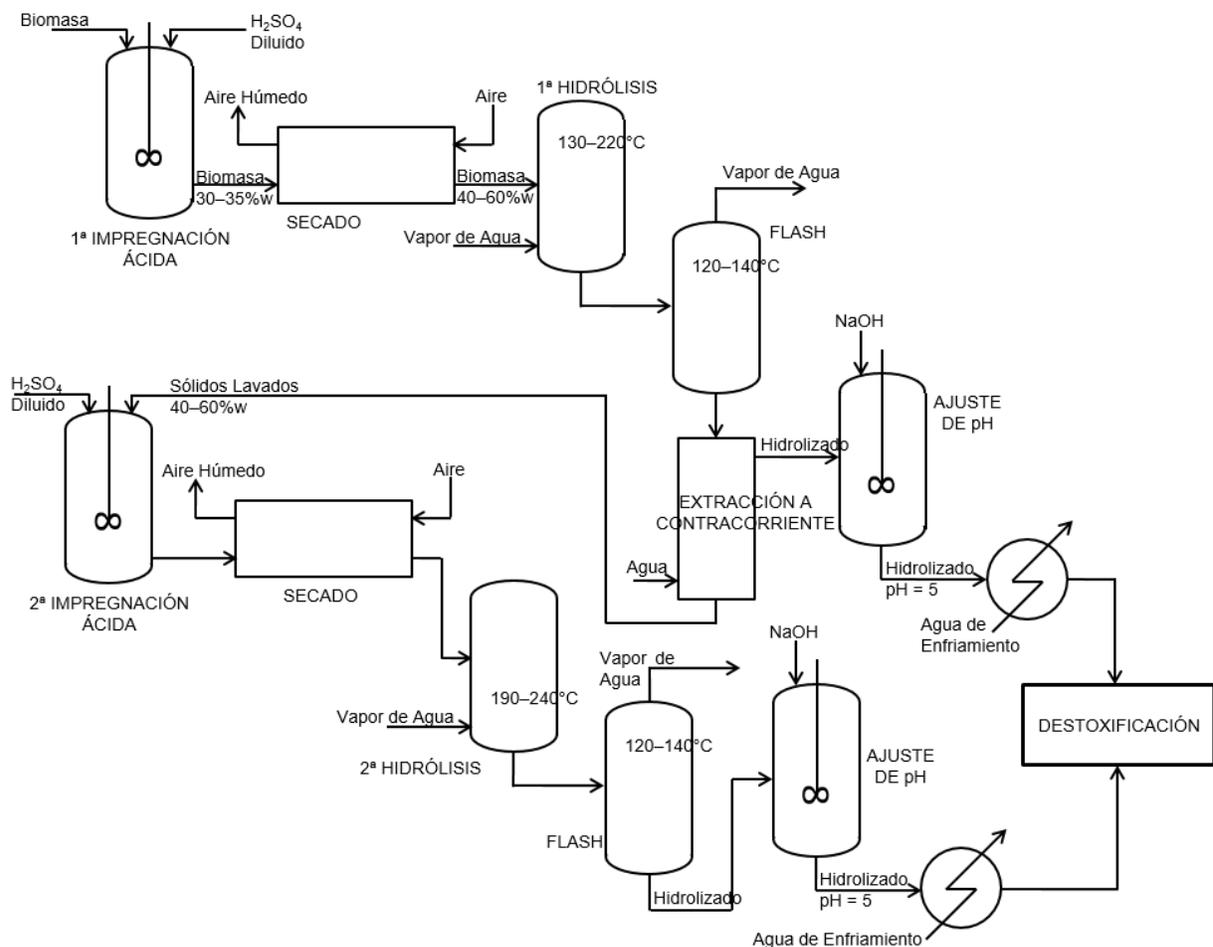


Figura 3.8. Diagrama de flujo del proceso NREL

En la segunda etapa de impregnación ácida, se adiciona más ácido sulfúrico diluido a los sólidos restantes de la biomasa tratada en la primer etapa. Luego se vuelve a desecar la biomasa tratada para pasar a una segunda hidrólisis con vapor de agua, la cual se lleva a cabo a condiciones más severas, pues se alcanzan temperaturas de entre 190 y 240°C, para poder hidrolizar a la celulosa restante. Después el hidrolizado es introducido a un tanque flash a 120 – 140°C para separar al vapor de agua del hidrolizado líquido.

Las corrientes de hidrolizado de ambas etapas tienen un pH bajo, lo cual afecta a los microorganismos usados en la fermentación de los azúcares. Por esta razón, a ambos hidrolizados se les ajusta el pH con sosa (hidróxido de sodio) hasta alcanzar un pH de 5. Asimismo, a ambas corrientes se les baja la temperatura mediante sendos intercambiadores de calor.

Aunque este proceso es aplicable a cualquier tipo de biomasa lignocelulósica, tiene un gran inconveniente, genera una gran cantidad de compuestos derivados de la degradación de la xilosa y de otros azúcares provenientes de la hemicelulosa, entre los cuales destacan el furfural y el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), ácidos orgánicos como el acético, fórmico y levulínico, y compuestos fenólicos, todos ellos tóxicos para los microorganismos fermentadores que producen etanol. Debido a ello, es necesario destoxificar ambas corrientes de hidrolizado previo a su fermentación.

Existen varios métodos de destoxificación de hidrolizados provenientes del proceso de hidrólisis con ácido sulfúrico diluido, pero de ellos destacan dos:

i) Destoxificación con hidróxido de calcio (overliming en inglés):

Este método consiste en agregar hidróxido de calcio al hidrolizado hasta alcanzar un pH de 9 ó 10 (ver figura 3.9), con lo que el furfural y el 5-HMF son degradados. Esto produce una gran cantidad de yeso, el cual debe ser removido mediante un filtro prensa, además de provocar la pérdida de azúcares fermentables. Finalmente, se debe reajustar el pH del hidrolizado destoxificado a 5 para efectuar la fermentación.

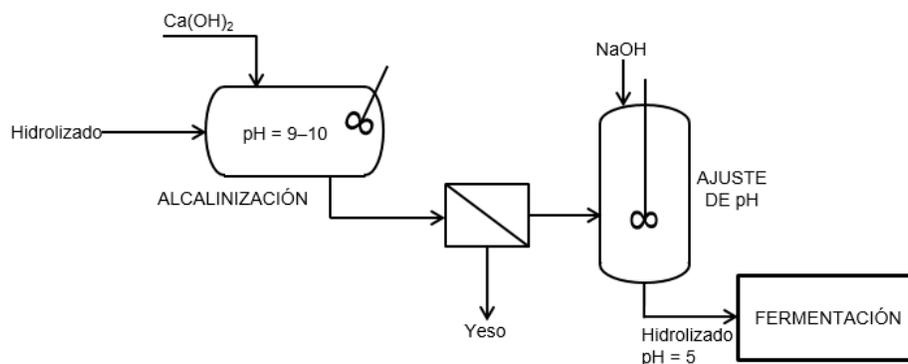


Figura 3.9. Diagrama de flujo de la destoxificación con hidróxido de calcio

ii) Destoxificación mediante intercambio aniónico:

En este método, el hidrolizado es introducido a una columna con resinas de intercambio aniónico (ver figura 3.10), las cuales remueven todos los compuestos tóxicos o inhibitorios de la fermentación, pero también remueven algunos azúcares fermentables.

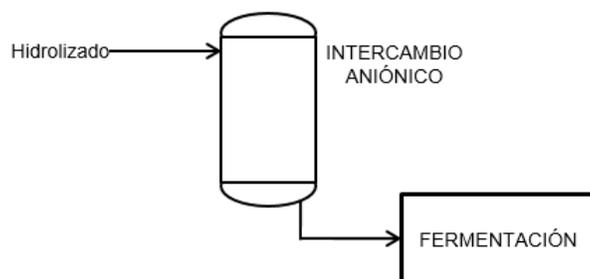


Figura 3.10. Diagrama de flujo de la destoxificación mediante intercambio aniónico

Actualmente, se está estudiando un método de destoxificación que emplea hongos, entre los cuales destaca *Amorphotheca resiniae*, pues logra disminuir considerablemente a inhibidores de la fermentación como el ácido acético, ácido levulínico, furfural y 5-HMF.

3) Explosión por vapor.

En este proceso, la biomasa es expuesta a vapor de agua sobrecalentado y se le presuriza por un tiempo corto, después del cual se despresuriza súbitamente, provocando que la biomasa “explote”. El propósito de este pretratamiento, conocido en inglés como steam explosion, es la ruptura de las microfibrillas para que la celulosa y la hemicelulosa sean susceptibles de hidrolizarse. Durante la exposición de la biomasa al vapor, el agua penetra la lignocelulosa e inicia una reacción de autohidrólisis, dado el carácter ácido del agua a altas temperaturas. Cuando ocurre la expansión súbita, esta agua se vaporiza rápidamente, provocando la ruptura de los enlaces glicosídicos de la celulosa y hemicelulosa, y la eliminación o el reacomodo de la lignina. La ruptura de estos enlaces genera ácido acético, el cual cataliza la reacción de hidrólisis de la hemicelulosa, liberando así azúcares solubles en agua. Tras esta explosión, la celulosa es más accesible al ataque de enzimas durante la hidrólisis.

Para favorecer la hidrólisis, la biomasa debe ser pretratada primero con ácido sulfúrico al 1%, para luego efectuar la explosión con vapor de agua, como se muestra en la figura 3.11. Dicho vapor es introducido a una temperatura de entre 190 y 270°C hasta presurizar al reactor a no más de 16 atm. El tiempo de exposición de la biomasa a estas altas temperaturas y presiones es muy corto, y depende de la temperatura del vapor, pues si éste entra a 190°C, el tiempo de exposición será de 10 min, pero si entra a 270°C, el tiempo disminuye a tan sólo un minuto. También este tiempo depende del tamaño de partícula de la biomasa, ya que se ha observado la obtención de una mayor cantidad de azúcares en el hidrolizado

mientras la partícula de biomasa sea de mayor tamaño. Una vez transcurrido este intervalo de tiempo, el contenido del reactor es expandido súbitamente, para ser recolectado en un tanque a una menor presión. Este tanque además permite la separación del vapor de agua y del líquido a hidrolizar. El vapor de agua además acarrea al furfural y al ácido acético formados durante la explosión, pues son compuestos inhibitorios de la fermentación.

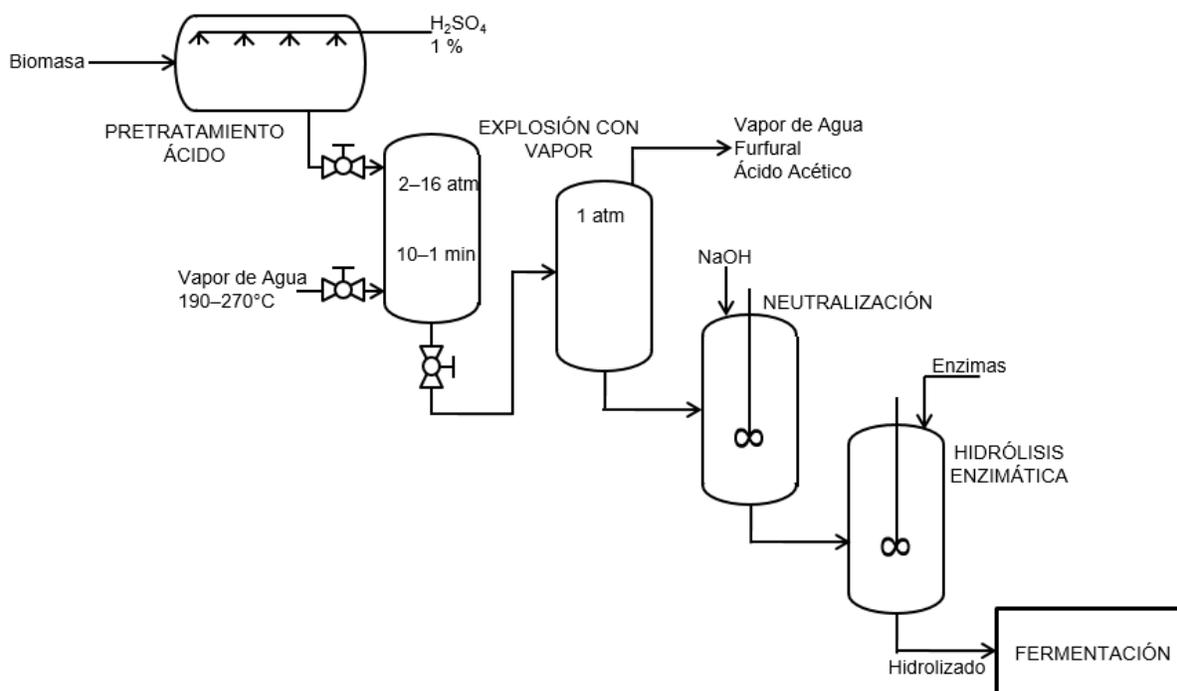


Figura 3.11. Diagrama de flujo del proceso de explosión por vapor

Posteriormente, debido a la formación de algunos ácidos y aldehídos, se neutraliza con sosa al líquido que contiene la biomasa pretratada y parcialmente degradada, hasta alcanzar un pH de entre 4 y 7, preferiblemente de 5, para finalmente efectuar una hidrólisis enzimática de la celulosa. Para esta última etapa, previa a la fermentación, se emplea la enzima celulasa para transformar a la celulosa en monosacáridos fermentables.

4) Tratamiento con amoníaco.

El amoníaco es un gas cuya disolución acuosa produce una base, el hidróxido de amonio, que provoca la degradación de las cadenas glicosídicas y de éster de la lignocelulosa, lo cual resulta en una alteración estructural de la lignina, el hinchamiento de la celulosa y su consecuente decristalización parcial, y en la solvatación parcial de la hemicelulosa. Otras bases como la sosa (hidróxido de sodio) y la potasa (hidróxido de potasio), también producen el mismo efecto sobre la biomasa que el amoníaco, pero este último se ha preferido para aplicarse a nivel industrial debido a que puede ser recuperado gracias a su alta volatilidad, y asimismo, se logra una considerable reducción de costos de productos químicos y de tratamiento de residuos y efluentes.

Existen diferentes procesos de tratamiento de la biomasa con amoníaco, destacando los tres descritos a continuación:

4a) Proceso ARP:

Este proceso denominado de percolación de amoníaco reciclado, ó ARP por sus siglas en inglés (Ammonia Recycle Percolation), consiste en introducir hidróxido de amonio acuoso, con una concentración de entre 5 y 15% masa, a un reactor empacado con la biomasa a tratar. El interior del reactor se mantiene a una temperatura de entre 140 y 210°C, y a una presión de 2.3 MPa, por un tiempo aproximado de 6 horas. Este contacto de la biomasa y el hidróxido de amonio permite delignificar la lignocelulosa, pues se logra eliminar entre 75 y 85% de la lignina, además de solubilizar a poco más de la mitad (50–60%) de la hemicelulosa. Por consiguiente, la celulosa queda expuesta a las enzimas que la hidrolizarán posteriormente.

Una vez delignificada la biomasa, es endulzada para eliminar al hidróxido de amonio, el cual es recuperado como amoníaco en fase gaseosa para reciclarlo al reactor de delignificación, como se muestra en la figura 3.12. Finalmente, la biomasa tratada es hidrolizada mediante enzimas para su posterior fermentación.

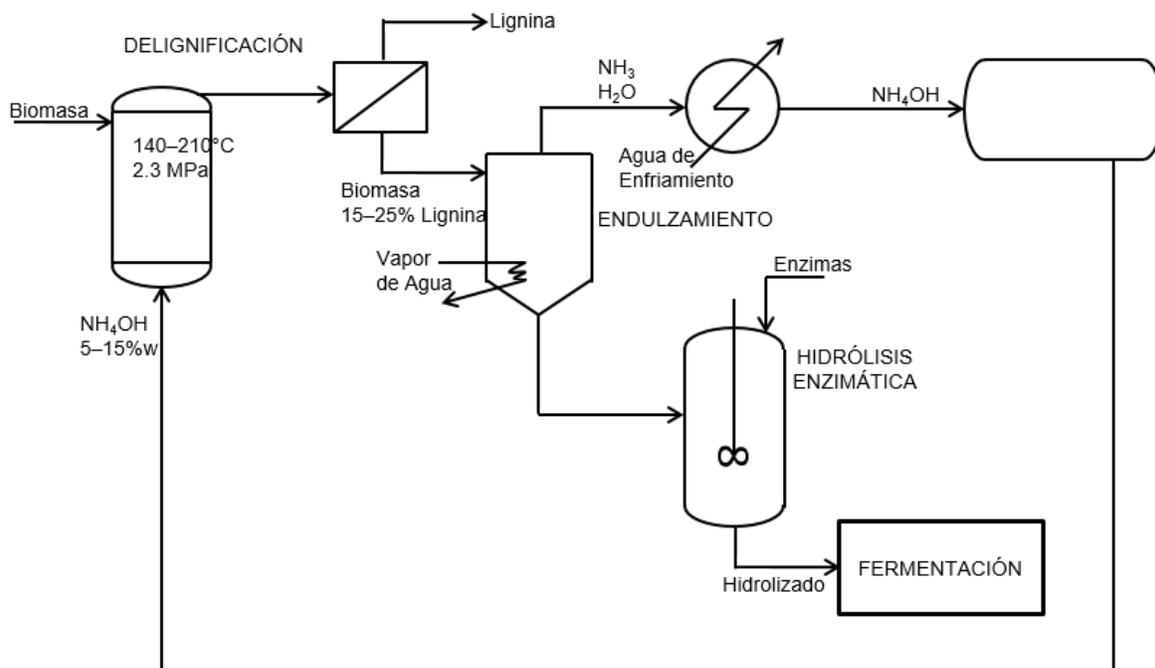


Figura 3.12. Diagrama de flujo del proceso ARP

4b) Proceso SAA:

El proceso conocido por las siglas SAA, del inglés Soaking in Aqueous Ammonia (sumersión en amoníaco acuoso), comienza por sumergir la biomasa en hidróxido

de amonio acuoso al 29.5% masa, para delignificarla. El tiempo de contacto depende de la temperatura a la que se efectúe esta reacción, pues si es de 25°C, el tiempo de residencia de la biomasa debe ser de 10 días, pero si es de 60°C, este tiempo disminuye a 12 horas. El resto del proceso se lleva a cabo como se observa en la figura 3.13, de forma similar al proceso ARP.

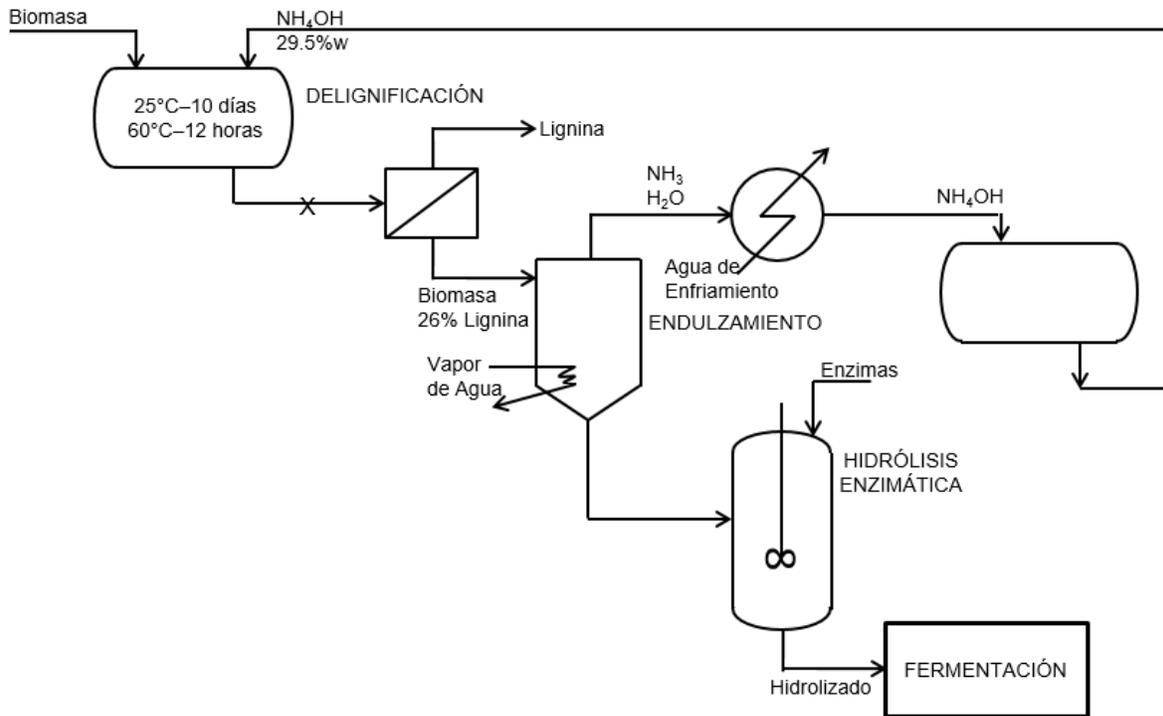


Figura 3.13. Diagrama de flujo del proceso SAA

Al manejar temperaturas de tratamiento menores al proceso ARP, el proceso SAA posee menores costos por energía, pero los tiempos de procesamiento son mayores, aunque esto permite una mayor obtención de glucosa y de xilosa, las principales azúcares fermentables.

4c) Proceso AFEX:

Las siglas AFEX provienen del nombre inglés Ammonia Fiber/Freeze Explosion/Expansion, y se aplican al proceso cuyo propósito central es provocar la ruptura de la lignocelulosa de modo similar al proceso de explosión por vapor, pero empleando amoniaco gaseoso en lugar de vapor de agua, y a una menor temperatura. Durante la exposición de la biomasa al amoniaco a alta presión, éste penetra las fibras de la biomasa y provoca que la lignocelulosa se hinche. Al efectuarse la expansión súbita del sistema, los enlaces lignina-carbohidrato se rompen, la hemicelulosa se hidroliza debido al carácter básico del amoniaco, y la celulosa se decristaliza parcialmente. Aunque la lignina no es eliminada, a diferencia del proceso de explosión por vapor, el proceso AFEX no genera sustancias inhibitoras de la fermentación debido a que tampoco degrada a la lignina. Como el

amoníaco se vaporiza rápida y completamente tras la expansión súbita, no es necesario efectuar un ajuste al pH antes de la hidrólisis enzimática y la fermentación.

El reactor donde se realiza la explosión con amoníaco opera a 140–180 psia y de 60 a 120°C, con un tiempo de residencia de entre 5 y 30 minutos, dependiendo del tipo de biomasa. El tanque colector del contenido del reactor se encuentra a condiciones atmosféricas, las cuales son suficientes para vaporizar al amoníaco contenido por la biomasa pretratada. Si no se lograra eliminar a la totalidad del amoníaco, se debe desecar la biomasa en un secador.

En la figura 3.14 se observa el ciclo de recuperación y reutilización del amoníaco, vía una condensación de los vapores provenientes del tanque colector del contenido del reactor, y una destilación del amoníaco. Nótese que la torre de destilación sólo representa a la operación unitaria, pues dicha figura no muestra los equipos periféricos ni las bombas necesarias en el proceso.

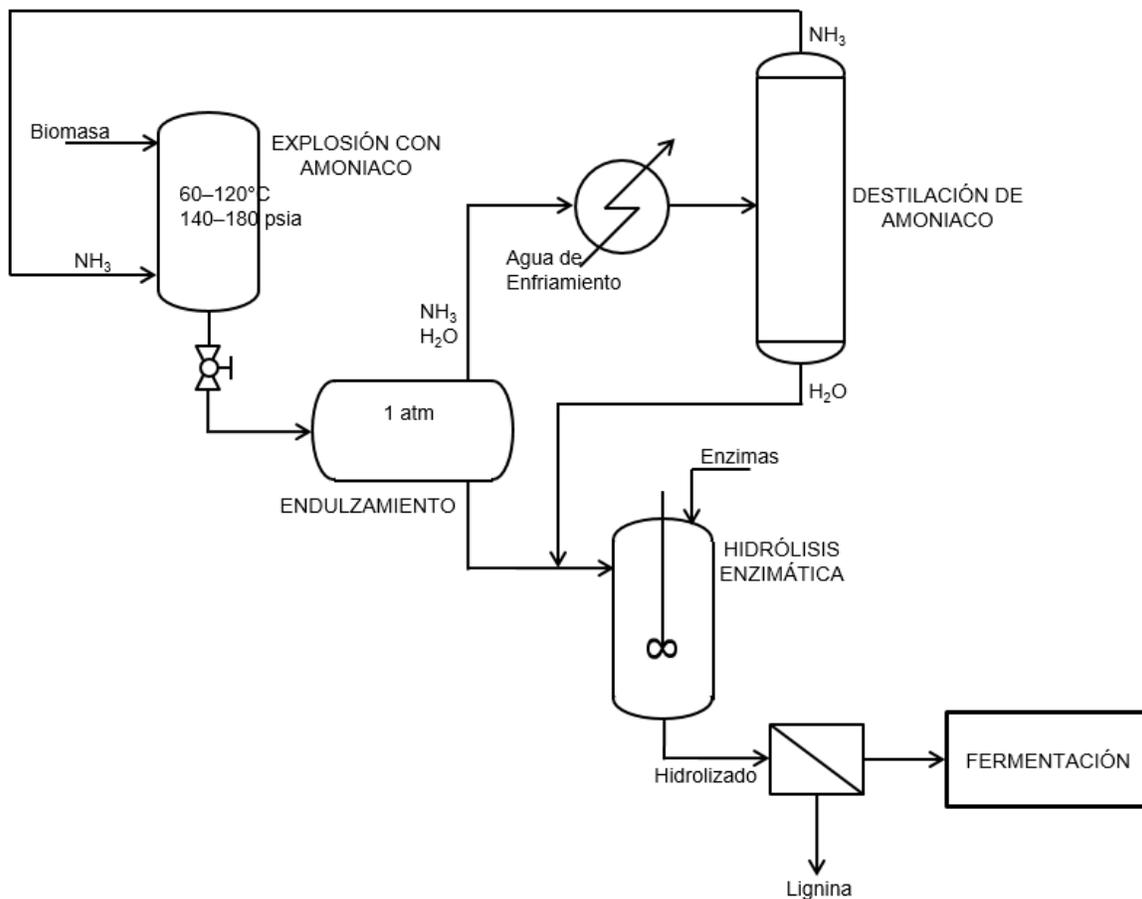


Figura 3.14. Diagrama de flujo del proceso AFEX

Una vez efectuada la hidrólisis enzimática de la biomasa tratada con amoníaco, se retira la lignina mediante un filtro prensa previo a la fermentación del hidrolizado.

5) Tratamiento con cal.

La cal, cuyo nombre IUPAC es hidróxido de calcio, es también una base, al igual que el amoníaco. Por esta razón, este proceso de tratamiento con cal (conocido en inglés como lime pretreatment) es semejante al proceso SAA, pero con la ventaja de tener un menor costo pues la cal es mucho más barata que el amoníaco, y además, se requiere un menor manejo de productos químicos.

Este proceso inicia con la inmersión de la biomasa en una solución de hidróxido de calcio al 2% masa, a una temperatura de 55°C y con aereación por unas cuatro semanas (ver figura 3.15). Como durante esta etapa se producen algunas sustancias inhibitoras de la fermentación, la lignocelulosa tratada debe neutralizarse para eliminarlos. Esta operación se llevará a cabo utilizando anhídrido carbónico (mejor conocido como dióxido de carbono, CO₂) para incluso precipitar al calcio como su carbonato correspondiente. Posteriormente, se efectúa una separación de los sólidos (mayoritariamente lignina y carbonato de calcio) mediante filtro prensa. Finalmente, la biomasa tratada se somete a una hidrólisis enzimática para después ser fermentada.

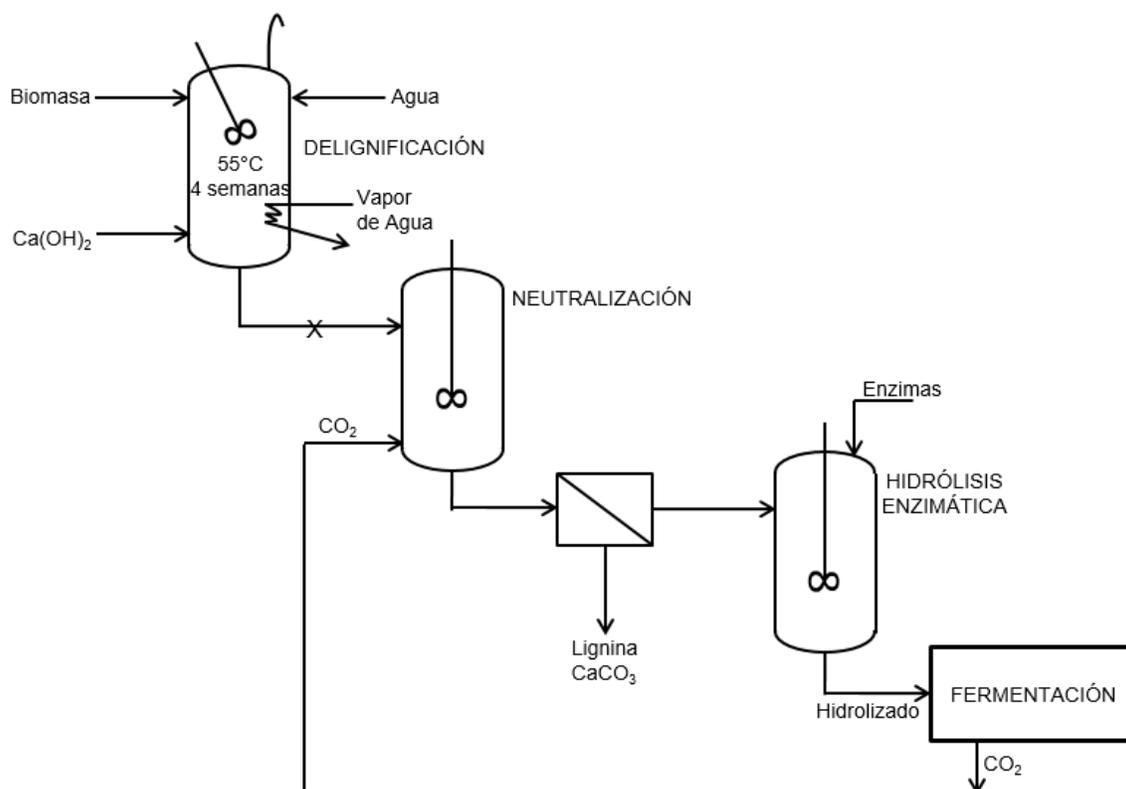


Figura 3.15. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento con cal

6) Tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno.

El peróxido de hidrógeno, mejor conocido como agua oxigenada, es un agente oxidante, el cual transforma a la lignina en dióxido de carbono, agua y ácidos

carboxílicos. Si se eleva el pH del agua oxigenada, ésta solubiliza a la hemicelulosa, por lo que la celulosa permanece intacta. Dado lo anterior, este proceso permite separar a los tres componentes de la lignocelulosa para darles su respectivo tratamiento.

Según se muestra en la figura 3.16, este proceso comienza con la adición de una solución alcalina de peróxido de hidrógeno, con pH de 11.5, a la biomasa previamente molida hasta alcanzar sus partículas una longitud aproximada de 2 mm. Una vez solubilizadas la lignina y la hemicelulosa, la celulosa es separada del líquido mediante un filtro prensa para ser hidrolizada con enzimas. De esta hidrólisis se obtiene glucosa.

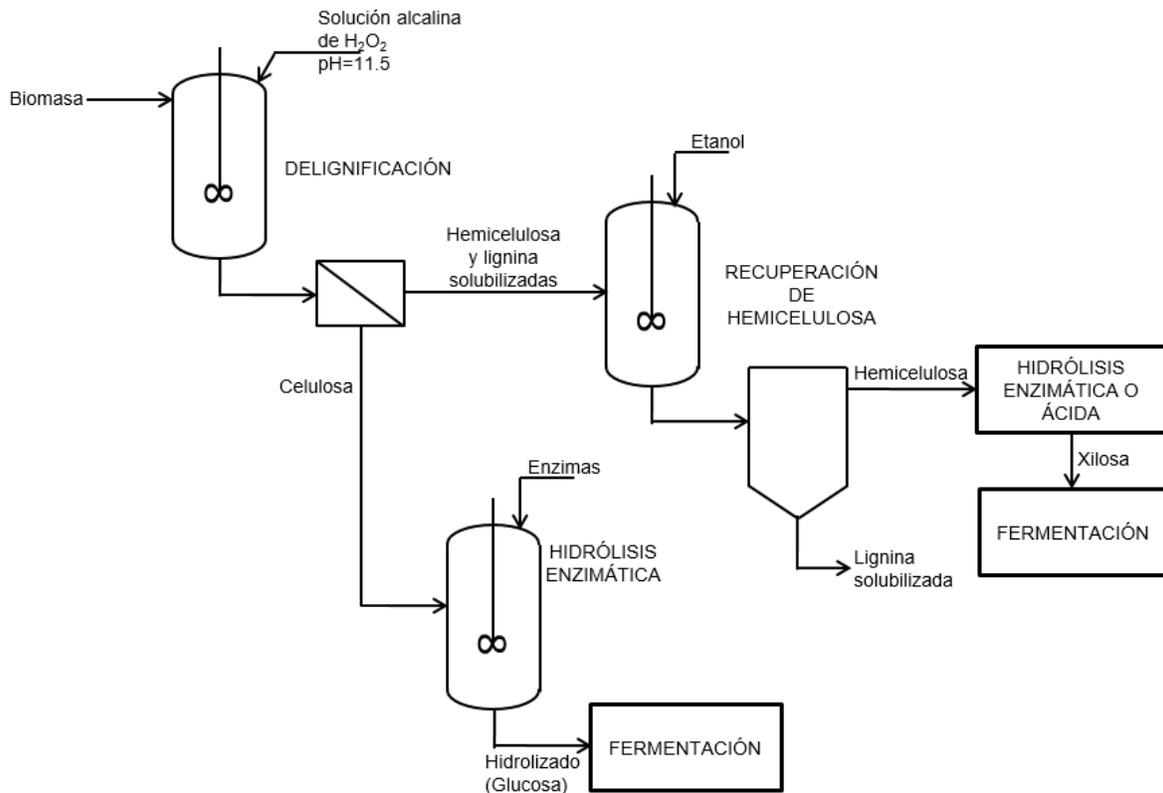


Figura 3.16. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno

Por otro lado, la hemicelulosa es recuperada mediante su extracción con etanol para ser hidrolizada con enzimas o con ácidos. De esta hidrólisis, se obtiene principalmente xilosa. Tanto la xilosa como la glucosa se fermentan por separado para producir etanol.

7) Oxidación húmeda.

Este proceso es similar al pretratamiento anterior excepto que el peróxido de hidrógeno es sustituido por aire u oxígeno puro, siendo ésta su principal ventaja, pues reduce costos por productos químicos.

Como se observa en la figura 3.17, la biomasa es expuesta a una corriente de aire u oxígeno, la cual es introducida al reactor hasta que se alcance una presión de 12 bar. Se añade agua para tener un medio donde se solubilizarán la hemicelulosa y la lignina. También se adiciona carbonato de sodio, Na_2CO_3 , para reducir la formación de subproductos como los inhibidores de la fermentación. Una vez introducidos todos los reactivos al reactor, se efectúa la delignificación a una temperatura de 195°C por un intervalo de tiempo de entre 10 y 20 minutos. Transcurrido este tiempo, se sigue un procesamiento similar al del tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno, obteniéndose de forma separada xilosa y glucosa, que de igual forma, se fermentan por separado para producir etanol.

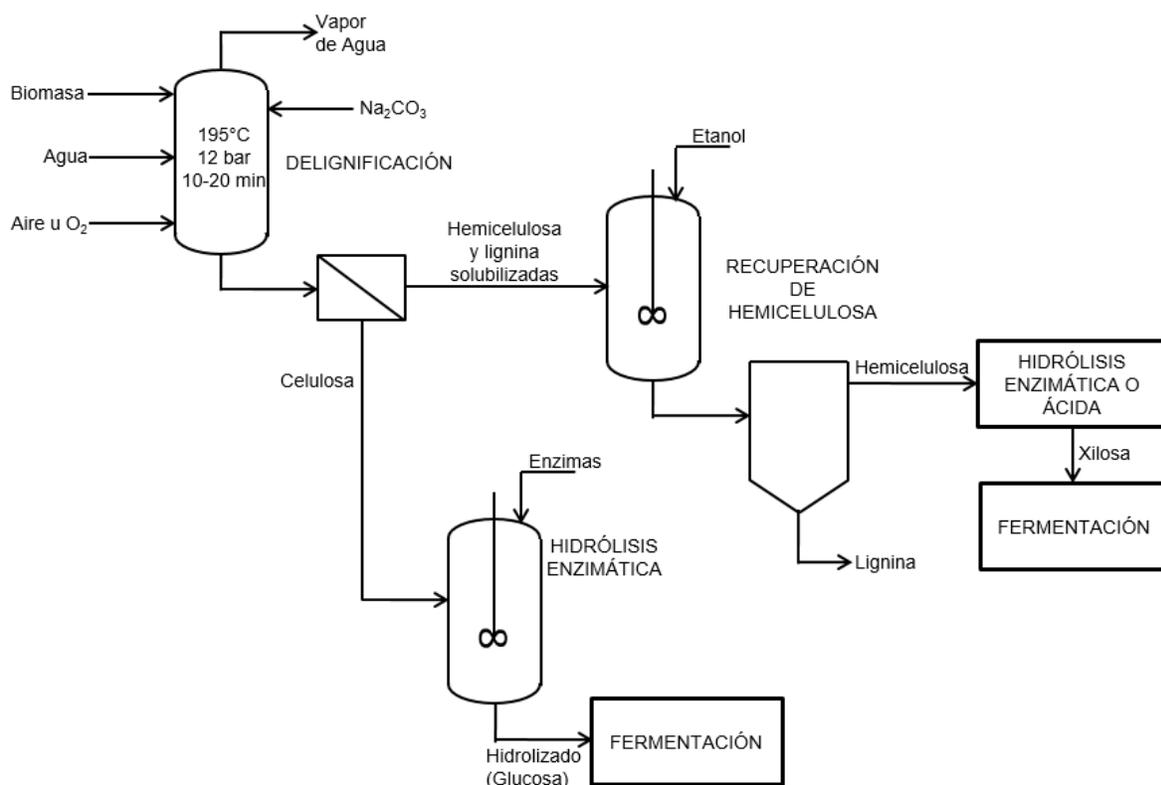


Figura 3.17. Diagrama de flujo del proceso de oxidación húmeda

8) Fraccionamiento con solventes orgánicos (proceso Organosolv).

El proceso conocido como Organosolv emplea solventes orgánicos como el etanol, pero a pH bajo para poder fraccionar a la biomasa, es decir, para solubilizar la lignina y hemicelulosa, dejando de lado a la celulosa intacta pero lista para ser hidrolizada por enzimas. El solvente orgánico empleado actúa de forma similar al peróxido de hidrógeno y al oxígeno en los dos pretratamientos anteriores.

Al igual que en los últimos dos pretratamientos, el proceso unitario clave está en el reactor de delignificación. En el proceso Organosolv, mostrado en la figura 3.18, la

biomasa entra en contacto con etanol acidificado con ácido sulfúrico, y se eleva la temperatura de la mezcla de reacción hasta los 180°C. Transcurridos 60 minutos, el contenido del reactor es fraccionado para obtener glucosa y xilosa para su posterior fermentación.

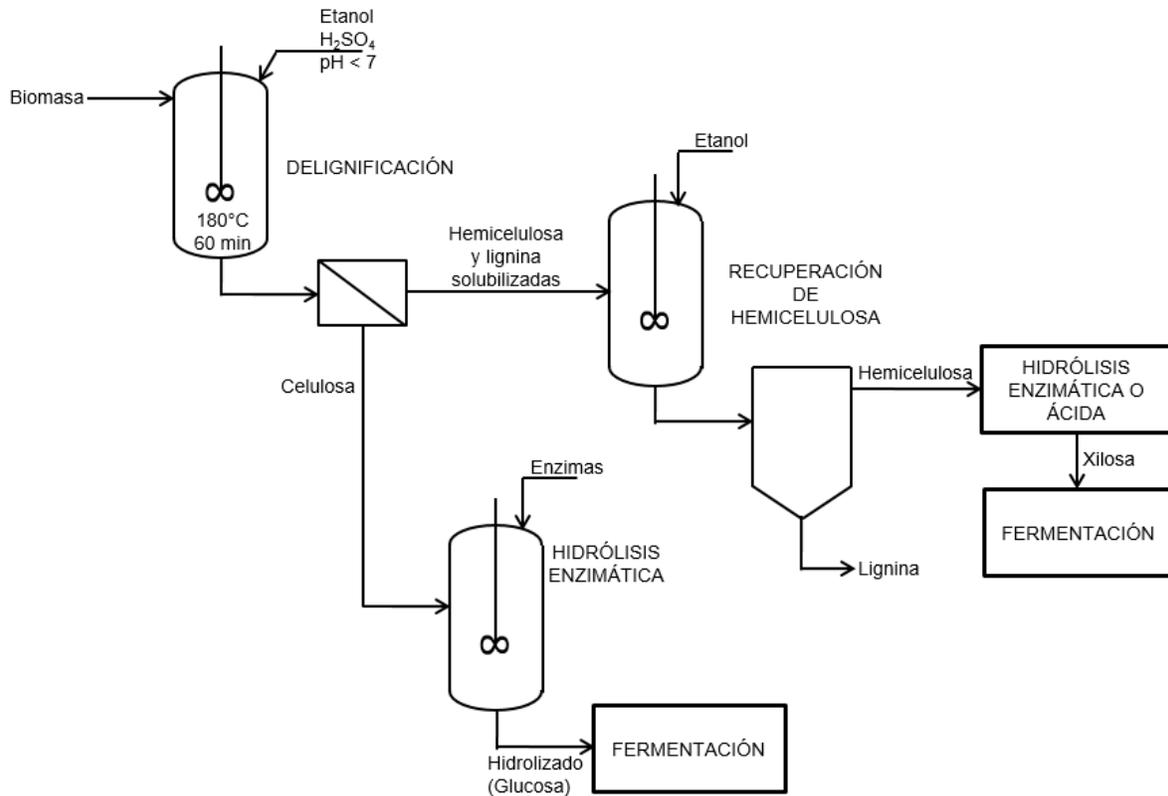


Figura 3.18. Diagrama de flujo del proceso Organosolv

9) Fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado.

Este proceso consiste en la separación de los componentes de la lignocelulosa por diferencia de solubilidades en varios solventes. Primero, se añade ácido fosfórico, con una concentración mayor al 82%, a la biomasa para solubilizar a la lignocelulosa. Esta etapa de digestión se efectúa a 50°C por unas cuatro horas aproximadamente. Al líquido obtenido de este reactor, se le adiciona acetona para precipitar a parte de la lignina y para también extraer a la hemicelulosa y la celulosa hacia la fase orgánica. Luego, la mezcla líquida es lavada primero con acetona para eliminar a la lignina, y después con agua para extraer a la hemicelulosa hacia la fase acuosa, pues la celulosa es insoluble en agua. Posteriormente, se regenera a la acetona y al ácido fosfórico mediante el arreglo esquematizado en la figura 3.19. La torre de destilación ahí mostrada sólo representa a la operación unitaria, por lo que no fueron dibujados sus equipos periféricos. De esta manera también se obtiene lignina de bajo peso molecular, hemicelulosa y celulosa, la cual será hidrolizada enzimáticamente para producir glucosa que será fermentada para transformarse en

etanol. La hemicelulosa también podría hidrolizarse para producir xilosa y también ser sujeta a una fermentación para obtener etanol.

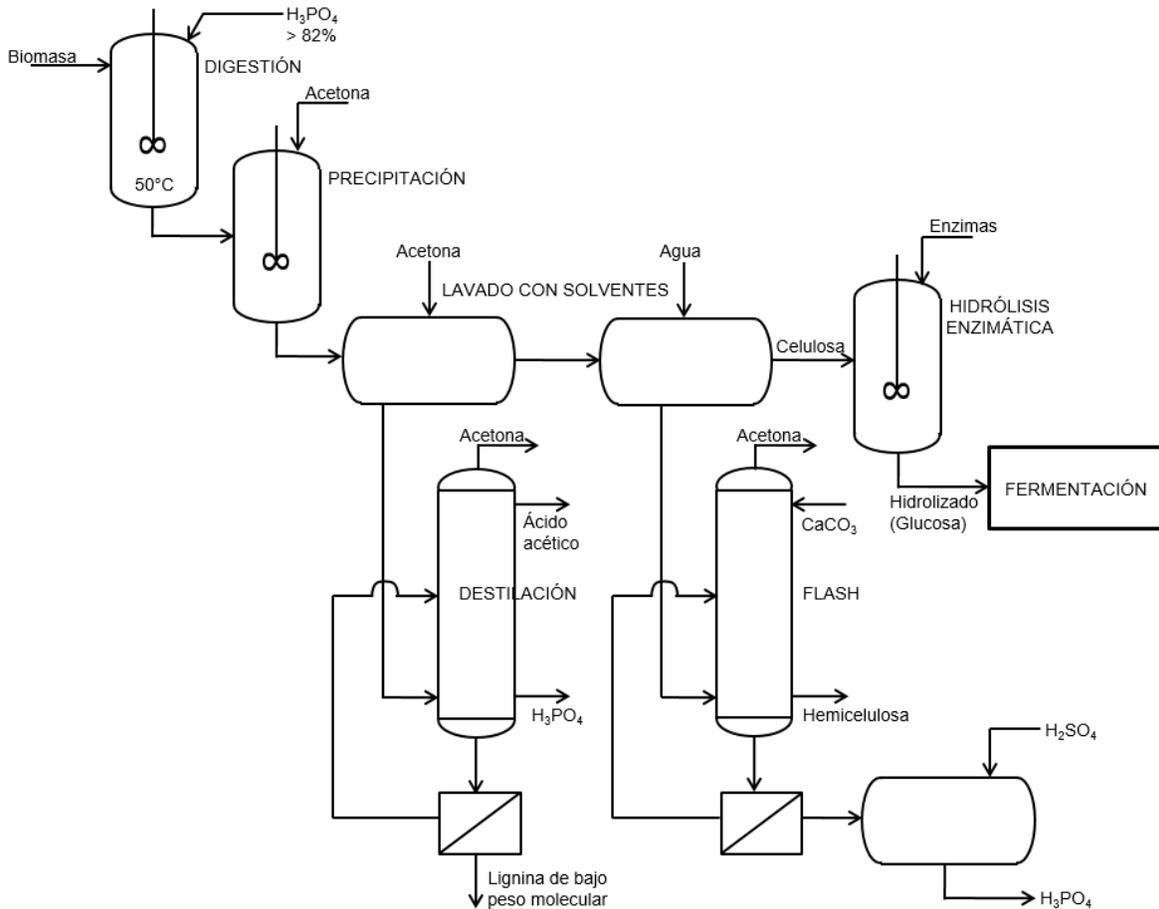


Figura 3.19. Diagrama de flujo del proceso de fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado

También se ha estudiado el fraccionamiento de la lignocelulosa con otros ácidos, como el ácido trifluoroacético (TFA), el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, pero el que ha dado mejores resultados de entre estos es el TFA.

10) Fraccionamiento con líquidos iónicos.

Los líquidos iónicos son sales compuestas por un pequeño anión y por un catión orgánico muy grande, las cuales son líquidas a temperatura ambiente, poseen una presión de vapor muy baja, y tienen la capacidad de disolver a los componentes de la biomasa lignocelulósica. Para su uso en el pretratamiento de la lignocelulosa, además de una gran capacidad de disolución, los líquidos iónicos deben tener un punto de fusión muy bajo, una baja viscosidad, una toxicidad muy baja, y una alta estabilidad hasta los $300^\circ C$.

Este pretratamiento con líquidos iónicos comienza con la delignificación de la biomasa mediante la disolución de la celulosa en el líquido iónico, a presión atmosférica y a temperaturas de entre 90 y 130°C, durante un intervalo de tiempo de entre 1 hora y 24 horas. En esta primera etapa del proceso, el anión del líquido iónico forma puentes de hidrógeno con la celulosa en una proporción estequiométrica uno a uno, rompiendo así la estructura cristalina de la celulosa. De esta forma, la celulosa se hace amorfa y se incrementa su accesibilidad a las enzimas durante la hidrólisis enzimática.

Una vez separada de la hemicelulosa y de la lignina, la celulosa es precipitada mediante un lavado con agua o con etanol, como se muestra en la figura 3.20, para luego ser sometida a una hidrólisis enzimática, y así producir glucosa para su fermentación y transformación en etanol.

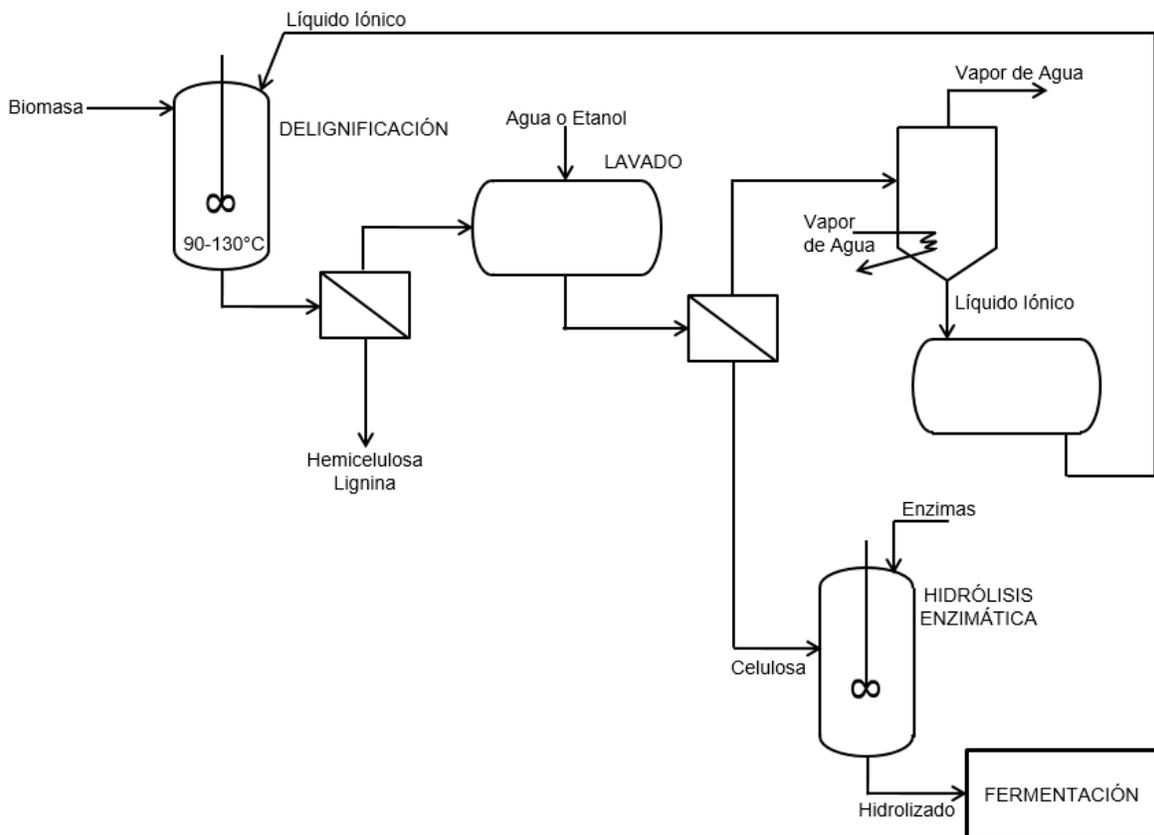


Figura 3.20. Diagrama de flujo del proceso de fraccionamiento con líquidos iónicos

Tras el lavado de la celulosa, el líquido iónico es recuperado en al menos un 99% mediante la evaporación del agua o del etanol empleados en el lavado, pues la presión de vapor del líquido iónico es muy inferior a la del agua. Entre los cationes que conforman a los líquidos iónicos están el 1-alkil-3-metilimidazolio, 1-alkil-2,3-dimetilimidazolio, 1-alil-3-metilimidazolio, 1-alil-2,3-dimetilimidazolio, 1-butil-3-metilpiridinio, y el tetrabutilfosfonio. Entre los aniones de los líquidos iónicos están el cloruro, bromuro, tiocianato, acetato, metanoato, benzoato, aminoacetato,

hidroxiacetato y mercaptoacetato, entre otros. Además, también se pretende usar al N-óxido de N-metilmorfolina como disolvente de celulosa de manera semejante a los líquidos iónicos. Este compuesto no es una sal, y por ende no es un líquido iónico, pero posee características similares a dichos líquidos.

Tabla 3.1. Líquidos iónicos disolventes de celulosa

Cation*		Anión**	
Abreviatura	Nombre	Abreviatura	Nombre
[C _n mim] ⁺	1-alkil-3-metilimidazolio	Cl ⁻	cloruro
[Amim] ⁺	1-alkil-3-metilimidazolio	Br ⁻	bromuro
[C _n mmim] ⁺	1-alkil-2,3-dimetilimidazolio	[SCN] ⁻	tiocianato
[Ammim] ⁺	1-alkil-2,3-dimetilimidazolio	[OAc] ⁻	acetato o etanoato
[C ₄ mPy] ⁺	1-butil-3-metilpiridinio	[HCOO] ⁻	metanoato
[Bu ₄ P] ⁺	tetrabutilfosfonio	[(C ₆ H ₅)COO] ⁻	benzoato
		[(NH ₂)CH ₂ COO] ⁻	aminoacetato
		[HOCH ₂ COO] ⁻	hidroxiacetato o glicolato
		[HSCH ₂ COO] ⁻	mercaptoacetato, tioglicolato o sulfanilacetato
		[(CH ₃ CH ₂ O) ₂ PO ₂] ⁻	dietilfosfato

*El subíndice n corresponde al número de carbonos en la cadena alquílica.

**La solubilidad de la celulosa depende del anión en el siguiente orden:

[OAc] ≈ [(CH₃CH₂O)₂PO₂]⁻ > [HSCH₂COO]⁻ > [HOCH₂COO]⁻ ≈ [(C₆H₅)COO]⁻ > [HCOO]⁻ > Cl⁻ > Br⁻ ≈ [SCN]⁻

FUENTE: Elaborado a partir de datos de:

BRODEAUR, Gary et al.; Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review; en *Enzyme Research* 2011, 787532, pág. 6

La hemicelulosa y la lignina pueden ser recuperadas a su vez mediante una solubilización selectiva con líquidos iónicos. Se les puede aplicar un proceso similar al empleado para solubilizar celulosa, y así poder hidrolizar enzimáticamente y fermentar a los derivados de la hemicelulosa y de la lignina para obtener otros productos, entre los cuales puede estar el etanol.

Hidrólisis Enzimática

Es el proceso por el cual un polisacárido es descompuesto en sus azúcares monoméricos constituyentes mediante el uso de agentes catalizadores de origen orgánico conocidos como “enzimas”. En el caso particular de la celulosa, las enzimas que la transforman en glucosa son denominadas “celulasas”, las cuales son excretadas por microorganismos capaces de degradar a la celulosa. La celulasa está conformada por dos grupos activos, una endo-β-(1→4)-glucanasa ó Cx-celulasa, y por una exo-β-(1→4)-glucanasa ó celobiohidrolasa. La Cx-celulasa rompe los enlaces en las regiones amorfas de las moléculas de celulosa, y la celobiohidrolasa remueve la celobiosa de los extremos de las moléculas.

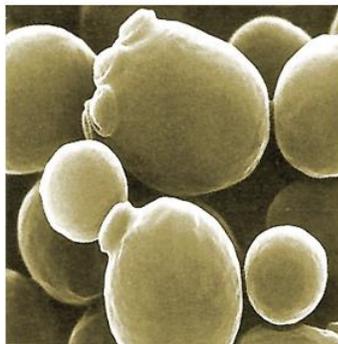
Otra enzima, la β -(1→4)-glucosidasa ó celobiasa, hidroliza la celobiosa y la transforma en glucosa. Esta enzima es excretada por hongos y bacterias aerobias que crecen en presencia de celulosa.

Fermentación

Es el proceso en el cual los azúcares u otras sustancias en solución son transformados por acción de algún microorganismo vivo. En el caso del etanol, el microorganismo más empleado es la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, bacteria que ha sido utilizada desde hace miles de años. También existen otras bacterias fermentadoras de soluciones azucaradas, entre las cuales destacan *Zymomonas mobilis*, *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca*, *Bacillus stearothermophilus*, *Thermoanaerobacter mathranii*, *Clostridium phytofermentans* y *Proteus mirabilis*. A continuación se dará una breve descripción de las actividades realizadas por los microorganismos *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis* para la producción de etanol a partir de glucosa.

Saccharomyces cerevisiae.

La bacteria *Saccharomyces cerevisiae*, mejor conocida como “levadura de cerveza”, es un microorganismo cuyas células son redondas u ovoides, de entre 5 y 10 μm de diámetro (ver figura 3.21), no posee un sistema locomotor, y se reproduce por mitosis formando “yemas”, las cuales se separan de la célula progenitora al alcanzar la madurez.



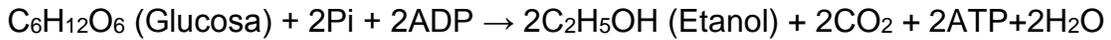
Saccharomyces cerevisiae



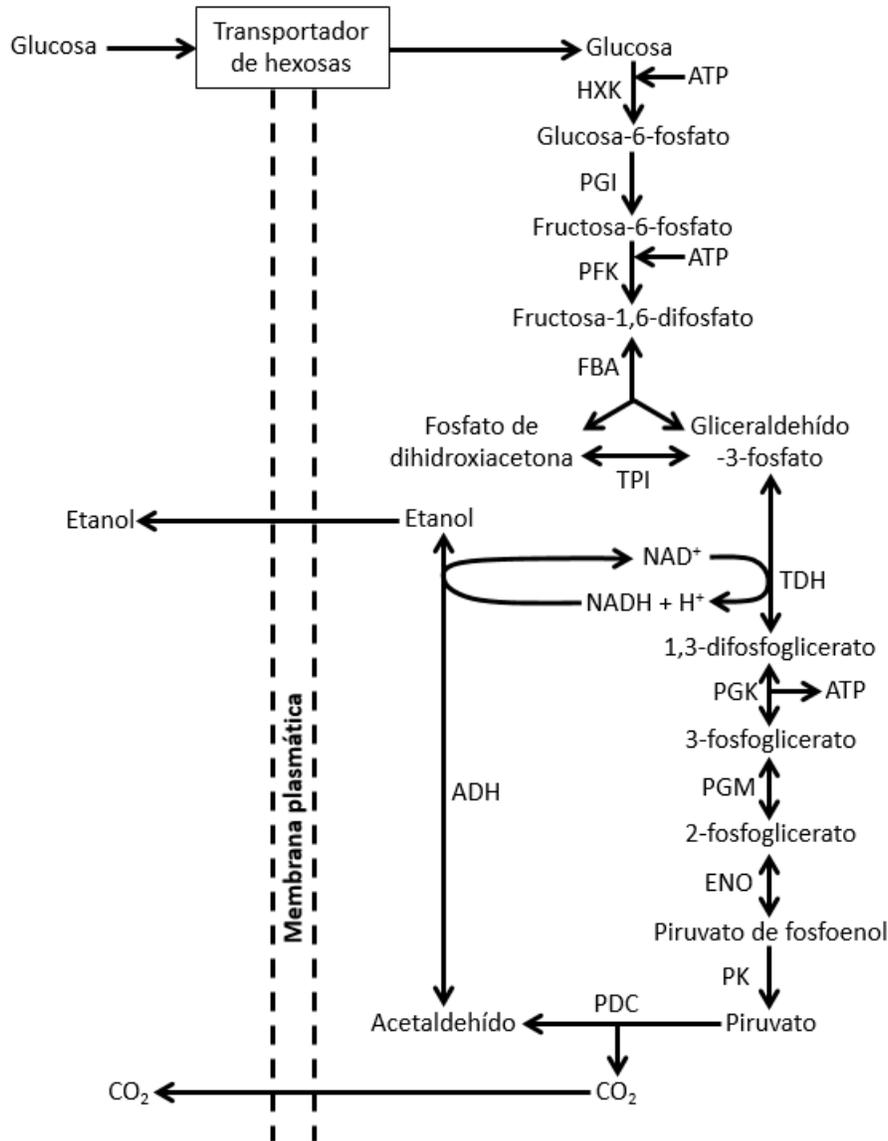
Zymomonas mobilis

Figura 3.21. Bacterias productoras de etanol a partir de glucosa

Entre los azúcares que este microorganismo puede metabolizar están la glucosa, fructosa, manosa, galactosa, sacarosa, maltosa y maltotriosa. *S. cerevisiae* produce etanol a partir de la glucosa vía la ruta glucolítica mostrada en la figura 3.22, la cual es mejor conocida como la ruta Embden-Myerhof-Parnas (EMP). La obtención de etanol vía la ruta EMP puede resumirse en la siguiente ecuación química:



donde Pi corresponde al ion fosfato (PO_4^{-3}), ADP es difosfato de adenosina, y ATP trifosfato de adenosina.



FUENTE: DRAPCHO et al.; Biofuels Engineering Process Technology; pág. 106

Figura 3.22. Ruta Embden-Myerhof-Parnas para la producción de etanol en *Saccharomyces cerevisiae*

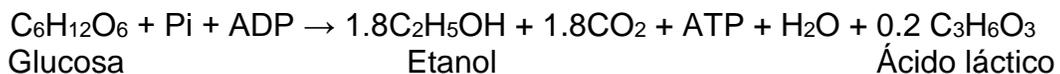
A partir de la ecuación anterior, puede calcularse que la producción teórica de etanol es de 0.511 g de etanol por cada gramo de glucosa consumida. Pero esta cantidad es la máxima obtenible, pues en la realidad se produce una menor cantidad de etanol debido a que parte de la glucosa consumida es empleada en la síntesis de masa celular, en el mantenimiento de la célula y en la producción de otras sustancias como el glicerol, ácido acético, ácido láctico y ácido succínico.

Para el crecimiento y la producción de etanol, *S. cerevisiae* requiere la adición de minerales como calcio, magnesio, manganeso, cobalto, hierro, cobre, potasio, sodio y zinc, pero es inhibida por el etanol que produce, pues éste incrementa la fluidez del plasma celular y aumenta la permeabilidad de la membrana celular, lo que ocasiona pérdida de iones y de metabolitos. Asimismo, los ácidos acético y láctico también inhiben su crecimiento al disminuir el pH del medio de cultivo. En cambio, el oxígeno en pequeñas cantidades reduce la inhibición del crecimiento celular debida al etanol, pero en grandes cantidades provoca una alta generación de masa celular y en una baja producción de etanol.

Zymomonas mobilis.

La bacteria *Zymomonas mobilis* es la responsable de la fermentación del aguamiel de maguey para producir pulque. Las células de *Z. mobilis* tienen forma de bacilo, es decir alargada, con una longitud de entre 2 y 6 µm y un diámetro de entre 1 y 1.5 µm. Poseen un sistema locomotor constituido por un grupo de máximo 4 flagelos polares, es decir, que se encuentran en uno de los extremos del bacilo (ver figura 3.21). Puede formar colonias o sólo presentarse en pares de bacilos. Esta bacteria es uno de los principales contaminantes de la cerveza durante su procesamiento, produciendo turbidez y olor a manzana podrida en la cerveza terminada.

Este microorganismo puede metabolizar tanto hexosas (entre ellas la glucosa), como pentosas (principalmente xilosa). *Z. mobilis* es el único microorganismo conocido en producir etanol a partir de glucosa, fructosa y sacarosa de forma anaerobia mediante la ruta Entner-Doudoroff (ED), la cual se muestra en la figura 3.23, y es el mecanismo central del metabolismo de esta bacteria. La obtención de etanol vía la ruta ED puede resumirse mediante la siguiente ecuación química:

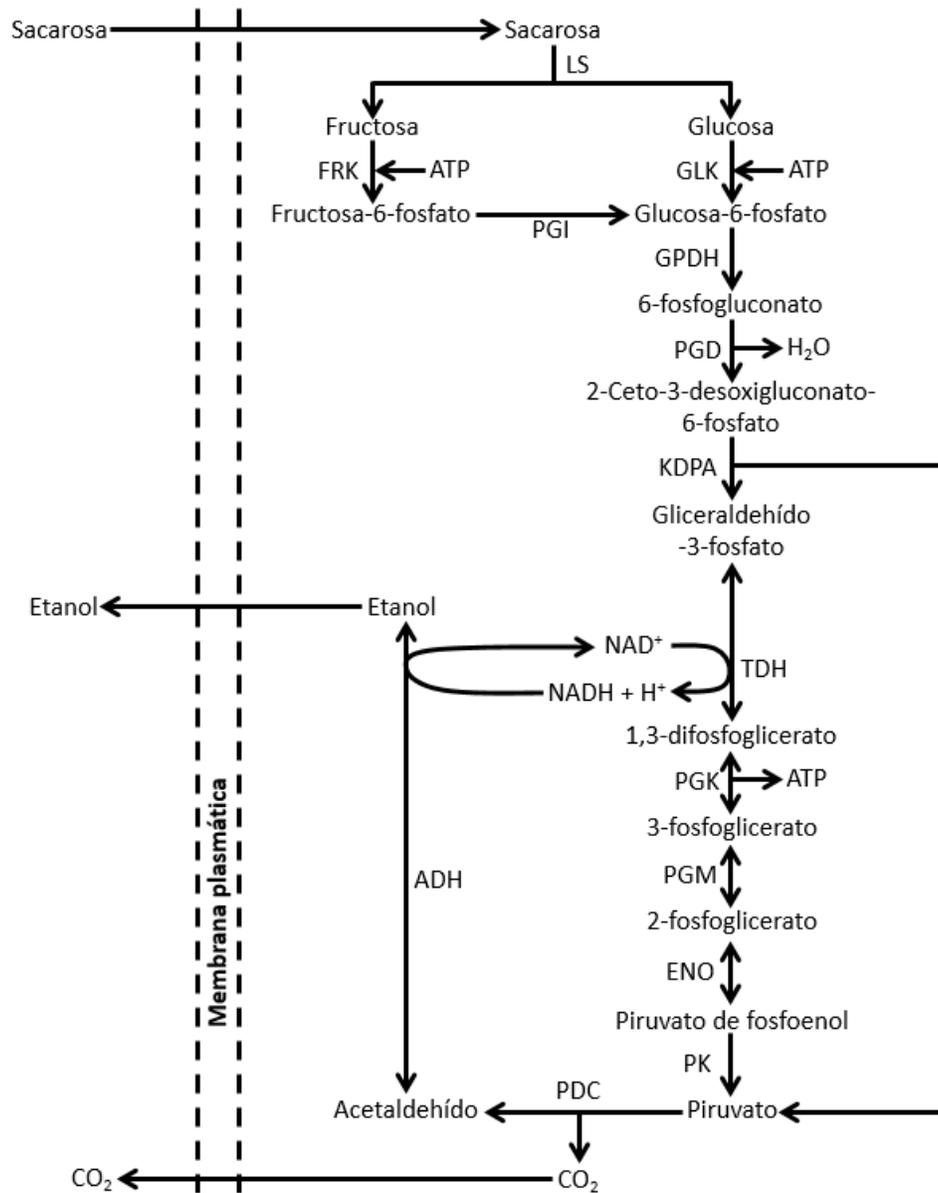


donde Pi corresponde al ion fosfato (PO_4^{-3}), ADP es difosfato de adenosina, y ATP trifosfato de adenosina.

Z. mobilis es un microorganismo muy tolerante al etanol, pues puede crecer en medios con una concentración de etanol de hasta 13%, pero el óptimo es de 5.5% de etanol. Además, tolera un bajo pH, pues su crecimiento no es inhibido a un pH de 3.5 ó de 4, lo cual evita la proliferación de bacterias contaminantes.

Aunque el empleo de *Z. mobilis* para producir etanol a partir de glucosa tiene varias ventajas, la gran desventaja se encuentra en el manejo de sus cultivos. Para poder inocular una solución de glucosa proveniente de la sacarificación de la lignocelulosa con *Z. mobilis*, sus cultivos deben mantenerse vivos en fermentadores “semilla” bajo un estricto control. En cambio, los cultivos de *S. cerevisiae* pueden almacenarse en seco y transportarse largas distancias; para reconstituirlos y generar así el inóculo, sólo se requiere un tanque de mezclado con agua cuyo control es mínimo. Por tanto,

los costos de manejo de los cultivos de *Z. mobilis* son mayores respecto de los correspondientes a *S. cerevisiae*. Sin embargo, se tiene mucho interés en desarrollar alguna variedad de *Z. mobilis* que haga rentable su utilización a escala industrial, tanto que incluso el Departamento de Energía (DOE por sus siglas en inglés) de Estados Unidos ha financiado estos desarrollos.



FUENTE: Elaboración propia a partir de esquemas reportados en:
 DRAPCHO et al.; Biofuels Engineering Process Technology; pág. 109
 CONWAY, Tyrrell; The Entner-Doudoroff pathway: history, physiology and molecular biology; en
FEMS Microbiology Reviews 103 (1992) pp. 6

Figura 3.23. Ruta Entner-Doudoroff para la producción de etanol en *Zymomonas mobilis*

Destilación

Es el proceso por el cual se separan dos o más sustancias debido a la diferencia en sus presiones de vapor, y por ende, en sus puntos de ebullición. Tratándose de mezclas etanol-agua, debido a la formación de puentes de hidrógeno entre ambos tipos de moléculas, existe un punto en el cual las presiones de vapor de cada sustancia originan mezclas líquidas y en fase vapor con composiciones idénticas, lo que dificulta su separación. A este punto de la mezcla se le denomina “azeótropo”, palabra que en griego significa “sin cambio en la ebullición”, y es dependiente de la presión total a la que se encuentre el sistema. Debido a la presencia de un punto de azeotropía en las mezclas etanol-agua, el proceso de destilación puede efectuarse en dos modalidades: convencional y azeotrópica.

Destilación convencional.

Este proceso se efectúa en una columna metálica conocida como “torre de destilación”, al interior de la cual fluyen dos fases, una líquida y otra vapor, que entran en contacto entre sí para transferir al componente más volátil (el de menor punto de ebullición) de la fase líquida a la fase vapor, y al componente menos volátil (el de mayor punto de ebullición) a la inversa. La torre de destilación tiene dos salidas de producto, la del domo y la del fondo, como se muestra en la figura 3.24. El producto del domo, mejor conocido como “destilado”, está compuesto mayoritariamente por la sustancia más volátil de la corriente de alimentación, y el producto del fondo o de fondos, contiene mayoritariamente al componente menos volátil alimentado a la torre.

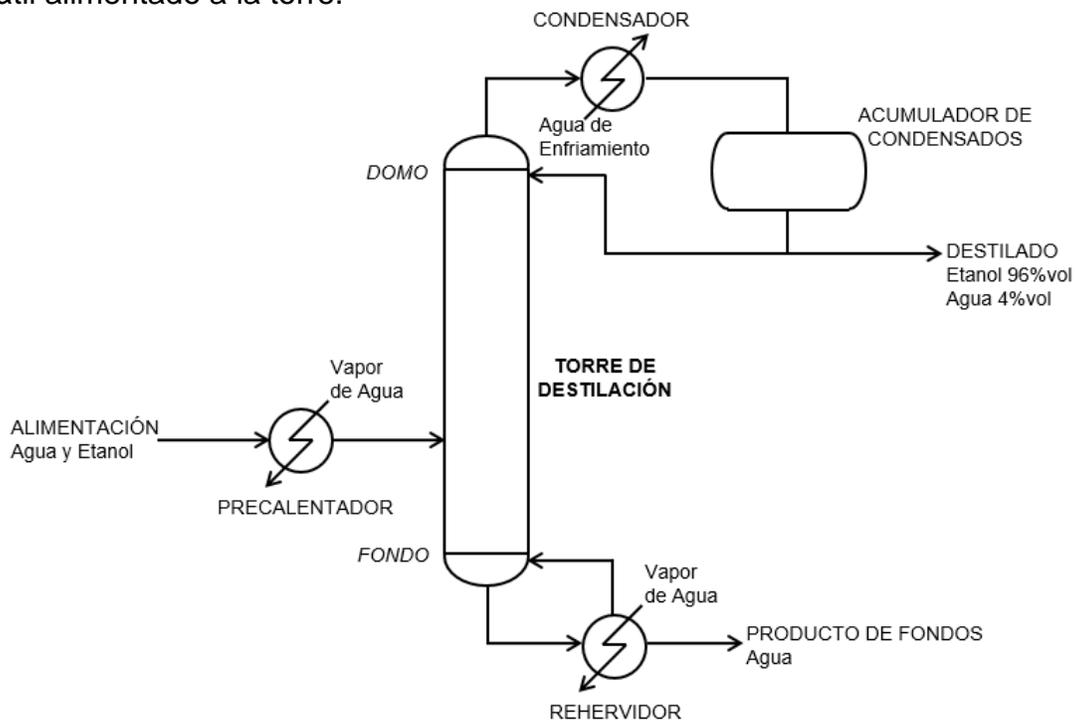


Figura 3.24. Torre de destilación convencional

La torre de destilación posee además en su interior elementos sólidos que facilitan el contacto entre ambas fases, dichos elementos pueden ser de dos tipos: platos y empaques de relleno. Existen tres tipos generales de platos: de campanas de burbujeo (de cachuchas), perforados, y de válvulas. Existen dos clases de empaques de relleno: al azar y estructurados. De los empaques al azar hay tres tipos: anillos, sillas y esféricos; de los empaques estructurados también existen tres tipos: corrugados, mallas y rejillas.

Como la mezcla etanol-agua presenta un punto de azeotropía, mediante este tipo de destilación sólo se puede obtener como destilado una mezcla cuya composición es cercana al azeótropo. Por tanto, no se puede separar por completo al etanol del agua por destilación convencional.

Destilación azeotrópica.

Este tipo de destilación también es efectuada en torres de destilación como los descritos anteriormente, pero a diferencia de la destilación convencional, la destilación azeotrópica sí permite la separación completa del etanol y del agua, para lo cual modifica al punto de azeotropía.

La modificación o ruptura del azeótropo se lleva a cabo de dos formas, modificando la presión de operación de la torre, o agregando un agente de arrastre. Mediante el método de modificación de la presión de operación, conocido en inglés como “*pressure swing*”, se incrementa la presión en el domo de la torre para eliminar al punto de azeotropía, y así poder tener un destilado de etanol puro.

Mediante la adición de un agente de arrastre, se modifica la composición química de la mezcla etanol-agua, lo que permite la separación completa del etanol. Un agente de arrastre, conocido en inglés como “*entrainer*”, es una sustancia que extrae una parte del etanol, separándolo del agua y facilitando su destilación hasta obtenerlo en estado puro. Un buen agente de arrastre debe tener las siguientes características:

- 1.- Debe modificar la volatilidad relativa de los componentes clave en la mezcla.
- 2.- Al adicionarse, debe adquirir una volatilidad tal que pueda recuperarse en el destilado.
- 3.- Debe poseer una entalpía molar de vaporización baja.
- 4.- Debe ser térmicamente estable.
- 5.- No debe reaccionar químicamente con los demás componentes de la mezcla.
- 6.- Debe estar disponible y no debe ser caro.
- 7.- No debe ser corrosivo.
- 8.- No debe ser tóxico.
- 9.- Debe ser fácilmente separable de los demás componentes de la mezcla.
- 10.- Debe ser completamente soluble en los demás componentes de la mezcla, y en las condiciones de operación (temperatura, presión y concentración) de la torre de destilación.

Los agentes de arrastre usados en la industria no necesariamente cumplen con todos los requisitos previamente mencionados, pero pueden seleccionarse de acuerdo a los mismos tomándolos sólo como una guía. Los agentes de arrastre más comúnmente usados para obtener etanol puro o anhidro son benceno, tricloroetileno (TCE), y una mezcla de etilenglicol y alguna sal.

1) Deshidratación de etanol con benceno.

Este proceso de deshidratación de etanol consta de tres torres de destilación interconectadas como se muestra en la figura 3.25. En la primera torre, es introducida la mezcla azeotrópica de etanol y agua, y en su correspondiente tanque acumulador de condensados, es introducido el benceno, por lo que este tanque funciona realmente como un decantador, donde son separadas dos fases líquidas: una acuosa (más densa, por lo que se precipita) y una orgánica (menos densa, queda sobrenadante). Esta fase orgánica está conformada principalmente por benceno y etanol, la cual es devuelta a la torre como reflujo. La fase acuosa es alimentada a una segunda torre de destilación, cuya función principal es regenerar al benceno. El producto de fondos de la segunda torre de destilación es alimentado a la tercera torre de destilación, en cuyo destilado se obtiene una corriente de composición similar a la corriente de alimentación, por lo que se le recircula hacia esta última.

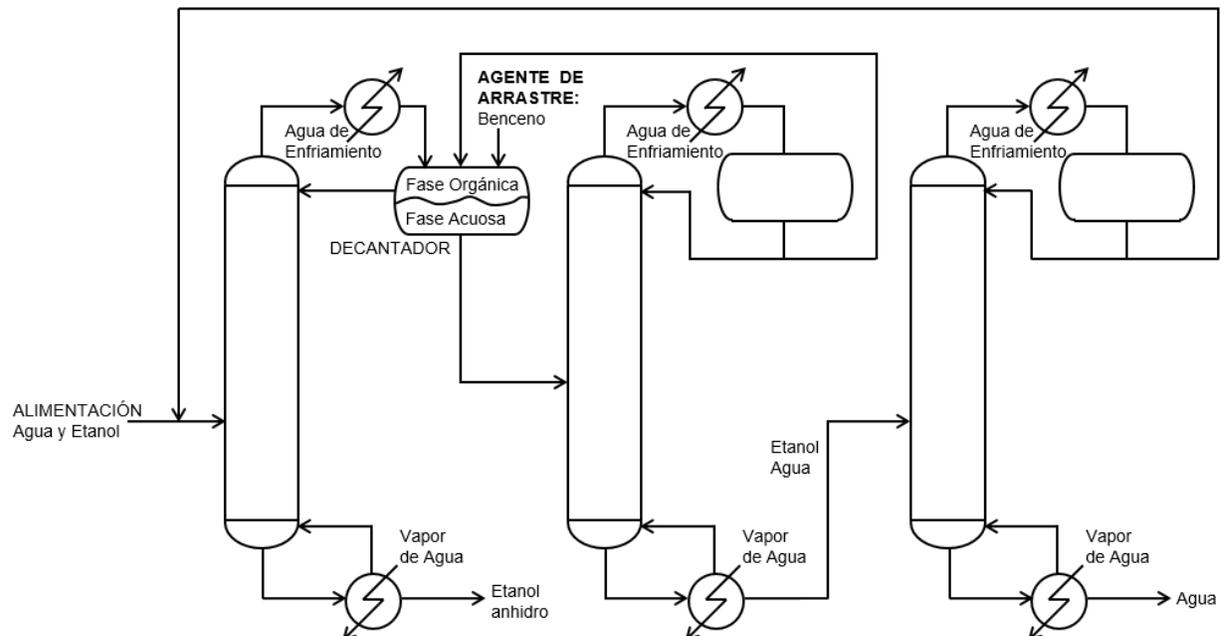


Figura 3.25. Proceso de deshidratación de etanol con benceno como agente de arrastre

Los productos principales se hallan en los fondos de la primera y la tercera torres, pues de la primera se obtiene etanol anhidro (el producto principal del proceso), y de la tercera sale agua pura, la cual puede destinarse para diversos usos.

2) Deshidratación de etanol con TCE.

A una mezcla azeotrópica de etanol y agua se le añade una corriente de TCE hasta alcanzar una concentración de 7% masa en dicha mezcla. Luego, ésta es alimentada a una torre de destilación, cuyo acumulador de condensados es un decantador, y al igual que en el proceso anterior, la fase orgánica es refluja (ver figura 3.26). El producto de fondos, el cual no contiene agua y está constituido mayoritariamente por etanol, es alimentado a una segunda torre de destilación, donde se regenera el TCE, y en el producto de fondos se obtiene etanol anhidro.

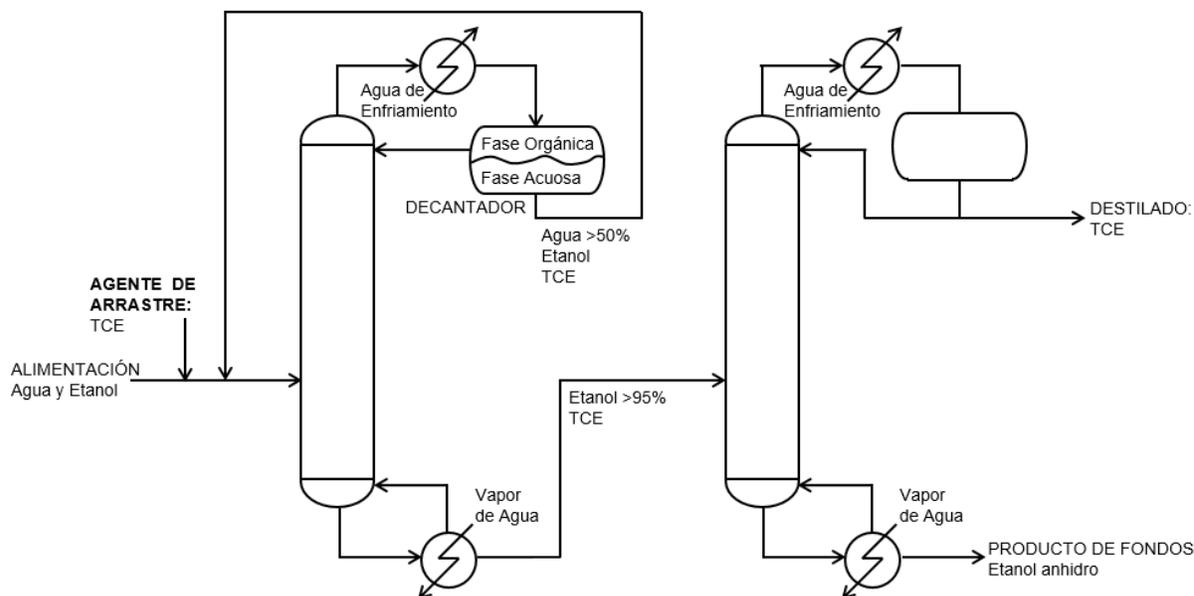


Figura 3.26. Proceso de deshidratación de etanol con tricloroetileno como agente de arrastre

Finalmente, la fase acuosa que contiene TCE puede ser purificada mediante una membrana de pervaporación, a través de la cual es removido el TCE hasta en un 90%. Este proceso de pervaporación es descrito en la última sección de este capítulo, pero aplicado a la mezcla etanol-agua exclusivamente, como un proceso de deshidratación de etanol alternativo a los procesos de destilación.

3) Deshidratación de etanol con una mezcla etilenglicol-sal.

La adición de alguna sal a un solvente como el etilenglicol permite crear un agente de arrastre cuya característica principal es el “efecto salino” sobre la mezcla etanol-agua; este efecto salino incrementa la volatilidad relativa del etanol, facilitando su separación del agua. Las sales más comúnmente usadas en este tipo de deshidratación son: acetato de potasio, cloruro de calcio, cloruro de aluminio, nitrato de potasio, carbonato de potasio y nitrato de aluminio no hidratado, entre otros.

Este proceso consiste en la alimentación de una mezcla azeotrópica de etanol y agua a una torre de destilación, cuyo producto de fondos es alimentado a una segunda torre de destilación, como se muestra en la figura 3.27. El propósito de esta segunda torre es la regeneración del agente de arrastre, el cual es obtenido como producto de fondos, por lo que es enviado a la primera torre como una segunda alimentación.

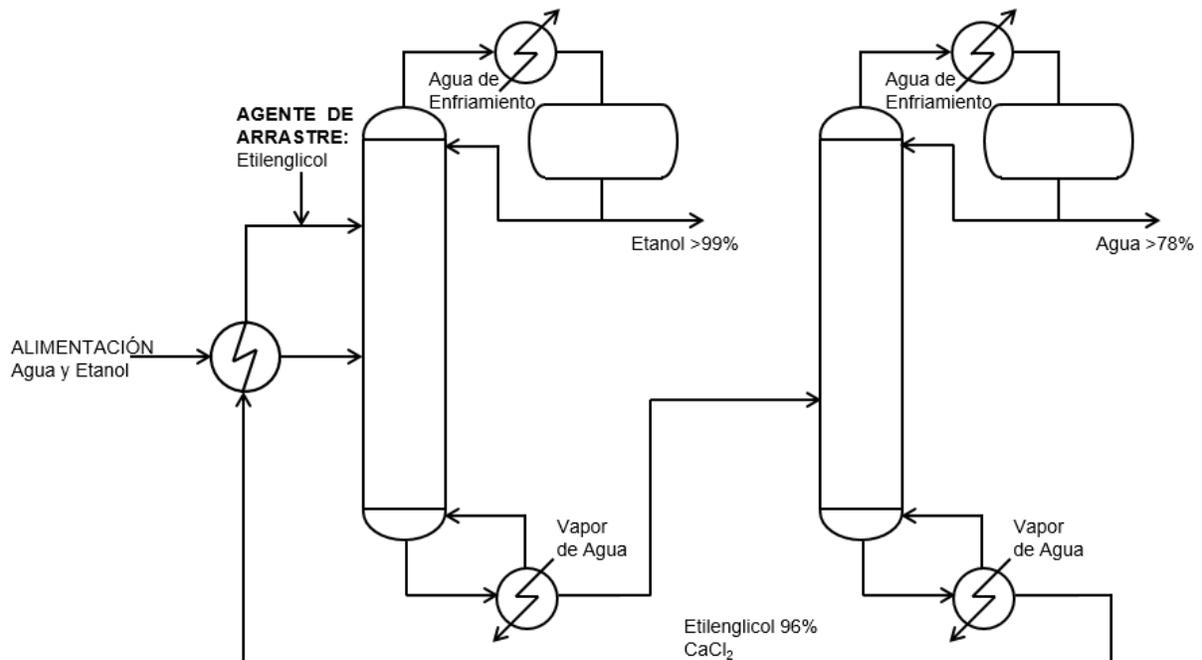


Figura 3.27. Proceso de deshidratación de etanol con una mezcla de etilenglicol y cloruro de calcio como agente de arrastre

El destilado de la segunda torre está compuesto mayoritariamente de agua, pero el destilado de la primera torre es prácticamente etanol puro. Se debe añadir una corriente de etilenglicol puro al proceso como una reposición de dicho solvente, pues una pequeña cantidad de éste se pierde en estas dos corrientes de destilado. En cambio, la sal no se pierde, pues es recirculada en el proceso a través de las corrientes de fondos.

Pervaporación.

Este proceso también conocido como “filtrado molecular”, efectúa la separación del etanol y del agua mediante el uso de una membrana semipermeable. La pervaporación es el proceso por el cual uno o más componentes de una mezcla líquida son separados selectivamente al difundirse a través de una membrana semipermeable, y como se presenta una gran caída de presión en la difusión del líquido por la membrana, éste se evapora para ser recolectado al otro lado de la membrana. A este vapor recolectado se le denomina “permeado”, y al líquido que no pasa a través de la membrana se le llama “rechazo”.

En el caso de la mezcla etanol-agua, ésta es destilada convencionalmente para llevarla a una concentración cercana a la del azeótropo. Luego, el destilado con una concentración de entre 90 y 95% masa de etanol, es alimentado al equipo de pervaporación, el cual consta de una serie de membranas poliméricas acomodadas en placas. Estas membranas remueven selectivamente al agua, generando un permeado con una concentración de entre 20 y 40% masa de etanol, el cual es recirculado a la torre de destilación, como se observa en la figura 3.28. El producto principal, el etanol, es obtenido en la corriente de rechazo con una concentración de 99.9% masa.

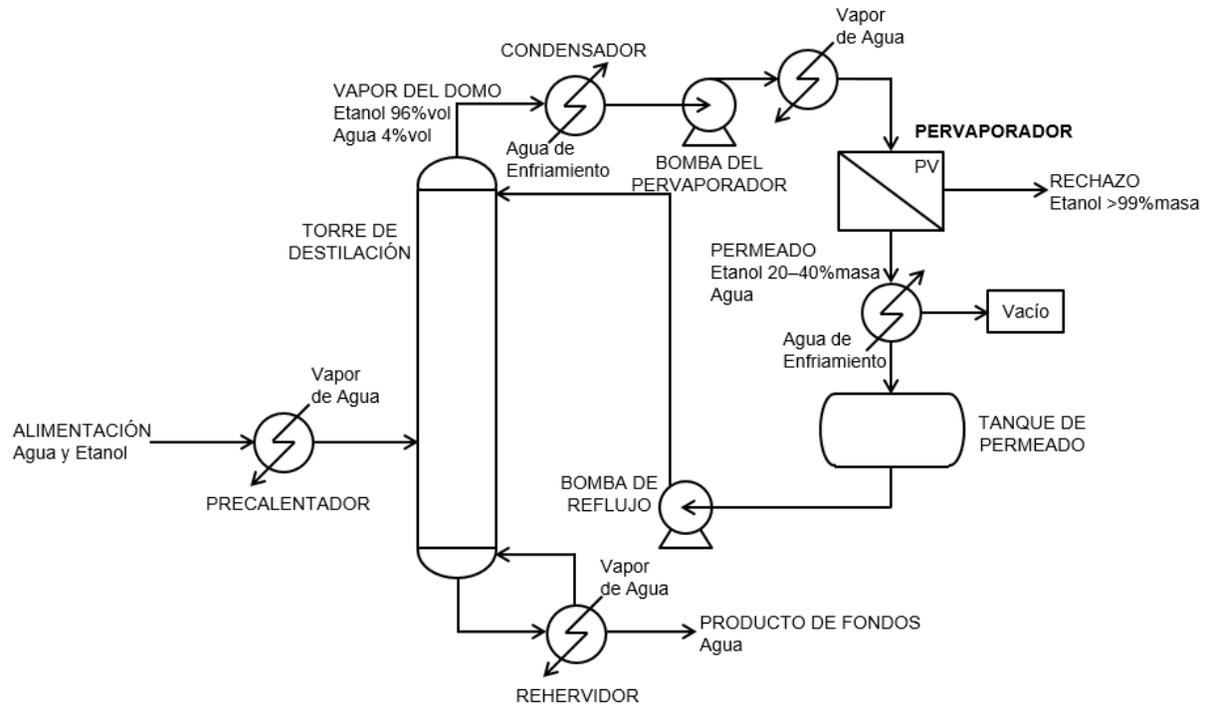


Figura 3.28. Proceso de deshidratación de etanol mediante pervaporación

Si se deseara emplear exclusivamente membranas de pervaporación para deshidratar etanol, se requeriría un gran número de etapas y un rehervidor entre cada una de ellas; por lo tanto, este método de separación es poco rentable frente a la destilación. Pero empleando una torre de destilación convencional al inicio de la deshidratación, disminuye considerablemente los costos totales de producción de etanol puro respecto de los procesos de destilación azeotrópica.

Fuentes de Información

BRODEUR, Gary et al.; Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review; en *Enzyme Research* 2011, 787532

BROWN, Robert C.; Biorenewable Resources. Engineering New Products from Agriculture; Iowa State Press, USA: 2003

- CAREY, Francis A.; GIULIANO, Robert M.; Organic Chemistry; McGraw-Hill, USA: 2011, 8ª ed.
- CONWAY, Tyrrell; The Entner-Doudoroff pathway: history, physiology and molecular biology; en *FEMS Microbiology Reviews* 103 (1992) 1-28
- CUNNINGHAM, Roberto E.; LÓPEZ, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; Universidad de Santiago de Compostela, Argentina: 1994
- DOE-JGI; Why Sequence *Zymomonas mobilis* strains?: <http://www.jgi.doe.gov/sequencing/why/100311.html>
- DRAPCHO, Caye M. et al.; Biofuels Engineering Process Technology; McGraw-Hill, USA: 2008
- EGGEMAN, Tim; ELANDER, Richard T.; Process and economic analysis of pretreatment technologies; en *Bioresource Technology* 96 (2005) 2019–2025
- EL-MANSI, E. M. T. et al.; Fermentation Microbiology and Biotechnology; CRC Press, USA: 2007
- GIL, I. D. et al.; Separation of ethanol and water by extractive distillation with salt and solvent as entrainer: process simulation; en *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 25 (2008) 207–215
- JEON, Tina; Steam Explosion Pretreatment of Cotton Gin Waste for Fuel Ethanol Production; Tesis de Maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University: 1998
- KISTER; Henry Z.; Distillation Design; McGraw-Hill, USA: 1992
- MCCABE, Warren L., et al.; Unit Operations of Chemical Engineering; McGraw-Hill, USA: 2005, 7ª ed.
- NGEMA, P.T.; Separation processes for high purity ethanol production; Tesis de Maestría, Durban University of Technology: 2010
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass Energy Data Book; DOE-EERE, USA: 2006, 1ª ed.
- PALMQVIST, Eva; HAHN-HÄGERDAL, Bärbel; Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification; en *Bioresource Technology* 74 (2000) 17–24
- SWINGS, J.; DE LEY, J.; The Biology of *Zymomonas*; en *Bacteriological Reviews* 41 (1977) 1–46

UNIVERSITY OF KALYANI; Department of Environmental Science; Envis Centre
(India):
http://ces.iisc.ernet.in/hpg/envis/envis_centres/homepages/kalyani.htm

VAN WINKLE, Matthew; Distillation; McGraw-Hill, USA: 1967

ZHANG, Jian et al.; Biodetoxification of toxins generated from lignocellulose pretreatment using a newly isolated fungus, *Amorphotheca resiniae* ZN1, and the consequent ethanol fermentation; en *Biotechnology for Biofuels* **3** (2010) 26

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL

En este capítulo se seleccionan tanto las materias primas como las rutas tecnológicas de obtención de etanol, además se efectúan todos los cálculos necesarios para evaluar energéticamente a estas tecnologías químicas.

Selección de la Tecnología de Sacarificación del Material Lignocelulósico

En el capítulo anterior se hizo una descripción de las diferentes tecnologías de obtención de azúcares fermentables a partir de la biomasa lignocelulósica. A continuación se hará una evaluación técnica de cada una de estas tecnologías para seleccionar las tres más factibles de usar en el proceso de producción de etanol.

El proceso de selección de las tecnologías de sacarificación consiste en un análisis horizontal-vertical, en el cual se evaluarán los siguientes aspectos:

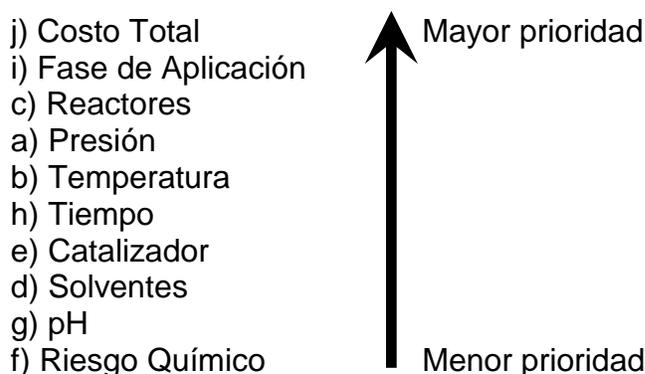
- a) Presión: se refiere a la presión más extrema presente en el proceso de sacarificación.
- b) Temperatura: corresponde a la temperatura más extrema alcanzada en cualquier etapa de la sacarificación.
- c) Reactores: contabiliza el número de etapas donde se efectúa alguna reacción química, las cuales por lo regular se efectúan en reactores químicos.
- d) Solventes: se refiere al medio líquido donde se desarrolla el proceso de sacarificación.
- e) Catalizador: en algunas tecnologías de sacarificación, las reacciones son catalizadas por el nivel de acidez o de basicidad del medio, pero en algunas otras se requiere de algún agente adicional que facilite dichas reacciones.
- f) Riesgo químico: corresponde al nivel de riesgo al personal operativo por exposición a los agentes químicos empleados en el proceso de sacarificación, y en caso de alguna emergencia.
- g) pH: es el nivel de acidez o de basicidad de las soluciones empleadas durante la sacarificación de la biomasa lignocelulósica.
- h) Tiempo: se refiere al tiempo máximo que tarda el pretratamiento de la biomasa, donde por lo regular se separa a la celulosa de la lignina.
- i) Fase de aplicación: corresponde a la escala máxima donde se ha probado la tecnología.
- j) Costo total: está relacionado con el costo unitario de producir etanol empleando cada tecnología de sacarificación.

A las tecnologías de sacarificación se les asignó el mismo número empleado en el capítulo 3:

- 1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol).
- 2) Hidrólisis con ácido sulfúrico diluido (proceso NREL).
- 3) Explosión por vapor.
- 4) Tratamiento con amoníaco:
 - 4a) Proceso ARP
 - 4b) Proceso SAA
 - 4c) Proceso AFEX
- 5) Tratamiento con cal.
- 6) Tratamiento con soluciones alcalinas de peróxido de hidrógeno.
- 7) Oxidación húmeda.

- 8) Fraccionamiento con solventes orgánicos (proceso Organosolv).
- 9) Fraccionamiento con ácido fosfórico concentrado.
- 10) Fraccionamiento con líquidos iónicos.

Para realizar el análisis de estas tecnologías, se construye una tabla cuyas columnas corresponden a las diferentes tecnologías de sacarificación, y en sus renglones se colocan los aspectos a evaluar de cada uno de estos procesos. Se le denomina “Análisis Horizontal-Vertical” porque de manera horizontal se evalúa un aspecto técnico de cada una de las tecnologías, y de forma vertical, se le da una ponderación cualitativa a cada uno de los aspectos evaluados. Para ponderar de forma vertical los diferentes aspectos a evaluar, se les clasifica de mayor a menor prioridad en cuanto al impacto que tienen respecto a la evaluación de cada proceso, quedando dicha clasificación de la siguiente manera:



Una vez hecha esta priorización de los aspectos técnicos a evaluar, se procede a calificar horizontalmente cada una de las tecnologías. Para ello se fija una escala arbitraria de calificación, la que por lo regular va de 0 a 10, y luego se puede aplicar cualquiera de las siguientes estrategias:

- 1) Factores de ponderación: se asigna arbitrariamente un factor de peso a cada uno de los aspectos técnicos a evaluar; este factor puede estar en forma de fracción o de porcentaje respecto al total de aspectos técnicos. Al final de la evaluación de un aspecto en algún renglón de la tabla, su factor correspondiente es multiplicado por la calificación asignada a cada tecnología horizontalmente de acuerdo a la escala 0 – 10.
- 2) Ajuste de escalas: se modifica el valor máximo de la escala 0 – 10 para cada aspecto; primero se fija esta escala para alguno de los aspectos técnicos a evaluar en algún renglón de la tabla, y luego se ajustan las escalas de los demás aspectos de acuerdo a su prioridad.

En la presente tesis, se optó por esta última estrategia debido a su simplicidad y rapidez de evaluación. De esta manera, cada tecnología va adquiriendo puntos en su calificación horizontal, los cuales al final se suman de manera vertical para obtener así el puntaje total; a mayor número de puntos acumulados por una tecnología, mejores cualidades posee y, por ende, tiene una mayor posibilidad de ser seleccionada por ser más atractiva con respecto a las demás tecnologías.

Las escalas para calificar cada aspecto técnico de las tecnologías de sacarificación de biomasa lignocelulósica se fijaron de la siguiente manera:

- a) Presión: a este aspecto se le asignó la escala 0 – 10 como referencia para las demás escalas, por ser la presión un factor de alta prioridad en un proceso. El valor de 10 corresponde a presiones similares a la atmosférica, y va disminuyendo este valor conforme se incrementa o disminuye la presión.
- b) Temperatura: se le asignó la escala 0 – 9, donde el valor de 9 corresponde a temperaturas similares a la ambiental (25°C aproximadamente), y va disminuyendo este valor conforme se aleja la temperatura de los 25°C.
- c) Reactores: su escala va de 0 a 10, siendo el valor de 10 el menor número de etapas de reacción.
- d) Solventes: se le asignó la escala 0 – 5, donde el valor de 5 corresponde a si el medio líquido es agua, por su alta disponibilidad, y va disminuyendo este valor conforme el medio líquido está menos disponible.
- e) Catalizador: como la adición de un agente químico es caro, en la escala asignada 0 – 8, la no incorporación de algún catalizador al proceso de sacarificación corresponde al valor de 8, la adición de un catalizador se le califica en el rango de 4 a 7 dependiendo de su disponibilidad, y el uso de varios catalizadores adquiere una calificación entre 0 y 3 dependiendo tanto de su disponibilidad como de su capacidad de reutilización o regeneración.
- f) Riesgo químico: el nivel de riesgo es determinado de acuerdo con la NOM-018-STPS-2000; para cuantificarlo, dicha norma oficial mexicana recomienda los sistemas de clasificación NFPA de la Asociación Nacional de Protección contra Incendio (siglas en inglés de National Fire Protection Association) y HMIS (siglas en inglés del Hazardous Materials Identification System) de la Asociación de Recubrimientos (American Coatings Association, en inglés), ambas asociaciones de Estados Unidos. Estos sistemas de clasificación son casi equivalentes, sólo que el NFPA se aplica a situaciones de emergencia, y el HMIS a salud ocupacional. En ambos sistemas se mide el nivel de riesgo en cuatro ejes (NFPA: Salud, Inflamabilidad, Reactividad, Riesgo Especial; HMIS: Salud, Inflamabilidad, Peligro Físico, Equipo de Protección), cada uno con un valor en la escala 0 – 4, siendo el valor de 4 el de mayor nivel de riesgo. En la figura 4.1, se ejemplifican ambos sistemas con la clasificación de riesgo para el ácido sulfúrico (H₂SO₄), una de las sustancias con mayor nivel de riesgo al personal operativo en los procesos de sacarificación de la biomasa lignocelulósica. En la tabla de análisis horizontal-vertical, se emplea la escala 0 – 5 para calificar el nivel de riesgo por el uso de sustancias químicas en cada proceso de sacarificación, siendo el 5 la calificación aplicada al proceso que emplee las sustancias cuyo nivel de riesgo sea el menor.



Sistema NFPA
Modelo de Rombo

Ácido Sulfúrico	
Salud	3
Inflamabilidad	0
Peligro Físico	2
Equipo de Protección Personal	

Sistema HMIS
Modelo de Rectángulo

FUENTE: Elaboración propia a partir de las siguientes normas:
NFPA 704 Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response
NOM-018-STPS-2000

Figura 4.1. Sistemas de clasificación del riesgo por exposición a sustancias químicas.

- g) **pH**: la escala asignada a este aspecto es 0 – 5, donde el valor de 5 corresponde a un pH neutro ($\text{pH} = 7$, similar al agua), y este valor disminuye conforme el medio se acidifique ($0 \leq \text{pH} < 7$) o se alcalinice ($7 < \text{pH} \leq 14$).
- h) **Tiempo**: se le asignó la escala 0 – 8, donde la calificación de 8 se le otorgaría al proceso de sacarificación cuyo pretratamiento de la biomasa tarde menos de 15 minutos; si dura máximo 1 hora, se califica con 7; hasta 2 horas y media, se le da un valor de 6; más de 6 horas, le corresponde una calificación de 4; más de 24 horas y hasta una semana, se le da un puntaje de 3; más de 15 días se le otorga un valor de 1; y si el tiempo requerido es mayor o igual a 4 semanas o un mes, le corresponde una calificación de 0.
- i) **Fase de aplicación**: en la escala 0 – 11, el valor de 11 se le da a un proceso de sacarificación que se haya probado a nivel industrial; si se ha probado máximo en planta piloto, se le asigna una calificación de 6; si el proceso sólo ha sido probado a escala de banco o nivel laboratorio, se le otorga un valor de 2; y si sólo está en papel a nivel teórico, se le califica con 0.
- j) **Costo total**: su escala va de 0 a 14 por ser el aspecto técnico a evaluar con la mayor prioridad; la calificación más alta se le otorga a la tecnología de sacarificación cuyo costo total unitario de pretratamiento sea el menor, y conforme se incrementa este costo, su calificación disminuye. La calificación de 0 se la da al proceso más caro o del que se desconozca el dato del costo.

Siguiendo los lineamientos arriba mencionados, el Análisis Horizontal-Vertical de las tecnologías de sacarificación de la biomasa lignocelulósica queda como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Análisis técnico horizontal-vertical de las tecnologías de sacarificación de biomasa lignocelulósica.

Concepto	Tecnologías de Sacarificación de Biomasa Lignocelulósica											
	1	2	3	4a	4b	4c	5	6	7	8	9	10
Presión	0.2 MPa 10	3.4 MPa 4	5.5 MPa 2	2.3 MPa 7	0.2 MPa 10	2.5 MPa 6	0.2 MPa 10	0.2 MPa 10	1.2 MPa 8	0.2 MPa 10	0.3 MPa 9	0.2 MPa 10
Temperatura	50°C 9	240°C 3	270°C 2	170°C 5	60°C 8	120°C 6	100°C 7	50°C 8	195°C 4	180°C 5	50°C 9	130°C 5
Reactores	4 7	6 5	2 9	2 9	2 9	2 9	2 9	3 8	3 8	3 8	4 7	2 9
Solventes	Agua 5	Agua 5	Agua 5	Agua 5	Agua 5	Agua 5	Agua 5	Etanol 3	Etanol 3	Etanol 3	Acetona 3	Líquido iónico 1
Catalizador	8	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Riesgo químico *	H ₂ SO ₄ 3/0/2/1/0 NaOH 3/0/1	H ₂ SO ₄ 3/0/2/1/0 NaOH 3/0/1	H ₂ SO ₄ 3/0/2/1/0 Enzimas 2/1/0	NH ₄ OH 3/1/0 Enzimas 2/1/0	NH ₄ OH 3/1/0 Enzimas 2/1/0	NH ₃ 3/1/0 Enzimas 2/1/0	Cal 3/0/0 Enzimas 2/1/0	H ₂ O ₂ 2/0/3/OX Enzimas 2/1/0	Enzimas 2/1/0	H ₂ SO ₄ 3/0/2/1/0 Enzimas 2/1/0	H ₂ SO ₄ 3/0/2/1/0 Enzimas 2/1/0	Enzimas 2/1/0
pH	2 1 1	1 5-10 1	2 5 4	3 10 2	3 10 2	3 10 2	4 10 2	4 11.5 1	5 5 4	5 5 4	5 1 1	4 5-6 5
Tiempo	4 horas 5	60 min 7	10 min 8	6 horas 4	10 días 2	30 min 7	4 semanas 0	6 horas 4	20 min 7	60 min 7	4 horas 5	24 horas 3
Fase de Aplicación	Industrial 11	Industrial 11	Industrial 11	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Planta piloto 6	Laboratorio 2	Laboratorio 2
Costo Total **	\$4,345 6	\$4,345 6	\$500 14	\$1,535 10	\$1,535 10	\$1,252 10	\$1,127 10	\$1,535 10	\$3,200 8	\$8,630 3	\$4,345 6	ND 0
Total	64	51	62	56	60	59	58	59	58	53	47	44

* Sólo se muestra la clasificación NFPA (Salud/Inflamabilidad/Reactividad/Riesgo Especial), por razones de espacio.

** En US\$/m³ etanol, dólares de 1987.

FUENTE: Elaboración propia con datos de diversas fuentes:

BRODEUR, Gary et al.; Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review; Enzyme Research 2011
 CUNNINGHAM, Roberto E.; LOPEZ, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; pág. 226, tabla 7.15
 DRAPCHO, Caye M. et al.; Biofuels Engineering Process Technology; págs. 133-143
 MSDS de reactivos; documentos proporcionados por fabricantes.

En la tabla 4.1 se observan tres tecnologías cuya calificación total supera los 60 puntos, inclusive, por lo que los procesos de sacarificación seleccionados para el presente estudio son:

- 1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)
- 3) Explosión por vapor
- 4b) Tratamiento con amoniaco (proceso SAA)

Los procesos 1 y 3 han sido probados a nivel industrial, y el proceso 4b sólo hasta planta piloto, pero es una tecnología que su escalamiento a nivel industrial se muestra atractivo si se toma en cuenta el resultado de la tabla 4.1.

Selección del Material Lignocelulósico como Insumo

Además de la tecnología de sacarificación, debe seleccionarse también a la biomasa lignocelulósica a ser procesada. Para ello se buscó en la literatura diferentes tipos de material lignocelulósico susceptibles de ser insumo en el proceso de obtención de etanol, y se encontraron los siguientes:

- Bagazos: de caña de azúcar y de remolacha azucarera (sugar beet)
- Bambú
- Cascarillas: de arroz, avena, cebada, semilla de algodón y de trigo, y vaina de soya
- Cultivos maderables de rápido crecimiento (poplar tree)
- Fibras: de algodón y de maíz
- Paja: de arroz, avena, cebada, sorgo y de trigo
- Papel de desperdicio
- Plantas enteras: hierba energética (switchgrass) y sorgo dulce
- Residuos del procesamiento de cosechas: granos secos de destilería, olote, rastrojo de maíz, residuos del desgranado de algodón y tallo de planta de algodón

Asimismo, se realizó una búsqueda de datos de la composición química de estos materiales. Dependiendo del tipo de biomasa, de su disponibilidad y de si se conocía de forma completa su composición química, se seleccionaron los siguientes:

- 1) Bagazo de caña de azúcar
- 2) Bagazo de remolacha azucarera
- 3) Cultivos maderables de rápido crecimiento
- 4) Olote
- 5) Paja de trigo
- 6) Rastrojo de maíz
- 7) Cascarilla de trigo

La composición química de estos insumos para producción de etanol se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Composición química de los insumos lignocelulósicos para producción de etanol.

Insumo Lignocelulósico	Composición en base seca (fracción masa)				Azúcares (fracción masa, base seca)			
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Otros*	Humedad	C6	C5	Totales
1) Bagazo de caña de azúcar	0.35	0.25	0.2	0.2	0.104	0.569	0.019	0.588
2) Bagazo de remolacha azucarera	0.229	0.493	0.012	0.13	0.13	0.425	0.03	0.455
3) Cultivos maderables de rápido crecimiento	0.5	0.23	0.22	0.05	0.068	0.733	0.018	0.751
4) Olote	0.32	0.44	0.13	0.11	0.11	0.516	0.03	0.546
5) Paja de trigo	0.38	0.26	0.16	0.09	0.101	0.602	0.025	0.627
6) Rastrojo de maíz	0.4	0.24	0.16	0.16	0.074	0.63	0.018	0.648
7) Cascarilla de trigo	0.38	0.36	0.16	0.1	0.106	0.602	0.025	0.627

* Incluye proteínas, aceites y materia mineral (sílica y álcalis)

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de diversas fuentes:

BROWN, Robert C.; *Biorenewable Resources*; pág. 65

CUNNINGHAM, Roberto E.; LÓPEZ, Gerardo D.; *Etanol de Lignocelulósicos*; pág. 21

DRAPCHO, Caye M. et al.; *Biofuels Engineering Process Technology*; págs. 83, 87

JEOH, Tina; *Steam Explosion Pretreatment of Cotton Gin Waste for Fuel Ethanol Production*; pág. 11

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; *Biomass Energy Data Book*; pág. 148, tabla B.1

SENER-BID-GTZ; *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*; Task 4: Ethanol feedstocks; pág. 153

VASSILEV, Stanislav V. et al.; *An overview of the chemical composition of biomass*; en *Fuel* 89 (2010) 913-933

ZHAO, Xuebing et al.; *Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose*; en *Biofuels. Bioprod. Bioref.* (2012) pág. 3

Las primeras tres columnas de la tabla 4.2 se refieren a la cantidad de polisacáridos presentes en los insumos lignocelulósicos, y las tres últimas columnas corresponden a la cantidad de azúcares simples que pueden obtenerse de estos polisacáridos. Estos azúcares están clasificados en C6 y C5, dependiendo de la cantidad de átomos de carbono presentes en los monómeros de azúcar, como se mencionó en el capítulo 3 de la presente tesis.

Molienda del Material Lignocelulósico

En la primera fase del procesamiento de los insumos lignocelulósicos, el consumo energético para la reducción de tamaño de dichos materiales en el molino es mostrado en la tabla 4.3; también se indica el tipo de molino a emplearse. La energía demandada por la molienda se da en kilowatts-hora por cada tonelada de biomasa lignocelulósica (kWh/ton), donde la tonelada es métrica: 1 ton = 1000 kg.

Tabla 4.3. Consumo energético en la molienda de los insumos lignocelulósicos.

Insumo Lignocelulósico	Molino	kWh/ton
1) Bagazo de caña de azúcar	de cuchillas	20
2) Bagazo de remolacha azucarera	de martillos	27.6
3) Cultivos maderables de rápido crecimiento	de cuchillas	64
4) Olote	de cuchillas	11
5) Paja de trigo	de cuchillas	6.4
6) Rastrojo de maíz	de cuchillas	20
7) Cascarrilla de trigo	de cuchillas	6.4

FUENTE: BITRA, Venkata S.P. et al.; Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions; en *Powder Technology* 193 (2009) 32
 BITRA, Venkata S.P. et al.; Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover; en *Bioresource Technology* 100 (2009) 6578
 CUNNINGHAM, Roberto E.; LÓPEZ, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; pág. 41, 218 (tabla 7.12)
 RAMOS CASADO, R.; ESTEBAN PASCUAL, L.E.; Biomass feedstocks preparation methods for energy production and its economic evaluation; 2nd International Workshop BIOGASTECH, Turquía: April 2008

En las siguientes secciones de este capítulo, los insumos serán referidos sólo por el número asignado en el presente estudio, para poderle dar más espacio a los resultados de los cálculos que prosiguen.

Sacarificación del Material Lignocelulósico

Para determinar el consumo energético de los procesos de sacarificación, se debe dimensionar al sistema mediante una base de cálculo. Convenientemente, se fija dicha base en 100 kg de biomasa lignocelulósica que entra a cada proceso como un insumo; ésta proviene del proceso de molienda, por lo cual se considera que su tamaño de partícula es el idóneo para efectuar el proceso de sacarificación.

Con la finalidad de realizar cálculos volumétricos además de másicos, se toma en cuenta la densidad de los materiales lignocelulósicos (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4. Densidad de los insumos lignocelulósicos.

Insumo	Densidad (kg/m ³)
1	75
2	105
3	150
4	150
5	50.46
6	66.56
7	50

FUENTE: CHEVANAN, Nehru et al.; Bulk density and compaction behavior of knife mill chopped switchgrass, wheat straw, and corn stover; en *Bioresource Technology* 101 (2010) 207
 CUNNINGHAM, Roberto E.; LÓPEZ, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; pág. 41, 218 (tabla 7.12)
 OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass Energy Data Book; 4a ed., pág. 232

1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol).

A partir de considerar 100 kg de insumo, y como la biomasa debe entrar con un 10% de humedad (agua líquida con fracción másica de 0.1), la alimentación del proceso queda conformada por las siguientes cantidades de los polisacáridos de interés:

Insumo	Masa alimentada (kg)		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
1	31.8	22.7	18.2
2	20.8	44.8	1.1
3	45.5	20.9	20.0
4	29.1	40.0	11.8
5	34.5	23.6	14.5
6	36.4	21.8	14.5
7	34.5	32.7	14.5

De acuerdo a la figura 4.2, y para un análisis energético más detallado, este proceso de sacarificación puede ser subdividido en nueve etapas:

- 1.- Descristalización
- 2.- Hidrólisis 1
- 3.- Separación de hidrolizado
- 4.- Hidrólisis 2
- 5.- Separación de lignina
- 6.- Separación ácido/azúcar
- 7.- Neutralización
- 8.- Regeneración de ácido sulfúrico
- 9.- Separación de yeso

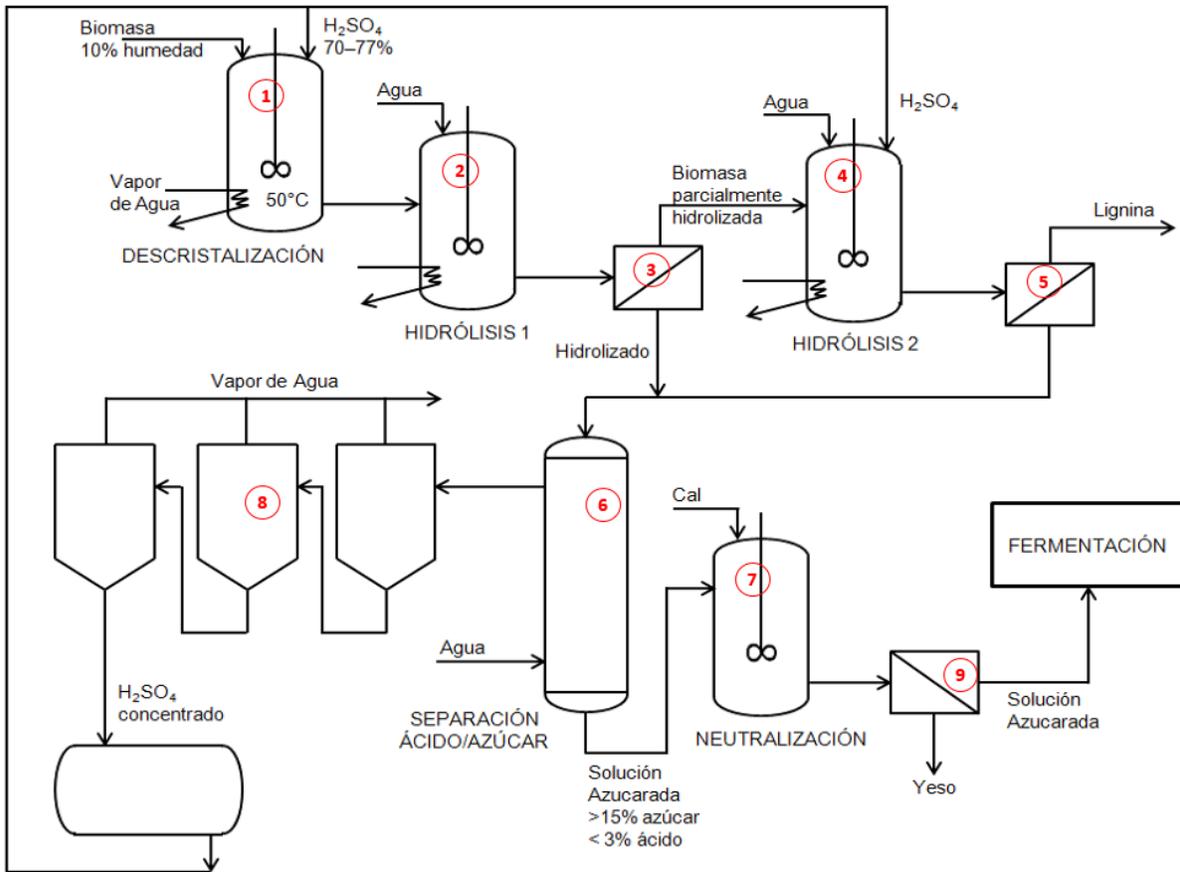


Figura 4.2. Etapas del proceso de hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol)

Etapa 1) Descristalización: para transformar la celulosa y la hemicelulosa de fase cristalina a fase amorfa, se añade ácido sulfúrico al 77%, cuya densidad es de 1664 kg/m^3 . Como la cantidad de ácido se añade en una proporción 1.25:1 respecto del total de celulosa y hemicelulosa, la cantidad total de biomasa y ácido resulta ser:

Insumo	Ácido Concentrado		Biomasa + Ácido (kg)
	Masa (kg)	Volumen (m^3)	
1	68.2	0.041	168.2
2	82.0	0.049	182.0
3	83.0	0.050	183.0
4	86.4	0.052	186.4
5	72.7	0.044	172.7
6	72.7	0.044	172.7
7	84.1	0.051	184.1

En cuanto al consumo energético de esta etapa, la cual se lleva a cabo en un tanque de mezclado con agitación, la energía específica para mezclar un material cuya viscosidad no supera los $25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (equivalente a $25,000 \text{ cp}$) es de 2 kW/m^3 . Como el tiempo de mezclado es de 24 horas, la energía involucrada en esta etapa es:

Insumo	Volumen de mezcla (m ³)	Energía de mezclado (kJ)
1	1.4	237,480.4
2	1.0	173,091.5
3	0.7	123,814.5
4	0.7	124,168.5
5	2.0	350,001.9
6	1.5	267,167.8
7	2.1	354,332.5

Etapa 2) Hidrólisis 1: para que la mezcla ácida se diluya y alcance una concentración de 30% de ácido sulfúrico, se requiere añadir la siguiente cantidad de agua:

Insumo	Agua para dilución	
	kg	m ³
1	106.8	0.107
2	128.5	0.129
3	130.0	0.130
4	135.3	0.135
5	113.9	0.114
6	113.9	0.114
7	131.7	0.132

La cual se calculó mediante la ecuación de balance para el ácido sulfúrico:

$$(m_1 + m_{H_2O})x_2 = m_1 x_1 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde: m_1 = masa de ácido sulfúrico concentrado

m_{H_2O} = masa de agua necesaria para la dilución

x_1 = concentración inicial de ácido

x_2 = concentración final de ácido

Por lo tanto, la masa total de biomasa, ácido y agua presentes en el equipo es:

Insumo	Biomasa + ácido + agua	
	Masa (kg)	Volumen (m ³)
1	275.0	1.5
2	310.6	1.1
3	312.9	0.8
4	321.7	0.9
5	286.7	2.1
6	286.7	1.7
7	315.8	2.2

Para esta cantidad de masa en el equipo donde se efectúa la hidrólisis, el cual es un tanque agitado, si se consideran las mismas condiciones presentes en el descristalizador (24 horas y 2 kW/m³ como energía específica de mezclado), la energía requerida para llevar a cabo esta etapa del proceso es:

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	255,938.6
2	195,302.9
3	146,272.0
4	147,548.9
5	369,690.6
6	286,856.6
7	377,097.6

Etapa 3) Separación de Hidrolizado: en un filtro prensa se separa el primer hidrolizado del resto de la biomasa; este líquido está formado principalmente por la celulosa ya transformada en azúcares simples, que en este caso es glucosa. La masa de hidrolizado 1 se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$m_{H1} = m_{BAA} - m_{Hc} - m_L - m_O \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde: m_{H1} = masa de hidrolizado 1

m_{BAA} = masa total de biomasa, ácido y agua resultantes de la hidrólisis 1

m_{Hc} = masa total de hemicelulosa

m_L = masa total de lignina

m_O = masa total de otros componentes de la biomasa lignocelulósica

La biomasa que pasa a la siguiente etapa se obtiene por diferencia. Si la densidad de ésta es de 21 lb/ft³, las corrientes de hidrolizado 1 y de biomasa a hidrolizar por segunda ocasión son las siguientes:

Insumo	Hidrolizado 1 (kg)	Biomasa a hidrolizar (kg)	Biomasa a hidrolizar (m ³)
1	215.9	59.1	0.176
2	252.9	57.7	0.171
3	267.5	45.5	0.135
4	259.8	61.8	0.184
5	240.3	46.4	0.138
6	235.8	50.9	0.151
7	259.5	56.4	0.167

Para determinar la energía consumida en el filtro prensa, la literatura reporta que el área unitaria para efectuar el proceso de filtrado de biomasa con consistencia similar a la pulpa de papel es de 16 ft²/(ton día), y el flujo volumétrico de líquido que debe

de entrar al filtro es de 0.01 veces el área de filtrado. Con esta información, el área de filtrado y el flujo de líquido resultan ser:

Insumo	Masa total a filtrar (ton)	Área de filtrado m ²	Flujo de líquido	
			m ³ /s	gpm
1	0.275	0.41	0.00409	64.80
2	0.311	0.46	0.00462	73.18
3	0.313	0.47	0.00465	73.73
4	0.322	0.48	0.00478	75.80
5	0.287	0.43	0.00426	67.55
6	0.287	0.43	0.00426	67.55
7	0.316	0.47	0.00469	74.42

De acuerdo al flujo de líquido, se determina su potencia de bombeo necesaria, y considerando que el ciclo completo de filtrado (filtrado, lavado, secado y descarga de la torta) es de 6 horas para biomasa, se calcula la energía total requerida por el filtro prensa:

Insumo	Potencia (HP)	Energía (kWh)
1	0.33	1.48
2	0.36	1.61
3	0.36	1.61
4	0.37	1.66
5	0.34	1.52
6	0.34	1.52
7	0.37	1.66

Etapa 4) Hidrólisis 2: considerando las mismas condiciones de operación empleadas en la hidrólisis 1, los resultados del balance de materia para esta etapa son:

Insumo	Ácido Concentrado		Agua para dilución		Biomasa + ácido + agua	
	Masa (kg)	Volumen (m ³)	kg	m ³	Masa (kg)	Volumen (m ³)
1	28.4	0.017	44.5	0.045	132.0	0.237
2	56.0	0.034	87.8	0.088	201.5	0.293
3	26.1	0.016	40.9	0.041	112.5	0.192
4	50.0	0.030	78.3	0.078	190.2	0.292
5	29.5	0.018	46.3	0.046	122.2	0.202
6	27.3	0.016	42.7	0.043	120.9	0.210
7	40.9	0.025	64.1	0.064	161.4	0.256

Y en cuanto al cálculo de la energía, si el tiempo total de mezclado es de 24 horas, y la energía específica del mezclador es de 2 kW/m³, la energía total consumida en esta etapa resulta ser:

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	40,968.4
2	50,611.7
3	33,118.5
4	50,455.4
5	34,862.0
6	36,343.6
7	44,250.8

Etapa 5) Separación de lignina: en un filtro prensa se separa el segundo hidrolizado del resto de la biomasa, la cual está conformada principalmente por lignina. El hidrolizado es un líquido que está formado en su mayoría por la hemicelulosa ya transformada en azúcares simples; estos son tanto C6 como C5. La masa de hidrolizado 2 se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$m_{H2} = m_{BAA} - m_L - m_O \quad \text{Ecuación 4.3}$$

donde: m_{H2} = masa de hidrolizado 2

m_{BAA} = masa total de biomasa, ácido y agua resultantes de la hidrólisis 2

m_L = masa total de lignina

m_O = masa total de otros componentes de la biomasa lignocelulósica

De esta manera, las cantidades de hidrolizado 2 y de lignina resultan ser:

Insumo	Hidrolizado 2 (kg)	Lignina	
		kg	m ³
1	95.6	36.4	0.108
2	188.6	12.9	0.038
3	88.0	24.5	0.073
4	168.3	21.8	0.065
5	99.5	22.7	0.068
6	91.8	29.1	0.086
7	137.7	23.6	0.070

El consumo de energía se calcula de igual manera al de la etapa 3, si se considera un tiempo de ciclo del filtro prensa de 6 horas:

Insumo	Masa total a filtrar (ton)	Área de filtrado m ²	Flujo de líquido		Potencia HP	Energía kWh
			m ³ /s	gpm		
1	0.132	0.20	0.00196	31.11	0.155	0.69
2	0.202	0.30	0.00300	47.48	0.23	1.03
3	0.113	0.17	0.00167	26.52	0.13	0.58
4	0.190	0.28	0.00283	44.81	0.225	1.01
5	0.122	0.18	0.00182	28.79	0.14	0.63

Insumo	Masa total a filtrar (ton)	Área de filtrado m ²	Flujo de líquido		Potencia HP	Energía kWh
			m ³ /s	gpm		
6	0.121	0.18	0.00180	28.49	0.14	0.63
7	0.161	0.24	0.00240	38.02	0.19	0.85

Etapa 6) Separación ácido/azúcar: al lecho fluidizado con resina de intercambio catiónico entran los hidrolizados 1 y 2; la cantidad total de hidrolizado alimentado a este separador, así como su composición química para cada tipo de insumo, resulta ser:

Insumo	Hidrolizado Total (kg)	Eficiencia de hidrólisis	Hexosas (kg)		Pentosas (kg)		Azúcares Totales (kg)
			Teórica	Experimental	Teórica	Experimental	
1	311.553	0.73	56.8	41.5	1.9	1.4	42.9
2	441.466	0.73	42.5	31.0	3.1	2.2	33.2
3	355.455	0.9	73.2	65.9	1.8	1.7	67.6
4	428.182	0.9	51.5	46.4	3.1	2.8	49.2
5	339.773	0.8	60.1	48.1	2.6	2.1	50.2
6	327.576	0.73	62.9	45.9	1.8	1.3	47.3
7	397.197	0.8	60.1	48.1	2.6	2.1	50.2

La tercera columna de esta tabla corresponde a la eficiencia de conversión de la celulosa y hemicelulosa en azúcares monoméricos C6 (hexosas) y C5 (pentosas); este dato es experimental y es reportado por Brodeur et al. Las cantidades teóricas de hexosas y de pentosas se calculan a partir de la composición de la biomasa lignocelulósica de la tabla 2, y las cantidades experimentales se obtienen a partir de considerar la eficiencia de la hidrólisis.

Los azúcares se separan del ácido mediante la adición de agua en cantidad suficiente como para producir una solución azucarada con más de 15% de azúcares y menos de 3% de ácido. Para determinar esta cantidad de agua adicional, se considera que por cada kilogramo de ésta, 750 g se emplean en diluir el ácido a recuperarse, y lo restante forma parte de la solución azucarada. Con estas consideraciones, el agua alimentada al separador es:

Insumo	Agua adicional	
	kg	m ³
1	800	0.8
2	600	0.6
3	1100	1.1
4	900	0.9
5	1000	1
6	900	0.9
7	950	0.95

Con estos datos se realiza el balance de materia del equipo, obteniéndose las corrientes de salida del separador:

Insumo	Solución Azucarada			Ácido a recuperar		
	kg	m ³	%azúcares	kg	m ³	%ácido
1	267.1	0.267	16.07	672.4	0.672	10.77
2	217.8	0.218	15.27	553.6	0.554	18.71
3	369.8	0.370	18.27	906.8	0.907	9.02
4	308.3	0.308	15.95	777.3	0.777	13.16
5	325.7	0.326	15.40	826.7	0.827	9.28
6	297.3	0.297	15.91	750.0	0.750	10.00
7	318.9	0.319	15.73	806.3	0.806	11.63

La cantidad de solución azucarada se calculó a partir de la ecuación de balance:

$$m_{SA} = m_A + 0.25(m_{H_2O} + m_{H_2SO_4}) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

donde: m_{SA} = masa de solución azucarada

m_A = masa total de azúcares

m_{H_2O} = masa de agua adicional en el separador ácido/azúcar

$m_{H_2SO_4}$ = masa de ácido presente en el separador

Y la cantidad de ácido a recuperar se determina de la siguiente forma:

$$m_{AR} = 0.75(m_{H_2O} + m_{H_2SO_4}) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

donde: m_{AR} = masa de ácido a recuperar

m_{H_2O} = masa de agua adicional en el separador ácido/azúcar

$m_{H_2SO_4}$ = masa de ácido presente en el separador

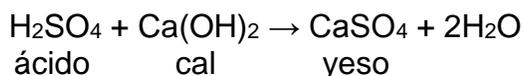
Respecto al análisis energético de esta etapa, se considera un tiempo de residencia del líquido en el separador de unos 20 minutos; con este dato se calcula el flujo de agua alimentada, se estima la potencia de bombeo y se calcula la energía consumida:

Insumo	Flujo de agua (gpm)	Potencia (HP)	Energía (kWh)
1	10.57	0.055	0.820
2	7.93	0.04	0.597
3	14.53	0.075	1.119
4	11.89	0.06	0.895
5	13.21	0.065	0.969
6	11.89	0.06	0.895
7	12.55	0.063	0.940

Etapa 7) Neutralización: la cantidad de ácido a neutralizar corresponde al 3% de la solución azucarada proveniente del separador ácido/azúcar de la etapa anterior:

Insumo	Ácido a neutralizar	
	kg	kgmol
1	8.01	0.082
2	6.53	0.067
3	11.10	0.113
4	9.25	0.094
5	9.77	0.100
6	8.92	0.091
7	9.57	0.098

Se calcularon las moles del ácido debido a que la neutralización se lleva a cabo mediante una reacción química con la cal:



Para calcular las masas de estos compuestos se deben considerar sus masas molares, las cuales resultan ser:

Compuesto		Masa molar kg/kgmol
Nombre	Fórmula	
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	98
Cal	Ca(OH) ₂	74
Yeso	CaSO ₄	136

Como la estequiometría de la reacción entre estos compuestos es unitaria, se calcula la masa de cal necesaria para la neutralización y la masa de yeso producido en la reacción:

Insumo	Cal necesaria		Yeso producido	
	kg	kgmol	kg	kgmol
1	6.05	0.082	11.12	0.082
2	4.93	0.067	9.07	0.067
3	8.38	0.113	15.40	0.113
4	6.98	0.094	12.83	0.094
5	7.38	0.100	13.56	0.100
6	6.73	0.091	12.38	0.091
7	7.22	0.098	13.28	0.098

La reacción de neutralización del ácido se lleva a cabo en un mezclador de tanque agitado. Si se considera un tiempo de mezclado de 2 horas y si la energía específica

para el mezclador es de 2 kW/m³, la energía total de mezclado se calcula de manera similar a la de los equipos de las etapas 1, 2 y 4:

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	3,845.8
2	3,135.7
3	5,325.7
4	4,438.9
5	4,690.5
6	4,281.0
7	4,592.4

Etapa 8) Regeneración de ácido sulfúrico: esta etapa se realiza en un evaporador de triple efecto, donde el ácido diluido ebulle en cada efecto para eliminarle una cantidad de agua, con lo que se incrementa su concentración. La cantidad de ácido concentrado producido en esta etapa se calcula mediante la siguiente ecuación de balance:

$$m_{AC} = m_{AD} \frac{C_1}{C_2} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

donde: m_{AC} = masa de ácido concentrado

m_{AD} = masa de ácido diluido

C_1 = concentración inicial de ácido sulfúrico al entrar al evaporador

C_2 = concentración final de ácido sulfúrico al salir del evaporador

La cantidad de agua a evaporarse se calcula de la siguiente manera:

$$m_{H_2O} = m_{AD} - m_{AC} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

donde: m_{H_2O} = masa de agua evaporada

m_{AD} = masa de ácido diluido

m_{AC} = masa de ácido concentrado

El balance global de materia en el evaporador de triple efecto queda como:

Insumo	Ácido diluido (kg)	Concentración inicial de ácido sulfúrico	Ácido concentrado (kg)	Agua evaporada (kg)
1	672.4	0.1077	94.1	578.4
2	553.6	0.1871	134.5	419.1
3	906.8	0.0902	106.3	800.6
4	777.3	0.1316	132.8	644.5
5	826.7	0.0928	99.6	727.1
6	750.0	0.1000	97.4	652.6
7	806.3	0.1163	121.8	684.5

La concentración final es de 0.77; tanto este dato como la concentración inicial están en fracción masa.

Respecto al análisis energético, sólo uno de los efectos recibe vapor de agua generado en una caldera; los demás efectos son calentados por el vapor generado en los efectos previos. Si la carga térmica de cada efecto es en promedio de 1,157.9 BTU/lb H₂O evaporada, entonces la energía consumida vía el vapor de la caldera resulta ser:

Insumo	Energía (kJ)
1	518,421.8
2	375,638.3
3	717,593.5
4	577,662.4
5	651,735.4
6	584,964.5
7	613,557.9

Etapa 9) Separación de yeso: esta operación se realiza en un filtro prensa, al igual que las etapas 3 y 5. De acuerdo a la literatura, el área unitaria para el filtrado del yeso es de 11 ft³/(ton día), y el flujo volumétrico de líquido a filtrarse es 1×10^{-4} veces el área de filtrado; por lo tanto, los valores del área de filtrado y del flujo de líquido son:

Insumo	Área de filtrado m ²	Flujo de líquido	
		m ³ /s	gpm
1	0.27	2.73E-05	4.33E-01
2	0.22	2.23E-05	3.53E-01
3	0.38	3.78E-05	5.99E-01
4	0.32	3.15E-05	4.99E-01
5	0.33	3.33E-05	5.28E-01
6	0.30	3.04E-05	4.82E-01
7	0.33	3.26E-05	5.17E-01

A partir de estos valores del flujo de líquido se estima una potencia de bombeo, la cual resulta ser de 0.02 HP. Si el tiempo del ciclo completo de filtrado es de 6 horas, entonces la cantidad de energía consumida en esta etapa final es 0.09 kWh para todos los insumos.

3) Explosión por vapor.

Considerando una alimentación de 100 kg de insumo, las cantidades de polisacáridos que entran al proceso son las siguientes:

Insumo	Masa alimentada (kg)		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
1	35	25	20
2	22.9	49.3	1.2
3	50	23	22
4	32	44	13
5	38	26	16
6	40	24	16
7	38	36	16

Este proceso de sacarificación puede ser subdividido en cuatro etapas para realizar su análisis energético de forma más detallada (ver figura 4.3):

- 1.- Pretratamiento ácido
- 2.- Explosión con vapor
- 3.- Neutralización
- 4.- Hidrólisis enzimática

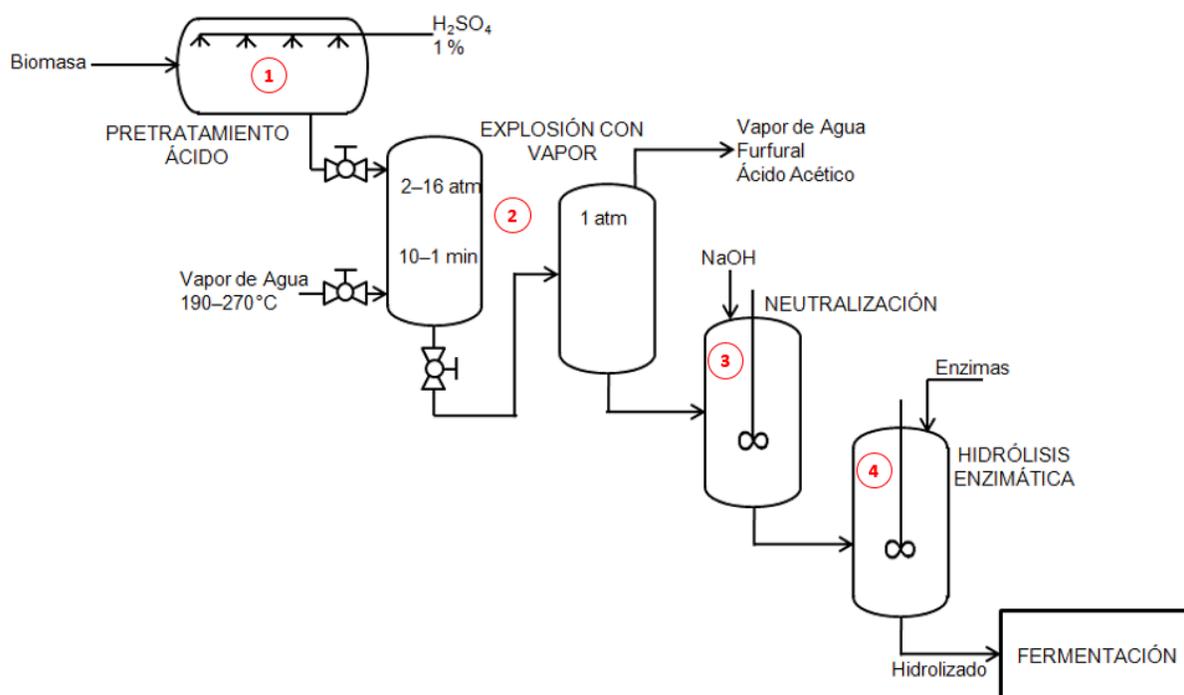


Figura 4.3. Etapas del proceso de explosión por vapor

Etapa 1) Pretratamiento ácido: para facilitar la ruptura de la celulosa y la hemicelulosa en la explosión con vapor, primero debe ser tratada con ácido sulfúrico al 1% en una proporción volumétrica líquido-sólido de 1.1:1. Considerando que el ácido tiene una densidad de 1000 kg/m^3 , las cantidades de ácido diluido y de mezcla de biomasa con ácido resultan ser:

Insumo	Ácido Diluido		Biomasa + Ácido (kg)
	Volumen (m ³)	Masa (kg)	
1	1.5	1,466.7	1,566.7
2	1.0	1,047.6	1,147.6
3	0.7	733.3	833.3
4	0.7	733.3	833.3
5	2.2	2,179.9	2,279.9
6	1.7	1,652.6	1,752.6
7	2.2	2,200.0	2,300.0

Para determinar el consumo de energía en esta etapa, se considera que el ácido es bombeado por una tubería de 1" de diámetro, cédula 40, con un flujo de 15 gpm. Como la potencia de bombeo requerido para este sistema de flujo es de 0.379 HP, se calcula el tiempo necesario para suministrar el volumen de ácido requerido por el pretratamiento ácido:

$$\theta = \frac{V_{H_2SO_4}}{F_{H_2SO_4}} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

donde: θ = tiempo de flujo del ácido diluido

$V_{H_2SO_4}$ = volumen de ácido diluido necesario para el pretratamiento ácido

$F_{H_2SO_4}$ = flujo de ácido diluido suministrado al pretratamiento ácido

Con este dato se calcula también la energía consumida por el pretratamiento ácido:

Insumo	Tiempo de flujo (s)	Energía de bombeo (kJ)
1	1,550.0	438.1
2	1,107.1	312.9
3	775.0	219.0
4	775.0	219.0
5	2,303.8	651.1
6	1,746.5	493.6
7	2,325.0	657.1

Etapa 2) Explosión con vapor. este proceso se realiza en dos tanques, uno a alta presión y el otro a presión atmosférica. En el primer tanque, se introduce el vapor de agua de baja presión, el cual penetra las fibras pretratadas con ácido sulfúrico diluido. Para evitar que haya un exceso de agua en dichas fibras, se introduce el vapor en igual proporción volumétrica que la biomasa. Si la densidad del vapor de agua a 1600 kPa (15.8 atm) y 500 K (227°C) es de 4.55 kg/m³, la cantidad de vapor de agua de baja presión a ser suministrado al primer tanque es:

Insumo	Vapor (m ³)	Vapor (kg)
1	1.3	6.1
2	1.0	4.3
3	0.7	3.0
4	0.7	3.0
5	2.0	9.0
6	1.5	6.8
7	2.0	9.1

En el segundo tanque, se lleva a cabo una expansión súbita para que las fibras de lignocelulosa exploten, formando azúcares monoméricos y otras sustancias más simples. Los monómeros de azúcar pasan a la fase líquida, formando una disolución azucarada ácida, y las otras sustancias (furfural y ácido acético principalmente), las cuales son muy volátiles, pasan a la fase vapor y salen por el domo de este tanque. Considerando que la eficiencia de ruptura de la lignocelulosa en esta etapa es:

Insumo	Eficiencia de ruptura
1	0.73
2	0.73
3	0.9
4	0.9
5	0.8
6	0.73
7	0.8

Entonces, la cantidad de sustancias volátiles y la biomasa hidrolizada en esta etapa resultan ser:

Insumo	Volátiles (kg)	Vapor + Volátiles (kg)	Biomasa Hidrolizada (kg)
1	14.6	20.7	85.4
2	0.876	5.2	99.124
3	19.8	22.8	80.2
4	11.7	14.7	88.3
5	12.8	21.8	87.2
6	11.68	18.5	88.32
7	12.8	21.9	87.2

La principal fuente de consumo de energía en esta etapa es la generación del vapor de agua de baja presión, lo cual se realiza en una caldera cuya eficiencia térmica se estima de 88%. Considerando la cantidad de vapor que debe generarse por cada insumo, la energía total para producir a dicho vapor de agua es:

Insumo	ΔH del vapor (kJ)	Energía para generar vapor (kJ)
1	16,185.3	18,392.3
2	11,560.9	13,137.4
3	8,092.6	9,196.2
4	8,092.6	9,196.2
5	24,056.6	27,337.0
6	18,237.6	20,724.5
7	24,277.9	27,588.5

El cambio de entalpía necesario para generar al vapor se calculó como:

$$\Delta H_{GVap} = m_{Vap} (C_{P_{Liq}} (T_{eb} - T_a) + \Delta H_{Vap}) \quad \text{Ecuación 4.9}$$

donde: ΔH_{GVap} = cambio de entalpía para generar vapor a partir de agua líquida

m_{Vap} = masa de vapor necesario a generarse

$C_{P_{Liq}}$ = capacidad calorífica del agua líquida a presión constante: 1 cal/(g °C)

T_{eb} = temperatura de ebullición del agua líquida: 202°C a 1821 kPa

T_a = temperatura inicial del agua líquida: 25°C

ΔH_{Vap} = calor latente de vaporización del agua: 1,930 kJ/kg

La energía para generar al vapor de agua se determinó mediante la ecuación:

$$E_{GVap} = \frac{\Delta H_{GVap}}{\eta} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

donde: E_{GVap} = energía para generar vapor a partir de agua líquida

ΔH_{GVap} = cambio de entalpía para generar vapor a partir de agua líquida

η = eficiencia térmica de la caldera: 0.88

Etapa 3) Neutralización: la mezcla líquida resultante de la explosión con vapor es una disolución azucarada ácida, la cual es neutralizada con sosa acuosa en un tanque agitado. La cantidad total de materia en el tanque es:

Insumo	Biomasa + Líquido (kg)	Biomasa + Líquido (m ³)
1	1,552.1	1.55
2	1,146.7	1.15
3	813.5	0.81
4	821.6	0.82
5	2,267.1	2.27
6	1,741.0	1.74
7	2,287.2	2.29

El consumo de energía del tanque agitado se determina considerando que el tiempo de mezclado es de 2 horas y, la energía específica para el mezclador es de 2 kW/m³, dato correspondiente a la agitación con propela de mezclas cuya viscosidad es menor a 25 Pa-s (equivalente a 25,000 cp):

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	22,349.8
2	16,513.1
3	11,714.9
4	11,831.5
5	32,646.9
6	25,069.9
7	32,935.7

Etapa 4) Hidrólisis enzimática: este proceso se realiza en un tanque de mezclado con agitación; la masa total a mezclarse con las enzimas es la resultante de la etapa de neutralización. La cantidad de azúcares producida es:

Insumo	Eficiencia global de la hidrólisis	Hexosas (kg)		Pentosas (kg)		Azúcares Totales (kg)
		Teórica	Experimental	Teórica	Experimental	
1	0.73	63.2	46.1	2.2	1.6	47.7
2	0.73	47.2	34.4	3.4	2.5	36.9
3	0.9	81.4	73.2	2.1	1.8	75.1
4	0.9	57.3	51.5	3.4	3.1	54.6
5	0.8	66.8	53.5	2.9	2.3	55.7
6	0.73	69.9	51.0	2.1	1.5	52.5
7	0.8	66.8	53.5	2.9	2.3	55.7

En esta tabla de resultados, las cantidades teóricas de hexosas y de pentosas se calcularon a partir de la composición de la biomasa lignocelulósica de la tabla 4.2, y las cantidades experimentales se obtuvieron a partir de considerar la eficiencia global de la hidrólisis. La suma de las cantidades experimentales da la masa de azúcares totales.

Si se considera un tiempo total de 48 horas, y si su energía específica de mezclado es de 2 kW/m³, entonces la energía consumida en esta etapa del proceso es:

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	536,394.2
2	396,314.4
3	281,157.1
4	283,956.5
5	783,525.1
6	601,677.2
7	790,456.3

4b) Tratamiento con amoniaco: Proceso SAA.

Considerando una masa de insumo de 100 kg, las cantidades de polisacáridos alimentadas al proceso son las siguientes:

Insumo	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
1	35	25	20
2	22.9	49.3	1.2
3	50	23	22
4	32	44	13
5	38	26	16
6	40	24	16
7	38	36	16

Para realizar un análisis energético detallado de este proceso de sacarificación, éste puede ser subdividido en cinco etapas, como se muestra en la figura 4.4:

- 1.- Delignificación
- 2.- Separación de lignina
- 3.- Endulzamiento
- 4.- Hidrólisis enzimática
- 5.- Regeneración de hidróxido de amonio

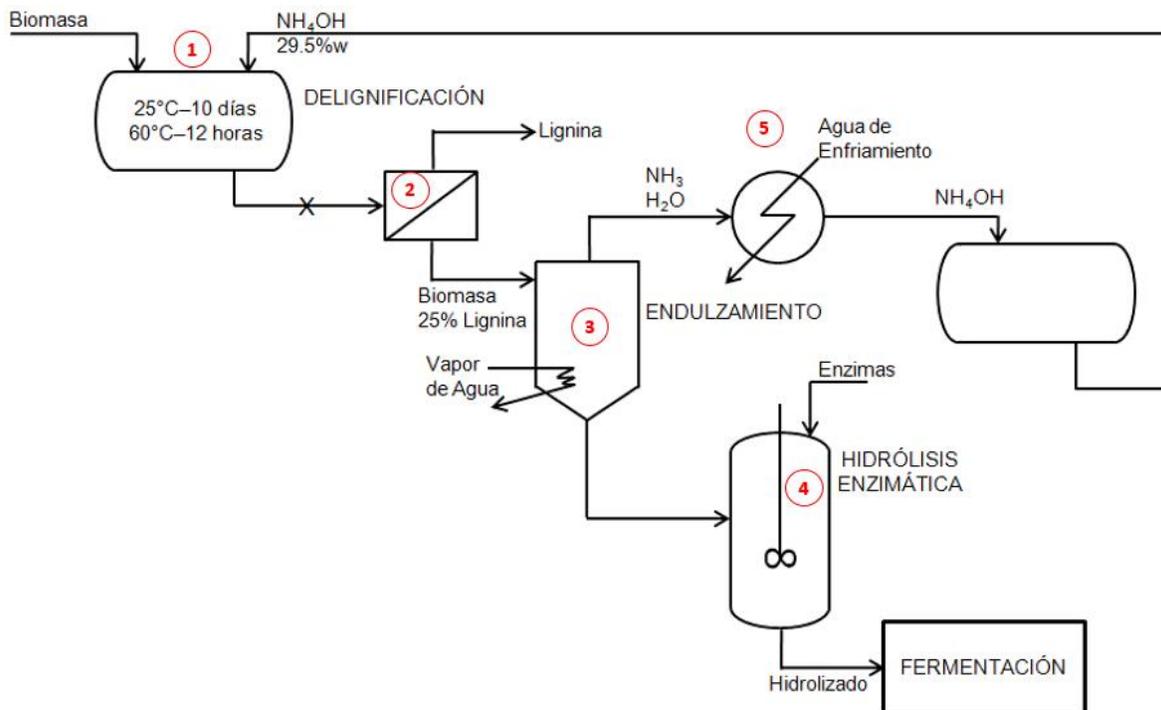
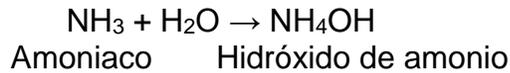


Figura 4.4. Etapas del proceso de tratamiento con amoniaco (proceso SAA)

Etapa 1) Delignificación: para reducir el consumo de energía, se considera que la sumersión de la biomasa en amoniaco acuoso al 29.5% masa se lleva a cabo a 25°C, aunque el tiempo de residencia de la lignocelulosa en el tanque de delignificación sea de 10 días. El amoniaco al disolverse en agua genera una reacción química que forma una solución de hidróxido de amonio (NH₄OH):



La determinación de la cantidad de solución de hidróxido de amonio se efectúa considerando que por cada metro cúbico de biomasa debe haber 1.1 m³ de solución. Como la densidad de la solución de NH₄OH es de 893.5 kg/m³, las cantidades de solución y de contenido total del tanque de delignificación resultan ser:

Insumo	NH ₄ OH 29.5%masa		Biomasa + Amonio	
	Volumen (m ³)	Masa (kg)	Volumen (m ³)	Masa (kg)
1	1.5	1,310.5	1,410.5	2.8
2	1.0	936.0	1,036.0	2.0
3	0.7	655.2	755.2	1.4
4	0.7	655.2	755.2	1.4
5	2.2	1,947.8	2,047.8	4.2
6	1.7	1,476.6	1,576.6	3.2
7	2.2	1,965.7	2,065.7	4.2

En cuanto a la energía, principalmente es consumida en la carga de la solución de NH₄OH mediante bombeo; para esta operación se considera una línea de 1" de diámetro, cédula 40. Si el flujo de amonio es de 15 gpm, el tiempo destinado a la alimentación del NH₄OH se calcula como:

$$\theta = \frac{V_{\text{NH}_4\text{OH}}}{F_{\text{NH}_4\text{OH}}} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

donde: θ = tiempo de flujo de la solución de NH₄OH

$V_{\text{NH}_4\text{OH}}$ = volumen de solución de NH₄OH necesario para la delignificación

$F_{\text{NH}_4\text{OH}}$ = flujo de solución de NH₄OH suministrado al tanque delignificador

Asimismo, la potencia de bombeo necesaria para suministrar la solución de NH₄OH al tanque con dicho flujo es de 0.379 HP. Entonces, el tiempo de flujo de la solución y la energía consumida por su bombeo resultan ser:

Insumo	Tiempo de flujo (s)	Energía de bombeo (kJ)
1	1,550.0	438.1
2	1,107.1	312.9
3	775.0	219.0

Insumo	Tiempo de flujo (s)	Energía de bombeo (kJ)
4	775.0	219.0
5	2,303.8	651.1
6	1,746.5	493.6
7	2,325.0	657.1

Etapa 2) Separación de lignina: en la delignificación, se separan la celulosa y la hemicelulosa de la lignina, pero queda un 25% de ésta retenida, la cual prosigue hacia la etapa de endulzamiento. Las cantidades de lignina eliminada y de lignina retenida, y de la solución de polisacáridos en NH₄OH acuoso son:

Insumo	Lignina (kg)		Polisacáridos + NH ₄ OH _(ac) (kg)
	eliminada	retenida	
1	15	5	1,375.5
2	0.9	0.3	1,008.5
3	16.5	5.5	733.7
4	9.75	3.25	734.5
5	12	4	2,015.8
6	12	4	1,544.6
7	12	4	2,043.7

La separación de la lignina se efectúa en un filtro prensa, cuya área unitaria de filtrado es de 16 ft²/(ton día). El flujo volumétrico de líquido necesario es de 0.01 veces el área total de filtrado. Con estos datos, los resultados de la determinación del área de filtrado y del flujo volumétrico de líquido, así como la masa total a filtrar, la cual está formada por la solución de polisacáridos en amonio y la lignina eliminada, resultan ser:

Insumo	Masa total a filtrar (ton)	Área de filtrado m ²	Flujo de líquido	
			m ³ /s	gpm
1	1.410	2.10	0.021	332.35
2	1.036	1.54	0.015	244.13
3	0.755	1.12	0.011	177.96
4	0.755	1.12	0.011	177.96
5	2.048	3.04	0.030	482.52
6	1.577	2.34	0.023	371.51
7	2.066	3.07	0.031	486.75

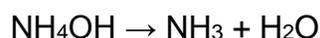
De acuerdo con el flujo de líquido se estima su potencia de bombeo:

Insumo	Potencia de bombeo (HP)
1	1.65
2	1.25
3	0.95
4	0.95
5	2.45
6	1.85
7	2.45

Considerando que el tiempo de filtrado es de 6 horas, el consumo energético de esta etapa es:

Insumo	Energía kWh
1	7.4
2	5.6
3	4.3
4	4.3
5	11.0
6	8.3
7	11.0

Etapa 3) Endulzamiento: consiste en eliminar el amoníaco (NH₃) de la solución de polisacáridos; esta etapa recibe el nombre de “endulzamiento” porque se considera al NH₃ un gas “amargo”. Este proceso se lleva a cabo mediante la siguiente reacción química, la cual requiere se incremente la temperatura de la solución de polisacáridos hasta 100°C:



Para determinar la masa de cada uno de los compuestos de la reacción, se toma en cuenta su masa molar:

Compuesto	Masa molar (kg/kgmol)
NH ₄ OH	35
NH ₃	17
H ₂ O	18

Como la estequiometría de la reacción es 1:1, y sabiendo que la solución de hidróxido de amonio original (en la etapa 1) estaba al 29.5% masa, entonces las cantidades de los compuestos en la reacción de endulzamiento son:

Insumo	Amonio entrante		Amoniaco saliente		Agua generada (vapor)	
	kg	kgmol	kg	kgmol	kg	kgmol
1	386.6	11.0	187.8	11.0	198.8	11.0
2	276.1	7.9	134.1	7.9	142.0	7.9
3	193.3	5.5	93.9	5.5	99.4	5.5
4	193.3	5.5	93.9	5.5	99.4	5.5
5	574.6	16.4	279.1	16.4	295.5	16.4
6	435.6	12.4	211.6	12.4	224.0	12.4
7	579.9	16.6	281.7	16.6	298.2	16.6

La cantidad de agua vapor saliente del proceso se calcula mediante la ecuación de balance:

$$m_{AS} = \frac{m_{NH_3}}{C} (1 - C) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

donde: m_{AS} = masa de agua vapor saliente del equipo de endulzamiento

m_{NH_3} = masa de amoniaco saliente del endulzamiento

C = concentración de amonio en la solución

La masa de agua líquida que pasa del endulzamiento a la hidrólisis enzimática se determina usando la ecuación siguiente:

$$m_{AH} = m_{Soln} - m_{NH_4OH} - (m_{AS} - m_{AG}) \quad \text{Ecuación 4.13}$$

donde: m_{AH} = masa de agua líquida a hidrólisis

m_{Soln} = masa de solución de $NH_4OH_{(ac)}$

m_{NH_4OH} = masa de amonio entrante al equipo de endulzamiento

m_{AS} = masa de agua vapor saliente del equipo de endulzamiento

m_{AG} = masa de agua vapor generada en la reacción de endulzamiento

Considerando que las densidades del agua vapor y del agua líquida son respectivamente 0.588 kg/m^3 y 1000 kg/m^3 , las cantidades de agua vapor saliente y de agua líquida a hidrólisis resultan ser:

Insumo	Agua saliente (vapor)		Agua a hidrólisis (líq)	
	kg	m^3	kg	m^3
1	448.7	762.8	674.0	0.674
2	320.5	544.9	481.4	0.481
3	224.4	381.4	337.0	0.337
4	224.4	381.4	337.0	0.337
5	667.0	1,133.8	1,001.7	1.002
6	505.6	859.5	759.4	0.759
7	673.1	1,144.2	1,010.9	1.011

El agua vapor total saliente del equipo de endulzamiento está dado por:

$$m_{AVap} = m_{AS} + m_{AG} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

donde: m_{AVap} = masa de agua vapor total saliente del equipo de endulzamiento

m_{AS} = masa de agua vapor saliente del equipo de endulzamiento

m_{AG} = masa de agua vapor generada en la reacción de endulzamiento

La cantidad total de agua vapor a la salida del endulzamiento es para cada insumo la siguiente:

Insumo	Agua vapor total a la salida		
	kg	m ³	kgmol
1	647.6	1,100.8	36.0
2	462.5	786.3	25.7
3	323.8	550.4	18.0
4	323.8	550.4	18.0
5	962.5	1,636.1	53.5
6	729.7	1,240.4	40.5
7	971.3	1,651.2	54.0

En cuanto a la energía, su principal fuente de consumo en esta etapa es la generación del vapor de agua de baja presión, de manera similar a la etapa 2 del proceso de sacarificación 3. El vapor de agua es generado en una caldera, cuya eficiencia térmica se estima de 88%. La cantidad de vapor necesaria para el calentamiento de la mezcla a endulzar se calcula mediante la ecuación de balance:

$$m_{Vap} = \frac{m_M C_{PM} (T_S - T_E) + m_{AS} \Delta H_{Vap}}{C_{PLiq} (T_{eb} - T_a) + \Delta H_{Vap}} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

donde: m_{Vap} = masa de agua vapor de calentamiento para el endulzamiento

m_M = masa de mezcla a endulzarse, formada por polisacáridos y NH_4OH

C_{PM} = capacidad calorífica de la mezcla a endulzarse: 1 cal/(g °C)

T_S = temperatura de salida de la mezcla: 100°C

T_E = temperatura de entrada de la mezcla: 25°C

m_{AS} = masa de agua vapor saliente del equipo de endulzamiento

C_{PLiq} = capacidad calorífica del agua líquida a presión constante: 1 cal/(g °C)

T_{eb} = temperatura de ebullición del agua líquida: 202°C a 1821 kPa

T_a = temperatura inicial del agua líquida: 25°C

ΔH_{Vap} = calor latente de vaporización del agua:

Para el agua de la mezcla a endulzarse: 970.3 BTU/lb a 1 atm

Para el agua del vapor de calentamiento: 1,930 kJ/kg a 1821 kPa

Para cada insumo, esta cantidad de vapor de calentamiento resulta ser:

Insumo	Cantidad de Vapor (kg)
1	540.3
2	389.0
3	275.5
4	275.6
5	799.7
6	608.2
7	808.1

La energía total para producir a dicho vapor de agua se calcula mediante las ecuaciones 4.9 y 4.10, las cuales dan como resultado para este proceso de endulzamiento:

Insumo	ΔH del vapor (kJ)	Energía para generar vapor (kJ)
1	1,042,718.7	1,184,907.6
2	750,711.6	853,081.4
3	531,791.3	604,308.3
4	531,961.4	604,501.6
5	1,543,331.3	1,753,785.5
6	1,173,749.6	1,333,806.4
7	1,559,655.9	1,772,336.2

Etapa 4) Hidrólisis enzimática: al igual que en el proceso de sacarificación 3, la hidrólisis de la solución de polisacáridos tras su endulzamiento da como resultado la siguiente composición:

Insumo	Hexosas (kg)		Pentosas (kg)		Azúcares Totales (kg)
	Teórica	Experimental	Teórica	Experimental	
1	63.16	46.11	2.17	1.58	47.69
2	47.18	34.44	3.42	2.50	36.93
3	81.36	73.23	2.05	1.85	75.07
4	57.28	51.55	3.42	3.08	54.63
5	66.82	53.46	2.85	2.28	55.74
6	69.93	51.05	2.05	1.50	52.55
7	66.82	53.46	2.85	2.28	55.74

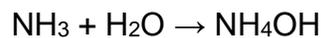
Para calcular las cantidades experimentales de hexosas y pentosas, las cuales al sumarse dan los azúcares totales, se consideran las siguientes eficiencias de la hidrólisis por cada insumo:

Insumo	Eficiencia de hidrólisis
1	0.73
2	0.73
3	0.9
4	0.9
5	0.8
6	0.73
7	0.8

Como el proceso de hidrólisis enzimática se efectúa en un tanque de mezclado, su energía específica para la agitación con propela de mezclas con viscosidad inferior a 25 Pa-s (equivalente a 25,000 cp) es de 2 kW/m³. Si el tiempo de mezclado es de 48 horas, la energía consumida por este proceso de hidrólisis es:

Insumo	Energía de mezclado (kJ)
1	186,671.6
2	142,347.2
3	109,233.4
4	109,492.6
5	267,566.8
6	208,530.4
7	273,268.2

Etapa 5) Regeneración de hidróxido de amonio: este proceso se lleva a cabo mediante la reacción entre el amoniaco gaseoso y el agua vapor, ambos de la corriente de salida de la etapa de endulzamiento:



Esta reacción química es exotérmica, por lo cual libera 80,800 kJ/kgmol de NH₃; se hace referencia a este compuesto porque es el reactivo limitante en la reacción química. Considerando la cantidad total de amoniaco eliminado en el proceso de endulzamiento, se determina la energía total liberada por esta reacción química:

Insumo	NH ₃ total (kgmol)	Calor de reacción (kJ)
1	11.0	892,465.2
2	7.9	637,475.2
3	5.5	446,232.6
4	5.5	446,232.6
5	16.4	1,326,494.1
6	12.4	1,005,632.4
7	16.6	1,338,697.9

Como la mezcla reactiva absorbe esta cantidad de calor, se le enfría usando agua líquida a 85°F, la cual se considera aumenta su temperatura hasta 95°F. Con esta información, la energía necesaria para incrementar la temperatura del agua fría es de 23.27 kJ/kg de agua, valor calculado mediante la ecuación:

$$\Delta H = C_{P_{Liq}} (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 4.16}$$

donde: ΔH = cambio de entalpía específica para calentar al agua fría

$C_{P_{Liq}}$ = capacidad calorífica del agua fría: 1 cal/(g °C)

T_1 = temperatura de entrada del agua fría: 85°F

T_2 = temperatura de salida del agua fría: 95°F

La energía consumida en la regeneración de la solución de NH_4OH sólo se debe a la regeneración del agua fría en una torre de enfriamiento. La energía específica para este proceso es de 0.254 kJ/kg de agua, considerando que esto se lleva a cabo en una torre de enfriamiento de ventilación inducida con un flujo de 1,200 gpm de agua.

La cantidad total de agua fría, así como la energía total consumida en la regeneración de la solución de hidróxido de amonio resultan ser:

Insumo	Agua fría (kg)	Energía para la regeneración	
		kJ	kWh
1	38,359.2	9,748.6	2.7
2	27,399.4	6,963.3	1.9
3	19,179.6	4,874.3	1.4
4	19,179.6	4,874.3	1.4
5	57,014.3	14,489.7	4.0
6	43,223.3	10,984.8	3.1
7	57,538.8	14,623.0	4.1

Fermentación de los Azúcares Producidos

La transformación de los azúcares obtenidos de la sacarificación de la biomasa lignocelulósica en etanol se efectúa mediante una serie de reacciones químicas, mostradas en el capítulo 3 y denominadas en conjunto como “fermentación”, las cuales liberan calor. Este proceso ocurre en un fermentador, el cual es un tanque agitado con un enchaquetado de agua fría para eliminar la cantidad de calor generado por la fermentación. Para determinar la energía térmica liberada por unidad de masa de etanol se emplean los datos experimentales de Costa Magazoni et al., quienes emplearon un fermentador de 210 m³ y con una concentración final de etanol de 73.41 kg/m³:

t (hr)	Q (kW)
0	0
0.2	3,115.4
0.4	3,115.4
0.6	3,096.2
0.8	3,142.3
1	3,219.2
2	3,538.5
3	3,823.1
4	4,076.9
5	4,230.8
5.2	3,192.3
5.4	57.7
5.45	0

donde: t = tiempo que transcurre desde el inicio de la fermentación
Q = flujo de calor emitido por la fermentación en cada instante

El calor total emitido por la fermentación de los azúcares se obtiene mediante la ecuación:

$$q = \int_{t_0}^t Q dt \quad \text{Ecuación 4.17}$$

donde: q = calor total producido durante la fermentación
t₀ = tiempo en el cual inicia la fermentación: 0 hr
t = instante de tiempo posterior al inicio de la fermentación: t > t₀

A partir de los datos de Costa Magazoni et al., se evalúa la ecuación 4.17 de forma numérica:

t (hr)	Q (kJ/h)	Qprom (kJ/h)	dt (hr)	Qprom dt (kJ)
0	0	5,607,720	0.2	1,121,544
0.2	11,215,440	11,215,440	0.2	2,243,088
0.4	11,215,440	11,180,880	0.2	2,236,176
0.6	11,146,320	11,229,300	0.2	2,245,860
0.8	11,312,280	11,450,700	0.2	2,290,140
1	11,589,120	12,163,860	1	12,163,860
2	12,738,600	13,250,880	1	13,250,880
3	13,763,160	14,220,000	1	14,220,000
4	14,676,840	14,953,860	1	14,953,860
5	15,230,880	13,361,580	0.2	2,672,316
5.2	11,492,280	5,850,000	0.2	1,170,000
5.4	207,720	103,860	0.05	5,193
5.45	0	Calor total: q =		68,572,917

La masa total de etanol empleada por Costa Magazoni et al. se obtiene como:

$$m_{\text{EtOH}} = V_F C_{\text{EtOH}} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

donde: m_{EtOH} = masa total de etanol en el fermentador

V_F = volumen del fermentador: 210 m³

C_{EtOH} = concentración de etanol en el fermentador: 73.41 kg/m³

Esta ecuación da como resultado una masa de 15,416.1 kg de etanol. Al dividir el calor total producido por la fermentación entre esta masa se obtiene que este proceso libera 4,448.1 kJ/kg de etanol.

Con este dato se determina la cantidad de calor liberado por la fermentación tras cada uno de los procesos de sacarificación de la lignocelulosa. Pero primero debe determinarse la cantidad de etanol producido en cada uno de estos procesos; teóricamente cada kilogramo de azúcares totales produce 0.51 kg de etanol vía la fermentación.

1) Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (proceso Arkenol).

La cantidad de etanol producido en este proceso a partir de los azúcares resulta ser:

Insumo	Azúcares Totales (kg)	Etanol Producido	
		kg	L
1	42.9	21.9	27.7
2	33.2	17.0	21.5
3	67.6	34.5	43.7
4	49.2	25.1	31.8
5	50.2	25.6	32.4
6	47.3	24.1	30.6
7	50.2	25.6	32.4

El volumen de etanol se calcula a partir de su densidad, la cual es de 0.789 kg/L.

La fermentación es efectuada por una bacteria; a nivel industrial, la bacteria más empleada es *Saccharomyces cerevisiae*. Este microorganismo no tolera concentraciones muy elevadas de etanol, por lo que se considera una concentración máxima de 10% v/v. La cantidad total de mezcla etanol-agua en el fermentador resulta ser entonces:

Insumo	Mezcla Etanol + Agua	
	kg	L
1	271.1	277.4
2	209.9	214.9
3	426.7	436.7

Insumo	Mezcla Etanol + Agua	
	kg	L
4	310.5	317.8
5	316.8	324.3
6	298.7	305.7
7	316.8	324.3

A partir de la cantidad de etanol producido, se calcula el calor total liberado por el proceso de fermentación:

Insumo	Calor Liberado (kJ)
1	97,362.8
2	75,408.7
3	153,277.2
4	111,530.4
5	113,799.2
6	107,284.6
7	113,799.2

Para retirar este calor del fermentador, a la mezcla etanol-agua se le enfría usando agua líquida a 85°F, la cual se considera aumenta su temperatura hasta 95°F. Con esta información, la energía necesaria para incrementar la temperatura del agua fría es de 23.27 kJ/kg de agua, valor calculado mediante la ecuación 4.16. A esta agua fría se le regenera en una torre de enfriamiento de ventilación inducida, cuya energía específica es de 0.254 kJ/kg de agua, considerando que el flujo de agua en la torre es de 1,200 gpm.

La cantidad total de agua fría, así como la energía necesaria para regenerar al agua fría resultan ser:

Insumo	Agua fría requerida (kg)	Energía para regenerar el agua fría (kJ)
1	4,184.8	1,063.5
2	3,241.2	823.7
3	6,588.0	1,674.3
4	4,793.7	1,218.3
5	4,891.2	1,243.1
6	4,611.2	1,171.9
7	4,891.2	1,243.1

Además, se debe tomar en cuenta la energía empleada en la agitación del contenido del fermentador. La energía específica para el agitador de propela es de 2 kW/m³, debido a que la viscosidad de la mezcla en fermentación es inferior a los 25,000 cp. El tiempo de mezclado es de 5.45 horas, valor empleado en la determinación del

calor total liberado por la fermentación. Con estos datos, la energía empleada en la agitación de la mezcla es:

Insumo	Energía para agitación (kJ)
1	10,886.0
2	8,431.3
3	17,137.7
4	12,470.0
5	12,723.7
6	11,995.3
7	12,723.7

Sumando las cantidades de energía para regenerar el agua fría y para la agitación de la mezcla del fermentador, la energía total empleada en la fermentación resulta ser:

Insumo	Energía Total (kJ)
1	11,949.5
2	9,255.0
3	18,811.9
4	13,688.3
5	13,966.7
6	13,167.2
7	13,966.7

3) Explosión por vapor.

De manera similar al proceso anterior, se calculan las cantidades totales de etanol y de la mezcla etanol-agua presentes en el fermentador, obteniéndose los siguientes resultados:

Insumo	Azúcares Totales (kg)	Etanol Producido		Mezcla Etanol + Agua	
		kg	L	kg	L
1	47.7	24.3	30.8	301.2	308.2
2	36.9	18.8	23.9	233.3	238.7
3	75.1	38.3	48.5	474.2	485.3
4	54.6	27.9	35.3	345.0	353.1
5	55.7	28.4	36.0	352.0	360.3
6	52.5	26.8	34.0	331.9	339.7
7	55.7	28.4	36.0	352.0	360.3

La cantidad de calor liberado por la fermentación, así como la cantidad de agua fría requerida para eliminarlo y su energía de regeneración, se les calcula de igual manera que en el proceso anterior:

Insumo	Calor Liberado (kJ)	Agua fría requerida (kg)	Energía para regenerar el agua fría (kJ)
1	108,180.9	4,649.7	1,181.7
2	83,787.4	3,601.3	915.2
3	170,308.0	7,320.0	1,860.3
4	123,922.7	5,326.3	1,353.6
5	126,443.5	5,434.7	1,381.2
6	119,205.2	5,123.6	1,302.1
7	126,443.5	5,434.7	1,381.2

Y finalmente, la energía para la agitación del contenido del fermentador y la energía total consumida por el proceso de fermentación resultan ser:

Insumo	Energía para agitación (kJ)	Energía Total (kJ)
1	12,095.5	13,277.2
2	9,368.1	10,283.4
3	19,041.8	20,902.2
4	13,855.6	15,209.2
5	14,137.4	15,518.6
6	13,328.1	14,630.2
7	14,137.4	15,518.6

4b) Tratamiento con amoníaco: Proceso SAA.

De manera semejante a los dos procesos anteriores, el balance de materia para el fermentador queda como:

Insumo	Azúcares Totales (kg)	Etanol Producido		Mezcla Etanol + Agua	
		kg	L	kg	L
1	47.7	24.3	30.8	301.2	308.2
2	36.9	18.8	23.9	233.3	238.7
3	75.1	38.3	48.5	474.2	485.3
4	54.6	27.9	35.3	345.0	353.1
5	55.7	28.4	36.0	352.0	360.3
6	52.5	26.8	34.0	331.9	339.7
7	55.7	28.4	36.0	352.0	360.3

Y el balance de energía resulta ser:

Insumo	Calor Liberado (kJ)	Agua fría requerida (kg)	Energía para regenerar el agua fría (kJ)	Energía para agitación (kJ)	Energía Total (kJ)
1	108,180.9	4,649.7	1,181.7	12,095.5	13,277.2
2	83,787.4	3,601.3	915.2	9,368.1	10,283.4
3	170,308.0	7,320.0	1,860.3	19,041.8	20,902.2
4	123,922.7	5,326.3	1,353.6	13,855.6	15,209.2
5	126,443.5	5,434.7	1,381.2	14,137.4	15,518.6
6	119,205.2	5,123.6	1,302.1	13,328.1	14,630.2
7	126,443.5	5,434.7	1,381.2	14,137.4	15,518.6

Destilación del Etanol Producido

Dependiendo de la calidad del etanol final a producir, es decir, del grado de separación del agua con la que está mezclado, existen dos tipos de destilación:

- 1) Destilación convencional: no rompe ni modifica al azeótropo formado con el agua debido a la presencia de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua y de etanol; se obtiene un etanol con un 4% en volumen de agua.
- 2) Destilación azeotrópica: rompe o modifica al azeótropo, por lo que se obtiene un etanol anhidro (libre de agua).

Como se mencionó en el capítulo 3 de esta tesis, la destilación azeotrópica es más compleja, por lo cual su consumo energético es mayor respecto de la destilación convencional. Para el presente análisis energético, se elige entonces este último proceso de destilación. La figura 4.5 muestra que un proceso convencional de destilación consta de una torre o columna de destilación y unos equipos periféricos auxiliares: condensador, tanque acumulador de condensados y rehervidor. La torre de destilación está dividida en dos secciones, la superior conocida como de enriquecimiento o rectificación, y la inferior denominada de agotamiento.

El objetivo de este proceso de destilación es separar al etanol del agua por las diferencias existentes en sus presiones de vapor, es decir, por sus diferentes puntos de ebullición. Para poderlo lograr, se introduce energía térmica en la parte inferior de la columna (en el rehervidor) para convertir en vapor al líquido de fondos, el cual entra en contacto con el líquido descendente mediante platos de válvulas, donde éstas burbujan el vapor en el líquido para que se dé la transferencia del etanol (el componente más volátil) del líquido hacia el vapor, y del agua (el componente menos volátil) del vapor hacia el líquido. El vapor que asciende hacia el domo de la torre, ya rico en etanol, es condensado para regresarlo hacia la columna y así mantener los platos burbujeando. Esta condensación se efectúa extrayendo energía térmica del vapor del domo.

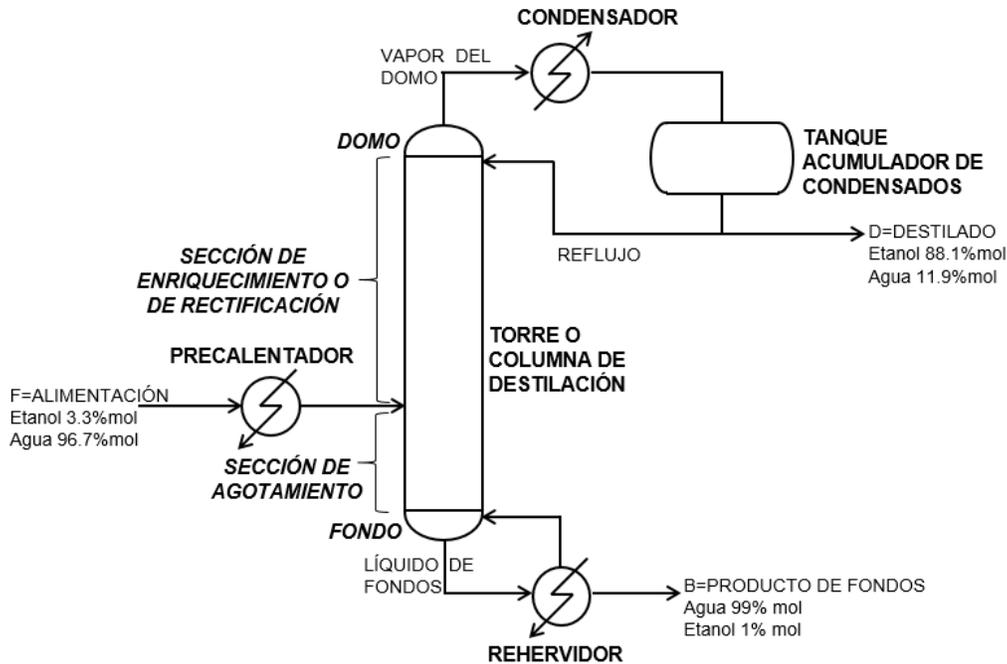


Figura 4.5. Destilación convencional

Para determinar el consumo energético de la torre de destilación, se emplea el método de Ponchon-Savarit, previa estimación de la composición del destilado vía el método de McCabe-Thiele. Para ambos métodos se considera la alimentación de la mezcla etanol-agua como líquido saturado, es decir, como líquido en su punto de ebullición, y el uso de un condensador total, con lo cual las corrientes de destilado, de reflujo y de vapor del domo tienen la misma composición química.

Esta destilación se va a efectuar a una presión de 760 mmHg (1 atm), dato empleado para determinar los datos de equilibrio fisicoquímico de la mezcla etanol-agua. Este sistema genera soluciones no ideales debido a la formación de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua y de etanol. Por esta razón, el equilibrio entre las fases líquida y vapor se alcanza cuando se cumple la siguiente expresión de la Ley de Raoult:

$$y_E \phi_E P + (1 - y_E) \phi_A P = x_E \gamma_E P_E^\circ + (1 - x_E) \gamma_A P_A^\circ \quad \text{Ecuación 4.19}$$

- donde:
- y_E = fracción molar de etanol en la fase vapor
 - ϕ_E = coeficiente de fugacidad del etanol en la fase vapor
 - ϕ_A = coeficiente de fugacidad del agua en la fase vapor
 - P = presión total del sistema: 760 mmHg = 1 atm
 - x_E = fracción molar de etanol en la fase líquida
 - γ_E = coeficiente de actividad del etanol en la fase líquida
 - γ_A = coeficiente de actividad del agua en la fase líquida
 - P_E° = presión de vapor del etanol
 - P_A° = presión de vapor del agua

Los coeficientes de fugacidad se determinaron con el modelo de Pitzer-Curl, y los de actividad con el modelo de Wilson. La estructura matemática de ambos modelos es muy compleja, y está fuera del alcance de esta tesis. En cambio, las presiones de vapor se calcularon mediante la ecuación de Antoine:

$$\ln(P^\circ) = A - \frac{B}{T + C} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

donde: T = temperatura de la fase líquida
A,B,C = coeficientes de Antoine para una sustancia en particular

Para poder realizar el análisis energético de la destilación, se calculan las entalpías de ambas fases en el equilibrio, es decir, en su punto de ebullición:

$$H_L = x_E \int_{T_0}^{T_{eb}} C_E dT + (1 - x_E) \int_{T_0}^{T_{eb}} C_A dT + H_L^E \quad \text{Ecuación 4.21}$$

donde: H_L = entalpía de la mezcla etanol-agua como líquido saturado
 C_E = capacidad calorífica del etanol en fase líquida
 C_A = capacidad calorífica del agua en fase líquida
 T_0 = temperatura de referencia para el cálculo de la entalpía: $0^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$
 T_{eb} = temperatura de ebullición de la mezcla líquida
 H_L^E = entalpía de exceso de la mezcla líquida

$$H_V = y_E \left(\int_{T_0}^{T_{eb}} C_{pE} dT + \Delta H_{vap,E} \right) + (1 - y_E) \left(\int_{T_0}^{T_{eb}} C_{pA} dT + \Delta H_{vap,A} \right) + H_V^E \quad \text{Ecuación 4.22}$$

donde: H_V = entalpía de la mezcla etanol-agua como vapor saturado
 C_{pE} = capacidad calorífica del etanol en fase vapor a presión constante
 C_{pA} = capacidad calorífica del agua en fase vapor a presión constante
 T_0 = temperatura de referencia para el cálculo de la entalpía: $0^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$
 T_{eb} = temperatura de ebullición de la mezcla líquida
 $\Delta H_{vap,E}$ = entalpía de vaporización del etanol
 $\Delta H_{vap,A}$ = entalpía de vaporización del agua
 H_V^E = entalpía de exceso de la mezcla en fase vapor

En las ecuaciones 4.21 y 4.22, las capacidades caloríficas son de tipo polinomial respecto de la temperatura; las entalpías de vaporización son funciones no lineales de la temperatura de acuerdo al manual Perry; y las entalpías de exceso corresponden a las del modelo de Wilson, pues dependen de la composición de la mezcla etanol-agua y del coeficiente de actividad.

Empleando las ecuaciones 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22, y los modelos de Pitzer-Curl y de Wilson, se determinaron los puntos de la curva de equilibrio para el sistema etanol-agua a 760 mmHg:

x _E	T _{ebullición} (°C)	y _E	H _L (kJ/kgmol)	H _v (kJ/kgmol)
0.00	99.998	0.000	7,563.07	48,088.29
0.05	91.052	0.308	7,126.25	48,022.56
0.10	87.307	0.417	7,037.66	47,928.40
0.15	85.306	0.473	7,066.44	47,866.70
0.20	84.005	0.510	7,141.88	47,823.31
0.25	83.037	0.539	7,238.81	47,789.78
0.30	82.254	0.564	7,346.89	47,762.10
0.35	81.586	0.587	7,461.41	47,738.29
0.40	80.999	0.609	7,580.07	47,717.40
0.45	80.476	0.631	7,701.73	47,698.94
0.50	80.006	0.654	7,825.88	47,682.70
0.55	79.585	0.677	7,952.33	47,668.66
0.60	79.210	0.702	8,081.11	47,656.91
0.65	78.883	0.728	8,212.38	47,647.62
0.70	78.605	0.757	8,346.40	47,641.06
0.75	78.380	0.787	8,483.48	47,637.61
0.80	78.210	0.821	8,624.01	47,637.71
0.85	78.102	0.859	8,768.31	47,641.87
0.90	78.060	0.901	8,916.83	47,650.78
0.95	78.090	0.947	9,069.93	47,665.19
1.00	78.199	1.000	9,227.94	47,685.94

En el método de McCabe-Thiele primero se estima una composición alta de etanol en el destilado, para luego realizar un balance global de materia para determinar las cantidades de destilado y de producto de fondos:

$$D = \left(\frac{x_F - x_B}{x_D - x_B} \right) F \quad \text{Ecuación 4.23}$$

donde: D = flujo molar o másico de destilado
x_F = fracción molar o másica de etanol en la alimentación
x_B = fracción molar o másica de etanol en el producto de fondos
x_D = fracción molar o másica de etanol en el destilado
F = flujo molar o másico de alimentación

$$B = F - D \quad \text{Ecuación 4.24}$$

donde: B = flujo molar o másico del producto de fondos

Al considerar que la alimentación entra en su punto de ebullición, su condición térmica (simbolizada por q) es de 1 en el método de McCabe-Thiele. Este parámetro

establece la fracción de la alimentación que permanece como líquido y por tanto desciende hacia la sección de agotamiento:

$$q = \frac{\text{Alimentación líquida hacia fondos}}{\text{Alimentación total}} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Conociendo la condición térmica de la mezcla etanol-agua a la entrada, se traza la línea de alimentación en un diagrama de composiciones molares del etanol (el componente más volátil) en la fase vapor contra las de la fase líquida; la ecuación de esta línea es:

$$y = \frac{q}{q-1}x + \frac{x_F}{1-q} \quad \text{Ecuación 4.26}$$

donde: q = condición térmica de la alimentación

y = fracción molar o másica de etanol en la fase vapor (ordenadas)

x = fracción molar o másica de etanol en la fase líquida (abscisas)

Como $q = 1$, la línea posee pendiente infinita, y por ende, es vertical a partir de la abscisa x_F .

Luego, se determina la condición de reflujo, la cual es la relación entre el flujo de líquido que regresa a la torre por el domo, y el flujo de destilado:

$$R = \frac{L_a}{D} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

donde: R = relación de reflujo

L_a = flujo molar o másico del líquido de reflujo

D = flujo molar o másico de destilado

Fijando la relación de reflujo a partir de una condición de equilibrio fisicoquímico entre las fases líquida y vapor, se establece la línea de operación de la sección de enriquecimiento, cuya ecuación es:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

donde: R = relación de reflujo con la que opera la torre de destilación

y = fracción molar o másica de etanol en la fase vapor (ordenadas)

x = fracción molar o másica de etanol en la fase líquida (abscisas)

x_D = fracción molar o másica de etanol en el destilado

Como la sección de enriquecimiento termina donde entra la alimentación a la torre, este punto permite establecer la línea de operación de la sección de agotamiento. Una vez establecidas las líneas que describen el comportamiento de la torre de destilación, se puede hacer el trazado y la determinación de las etapas de equilibrio

necesarias para efectuar la separación del etanol y el agua. En la figura 4.6, se muestran las líneas de operación de la torre de destilación sujeta a las siguientes condiciones:

Presión de operación		760 mmHg
Alimentación	Flujo molar	1000 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.033
	Temperatura	93.19°C
	Condición térmica	1
Destilado	Flujo molar	26.4 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.881
	Temperatura	78.07°C
Producto de fondos	Flujo molar	973.6 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.01
	Temperatura	97.44°C
Relación de reflujo		4.42

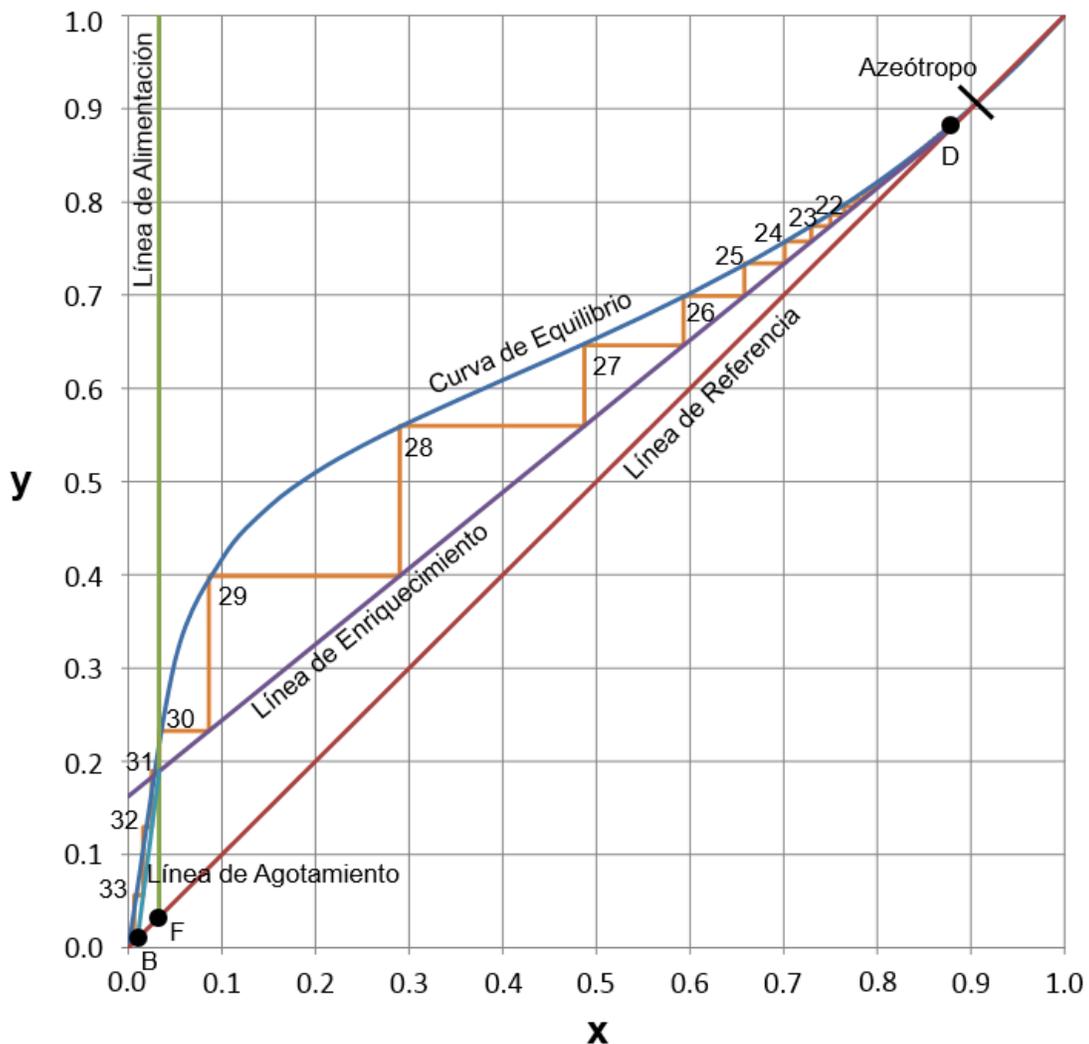


Figura 4.6. Diagrama McCabe-Thiele para la destilación convencional de la mezcla etanol-agua

También se puede observar en la figura 4.6 el trazado de las etapas de equilibrio, las cuales son en total 33, teniendo la etapa óptima de alimentación en la número 31. Para efectuar este trazado se toman en cuenta los gradientes de concentración de etanol tanto del lado del líquido como del vapor, y el número de estas etapas indica el número teórico de platos requeridos al interior de la torre de destilación, además del rehervidor, al que le corresponde la última etapa (la número 33).

En el caso del método de Ponchon-Savarit, se construye un diagrama entalpía-composición (Hxy) donde se trazan las curvas para H_L (línea de burbuja) y H_V (línea de rocío). Además, se ubican las corrientes de alimentación, de destilado y de producto de fondos sobre la línea de burbuja, dado que estas corrientes son líquidos saturados, y la corriente de vapor del domo (V_a) sobre la línea de rocío, pues es un vapor saturado. Considerando el equilibrio entre fases con la corriente de alimentación, se determina la relación de reflujo:

$$R = \frac{L_a}{D} = \frac{H_{V_a} - (H_D + q_D)}{H_D - H_{V_a}} \quad \text{Ecuación 4.29}$$

donde: R = relación de reflujo con la que opera la torre de destilación

L_a = flujo molar de líquido de reflujo

D = flujo molar de destilado

H_{V_a} = entalpía específica del vapor del domo

H_D = entalpía específica del destilado

q_D = calor específico asociado al condensador:

$$q_D = \frac{Q_C}{D} \quad \text{Ecuación 4.30}$$

donde: Q_C = carga térmica del condensador (calor a retirarse del vapor del domo)

Con la relación de reflujo, se ubican en el diagrama Hxy los puntos de diferencia del destilado y del producto de fondos, y luego se efectúa el trazado de las etapas de equilibrio al interior de la torre de destilación, manteniéndose en todas ellas las relaciones siguientes:

$$\frac{y_{j+1} - x_D}{x_j - x_D} = \frac{H_{V_{j+1}} - (H_D + q_D)}{H_{L_j} - (H_D + q_D)} \quad \text{Ecuación 4.31}$$

donde: j = número de la etapa de equilibrio

y_{j+1} = fracción molar de etanol en el vapor saliente de la etapa $j+1$

x_j = fracción molar de etanol en el líquido saliente de la etapa j

$H_{V_{j+1}}$ = entalpía específica del vapor saliente de la etapa $j+1$

H_{L_j} = entalpía específica del líquido saliente de la etapa j

$$\frac{y_{j+1} - x_B}{x_j - x_B} = \frac{H_{V_{j+1}} - (H_B - q_B)}{H_{L_j} - (H_B - q_B)}$$

Ecuación 4.32

donde: j = número de la etapa de equilibrio

y_{j+1} = fracción molar de etanol en el vapor saliente de la etapa j+1

x_j = fracción molar de etanol en el líquido saliente de la etapa j

$H_{V_{j+1}}$ = entalpía específica del vapor saliente de la etapa j+1

H_{L_j} = entalpía específica del líquido saliente de la etapa j

H_B = entalpía específica del producto de fondos

q_B = calor específico asociado al rehevador:

$$q_B = \frac{Q_r}{B}$$

Ecuación 4.33

donde: Q_r = carga térmica del rehevador (calor a introducirse al líquido del fondo)

La ecuación 4.31 se aplica a las etapas de equilibrio de la sección de enriquecimiento, mientras que la ecuación 4.32 corresponde a las etapas de la sección de agotamiento. Ambas ecuaciones equivalen a las líneas de operación para cada una de las secciones de la torre de destilación, sólo que incorporan los balances de energía en cada etapa de equilibrio líquido-vapor.

Una vez trazadas las etapas de equilibrio, queda completo el diagrama Ponchon-Savarit (ver figura 4.7), el cual corresponde a toda la torre de destilación sujeta a las siguientes condiciones:

Presión de operación		760 mmHg
Alimentación	Flujo molar	1000 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.033
	Temperatura	93.19°C
	Entalpía específica	7,214.4 kJ/kgmol
Destilado	Flujo molar	26.4 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.881
	Temperatura	78.07°C
	Entalpía específica	8,859.9 kJ/kgmol
Producto de fondos	Flujo molar	973.6 kgmol/h
	Fracción molar de etanol	0.01
	Temperatura	97.44°C
	Entalpía específica	7,424.3 kJ/kgmol
Relación de reflujo		4.38

Además, en la figura 4.7 se puede observar el trazado de las etapas de equilibrio, las cuales son en total 35, teniendo la etapa óptima de alimentación en la número 32. Para efectuar este trazado se toman en cuenta tanto los equilibrios líquido-vapor como los puntos de diferencia del destilado (indicado por Δ_D en el diagrama) y del producto de fondos (marcado con Δ_B). De igual forma que en el diagrama McCabe-

Thiele (figura 4.6), el número de estas etapas de equilibrio indica el número teórico de platos requeridos al interior de la torre de destilación, incluyendo al rehedidor en la etapa 35.

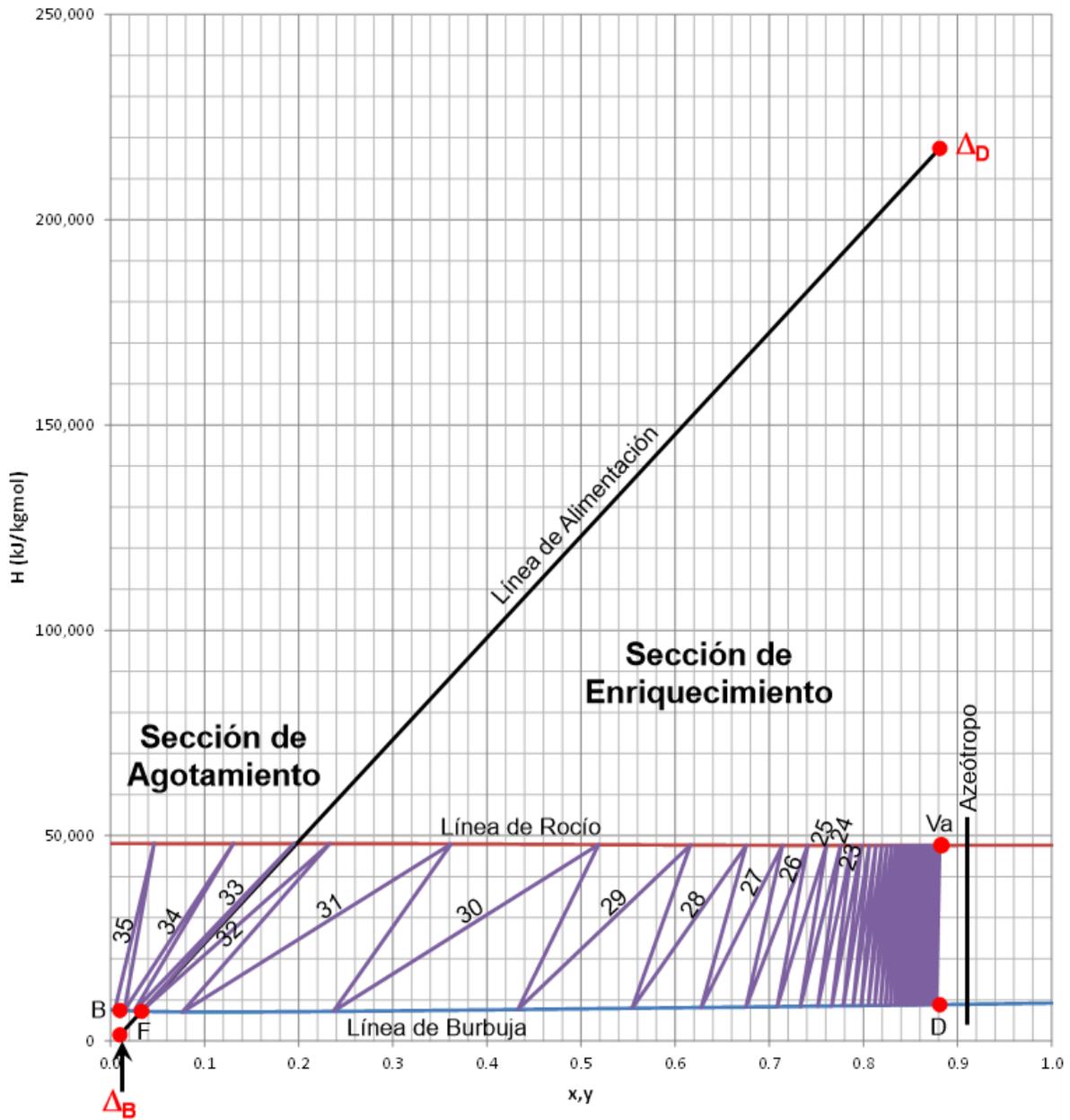


Figura 4.7. Diagrama Ponchon-Savarit para la destilación convencional de la mezcla etanol-agua

Pero también del diagrama Ponchon-Savarit se pueden determinar las cargas térmicas del condensador y del rehedidor, propósito de este análisis. De la figura 4.7 se obtienen los calores específicos asociados a cada uno de estos intercambiadores de calor: $q_D = 208,537.5$ kJ/kgmol, $q_B = 5,910.6$ kJ/kgmol. A partir de las ecuaciones 4.30 y 4.33, se calculan respectivamente las cargas térmicas:

$$Q_c = 5,506,729.7 \text{ kJ/h}$$

$$Q_r = 5,754,483.3 \text{ kJ/h}$$

Estas cargas térmicas corresponden a una alimentación de 1000 kgmol/h de mezcla etanol-agua con 3.3%mol del primero, por lo que se les debe cambiar de base para expresarlas por unidad de masa de alimentación:

$$Q/F = \frac{Q}{F M_F} \quad \text{Ecuación 4.34}$$

donde: Q/F = carga térmica del intercambiador de calor por unidad de masa de F
 Q = carga térmica del condensador o del rehervidor
 F = flujo molar de la corriente de alimentación
 M_F = masa molar de la corriente de alimentación

Aplicando la ecuación 4.34 a las cargas térmicas Q_c y Q_r se obtienen:

Condensador: $Q_c/F = 290.7 \text{ kJ/kg de F}$
 Rehervidor: $Q_r/F = 303.7 \text{ kJ/kg de F}$

El condensador tiene como fluido térmico agua fría producida en una torre de enfriamiento, la cual normalmente está contemplada dentro de los servicios auxiliares y será tratada en la siguiente sección. El agua necesaria para cubrir el requerimiento energético del condensador es de 12.5 kg/kg de F, la cual sólo consume 3.17 kJ/kg de F para ser producida.

En el caso del rehervidor, el fluido térmico es vapor de agua de baja presión, cuya producción se realiza en una caldera, un servicio auxiliar a ser tratado también en la siguiente sección. El rehervidor requiere de 0.15 kg vapor/kg de F, y éste a su vez es producido empleando 442.7 kJ/kg de F.

Además, para que la corriente de alimentación entre a la torre de destilación como líquido saturado, también requiere de un precalentador. El cálculo del cambio de entalpía se efectúa con la ecuación 4.21, sólo que el intervalo de temperaturas va de 25°C a 93.19°C, teniendo a 0°C como valor de referencia. De nueva cuenta se emplea el modelo de Wilson para el cálculo de las entalpías de exceso de la mezcla líquida. El calor requerido para precalentar la mezcla etanol-agua de alimentación a la torre de destilación resulta ser de 270.8 kJ/kg de F.

Sumando estos tres servicios energéticos: precalentador, condensador y rehervidor, la energía total a emplearse en la torre de destilación convencional es de 716.7 kJ/kg de F. Y de acuerdo a la cantidad de mezcla etanol-agua producida en la fermentación, el total de energía requerida por la destilación para cada insumo en cada proceso de hidrólisis es el siguiente:

Insumo	Proceso 1)		Proceso 3)		Proceso 4b)	
	Etanol+Agua (kg)	Energía Total (kJ)	Etanol+Agua (kg)	Energía Total (kJ)	Etanol+Agua (kg)	Energía Total (kJ)
1	271.1	194,272.6	301.2	215,858.4	301.2	215,858.4
2	209.9	150,466.5	233.3	167,185.0	233.3	167,185.0
3	426.7	305,841.1	474.2	339,823.5	474.2	339,823.5
4	310.5	222,541.9	345.0	247,268.8	345.0	247,268.8
5	316.8	227,068.8	352.0	252,298.7	352.0	252,298.7
6	298.7	214,070.1	331.9	237,855.7	331.9	237,855.7
7	316.8	227,068.8	352.0	252,298.7	352.0	252,298.7

Servicios Energéticos Auxiliares

Todas las etapas del procesamiento de la materia prima lignocelulósica para su transformación en etanol requieren de servicios auxiliares, los cuales también consumen energía. Los servicios que en particular serán tratados en esta sección son:

- a) Enfriamiento de agua
- b) Generación de vapor de calentamiento
- c) Bombeo
- d) Electricidad

En secciones precedentes ya han sido abordados servicios equivalentes pero que formaban parte directa del proceso, por esta razón no fueron considerados como auxiliares; en la presente sección, serán tratados los servicios auxiliares generales de todo el proceso.

a) **Enfriamiento de agua:** el agua fría empleada en los intercambiadores de calor del proceso incrementa su temperatura tras haber sido un fluido de enfriamiento; para regenerar esta agua fría, se reduce su temperatura en una torre de enfriamiento. Si se considera que el agua entra a la torre a 35°C y sale fría a 29°C, y si se estima un acercamiento de 7°F, entonces por cada 1200 gpm de agua se requerirán 19.2 kW de energía necesaria para bombear esta agua y para hacer funcionar el ventilador, el cual succiona el aire necesario para enfriarla. Esta cantidad de energía se puede cambiar a una base másica mediante la ecuación:

$$E_{TE} = \frac{E_{TE/V}}{\rho_{AF}} \quad \text{Ecuación 4.35}$$

donde: E_{TE} = energía usada en la torre de enfriamiento para regenerar al agua fría
 $E_{TE/V}$ = energía usada en la torre de enfriamiento por unidad de volumen
 ρ_{AF} = densidad del agua fría

Como la densidad del agua fría en la torre de enfriamiento es de 998 kg/m³, entonces la energía de bombeo y del ventilador en la torre de enfriamiento por cada unidad de masa de agua es de 0.254 kJ/kg.

Para calcular la cantidad necesaria de agua fría en los intercambiadores de calor:

$$W_{AF} = \frac{Q}{\Delta H_{AF}} \quad \text{Ecuación 4.36}$$

donde: W_{AF} = flujo másico de agua fría necesario en un intercambiador de calor

Q = carga térmica del intercambiador de calor

ΔH_{AF} = cambio de entalpía específica del agua en la torre de enfriamiento

Este cambio de entalpía del agua entre las temperaturas de 35°C y 29°C resulta ser de 23.27 kJ/kg de agua fría.

b) Generación de vapor de calentamiento: este vapor de agua es saturado a baja presión, por lo que a 100 psia la entalpía de vaporización del agua es de 2052 kJ/kg. Pero si el agua entra a temperatura ambiente (25°C), primero debe absorber calor sensible hasta su punto de ebullición, el cual es de 162°C a 100 psia, para luego absorber calor latente. El cambio de entalpía del agua líquida para alcanzar su punto de ebullición a 100 psia es de 580 kJ/kg, y sumándole la entalpía de vaporización se obtiene un cambio de entalpía total de 2632 kJ/kg, desde el líquido a 25°C hasta el vapor saturado.

Si el equipo empleado es una caldera cuya eficiencia térmica es de 88%, entonces la energía total necesaria para generar vapor de baja presión es de 2991 kJ/kg. Y si además se emplea diesel industrial, el cual tiene un poder calorífico inferior de 44,224.1 kJ/kg, entonces se emplearán 82 L de diesel por cada tonelada (1000 kg) de vapor producido.

c) Bombeo: para transportar los fluidos entre los equipos de proceso se requiere el empleo de bombas, las cuales pueden ser centrífugas o de desplazamiento positivo; todas ellas consumen energía para poder efectuar este transporte. Toda planta productora de etanol a partir de biomasa lignocelulósica consume en el bombeo de fluidos un total de 2211.8 kJ por cada kilogramo de etanol producido. De acuerdo al tipo de insumo, cada ruta tecnológica en la generación de etanol consume por bombeo lo siguiente:

Insumo	Proceso 1)		Proceso 3)		Proceso 4b)	
	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)
1	21.9	48,655.7	24.3	54,061.9	24.3	54,061.9
2	17.0	37,684.4	18.8	41,871.6	18.8	41,871.6
3	34.5	76,598.1	38.3	85,109.0	38.3	85,109.0

Insumo	Proceso 1)		Proceso 3)		Proceso 4b)	
	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)	Etanol producido (kg)	Energía de bombeo (kJ)
4	25.1	55,735.7	27.9	61,928.6	27.9	61,928.6
5	25.6	56,869.5	28.4	63,188.3	28.4	63,188.3
6	24.1	53,614.0	26.8	59,571.1	26.8	59,571.1
7	25.6	56,869.5	28.4	63,188.3	28.4	63,188.3

d) **Electricidad:** en el proceso, las operaciones que mayoritariamente consumen energía eléctrica son la molienda, el mezclado (durante la sacarificación y la fermentación), filtrado (durante la sacarificación), el enfriamiento de agua (el agua fría es empleada principalmente en la fermentación, pero también se le puede usar durante la sacarificación) y el bombeo de fluidos; los resultados correspondientes a este consumo son los que a continuación se dan en kJ:

Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	614,172.4	633,283.1	297,536.1
2	488,842.6	474,918.4	231,535.3
3	435,195.3	421,923.1	258,460.6
4	409,901.6	376,885.8	210,766.5
5	840,438.9	897,183.0	402,529.9
6	676,683.8	708,148.4	330,714.7
7	862,755.6	904,403.0	408,364.6

Resultados del Análisis Energético de la Producción de Etanol

Tomando en cuenta el consumo energético en cada una de las etapas de las tres rutas tecnológicas seleccionadas para producir etanol a partir de biomasa lignocelulósica, y considerando la masa inicial de insumo (100 kg ó 0.1 ton), se obtuvieron los valores mostrados en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7. Todos los resultados están en kWh por cada tonelada de insumo; si se desea convertir cada valor a kJ/kg, debe multiplicarse por 3.6.

Cabe destacar que no se hace una distinción entre las diferentes fuentes energéticas (electricidad, combustible externo: diesel, combustible interno: residuos lignocelulósicos), pues los resultados de dichas tablas contienen las cifras totales de energía consumida en cada etapa del proceso de producción de etanol y la energía consumida total por el proceso. Sin embargo, de forma indirecta puede efectuarse la separación de cifras de acuerdo al consumo de cada fuente de energía.

Tabla 4.5. Consumo energético por unidad de masa (kWh/ton) en el proceso completo centrado en la hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (Proceso 1).

Etapas \ Insumo	1	2	3	4	5	6	7
Molienda	20	27.6	64	11	6.4	20	6.4
Descristalización	659.7	480.8	343.9	344.9	972.2	742.1	984.3
Hidrólisis 1	710.9	542.5	406.3	409.9	1026.9	796.8	1047.5
Separación del Hidrolizado	14.8	16.1	16.1	16.6	15.2	15.2	16.6
Hidrólisis 2	113.8	140.6	92.0	140.2	96.8	101.0	122.9
Separación de Lignina	6.9	10.3	5.8	10.1	6.3	6.3	8.5
Separación Ácido/Azúcar	8.2	6.0	11.2	8.9	9.7	8.9	9.4
Neutralización	10.7	8.7	14.8	12.3	13.0	11.9	12.8
Separación de Yeso	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
Regeneración de H ₂ SO ₄	1440.1	1043.4	1993.3	1604.6	1810.4	1624.9	1704.3
Fermentación	33.2	25.7	52.3	38.0	38.8	36.6	38.8
Destilación	539.6	418.0	849.6	618.2	630.7	594.6	630.7
Otros servicios	135.2	104.7	212.8	154.8	158.0	148.9	158.0
Total	3693.0	2824.4	4062.0	3369.5	4784.5	4107.3	4740.1

Tabla 4.6. Consumo energético por unidad de masa (kWh/ton) en el proceso completo centrado en la explosión por vapor (Proceso 3).

Etapas \ Insumo	1	2	3	4	5	6	7
Molienda	20	27.6	64	11	6.4	20	6.4
Pretratamiento Ácido	1.2	0.9	0.6	0.6	1.8	1.4	1.8
Explosión con Vapor	51.1	36.5	25.5	25.5	75.9	57.6	76.6
Neutralización	62.1	45.9	32.5	32.9	90.7	69.6	91.5
Hidrólisis Enzimática	1490.0	1100.9	781.0	788.8	2176.5	1671.3	2195.7
Fermentación	36.9	28.6	58.1	42.2	43.1	40.6	43.1
Destilación	599.6	464.4	944.0	686.9	700.8	660.7	700.8
Otros servicios	150.2	116.3	236.4	172.0	175.5	165.5	175.5
Total	2411.0	1821.0	2142.1	1759.9	3270.7	2686.7	3291.5

Tabla 4.7. Consumo energético por unidad de masa (kWh/ton) en el proceso completo centrado en el tratamiento con amoníaco (Proceso 4b).

Etapas \ Insumo	1	2	3	4	5	6	7
Molienda	20	27.6	64	11	6.4	20	6.4
Delignificación	1.2	0.9	0.6	0.6	1.8	1.4	1.8
Separación de Lignina	73.8	55.9	42.5	42.5	109.6	82.8	109.6
Endulzamiento	4554.4	3278.9	2322.7	2323.5	6740.9	5126.7	6812.2
Regeneración de NH ₄ OH	27.1	19.3	13.5	13.5	40.2	30.5	40.6
Hidrólisis Enzimática	518.5	395.4	303.4	304.1	743.2	579.3	759.1
Fermentación	36.9	28.6	58.1	42.2	43.1	40.6	43.1
Destilación	599.6	464.4	944.0	686.9	700.8	660.7	700.8
Otros servicios	150.2	116.3	236.4	172.0	175.5	165.5	175.5
Total	5981.7	4387.4	3985.3	3596.4	8561.7	6707.4	8649.2

Este análisis energético mostrado en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 también es conocido como análisis GtG (“puerta-a-puerta”, por las siglas en inglés “Gate-to-Gate”) porque sólo contempla la transformación de la materia prima en producto principal a lo largo de todas las etapas de un proceso, a diferencia de otros análisis de ciclo de vida

como el WTT (“pozo-a-tanque”, siglas en inglés de “Well-To-Tank”) y el WTW (siglas en inglés de “Well-To-Wheels”, y significa “pozo-a-ruedas”), los cuales son aplicados específicamente a materiales energéticos (como los combustibles) y toman en cuenta la producción de la materia prima, su transportación hacia el proceso, y la transportación y uso final del energético producido.

Fuentes de Información

- BITRA, Venkata S.P. et al.; Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover; en *Bioresource Technology* 100 (2009) 6578-6585
- BITRA, Venkata S.P. et al.; Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions; en *Powder Technology* 193 (2009) 32-45
- BRODEUR, Gary et al.; Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review; en *Enzyme Research* 2011, 787532
- BROWN, Robert C.; Biorenewable Resources. Engineering New Products from Agriculture; Iowa State Press, USA: 2003
- CHEVANAN, Nehru et al.; Bulk density and compaction behavior of knife mill chopped switchgrass, wheat straw, and corn stover; en *Bioresource Technology* 101 (2010) 207-214
- COSTA MAGAZONI, Felipe et al.; Cooling of Ethanol Fermentation Process Using Absorption Chillers; en *Int. J. of Thermodynamics*, Vol. 13 (No. 3), pp. 111-118, 2010
- CRANE Co.; Flow of fluids through valves, fittings, and pipe; CRANE, USA: 1965
- CUNNINGHAM, Roberto E.; LÓPEZ, Gerardo D.; Etanol de Lignocelulósicos; Universidad de Santiago de Compostela, Argentina: 1994
- DRAPCHO, Caye M. et al.; Biofuels Engineering Process Technology; McGraw-Hill, USA: 2008
- HENLEY, Ernest J.; SEADER, J.D.; Equilibrium-Stage Separation Operations in Chemical Engineering; Wiley, USA: 1981
- HOLMES, M.J.; VAN WINKLE, M.; Prediction of ternary vapor-liquid equilibria from binary data; en *Ind. Eng. Chem.* 62 (1), 23-24, Jan. 1970
- HOLYFIELD, G.W.; BROWN, D.W.; Application of a Filter Press in the Recovery of Potash at Boulby Mine; en *Filtration & Separation*, May 1995, 455-459

- JEOH, Tina; Steam Explosion Pretreatment of Cotton Gin Waste for Fuel Ethanol Production; Tesis de Maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University: 1998
- JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, Concepción, et al.; Methodology for Developing Gate-to-Gate Life Cycle Inventory Information; en *Int. J. LCA* **5** (3) 153-159 (2000)
- KERN, Donald Q.; Procesos de Transferencia de Calor; CECSA, México: 1998
- MCCABE, Warren L., et al.; Unit Operations of Chemical Engineering; McGraw-Hill, USA: 2005, 7ª ed.
- MELSERT, Ryan M.; Energy optimization of the production of cellulosic ethanol from southern pine; Tesis, Georgia Institute of Technology, USA: 2007, pág. 36
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; Balanco de Energia Útil 2005; MME, Brasil: 2005
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Balanco Energético Nacional 2015; MME-EPE, Brasil: 2015
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION; NFPA 704 Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response; NFPA, USA: 2006
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST): <http://www.nist.gov/>
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass Energy Data Book; DOE, USA: 2011, 4a ed., apéndice B
- PEMEX; Hoja de Datos de Seguridad-Pemex Diesel: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDSS-301%20Pemex%20Diesel.pdf>
- PERLMUTTER, Barry A.; A review of filter press basics and issues versus alternative batch continuous replacement technologies; BHS-Filtration Inc., USA, pág. 4
- PERLMUTTER, Barry A.; Evaluating thin-cake pressure filtration using the BHS Autopress technology; en *Chemical Processing*, April 2002, 31-38
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; Chemical Engineers' Handbook; McGraw-Hill, USA: 2008, 8a ed.
- PETERS; TIMMERHAUS; Plant Design and Economics for Chemical Engineers; McGraw-Hill, USA: 2004, 5a ed.

- RAMOS CASADO, R.; ESTEBAN PASCUAL, L.E.; Biomass feedstocks preparation methods for energy production and its economic evaluation; 2nd International Workshop BIOGASTECH, Turquía: April 2008
- SECRETARÍA DE ENERGÍA; Balance Nacional de Energía 2014; SENER, México: 2015
- SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL; NOM-018-STPS-2000; en *DOF*, Viernes 27 de octubre de 2000
- SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL; NOM-018-STPS-2015; en *DOF*, Viernes 9 de octubre de 2015
- SENER-BID-GTZ; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; SENER, México: 2006, Task 4: Ethanol feedstocks
- SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOT, M.M.; Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics; McGraw-Hill, USA: 2005, 7a ed.
- SPX COOLING TECHNOLOGIES, INC.; Cooling tower energy and its management; Reporte Técnico, USA: 2013: <http://spxcooling.com/library/detail/cooling-tower-energy-and-its-management>
- TARLETON, E.S.; WAKEMAN, R.J.; The simulation, modelling and sizing of pressure filters; en *Filtration and Separation*, 31 (4), 393-397
- VASSILEV, Stanislav V. et al.; An overview of the chemical composition of biomass; en *Fuel* 89 (2010) 913-933
- WALAS, Stanley M.; Phase Equilibria in Chemical Engineering; Butterworth, USA: 1985
- WALAS, Stanley M. et al.; Chemical Process Equipment Selection and Design; Butterworth-Heinemann, USA: 2010, 2a ed.
- ZHAO, Xuebing et al.; Biomass recalcitrance. Part I: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose; en *Biofuels, Bioprod. Bioref.* (2012) pág. 3

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se efectúa un análisis final de los resultados generados en el capítulo anterior, y se evalúan las consecuencias que implican dichos resultados para emitir una serie de recomendaciones en materia de producción de etanol biocombustible.

Análisis de Resultados

La cantidad total de etanol producido por cada proceso y por cada insumo se muestra en la tabla 5.1. Se puede observar que los procesos 3 y 4b producen la mayor cantidad de etanol por cada insumo. El insumo del cual se obtiene la más alta producción de este alcohol es el 3, correspondiente a los cultivos maderables de rápido crecimiento, seguido de la paja y del salvado de trigo (insumos 5 y 7), y del olote (insumo 4).

Tabla 5.1. Cantidad total de etanol producido por unidad de biomasa (kg/kg) por tipo de insumo en las tres rutas tecnológicas analizadas.

	Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	Bagazo de caña de azúcar	0.219	0.243	0.243
2	Bagazo de remolacha azucarera	0.170	0.188	0.188
3	Cultivos maderables de rápido crecimiento	0.345	0.383	0.383
4	Olote	0.251	0.279	0.279
5	Paja de trigo	0.256	0.284	0.284
6	Rastrojo de maíz	0.241	0.268	0.268
7	Salvado de trigo	0.256	0.284	0.284

En estos tres procesos de segunda generación, los insumos lignocelulósicos con una mayor cantidad de celulosa y de hemicelulosa, transformables a polisacáridos C6 y C5, son las materias primas más recomendables para producir una gran cantidad de etanol. Pero al conjuntar las cifras de consumo energético total en cada uno de estos procesos y por cada tipo de insumo lignocelulósico (ver tabla 5.2), se puede observar que en el proceso 1 la materia prima más favorable (por consumir la menor cantidad de energía) es el bagazo de remolacha azucarera (insumo 2), seguido del olote (insumo 4) y del bagazo de caña de azúcar (insumo 1); y el insumo biomásico menos recomendable para este proceso es la paja de trigo (insumo 5), por ser la materia prima cuyo requerimiento energético es el mayor, seguido a su vez por el salvado de trigo (insumo 7) y el rastrojo de maíz (insumo 6).

Tabla 5.2. Consumo energético total por unidad de masa (kWh/ton) por tipo de insumo en las tres rutas tecnológicas analizadas.

	Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	Bagazo de caña de azúcar	3693.0	2411.0	5981.7
2	Bagazo de remolacha azucarera	2824.4	1821.0	4387.4
3	Cultivos maderables de rápido crecimiento	4062.0	2142.1	3985.3
4	Olote	3369.5	1759.9	3596.4
5	Paja de trigo	4784.5	3270.7	8561.7
6	Rastrojo de maíz	4107.3	2686.7	6707.4
7	Salvado de trigo	4740.1	3291.5	8649.2

En cambio, en los procesos 3 y 4b el insumo con un consumo energético menor es el olote (insumo 4), y el de mayor consumo de energía es el salvado de trigo (insumo 7). En el caso del proceso 3, tras el olote son más favorables el bagazo de

remolacha azucarera (insumo 2) y los cultivos maderables de rápido crecimiento (insumo 3); en el proceso 4, los insumos más recomendables después del olote son los cultivos maderables de rápido crecimiento y el bagazo de remolacha azucarera, en este orden.

De acuerdo a la composición química de la biomasa lignocelulósica, se puede observar que los tres procesos de segunda generación tienden a ser favorables energéticamente cuando se emplea algún insumo con un mayor contenido de celulosa (insumo 3) y de hemicelulosa (insumos 2 y 4), según la tabla 4.2 del capítulo anterior. Al compararse entre sí estos tres procesos (ver tabla 5.2), el mejor de ellos resulta ser el proceso 3, pues en cada insumo es el de menor consumo energético.

En conclusión, la combinación insumo-proceso con el menor consumo energético en la transformación de la materia prima en etanol resulta ser el olote procesado mediante la explosión por vapor (insumo 4-proceso 3), según la matriz de la tabla 5.2. Sin embargo, esta recomendación no puede estar completa sin antes comparar este consumo de energía con la cantidad de energía obtenida del producto principal de estos procesos que es el etanol.

Consecuencias de los Resultados

El propósito de la obtención de etanol a partir de material lignocelulósico es la inversión de energía (sea térmica o eléctrica) para producir la mayor cantidad posible de alcohol etílico, en cuya molécula queda almacenada esta energía junto con una porción de la energía química contenida en la celulosa y hemicelulosa del insumo. Toda esta energía acumulada en las moléculas de etanol será liberada durante el uso final de este alcohol mediante combustión.

Por esta razón, es importante comparar la cantidad de energía liberada por la combustión del etanol obtenido, con la cantidad de energía empleada en la producción de este alcohol, en forma de cociente al cual en lo sucesivo se le denominará “ganancia energética del proceso”:

$$G_p = \frac{E_{\text{Etanol}}}{E_{\text{Proceso}}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde: G_p = ganancia energética del proceso (adimensional)

E_{Proceso} = energía introducida en el proceso de producción de etanol (kWh)

E_{Etanol} = energía obtenida de la combustión del etanol producido (kWh):

$$E_{\text{Etanol}} = W_{\text{EtOH}} \text{PCI}_{\text{EtOH}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

W_{EtOH} = cantidad de etanol producido (kg)

PCI_{EtOH} = poder calorífico inferior del etanol: $\text{PCI}_{\text{EtOH}} = 26.95 \text{ MJ/kg}$

Si la ganancia energética del proceso es mayor a uno, significa que se obtiene más energía quemando el etanol producido comparada con la energía introducida al proceso de fabricación del alcohol. Esta situación es la ideal, pues la combinación insumo-proceso que presente este caso será rentable. Si por el contrario, el cociente calculado en la ecuación 1 es menor a uno, entonces se obtiene menos energía del etanol respecto de la invertida en el proceso, y por ende, además de existir pérdidas de energía, la combinación insumo-proceso que presente este caso no será rentable, pues no conviene invertir 1 kWh de energía en el proceso para obtener menos de 1 kWh de energía a partir del etanol.

En el capítulo anterior, en la sección titulada “Fermentación de los Azúcares Producidos”, se muestra la cantidad de etanol obtenido en cada uno de los procesos por cada tipo de insumo; el valor de la ganancia energética para cada materia prima empleada en los tres procesos analizados resulta ser:

	Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	Bagazo de caña de azúcar	0.444	0.755	0.304
2	Bagazo de remolacha azucarera	0.449	0.774	0.321
3	Cultivos maderables de rápido crecimiento	0.635	1.338	0.719
4	Olote	0.557	1.185	0.580
5	Paja de trigo	0.400	0.651	0.249
6	Rastrojo de maíz	0.440	0.747	0.299
7	Salvado de trigo	0.404	0.647	0.246

Se puede observar en esta tabla que la ruta tecnológica más conveniente es el proceso 3, pero sólo si se emplean cultivos maderables de rápido crecimiento (insumo 3) y olote (insumo 4) en la producción de etanol. Sin embargo, en los procesos 1 y 4b también se obtiene lignina como residuo; este material es combustible, por lo que se le puede emplear en estos procesos para disminuir la cantidad de energía a invertirse. En el capítulo anterior, la cantidad de lignina producida fue calculada en la sección “Sacarificación del Material Lignocelulósico”, en la etapa 5 del proceso 1 y en la etapa 2 del proceso 4b.

Considerando que la lignina posee un poder calorífico inferior de 22.48 MJ/kg, y que su combustión tiene una eficiencia de 82%, entonces los valores de la ganancia energética corregidos para los procesos 1 y 4b resultan ser los mostrados en la tabla 5.3, junto con los valores anteriores para el proceso 3.

Tabla 5.3. Ganancia energética de cada proceso de producción de etanol por tipo de insumo lignocelulósico.

	Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	Bagazo de caña de azúcar	0.895	0.755	0.349
2	Bagazo de remolacha azucarera	0.587	0.774	0.325
3	Cultivos maderables de rápido crecimiento	0.920	1.338	0.913
4	Olote	0.833	1.185	0.673
5	Paja de trigo	0.529	0.651	0.268
6	Rastrojo de maíz	0.690	0.747	0.329
7	Salvado de trigo	0.543	0.647	0.265

A pesar de la corrección de las ganancias energéticas de los procesos, lo cual incrementó sus valores, aun así sigue siendo el proceso 3 el más conveniente si se emplean los insumos 3 y 4. También se observa en la tabla que los procesos 1 y 4b poseen una ganancia energética cercana a uno si se usa el insumo 3 en los mismos. Con esta información ya se puede concluir definitivamente que la combinación insumo 3-proceso 3 es la más óptima de todas las rutas tecnológicas de segunda generación para producir etanol como biocombustible.

Además de haberse calculado la cantidad total de energía requerida por cada proceso y con cada tipo de insumo, y de haberse determinado la cantidad de electricidad y de lignina quemada para alimentar energéticamente a dichos procesos, se puede estimar la energía resultante de introducir diesel industrial como energético. En otras palabras, se puede conocer el mix energético de cada proceso (ver tablas 5.4, 5.5 y 5.6). Y si además se considera la cantidad de energía obtenida de la combustión del etanol producido, se amplía el mix energético para construir la matriz energética de cada proceso.

Tabla 5.4. Matriz energética del proceso centrado en la hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado (Proceso 1).

Insumo	Consumo Energético del Proceso (kWh/ton biomasa)				Energía Producida (kWh/ton biomasa)	
	Electricidad	Lignina	Diesel	Total	Combustión de Etanol	Pérdidas
1	1706.0	1987.0	0.0	3693.0	1638.7	2054.3
2	1357.9	805.9	660.6	2824.4	1269.2	1555.2
3	1208.9	1532.4	1320.8	4062.0	2579.8	1482.2
4	1138.6	1362.1	868.7	3369.5	1877.2	1492.3
5	2334.6	1418.9	1031.0	4784.5	1915.4	2869.1
6	1879.7	1816.2	411.4	4107.3	1805.7	2301.6
7	2396.5	1475.6	867.9	4740.1	1915.4	2824.8

Tabla 5.5. Matriz energética del proceso centrado en la explosión por vapor (Proceso 3).

Insumo	Consumo Energético del Proceso (kWh/ton biomasa)			Energía Producida (kWh/ton biomasa)	
	Electricidad	Diesel	Total	Combustión de Etanol	Pérdidas
1	1759.1	651.9	2411.0	1820.8	590.2
2	1319.2	501.8	1821.0	1410.2	410.8
3	1172.0	970.1	2142.1	2866.5	-724.3
4	1046.9	713.0	1759.9	2085.7	-325.8
5	2492.2	778.6	3270.7	2128.2	1142.6
6	1967.1	719.6	2686.7	2006.3	680.4
7	2512.2	779.3	3291.5	2128.2	1163.3

El consumo energético del proceso de las matrices de las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 corresponde a un análisis de ciclo de vida GtG (puerta a puerta), de acuerdo a lo discutido en la parte final del capítulo anterior. Si a estas matrices energéticas se

les añadiera el consumo energético durante la cosecha y transportación de las materias primas, y durante la transportación del etanol producido, se tendría un análisis de ciclo de vida de tipo WTT (pozo a tanque, ver último párrafo del capítulo 4). Y si se añadiera el consumo energético durante el uso final del etanol al quemarse en el motor de un vehículo, el análisis de ciclo de vida sería del tipo WTW (pozo a ruedas). Ambos esquemas de análisis (WTT y WTW) están fuera del alcance de este trabajo de tesis.

Tabla 5.6. Matriz energética del proceso centrado en el tratamiento con amoniaco (Proceso 4b).

Insumo	Consumo Energético del Proceso (kWh/ton biomasa)				Energía Producida (kWh/ton biomasa)	
	Electricidad	Lignina	Diesel	Total	Combustión de Etanol	Pérdidas
1	826.5	936.5	4218.7	5981.7	1820.8	4160.9
2	643.2	56.2	3688.0	4387.4	1410.2	2977.1
3	717.9	1030.1	2237.2	3985.3	2866.5	1118.8
4	585.5	608.7	2402.3	3596.4	2085.7	1510.7
5	1118.1	749.2	6694.4	8561.7	2128.2	6433.5
6	918.7	749.2	5039.6	6707.4	2006.3	4701.1
7	1134.3	749.2	6765.7	8649.2	2128.2	6521.1

En estas matrices energéticas, las cifras de la columna “Combustión de Etanol” fueron calculadas mediante la ecuación 5.2, pues corresponde a la energía producida al quemarse el etanol durante su uso final. En el caso de las cantidades de la columna “Pérdidas”, son el resultado de la diferencia existente entre la energía total consumida por el proceso y la combustión del etanol:

$$E_{\text{Pérdidas}} = E_{\text{Proceso}} - E_{\text{Etanol}} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde: $E_{\text{Pérdidas}}$ = pérdidas de energía por unidad de biomasa (kWh/ton)
 E_{Proceso} = energía consumida en el proceso por unidad de biomasa (kWh/ton)
 E_{Etanol} = energía obtenida de la combustión del etanol por unidad de biomasa (kWh/ton)

Estas pérdidas de energía corresponden a la energía consumida por el proceso que no pudo almacenarse químicamente en las moléculas de etanol, para luego poder ser liberada durante la combustión del alcohol. En otras palabras, este concepto de pérdidas de energía no contempla las fugas de energía en forma de calor durante el proceso ni durante la quema del etanol en un vehículo automotor, sólo es un reflejo de las ineficiencias químicas inherentes del proceso de producción del alcohol etílico, el energético central de este trabajo de tesis, y de la composición química del insumo lignocelulósico a ser transformado por dicho proceso.

Una vez conocido el mix energético de cada proceso, también puede estimarse la emisión de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en español). La combustión de energéticos basados en carbono genera varios gases:



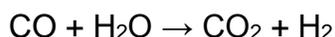
donde: $\alpha = \frac{16x - y - 8z}{12} E$; si se alimenta con aire estequiométrico: $E = 1$,

si hay exceso de aire: $E > 1$

$\beta = \theta = 3.76\alpha$, debido a la composición química del aire (79% N_2 y 21% O_2)

$$\gamma = \frac{3x - y}{3} , \delta = \varepsilon = \zeta = \eta = \frac{y}{6}$$

El anhídrido carbónico (CO_2) y el agua (H_2O) en fase vapor son el resultado de la ruptura de los enlaces en la molécula del combustible ($C_xH_yO_z$) al combinarse con el oxígeno (O_2) del aire durante la reacción de combustión. El anhídrido carbonoso (CO) aparece cuando la combustión es incompleta o por una desproporción de la molécula de CO_2 a elevadas temperaturas. La molécula de hidrógeno (H_2) proviene de la reacción de desplazamiento de agua en el gas de síntesis:



El metano (CH_4) y el anhídrido hiponitroso (N_2O , también conocido como monóxido de dinitrógeno, o como óxido nitroso en el ámbito del automovilismo y de los cohetes espaciales) aparecen cuando se alcanzan altas temperaturas en la combustión ($>230^\circ C$); el último de estos compuestos proviene del nitrógeno del aire al reaccionar con radicales de oxígeno (O y OH) presentes a altas temperaturas.

La reacción de combustión mostrada arriba sólo es aplicable a combustibles libres de azufre, o con un contenido bajo (< 500 ppm) de compuestos azufrados. De todos los gases producidos en dicha reacción, el CO_2 , el metano y el N_2O son los gases de mayor interés en todo inventario de emisiones de GEI. De acuerdo a la guía del IPCC (siglas en inglés del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático), en el capítulo de combustión en fuentes estacionarias, los combustibles empleados para alimentar al proceso de producción de etanol (diesel industrial y lignina) emiten las cantidades de GEI mostradas en la tabla 5.8. En el caso de la electricidad, como este energético es generado en México a partir de diversas fuentes (ver tabla 5.7), se evaluó el mix energético de la electricidad mexicana para luego estimar su emisión de estos tres GEI.

Tabla 5.7. Consumo energético para producir electricidad en México y factores de emisión de GEI de cada insumo (2015).

Insumo energético	Energía consumida para generar electricidad (PJ)			Factores de emisión de GEI (ton GEI/PJ)		
	Pública*	PIE**	Total	CO_2	CH_4	N_2O
Carbón	362.45	0	362.45	98,300	1	1.5
Nuclear	120.41	0	120.41	NA	NA	NA
Hidráulica	108.46	0	108.46	NA	NA	NA
Geotérmica	133.68	0	133.68	NA	NA	NA
Solar	0.05	0	0.05	NA	NA	NA

Insumo energético	Energía consumida para generar electricidad (PJ)			Factores de emisión de GEI (ton GEI/PJ)		
	Pública*	PIE**	Total	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Eólica	0.73	7.86	8.59	NA	NA	NA
Diesel	13.6	2.24	15.84	74,100	3	0.6
Combustóleo	246.29	0	246.29	77,400	3	0.6
Gas seco	494.86	587.31	1082.17	56,100	1	0.1
Total de energía eléctrica producida (PJ)			2077.94			

NA = No Aplicable

* Corresponde a las empresas de capital público que generan electricidad; en México sólo existe la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como única entidad pública productora, transmisora y distribuidora de energía eléctrica.

**PIE corresponde a las siglas de Productores Independientes de Energía, los cuales son empresas de capital privado que generan electricidad para venderla a la CFE.

FUENTE: SECRETARÍA DE ENERGÍA; Balance Nacional de Energía 2015; pág. 52-53, cuadro 24

IPCC; 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2-Energy; pág. 2.16-2.17, tabla 2.2

Tabla 5.8. Emisión de GEI por energético introducido a los procesos de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica.

GEI	Factores de emisión de GEI (ton GEI/PJ)		
	Lignina	Diesel	Electricidad*
CO ₂	112,000	74,100	56,101.3
CH ₄	30	3	1.1
N ₂ O	4	0.6	0.4

*Valores calculados a partir de datos de la tabla 5.7.

FUENTE: IPCC; 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2-Energy; pág. 2.16-2.17, tabla 2.2

Los valores de la columna “Electricidad” en la tabla 5.8 fueron calculados a partir de los datos mostrados en la tabla 5.7, empleando la siguiente ecuación:

$$FE_j = \frac{\sum_{i=1}^n E_{C_i} FE_{ij}}{E_T} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

donde: i = subíndice correspondiente a cada insumo

j = subíndice correspondiente a cada gas de efecto invernadero (GEI)

FE_j = factor de emisión del j-ésimo GEI (ton GEI/PJ)

E_{C_i} = energía total consumida para generar electricidad a partir del i-ésimo insumo (PJ)

FE_{ij} = factor de emisión del j-ésimo GEI debido al consumo del i-ésimo insumo (ton GEI/PJ)

E_T = total de energía eléctrica producida (PJ)

n = número total de insumos registrados en la tabla 5.7

Una vez establecidos los factores de emisión de GEI para cada energético de los procesos de producción de etanol, pueden estimarse las emisiones de dichos gases al interior de cada proceso:

$$W_j = \sum_{i=1}^n E_{\text{Proceso}_i} FE_{ij} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

donde: i = subíndice correspondiente a cada energético introducido al proceso

- j = subíndice correspondiente a cada gas de efecto invernadero (GEI)
 W_j = emisión del j -ésimo GEI por unidad de biomasa (ton GEI/ton biomasa)
 $E_{\text{Proceso } i}$ = energía consumida por el proceso a partir del i -ésimo energético, por unidad de biomasa (kWh/ton biomasa); dato extraído de las tablas 5.4, 5.5 ó 5.6
 FE_{ij} = factor de emisión del j -ésimo GEI debido al consumo del i -ésimo energético (ton GEI/PJ); se deben convertir los PJ en kWh
 n = número total de energéticos consumidos por el proceso; en el caso de los procesos 1 y 4b: $n = 3$, pero en el proceso 3: $n = 2$

Aplicando la ecuación 5.5 a cada insumo lignocelulósico en cada proceso se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.9. Cabe resaltar que a mayor consumo de energéticos en un proceso, mayor será su emisión de GEI, y viceversa.

Tabla 5.9. Emisión de GEI por proceso de producción de etanol y por cada tipo de insumo lignocelulósico (ton GEI/ton biomasa).

Insumo	Proceso 1)			Proceso 3)			Proceso 4b)		
	CO ₂	CH ₄ x10 ⁴	N ₂ O x10 ⁵	CO ₂	CH ₄ x10 ⁴	N ₂ O x10 ⁵	CO ₂	CH ₄ x10 ⁴	N ₂ O x10 ⁵
1	1.146	2.21	3.10	0.529	0.14	0.39	1.670	1.50	2.38
2	0.775	0.99	1.49	0.400	0.11	0.29	1.136	0.48	0.97
3	1.214	1.84	2.66	0.495	0.15	0.37	1.157	1.38	2.07
4	1.011	1.61	2.31	0.402	0.12	0.30	1.004	0.94	1.48
5	1.319	1.73	2.59	0.711	0.18	0.52	2.314	1.58	2.68
6	1.222	2.08	2.97	0.589	0.15	0.43	1.832	1.39	2.30
7	1.311	1.78	2.65	0.715	0.18	0.52	2.336	1.58	2.70

Se puede observar que el proceso con la menor cantidad de emisiones de cada uno de los GEI es el proceso 3. Sin embargo, estas emisiones no pueden ser comparadas entre sí, por lo que para ello las emisiones de metano y de N₂O serán convertidas para hacerlas equivalentes a las del CO₂. Existe un factor de conversión el cual considera la cantidad de energía térmica que puede absorber cada GEI tras haber sido emitido y acumulado en la atmósfera; este factor es conocido como “potencial de calentamiento global” (GWP por sus siglas en inglés: Global Warming Potential) y es calculado considerando la vida media de cada GEI en la atmósfera, pues estos gases son removidos mediante algún mecanismo natural (lluvia, radiación ultravioleta, entre otros). En la tabla 5.10 son reportados los factores GWP para los GEI provenientes de la combustión, considerando un horizonte de 20 años de estadía del gas en la atmósfera.

Tabla 5.10. Potenciales de calentamiento global (GWP) para los gases de efecto invernadero emitidos por la combustión, a un horizonte de 20 años.

GEI	GWP ₂₀
CO ₂	1
CH ₄	72
N ₂ O	289

FUENTE: IPCC; Climate Change 2007. The Physical Science Basis; pág. 212, tabla 2.14

Con los factores de la tabla 5.10, se calcula la emisión de gases de efecto invernadero para cada insumo lignocelulósico en cada proceso de producción de etanol, previa conversión de las emisiones de metano y de N₂O a su equivalente en CO₂, como se indica en la siguiente ecuación:

$$W_i = W_i^{CO_2} GWP_{20}^{CO_2} + W_i^{CH_4} GWP_{20}^{CH_4} + W_i^{N_2O} GWP_{20}^{N_2O} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

donde: i = subíndice correspondiente a cada insumo lignocelulósico introducido al proceso

W_i = emisión de GEI del procesamiento del i-ésimo insumo lignocelulósico en toneladas equivalentes a CO₂, por unidad de biomasa (ton CO₂ eq/ton biomasa)

$W_i^{CO_2}$, $W_i^{CH_4}$, $W_i^{N_2O}$ = emisión de cada GEI por el procesamiento del i-ésimo insumo lignocelulósico en toneladas del referido gas por unidad de biomasa (ton GEI/ton biomasa); dato extraído de la tabla 5.9

$GWP_{20}^{CO_2}$, $GWP_{20}^{CH_4}$, $GWP_{20}^{N_2O}$ = potencial de calentamiento global a 20 años de vida del GEI correspondiente respecto al CO₂ (ton CO₂/ton GEI)

Empleando los datos de la tabla 5.9 y los GWP de la tabla 5.10, además de la ecuación 5.6, se obtienen las emisiones totales de gases de efecto invernadero para cada proceso y para cada insumo lignocelulósico (ver tabla 5.11). Aunque en el reporte del IPCC sobre cambio climático también se reportan valores de GWP para periodos de tiempo mayores (100 años y 500 años), se seleccionaron los datos correspondientes a 20 años para evaluar el impacto de los GEI a corto plazo.

Tabla 5.11. Emisiones totales de gases de efecto invernadero emitidos durante el procesamiento de la biomasa lignocelulósica en cada proceso de producción de etanol (ton CO₂ equivalente/ton biomasa).

	Insumo	Proceso 1)	Proceso 3)	Proceso 4b)
1	Bagazo de caña de azúcar	1.171	0.531	1.688
2	Bagazo de remolacha azucarera	0.787	0.402	1.143
3	Cultivos maderables de rápido crecimiento	1.235	0.498	1.173
4	Olote	1.029	0.403	1.016
5	Paja de trigo	1.339	0.714	2.333
6	Rastrojo de maíz	1.245	0.592	1.849
7	Salvado de trigo	1.331	0.718	2.355

Con los valores de la tabla 5.11 se confirma que el proceso 3 es el de menor cantidad de emisiones de GEI, seguido del proceso 1. El proceso 4b es el que mayores emisiones de gases de efecto invernadero presenta. Respecto a los insumos lignocelulósicos, el insumo con menor impacto a la atmósfera (por tener bajas emisiones de GEI) es el bagazo de remolacha azucarera (insumo 2), seguido del olote (insumo 4) y de los cultivos maderables de rápido crecimiento (insumo 3). En cambio, los insumos con mayores emisiones de GEI, y por ende, con mayor

impacto a la atmósfera, son el salvado de trigo (insumo 7), seguido en orden descendente por la paja de trigo (insumo 5) y el rastrojo de maíz (insumo 6).

Recomendaciones

De acuerdo a los resultados mostrados en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.11, se puede concluir que la combinación insumo-proceso más recomendable para producir etanol es el procesamiento de cultivos maderables de rápido crecimiento (insumo 3) mediante explosión con vapor (proceso 3). Sin embargo, si se revisan las definiciones dadas en el capítulo 1, dicho insumo realmente es de tercera generación, pues se trata de un cultivo cuyo único propósito es ser transformado en biocombustible, a diferencia de las demás materias primas seleccionadas en este trabajo de tesis que sí son de segunda generación al ser residuos agroindustriales. Entonces, el insumo lignocelulósico de segunda generación más conveniente de ser transformado a etanol vía el proceso 3 es el olote (insumo 4).

Se seleccionaron los insumos 3 y 4 para ser procesados mediante la ruta tecnológica 3 debido a:

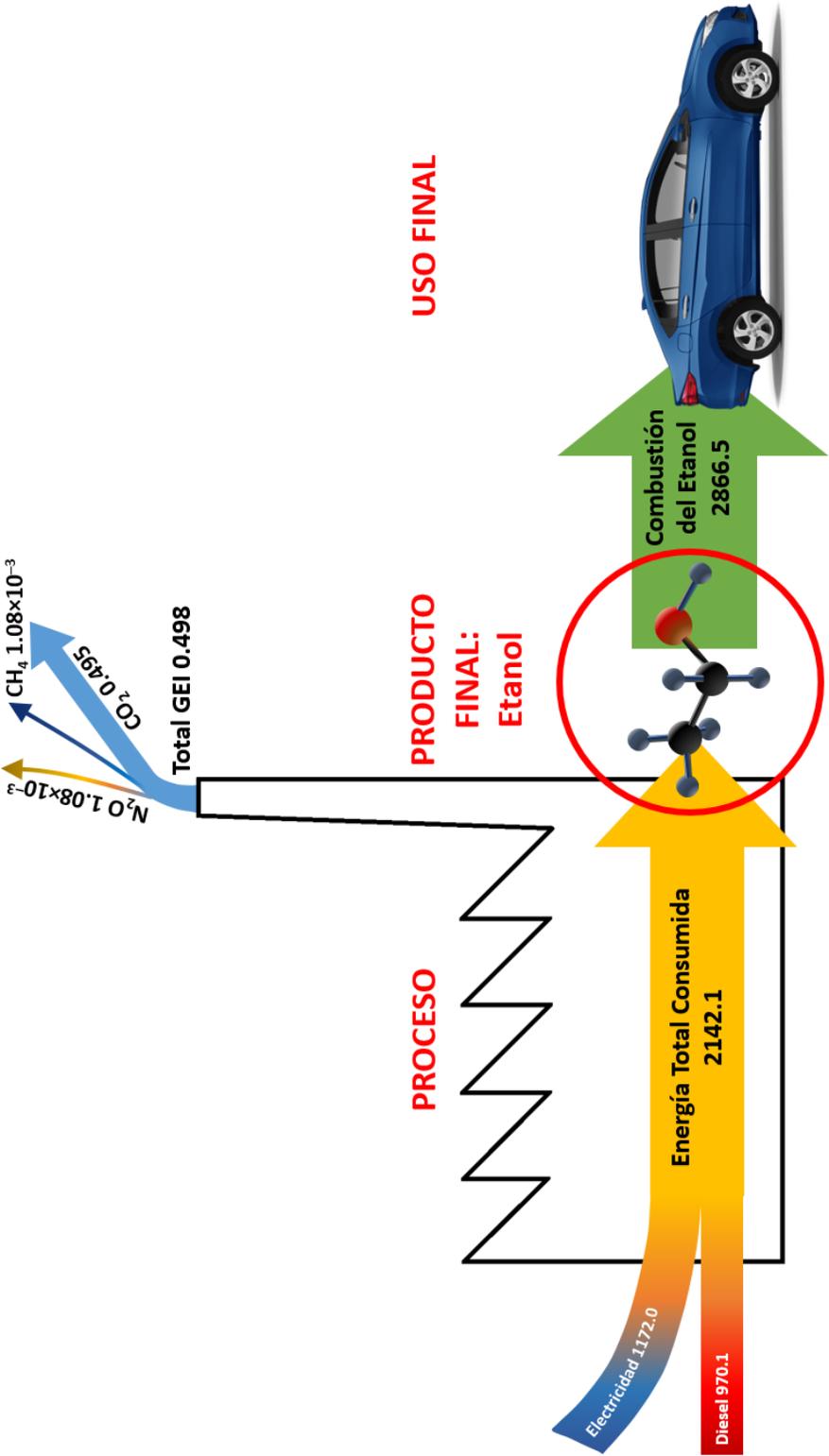
- a) La ganancia energética del proceso 3 con estos insumos es mayor a uno (ver tabla 5.3), comparados frente a las demás materias primas y a los otros procesos.
- b) Poseen un consumo energético total bajo (ver tabla 5.2); de hecho, el olote es el insumo con el cual su transformación a etanol es la de menor intensidad energética, seguido muy de cerca por los cultivos maderables de rápido crecimiento.
- c) La producción de etanol con estos insumos es alta (ver tabla 5.1). Los cultivos maderables son los que más alcohol etílico generan. Aunque el olote no es el segundo insumo con mayor obtención de etanol, aun así posee una producción alta de este energético.
- d) Presentan emisiones de GEI muy bajas (ver tabla 5.11), pues por cada tonelada de biomasa emiten menos de 0.5 toneladas de gases equivalentes a CO₂, es decir, tienen un balance positivo en las emisiones de GEI:

$$\text{Entrada}_{\text{Biomasa}} - \text{Salida}_{\text{GEI}} > 0 \text{ , o bien, } \text{Entrada}_{\text{Biomasa}} > \text{Salida}_{\text{GEI}}$$

Esta selección corresponde incluso a insumos cuya cantidad de celulosa y hemicelulosa es alta; los cultivos maderables de rápido crecimiento son el insumo con mayor cantidad de celulosa, y por ende, genera la mayor cantidad de azúcares C6 (ver tabla 4.2 del capítulo 4). En cambio, el olote es el insumo con la mayor cantidad de hemicelulosa, la cual produce una gran cantidad de azúcares C6 y principalmente C5, lo cual permite obtener más etanol por cada unidad de biomasa.

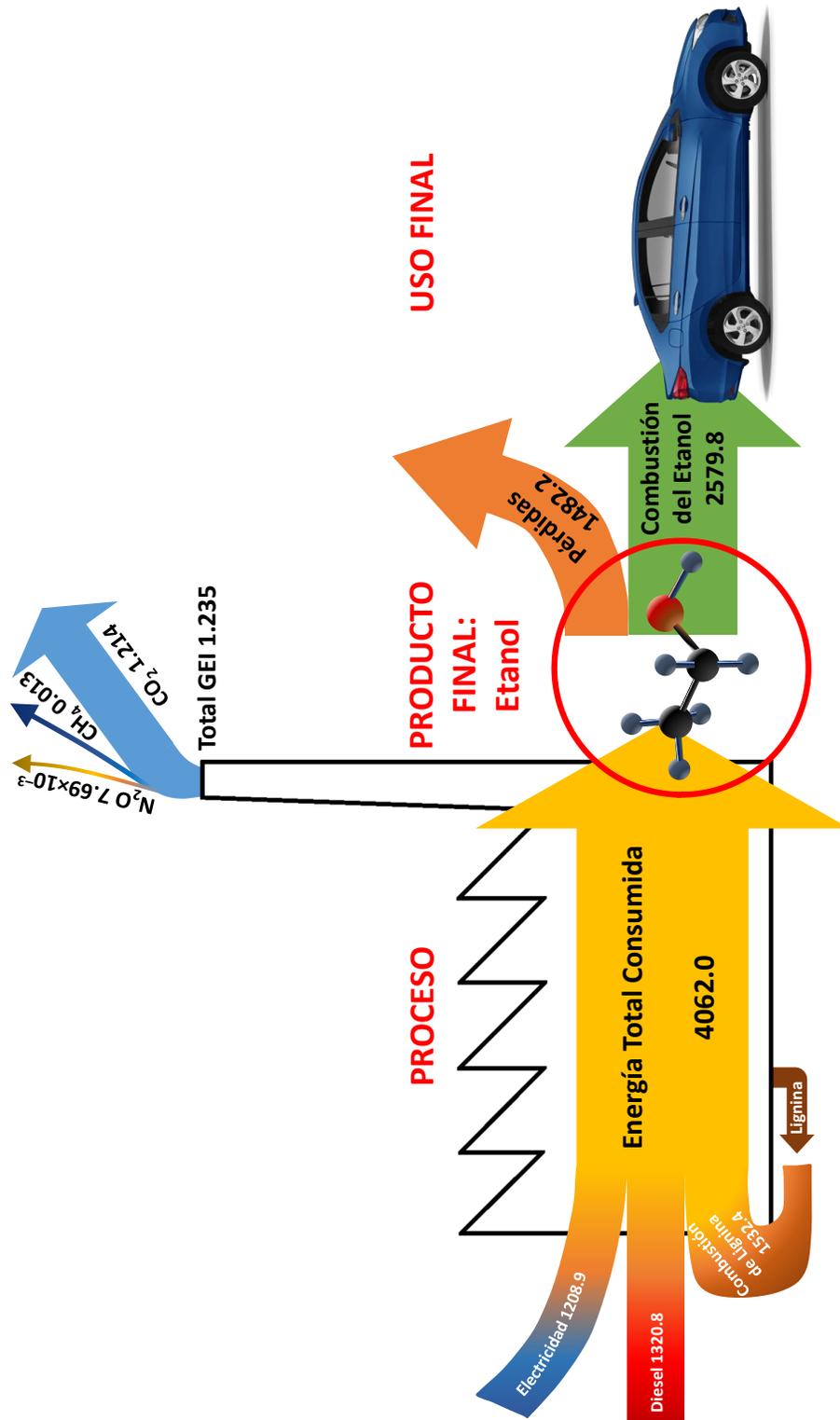
Respecto a las otras rutas tecnológicas (procesos 1 y 4b), ambas presentan cifras similares en los rubros tratados arriba (ver tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.11). Para hacer una comparación entre cualquiera de estas rutas y el proceso 3, se elaboraron de manera gráfica los balances globales de energía y se muestran las emisiones de

GEI, todo en un diagrama de Sankey (ver figuras 5.1 y 5.2). Tanto en el diagrama de la figura 5.1 como en la figura 5.2 se emplearon los cultivos maderables de rápido crecimiento (insumo 3) para poder comparar al proceso 3 (figura 5.1) con el proceso 1 (figura 5.2).



Las cifras de consumo energético están dadas en kWh/ton biomasa, y las emisiones de GEI están en ton CO₂ eq/ton biomasa.

Figura 5.1. Balance global de energía y emisiones de gases de efecto invernadero para la transformación del insumo 3 (cultivos maderables de rápido crecimiento) en etanol vía el proceso 3 (explosión por vapor)



Las cifras de consumo energético están dadas en kWh/ton biomasa, y las emisiones de GEI están en ton CO₂ eq/ton biomasa.

Figura 5.2. Balance global de energía y emisiones de gases de efecto invernadero para la transformación del insumo 3 (cultivos maderables de rápido crecimiento) en etanol vía el proceso 1 (hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado)

No se elaboraron diagramas de Sankey como los mostrados en las figuras 5.1 y 5.2 para el olote (insumo 4), porque resultarían muy similares a los correspondientes a los cultivos maderables de rápido crecimiento, pues sólo cambiarían las cifras ahí

exhibidas. Nótese además que estos diagramas están centrados en torno al etanol, pues es el producto principal del proceso y objetivo de esta tesis. Además, la flecha entrante al automóvil sólo corresponde a la cantidad de energía obtenida de la combustión del alcohol, sin tomar en cuenta la eficiencia de aprovechamiento de esta energía dentro del vehículo.

En conclusión, los procesos de segunda generación no son convenientes en la producción de etanol, a menos que se emplee como insumo algún residuo agroindustrial rico en celulosa y hemicelulosa como el olote, con el cual la ganancia energética del proceso sea mayor a uno, para presentar un balance positivo en las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, los cultivos maderables de rápido crecimiento son un ejemplo de que los procesos de tercera generación presentan mejores parámetros de ganancia energética y de balance de emisiones de GEI, pues otros insumos de este tipo, como las microalgas, poseen una mayor cantidad de polisacáridos que los cultivos maderables. Esto lleva a pensar en la conveniencia de producir etanol vía alguna ruta tecnológica de tercera generación, aunque esta evaluación estuvo fuera del alcance del presente trabajo de tesis, pero se sugiere partir de este punto para algún trabajo futuro.

Fuentes de Información

BLANQUART, G. et al.; Chemical mechanism for high temperature combustion of engine relevant fuels with emphasis on soot precursors; en *Combustion and Flame* **156** (2009) 588-607

BROWN, Malcolm R.; The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture; en *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **145** (1) March 1991, pp. 79-99

IPCC; 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2- Energy; Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japón: 2006, pág. 2.16-2.17, tabla 2.2

IPCC; Climate Change 2007. The Physical Science Basis; Cambridge University Press, USA: 2007, pág. 212, tabla 2.14:
https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html
Fe de Erratas:
https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/errataserrata-errata.html#table214

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; Balanço de Energia Útil BEU 2005; MME, Brasil: 2005, pág. 30

NREL; Combustion Properties of Lignin Residue from Lignocellulose Fermentation; University of California-Davis, USA: 2000, pág. 6

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY; Biomass Energy Data Book; DOE-EERE, USA: 2011, apéndice A

SECRETARÍA DE ENERGÍA; Balance Nacional de Energía 2015; SENER, México: 2016, pág. 52-53, cuadro 24

CAPÍTULO 6

ANEXOS

En este capítulo se incorporan unos documentos generados paralelamente y en consecuencia del desarrollo de este trabajo de tesis, los cuales han sido añadidos para complementar el tema y para reforzar la importancia del análisis realizado en los capítulos previos.

ANEXO 1

Verificación de la frase pronunciada por Henry Ford en 1925

Cálculo efectuado por el autor de esta tesis con motivo de mi participación en el coloquio del 26 de junio de 2009 en el marco de la Cátedra Extraordinaria Maestro José María Luis Mora de la Facultad de Economía de la UNAM. Dicho coloquio fue presidido y moderado por el Dr. Ángel de la Vega Navarro, titular de la cátedra, y se llevó a cabo en la Casa de la Universidad de California en México.

Este cálculo fue mostrado en una lámina de la presentación de mi trabajo realizado durante dicha cátedra (ver anexo 2), y responde a la frase que Henry Ford le dijo a un reportero del periódico New York Times:

“Hay combustible en cada trozo de materia vegetal que pueda ser fermentada. Hay suficiente alcohol en la cosecha anual de un acre de papas como para mover la maquinaria necesaria para cultivarlas durante cien años”

FUENTE: “Ford Predicts Fuel From Vegetation”; *The New York Times*, 20 de septiembre de 1925, pág. 24
KOVARIK, William; “Henry Ford, Charles Kettering and the Fuel of the Future”; en *Automotive History Review*, No. 32, primavera 1998, pp. 7-27

¿TENÍAN RAZÓN DIESEL Y FORD?

Henry Ford

Producción de etanol por hectárea (promedio): 2,400 L/ha

Energía obtenida del etanol (máxima): 22.3 MJ/L

Energía de una cosecha anual de papas: 53.5 GJ/ha

Si una hectárea equivale a 2.47 acres: 21.7 GJ/acre

Energía necesaria para producir* papas (promedio): 9 GJ/acre-año

*Sólo maquinaria .

Años en que puede usarse el etanol obtenido del acre de papas:

$$\frac{21.7 \text{ GJ/acre}}{9 \text{ GJ/acre-año}} = 2.4 \text{ años}$$

Fuentes: BROWN; Robert C.; *Biorenewable Resources*; Iowa State Press, USA: 2003
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; *Balanco Energético Nacional 2008*; MME-EPE, Brasil: 2008
SAGARPA; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), México: 2009: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>

Para el presente trabajo de tesis se efectuó la siguiente actualización del cálculo, pues el mostrado en la lámina de la presentación del coloquio fue realizado a partir de datos del periodo 2008-2009, correspondientes a la agricultura en México. En este recálculo se emplearon datos de otros países productores de papa, para ampliar el banco de información frente a la postura de Henry Ford; estos países son: Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Países Bajos, entre otros más de cuyos datos se dispone en la literatura y fuentes de información electrónica.

México.

Primero se debe estimar la energía necesaria para producir una cosecha anual de papa (*Solanum tuberosum*), pues no existe información pública al respecto. Para ello, se emplean datos de costo de producción anual de yuca en Tabasco (ver tabla 1). Se seleccionó la yuca (*Manihot esculenta*, conocida en portugués como cassava) porque su tubérculo es muy similar al de la papa (ver figura 1), así como el resto de la planta, y por ende, las actividades agrícolas realizadas para producir yuca deben ser semejantes a las actividades agrícolas para cultivar papa.

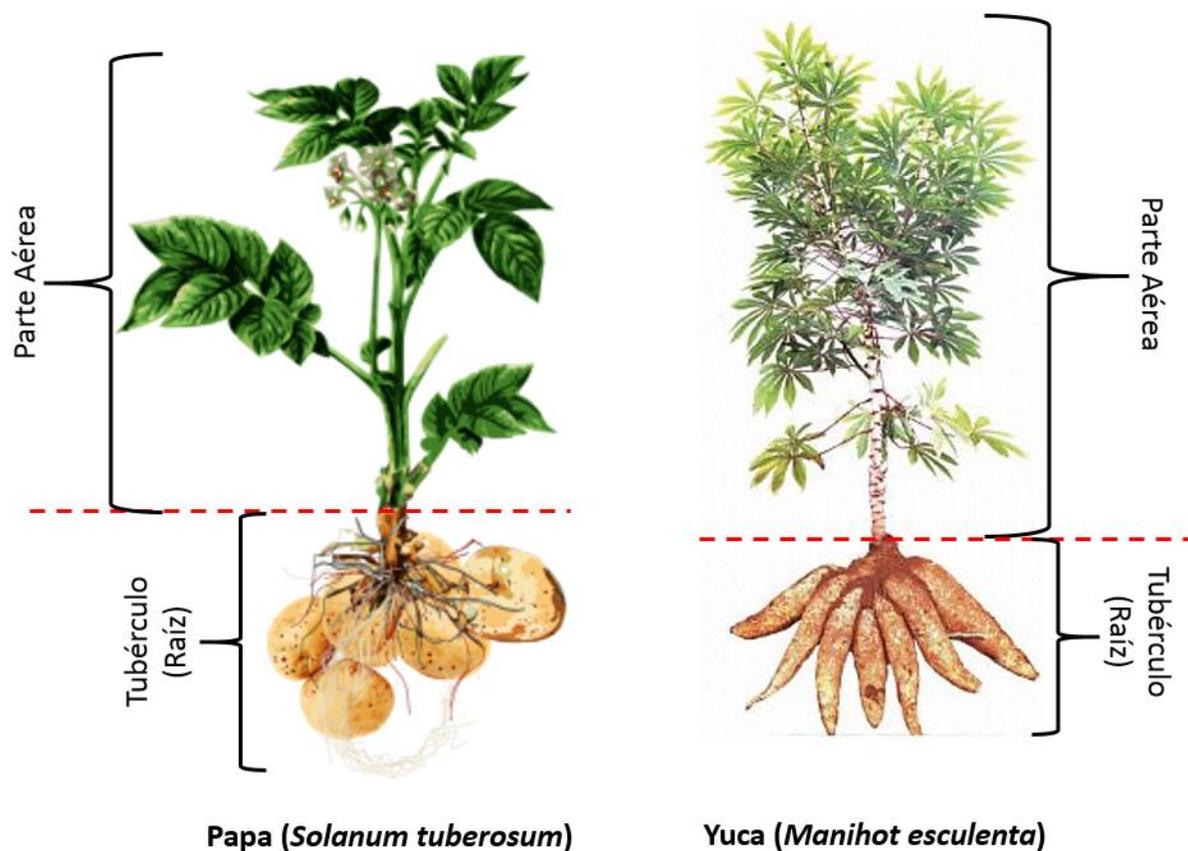


Figura 1. Plantas de papa y de yuca

Tabla 1. Costo anual de cada actividad agrícola en la producción de yuca en Tabasco.

Actividad	Costo (Mx\$/ha)*
Preparación de tierras	900
Siembra o plantación	850
Fertilización	1883
Cultivos	784
Control de plagas	496
Cosecha	1150
Acarreo	600
Total	6663

*Pesos mexicanos del año 2004

Fuente: SENER; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; Task 4, pág. 4, tabla 7.2

Los costos de la tabla 1 deben ser directamente proporcionales a la energía empleada en cada actividad, por lo cual se les puede convertir a términos energéticos. Para ello, primero se emplea el tipo de cambio promedio peso-dólar existente en el año 2004: 11.29 Mx\$/US\$, según información del Banco de México. Luego se usa el precio del barril de petróleo, pues es el punto de referencia base para todos los bienes, entre ellos la energía. El precio del petróleo empleado es el del petróleo crudo West Texas Intermediate (WTI), ya que el precio de todos los productos petrolíferos mexicanos toman como referencia para su base de cotización al WTI; en el año 2004 el valor promedio de este precio era de 41.51 US\$/bbl de acuerdo al EIA (siglas en inglés del Energy Information Administration, dependencia del Departamento de Energía de Estados Unidos).

Finalmente, debe tomarse en cuenta la energía que puede ser obtenida a partir de un barril de petróleo, concepto mejor conocido como “barril de petróleo equivalente” (BPE, siglas en español; en inglés BOE = Barrel of Oil Equivalent). De acuerdo a los factores de conversión reportados en el Balance Nacional de Energía de Brasil, esta cantidad es igual a 5.9488 GJ/bbl.

Para convertir los costos de la tabla 1 en energía se usa la siguiente ecuación:

$$E_{\text{Actividad}} = \frac{C_{\text{Actividad}} \text{ BPE}}{T_{\text{PD}} P_{\text{WTI}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde: $E_{\text{Actividad}}$ = energía consumida anualmente por actividad agrícola

$C_{\text{Actividad}}$ = costo anual de la actividad agrícola

BPE = barril de petróleo equivalente = 5.9488 GJ/bbl

T_{PD} = tipo de cambio peso-dólar

P_{WTI} = precio del barril de petróleo WTI

Empleando la ecuación 1, los costos de la tabla 1 son convertidos a energía (ver tabla 2). Algunas de las actividades mostradas en las tablas 1 y 2 son generalmente realizadas con maquinaria en el campo mexicano; dichas actividades son:

preparación de tierras, siembra o plantación, cosecha, y acarreo. Las demás actividades son normalmente efectuadas por campesinos, y en consecuencia, su dato de energía consumida no proviene de algún combustible.

Tabla 2. Energía empleada anualmente en cada actividad agrícola durante la producción de yuca en Tabasco.

Actividad	Energía (GJ/ha)
Preparación de tierras	11.4
Siembra o plantación	10.8
Fertilización	23.9
Cultivos	10.0
Control de plagas	6.3
Cosecha	14.6
Acarreo	7.6
Total	84.6

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de diversas fuentes:
 SENER; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; Task 4, pág. 4, tabla 7.2
 BANCO DE MÉXICO; Sistema de Información Económica
 ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION; Petroleum & Other Liquids
 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; Balanço Energético Nacional 2016, pág. 223, tabla VIII.5

Para calcular la energía empleada en la cosecha anual de papa sólo se usarán los datos de las actividades en las cuales una máquina fue utilizada, pues ésta consume energía proveniente de algún combustible, que en este anexo de la tesis es el etanol proveniente de la papa. Entonces, la energía consumida por la maquinaria empleada para producir una cosecha anual de papa en México resulta ser:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 44.4 \text{ GJ}/(\text{ha año})$$

Por otra parte, se debe estimar la energía que puede extraerse del etanol proveniente de la cosecha anual de papa. Para iniciar este cálculo, se determina el rendimiento del cultivo de papa (ver tabla 3); el promedio de los datos mostrados en esta tabla resulta ser de 26.698 ton/ha.

Tabla 3. Rendimiento de la cosecha anual de papa a nivel nacional en México.

Año	Rendimiento (ton/ha)
2005	27.185
2006	24.325
2007	26.691
2008	28.178
2009	28.366
2010	26.786
2011	25.282
2012	27.306
2013	25.63
2014	27.266
2015	26.664

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de varios años proporcionados por: SIAP; Avance de Siembras y Cosechas. Resumen nacional por cultivo

Luego se calcula la cantidad de etanol que puede producirse a partir de la cosecha anual de papa; de acuerdo a Brown, se pueden extraer 96 L por cada tonelada de papa. Entonces, la cantidad de etanol producido por cada hectárea de cultivo de papa se calcula con la ecuación 2, y resulta ser de 2563 L/ha.

$$Q_{\text{EtOH}} = R_C V_{\text{EtOH}} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde: Q_{EtOH} = cantidad de etanol por hectárea de cultivo, en L/ha

R_C = rendimiento del cultivo, en ton/ha

V_{EtOH} = volumen de etanol por tonelada de cultivo = 96 L/ton

Posteriormente, se determina la cantidad de energía que puede producirse a partir de la cosecha de papa. Como el etanol producido a partir de la papa va a ser quemado por la maquinaria para aprovechar su energía almacenada químicamente, entonces se emplea el poder calorífico inferior (PCI); en el caso del etanol, su combustión posee un PCI de 6750 kcal por cada kilogramo del energético. El etanol además tiene una densidad de 791 kg/m³. Entonces la cantidad de energía proveniente del etanol por cada hectárea de cultivo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\text{EtOH}} = \text{PCI}_{\text{EtOH}} \rho_{\text{EtOH}} Q_{\text{EtOH}} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde: E_{EtOH} = energía de la combustión de etanol por hectárea de cultivo, en GJ/ha

PCI_{EtOH} = poder calorífico inferior del etanol = 6750 kcal/kg

ρ_{EtOH} = densidad del etanol = 791 kg/m³

Q_{EtOH} = cantidad de etanol por hectárea de cultivo, en L/ha

Dado que una kilocaloría equivale a 4.1868×10⁻⁶ gigajoules, y que un metro cúbico contiene 1000 litros, empleando la ecuación 3 se obtiene:

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 57.3 \text{ GJ/ha}$$

Finalmente, como un acre equivale a 0.4046856 hectáreas, se convierten a acres tanto la energía para la producción de papa como la energía del etanol de papa:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 18.0 \text{ GJ/(acre año)}$$

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 23.2 \text{ GJ/acre}$$

Para determinar los años en que la producción de papa puede ser sustentada energéticamente por el etanol obtenido de una cosecha anual de papa, se emplea el concepto de ganancia energética (ver ecuación 5.1 del capítulo 5), el cual queda representado por la siguiente ecuación:

$$G_{\text{EC}} = \frac{E_{\text{Salida}}}{E_{\text{Entrada}}} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde: G_{EC} = ganancia energética del cultivo, en años

$E_{\text{Salida}} = \text{energía obtenida del etanol producido por el cultivo} = E_{\text{Etanol de Papa}}$
 $E_{\text{Entrada}} = \text{energía necesaria para producir el cultivo} = E_{\text{Producción de Papa}}$

Aplicando la ecuación 4 se obtiene: $G_{\text{EC}} = \frac{23.2 \frac{\text{GJ}}{\text{acre}}}{18.0 \frac{\text{GJ}}{\text{acre año}}} = 1.3 \text{ años}$

Este resultado indica que la cantidad de energía generada por etanol producido a partir de cultivar un acre de papas en México alcanza para sustentar energéticamente a la maquinaria agrícola por 1.3 años (1 año y 3.5 meses). Asimismo, este valor difiere del reportado en la lámina presentada en el coloquio debido al uso de información incompleta respecto al consumo energético en el cultivo de la papa, pues ahí se usó la cifra 9 GJ/(acre año) en lugar de la más completa de 18 GJ/(acre año) del presente análisis.

Estados Unidos.

Se comienza estimando la energía necesaria para producir una cosecha anual de papa, pues ninguna entidad pública o privada da información al respecto, al igual que en México. Existen unos datos de consumo energético por actividad agrícola para cultivar papa, los cuales fueron publicados por Pimentel y son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Energía empleada anualmente en cada actividad agrícola durante la producción de papa en Estados Unidos.

Actividad	Energía (GJ/ha)
Preparación de tierras	6.7
Maquinaria	3.9
Combustible (diesel)	16.7
Nitrógeno	21.4
Fósforo	4.5
Potasio	2.6
Azufre	2.4
Semillas	0.1
Herbicidas	2.8
Insecticidas	3.8
Fungicidas	41.9
Electricidad	0.2
Transporte	0.4
Total	107.3

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de:

PIMENTEL, David; Energy Inputs in Food Crop Production in Developing and Developed Nations; en *Energies* 2009, 2, pág. 11, tabla 11

Obsérvese que dicha tabla no considera la energía empleada en la cosecha de la papa, por lo cual se estima que esta actividad debe consumir un 12% del total de energía; esto genera una energía total de 122.0 GJ/ha, de los cuales 14.6 GJ/ha

corresponden a la cosecha, cifra similar a la de México (ver tabla 2). Si se consideran sólo aquellas actividades potencialmente consumidoras de etanol como combustible (preparación de tierras, maquinaria, combustible, electricidad, transporte, y cosecha), se obtiene el consumo total de energía para producir una cosecha anual de papa en Estados Unidos:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 42.5 \text{ GJ}/(\text{ha año})$$

En cuanto al cálculo de la energía que puede extraerse del etanol proveniente de la cosecha anual de papa, la estimación del rendimiento del cultivo de papa se efectúa a partir de datos proporcionados por el Departamento de Agricultura (USDA, por sus siglas en inglés), los cuales son mostrados en la tabla 5. El valor promedio de los rendimientos mostrados en dicha tabla resulta ser de 45.394 ton/ha.

Tabla 5. Rendimiento de la cosecha anual de papa a nivel nacional en Estados Unidos.

Año	Rendimiento (ton/ha)
2005	43.752
2006	44.089
2007	44.426
2008	44.426
2009	46.445
2010	44.987
2011	44.762
2012	45.884
2013	46.445
2014	47.230
2015	46.894

Fuente: Elaboración propia a partir de datos provenientes de reportes de varios años: USDA; Potatoes Summary; Septiembre, pág. 9

Con este rendimiento y empleando las ecuaciones 2 y 3, se calcula la energía generada por la combustión del etanol producido a partir de la cosecha de papa:

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 97.4 \text{ GJ}/\text{ha}$$

Ambos resultados energéticos se convierten a acres:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 17.2 \text{ GJ}/(\text{acre año})$$

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 39.4 \text{ GJ}/\text{acre}$$

Por último, se determina la cantidad de años sustentados por el etanol de papa mediante la ecuación 4:

$$G_{\text{EC}} = \frac{39.4 \frac{\text{GJ}}{\text{acre}}}{17.2 \frac{\text{GJ}}{\text{acre año}}} = 2.3 \text{ años}$$

Este resultado es mayor al de México, e indica que la cantidad de energía generada por etanol producido a partir de cultivar un acre de papas en Estados Unidos, alcanza para sustentar energéticamente a la maquinaria agrícola por 2 años y 3.5 meses. Además, este valor de ganancia energética (conocida en la literatura agrícola como “eficiencia energética” o “cociente energético salida-entrada”) del cultivo de papa es intermedio a los valores reportados por Pimentel y por Walker, los cuales son respectivamente 2.76 años y 2.1 años, y ambos validan el presente cálculo.

Reino Unido.

De acuerdo al reporte de DEFRA (siglas en inglés del Departamento de Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales del Reino Unido) y de la Universidad de Warwick, la energía para producir una cosecha anual de papa en el Reino Unido es de 44.5 GJ/(ha año), con un rendimiento de 45 ton/ha. Si a este último dato se le aplican las ecuaciones 2 y 3, se obtiene la energía producida por la combustión de etanol proveniente de la cosecha de papas. Entonces, los valores de energía de entrada y de salida por cada acre de cultivo resultan ser respectivamente:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 18.0 \text{ GJ}/(\text{acre año})$$

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 39.1 \text{ GJ}/\text{acre}$$

Y empleando la ecuación 4, se obtiene la ganancia energética:

$$G_{\text{EC}} = \frac{39.1 \frac{\text{GJ}}{\text{acre}}}{18.0 \frac{\text{GJ}}{\text{acre año}}} = 2.2 \text{ años}$$

Esta cifra es comparable a la de Estados Unidos, pues sus tecnologías de producción agrícola son semejantes entre ambos países.

Alemania.

El reporte de la Agriculture and Energy Efficiency (agrEE, abreviatura en inglés) de la Unión Europea, da los siguientes datos de energía introducida al cultivo de la papa anualmente y de rendimiento de la cosecha de papa en Alemania; estos datos son respectivamente 26.9 GJ/(ha año) y 42.4 ton/ha. Con estos valores y aplicando las ecuaciones 2 y 3, se obtienen las energías de entrada y de salida por acre de cultivo:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 10.9 \text{ GJ}/(\text{acre año})$$

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 36.8 \text{ GJ}/\text{acre}$$

Con la aplicación de la ecuación 4, se determina la cantidad de años en que el cultivo anual de papa puede sustentarse en el etanol producido a base de papa:

$$G_{EC} = \frac{36.8 \frac{\text{GJ}}{\text{acre}}}{10.9 \frac{\text{GJ}}{\text{acre año}}} = 3.4 \text{ años}$$

Esta ganancia energética equivalente a 3 años y 5 meses, es muy alta comparada con los países anteriormente analizados. Esto se debe a la alta eficiencia energética en los procesos de producción de papa, derivada del alto grado de tecnificación de la agricultura en Alemania.

Países Bajos.

Al igual que para Alemania, el reporte de la agrEE ofrece los datos necesarios para evaluar energéticamente el cultivo de papa en los Países Bajos, país también conocido como Holanda. El rendimiento de sus cosechas anuales de papa es de 50.2 ton/ha, uno de los datos más altos reportados para la papa en Europa (el rendimiento más alto corresponde a Bélgica, de acuerdo a la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas, FAO por sus siglas en inglés) y en el mundo (el mayor rendimiento se da en Kuwait, según FAO).

La energía introducida al cultivo anual de papa es de 44.8 GJ/ha de acuerdo al mismo reporte. Entonces, las energías de entrada y de salida por acre de cultivo de papa, resultantes de la aplicación de las ecuaciones 2 y 3 a los datos arriba mencionados, son:

$$E_{\text{Producción de Papa}} = 18.1 \text{ GJ}/(\text{acre año})$$

$$E_{\text{Etanol de Papa}} = 43.6 \text{ GJ}/\text{acre}$$

Los cuales con la ecuación 4 dan una ganancia energética de:

$$G_{EC} = \frac{43.6 \frac{\text{GJ}}{\text{acre}}}{18.1 \frac{\text{GJ}}{\text{acre año}}} = 2.4 \text{ años}$$

Esto significa que en los Países Bajos la cosecha anual de papa rinde energéticamente un año menos que en Alemania. Este resultado es producto de una menor eficiencia energética en el cultivo de papa respecto de la alta tecnificación agrícola alemana, a pesar del altísimo rendimiento de la cosecha holandesa.

Otros Países.

Aplicando la misma metodología usada en los países anteriormente analizados, se evaluó energéticamente el cultivo de papa respecto de la producción de etanol en los siguientes países: Polonia, Irán, Bangladesh, India, China, y Perú (ver tabla 6). Estos países fueron seleccionados no sólo por la disponibilidad de datos suficientes para realizar dicha evaluación, sino porque pertenecen a las regiones de mayor

producción de papa en el mundo. Polonia posee un grado de tecnificación agrícola similar al de Alemania; Irán ha invertido muchos recursos científicos en la mejora de sus cultivos de papa. Bangladesh es un país altamente rural pero que se encuentra dentro de los diez mayores productores de papa en el mundo, además que ha realizado esfuerzos por desarrollarse económicamente, pues su producto interno bruto se ubica ya dentro de los 35 países más ricos del mundo.

Tabla 6. Evaluación de la ganancia energética de la producción de etanol a partir del cultivo de papa en países seleccionados.

País	Polonia	Irán	Bangladesh	India	China	Perú
Energía para la producción de papa (GJ/acre-año)	6.8	17.3	16.8	18.3	18.3	10.4
Rendimiento de la cosecha (ton/ha)	27	27.5	16.8	20.2	15.4	13.4
Etanol obtenido de la cosecha (L/ha)	2592	2639	1615.3	1940.1	1481.2	1288.5
Energía del etanol de papa (GJ/acre)	23.4	23.9	14.6	17.6	13.4	11.7
Ganancia energética del etanol de papa (años)	3.4	1.4	0.9	1.0	0.7	1.1

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de diversas fuentes:

FAO: FAOSTAT/Crops; 2005-2014

Polonia: agrEE; State of the Art on Energy Efficiency in Agriculture; pág. 24, tabla 8

Irán: TAHERI, Shahram; SHAMABADI, Zayn-alabedin; Effect of planting date and plant density on potato yield, approach energy efficiency; en *Intl J Agri Crop Sci*, Vol. 5 (7) 2013, pp. 753, tabla 3

Bangladesh: KHAN, M.A.; HOSSAIN, S.M.A.; Study on Energy Input, Output and Energy Efficiency of Major Jute Based Cropping Pattern; en *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 42 (2) 2007, pp. 199, tabla II

India y China: GULATI, S.; SINGH, M.; Energy requirement and management in a potato production system; en *Potato J.* 38 (1) 2011, pp. 65

Perú: INEI; Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2013; capítulo 7, pág. 335, tabla 7.7

EGÚSQUIZA, B.R.; La Papa en el Perú. Presente y Futuro

En el caso de India y China, estos países son los dos mayores productores de papa en el mundo, pues en 2014 ocuparon las posiciones 2 y 1, respectivamente, con sendas cifras de producción total del tubérculo que ascendieron a 46.4 y 95.6 millones de toneladas, de acuerdo a la FAO (ver tabla 7). Perú no sólo es un gran productor de papa, es además el sitio de origen de este importante tubérculo comestible, el cual es el cuarto cultivo alimenticio con mayor producción en el mundo; los tres alimentos agrícolas mayormente cultivados son el arroz, el trigo y el maíz, en este orden.

Tabla 7. Países con mayor producción de papa en el mundo (2014).

	País	Producción (Mton/año)*
1	China	95.6
2	India	46.4
3	Rusia	31.5
4	Ucrania	23.7
5	Estados Unidos	20.1
6	Alemania	11.6
7	Bangladesh	9.0
8	Francia	8.1
9	Polonia	7.7
10	Países Bajos	7.1
12	Reino Unido	5.9
13	Irán	4.7
14	Perú	4.7
35	México	1.7

*Mton = millones de toneladas
Fuente: FAO; FAOSTAT/Crops; 2014

Como puede observarse en la tabla 6, Polonia presenta datos de consumo de energía y de rendimiento agrícola de papa similares a los de Alemania, por lo que su ganancia energética es semejante al valor alemán. En el caso de Irán y Perú, muestran ganancias energéticas similares a pesar de que los datos iraníes son mejores a los peruanos, pues el país del Medio Oriente ha invertido muchos recursos en el desarrollo de su industria agrícola.

Bangladesh, India y China poseen ganancias energéticas muy bajas, pues a su agricultura aún le falta industrializarse más. A pesar de que India y China son los mayores productores de papa en el mundo, sus cifras en la tabla 6 señalan las áreas de oportunidad para ambos países, pues deben incrementar la eficiencia de su maquinaria y de sus procesos agrícolas, así como deben mejorar sus sistemas de irrigación y de cuidado de los cultivos para incrementar su rendimiento anual.

Si bien todos estos datos y cálculos permiten verificar el cumplimiento de la frase de Henry Ford, existen algunos países cuya ganancia energética del etanol de papa es insuficiente para responder ante el sueño de aquel empresario automotriz y visionario de los biocombustibles.

Conclusiones

Los valores finales de la ganancia energética del etanol de papa, o bien, los años en que el cultivo de papa puede ser sustentado por etanol producido por este tubérculo, se muestran de manera sucinta en la tabla 8, donde los países fueron ordenados en orden descendente de ganancia energética. Debido a que dicho valor está en relación directa tanto del grado de industrialización de la agricultura de cada país como de la eficiencia energética en estos procesos, los países productores de papa pueden entonces ser clasificados en:

- a) Países de Ganancia Energética Agrícola Alta: si su ganancia energética del etanol proveniente del cultivo es mayor o igual a 2 años:

$$G_{EC} \geq 2 \text{ años}$$

Estos países poseen una industria agrícola plenamente desarrollada, con un uso intensivo de maquinaria y de irrigación de alta eficiencia en el consumo de agua, por lo cual presentan rendimientos de cosecha anual altos.

- b) Países de Ganancia Energética Agrícola Moderada: si dicha ganancia energética está entre 1 y 2 años:

$$1 \text{ año} \leq G_{EC} < 2 \text{ años}$$

Estos países tienen una industria agrícola parcialmente desarrollada, pues aunque empleen maquinaria para cultivos, ésta suele ir acompañada del uso de trabajo animal. Asimismo, la irrigación posee consumos de agua elevados por su baja tecnificación, así como el cuidado de los cultivos (fertilizantes y control de plagas) son insuficientes o no convenientes, por lo que sus rendimientos de cosecha anual son moderados.

- c) Países de Ganancia Energética Agrícola Baja: si la ganancia energética en cuestión es menor a 1 año:

$$G_{EC} < 1 \text{ año}$$

Estos países poseen una industria agrícola con muy bajo desarrollo, más dependiente de la energía física humana y animal; además sus sistemas de irrigación poseen pérdidas de agua muy elevadas debido a su baja o escasa tecnificación, y el cuidado de los cultivos es escaso o inconveniente, lo cual lleva a tener rendimientos de cosecha anual bajos.

Tabla 8. Ganancia energética del etanol de papa en los países selectos.

País	G _{EC} (años)
Polonia	3.43
Alemania	3.38
Países Bajos	2.40
Estados Unidos	2.29
Reino Unido	2.17
Irán	1.38
México	1.29
Perú	1.12
India	0.96
Bangladesh	0.87
China	0.73

Nótese además que la parte decimal de las cifras de la tabla 8 se extendió a dos posiciones para reflejar las pequeñas diferencias entre países como Polonia y Alemania, y para observar que el valor de India es ligeramente inferior a uno, lo cual lo clasifica como país de ganancia energética agrícola baja.

Si se promedian los valores de las ganancias energéticas del etanol de papa de la tabla 8 por el tipo de país de acuerdo a la clasificación mencionada anteriormente, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 9.

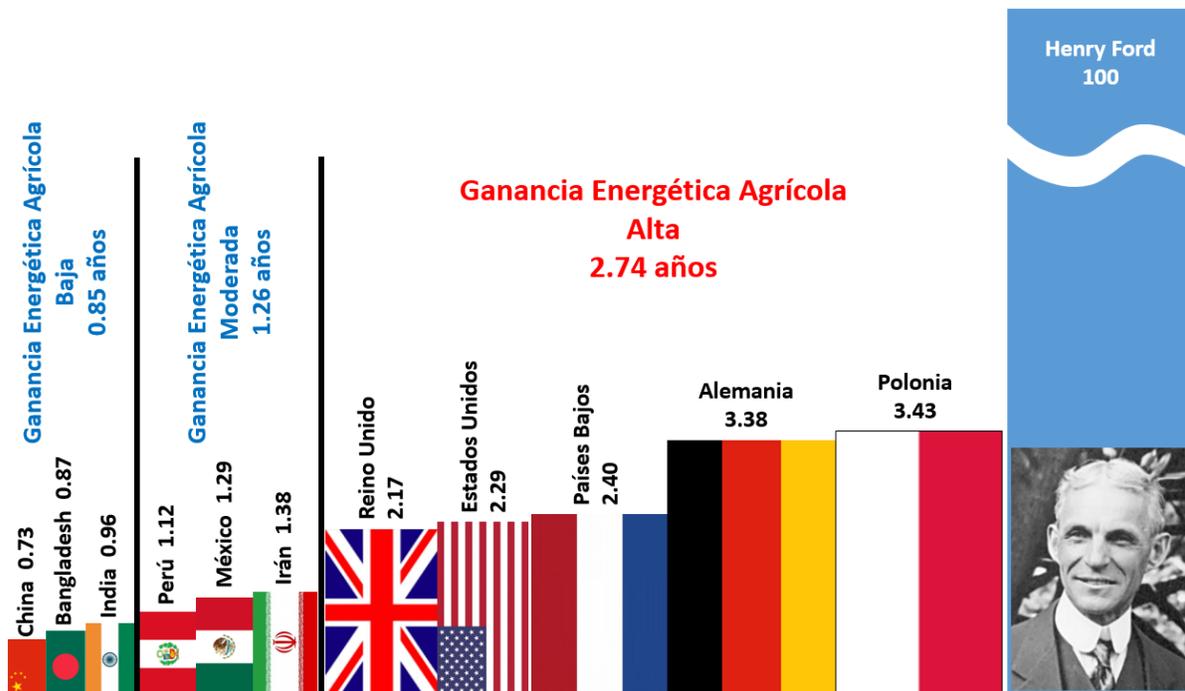
Tabla 9. Ganancia energética promedio del etanol de papa de acuerdo al tipo de país según su agricultura.

Países	G _{EC} promedio (años)
<i>Ganancia Energética Agrícola Alta:</i> Polonia, Alemania, Países Bajos, Estados Unidos, Reino Unido	2.74
<i>Ganancia Energética Agrícola Moderada:</i> Irán, México, Perú	1.26
<i>Ganancia Energética Agrícola Baja:</i> India, Bangladesh, China	0.85
Total	1.82

Como el espíritu de Henry Ford cuando expresó su frase al New York Times era de alta expectación por el desarrollo de los biocombustibles a través de un alto desarrollo de la agricultura, entonces se tomará el valor de ganancia energética promedio del etanol de papa de los países con mayor desarrollo agrícola:

$$G_{EC \text{ Papa}} = 2.74 \text{ años}$$

Una comparación entre la ganancia energética del etanol de papa de los países productores aquí analizados y la expectativa de Henry Ford, se muestra en la figura 2, donde se observa que él esperaba una ganancia energética de 100 años, lo cual es imposible pero los valores reales son suficientes, siempre y cuando toda la producción de papa se emplee en generar etanol y usarlo como biocombustible para la industria agrícola.



Nota: todas las cifras provienen de la tabla 8 y están expresadas en años.

Figura 2. Comparación de ganancias energéticas del etanol de papa con la esperada por Henry Ford

En la realidad, según datos de Morales Fernández, sólo el 25% de la producción de papa se puede emplear para generar etanol, pues el 17% de la misma se usa como semilla para el siguiente ciclo anual de cosecha, y el restante 58% se destina para el mercado alimenticio, es decir, el consumo humano de papa. De esta forma, el numerador de la ecuación 4 queda multiplicado por 0.25, dado que proviene de las ecuaciones 2 y 3, donde al sustituir la 2 en la 3 se produce dicho numerador:

$$G_{EC} = \frac{E_{Salida}}{E_{Entrada}} = \frac{F_{DCE} \cdot PCI_{EtOH} \cdot \rho_{EtOH} \cdot R_C \cdot V_{EtOH}}{E_{PC}} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde: G_{EC} = ganancia energética del cultivo, en años

E_{Salida} = energía obtenida del etanol producido por el cultivo = $E_{Etanol \text{ de Papa}}$

$E_{Entrada}$ = energía necesaria para producir el cultivo = $E_{PC} = E_{Producción \text{ de Papa}}$

F_{DCE} = fracción del producto del cultivo desviado para su consumo como energético; en el caso de la papa = 0.25

PCI_{EtOH} = poder calorífico inferior del etanol = 6750 kcal/kg

ρ_{EtOH} = densidad del etanol = 791 kg/m³

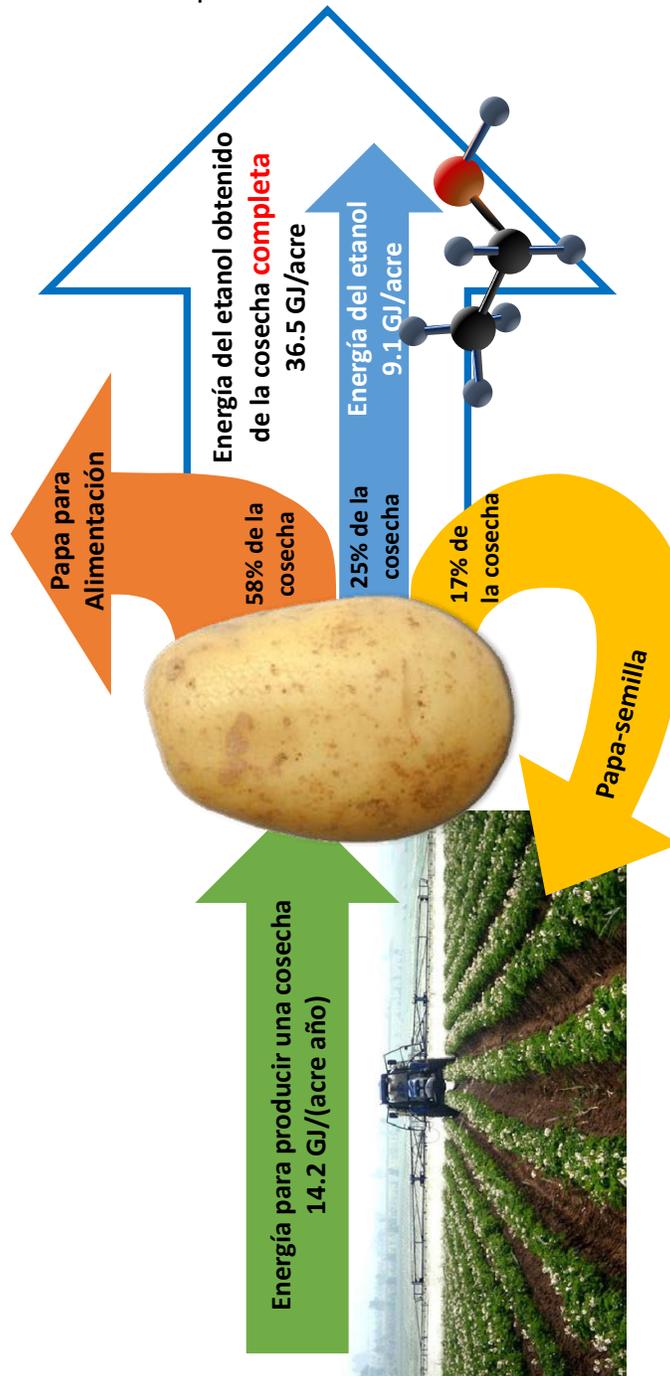
R_C = rendimiento del cultivo, en ton/ha

V_{EtOH} = volumen de etanol por tonelada de cultivo; para la papa = 96 L/ton

Entonces, la ganancia energética real del etanol de papa ya no es de 2.74 años sino resulta ser:

$$G_{EC \text{ Real Papa}} = 0.68 \text{ años}$$

Finalmente, se elaboró un diagrama de Sankey para mostrar las cantidades de energía en torno al tubérculo de la papa (ver figura 3), donde se toman en cuenta las dos ganancias energéticas calculadas: la total de 2.74 años y la real de 0.68 años. A partir de la información de este diagrama se puede concluir que las materias primas de primera generación (como la papa) usadas para producir etanol biocombustible implican un desvío de alimentos, si se desea emplear la cosecha de las mismas en su totalidad. Por esta razón, se deben emplear materias primas de segunda o tercera generación en la producción de biocombustibles, pues estos materiales no son comestibles para el humano.



Nota: las cifras de energía aquí mostradas corresponden a valores promedio de países con ganancia energética agrícola alta, por lo que los valores medios de 2.74 años y 0.68 años podrían no cumplirse en este diagrama.

Figura 3. Balance global de energía del etanol de papa

Aun así, debe procurarse usar materias primas de segunda o tercera generación que no tengan un impacto negativo a la alimentación humana y animal, pues algunos materiales de segunda generación (como el rastrojo de maíz y la paja de trigo) también son empleados como abono para sembradíos y como forraje para animales. Asimismo, el cultivo de materias primas de tercera generación para biocombustibles debe efectuarse en terrenos no aptos para el cultivo de alimentos, si no también se efectuaría un desvío de recursos para la alimentación.

Es una lástima informarle al señor Henry Ford lo siguiente: la cantidad de etanol producido a partir de un acre de cosecha anual de papa no alcanza para energizar la maquinaria agrícola por 2.74 años, mucho menos para los 100 años que él con gran entusiasmo anunciaba. A menos que se desvíe de la alimentación humana una mayor cantidad de papa, digamos un 36.55%; en la ecuación 5 se tendría entonces un F_{DCE} de 0.3655 y se generaría así una ganancia energética del etanol de papa de al menos 1 año en promedio para países con ganancia alta. De esta forma y con esta cantidad de papa desviada del consumo humano, se le podría recomendar al señor Ford llevar a cabo su idea en Alemania y en Polonia, donde sin lugar a dudas sería un éxito.

Si él deseara replicar su idea en algún otro país como su natal Estados Unidos, tendría que emplear toda su cosecha de papa sólo para producir etanol y así lograría mover su maquinaria agrícola por 2.74 años en promedio, o de 2.29 años sólo en su país natal. O incluso, se le podría sugerir el uso sólo del 36.55% de su cosecha de papa, o del 43.6% en Estados Unidos (equivalente a 8 ton/acre de papa), para abastecer a su maquinaria de energía por al menos un año; lo restante de papa serviría para resembrar el acre con papa-semilla (17% ó 3.1 ton/acre de papa en Estados Unidos) y para una alimentación humana baja en consumo del tubérculo. De todas formas, lo poco o mucho que sea empleada la papa para producir etanol biocombustible, serviría para disminuir el consumo de combustibles fósiles y así poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (una hectárea de cultivo de papa puede absorber y fijar 1.54 ton de CO_2 , o bien, 623 kg CO_2 /acre, según Janick), por lo que la frase de Henry Ford puede interpretarse como un aviso de esto, de aquí su carácter de visionario.

Fuentes de Información

AGRICULTURE AND ENERGY EFFICIENCY; State of the Art on Energy Efficiency in Agriculture; agrEE, Unión Europea: 2012, pág. 24, tabla 8

BANCO DE MÉXICO; Sistema de Información Económica/Tipos de cambio y resultados históricos de las subastas/Serie histórica diaria del tipo de cambio peso-dólar:

<http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=6&accion=consultarCuadro&idCuadro=CF373&locale=es>

- BROWN, Robert C.; Biorenewable Resources. Engineering New Products from Agriculture; Iowa State Press, USA: 2003, 1a ed., pág. 160, tabla 7.1
- DEPARTMENT OF AGRICULTURE (Estados Unidos); Potatoes 2015 Summary; USDA, USA: Septiembre 2016, pág. 9
- EGÚSQUIZA, B.R.; La Papa en el Perú. Presente y Futuro; presentación para el Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI) del gobierno de Perú, 17 de marzo de 2008:
http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_exposiciones_Papa_En_EL_Peru.pdf
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (Estados Unidos); Petroleum & Other Liquids/Cushing, OK WTI Spot Price FOB:
<https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=rwtc&f=a>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); FAOSTAT/Crops: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- “Ford Predicts Fuel From Vegetation”; *The New York Times*, 20 de septiembre de 1925, pág. 24
- GULATI, S.; SINGH, M.; Energy requirement and management in a potato production system; en *Potato J.* 38 (1) 2011, pp. 65
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI); Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2013; INEI, Perú: 2014, capítulo 7, pág. 335, tabla 7.7
- JANICK, Jules; Energy and Crop Production; Lectura, Purdue University, USA: 2002, pág. 7: https://hort.purdue.edu/newcrop/hort_403/
- KHAN, M.A.; HOSSAIN, S.M.A.; Study on Energy Input, Output and Energy Efficiency of Major Jute Based Cropping Pattern; en *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 42 (2) 2007, pp. 199, tabla II
- KOVARIK, William; “Henry Ford, Charles Kettering and the Fuel of the Future”; en *Automotive History Review*, No. 32, primavera 1998:
<http://www.radford.edu/~wkovarik/papers/fuel.html>
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Balanco Energético Nacional 2008; Brasil, EPE: 2008, pág. 164, Tabla IX.9
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Balanco Energético Nacional 2016; Brasil, EPE: 2016, pág. 226, Tabla VIII.9

- MORALES FERNÁNDEZ, Sigfrido David; Crecimiento, contenido de azúcares y capacidad de brotación en semilla tubérculo de papa (*Solanum tuberosum* L.); Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Chapingo, México: 2011, pág. 5
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; Chemical Engineers' Handbook; McGraw-Hill, USA: 1999, 7a ed., pág. 1-4, tabla 1-4
- PIMENTEL, David; Energy Inputs in Food Crop Production in Developing and Developed Nations; en *Energies* **2009**, 2, pág. 11, tabla 11
- SECRETARÍA DE ENERGÍA; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; SENER-GTZ-BID, México: 2006, Task 4, pág. 4 (pág. 180 del pdf), tabla 7.2
- SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (SIAP); Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por cultivo: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- TAHERI, Shahram; SHAMABADI, Zayn-alabedin; Effect of planting date and plant density on potato yield, approach energy efficiency; en *Intl J Agri Crop Sci*, Vol. 5 (7) 2013, pp. 753, tabla 3
- THE UNIVERSITY OF WARWICK; Environmental Footprint and Sustainability of Horticulture (including Potatoes)-A Comparison with Other Agricultural Sectors; DEFRA, UK: 2007, pp. 23 (tabla 6), 43: <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&ProjectID=14405&>
- WALKER, John N.; Energy Usage in Agricultural Production; University of Kentucky-Kentucky Department of Energy, USA: 1981, pág. 4, tabla 2

ANEXO 2

Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional

Versión completa del trabajo desarrollado por el autor de esta tesis con motivo del cierre de la Cátedra Extraordinaria Maestro José María Luis Mora de la Facultad de Economía de la UNAM, a invitación del Dr. Ángel de la Vega Navarro, titular de la misma en el periodo septiembre 2008 – agosto 2009. Una versión resumida fue publicada en la revista Economía Informa (núm. 359, julio – agosto 2009), publicación bimestral de la Facultad de Economía.

BIOCOMBUSTIBLES: DESARROLLO HISTÓRICO-TECNOLÓGICO, MERCADOS ACTUALES Y COMERCIO INTERNACIONAL

Ing. Carlos Alvarez Maciel

“El uso de los aceites vegetales como combustible y fuente energética podrá ser insignificante hoy, pero con el curso del tiempo será tan importante como el petróleo y el carbón”.

Rudolph Diesel, 1912

“Hay combustible en cada trozo de materia vegetal que pueda ser fermentada. Hay suficiente alcohol en la cosecha anual de un acre de papas como para mover la maquinaria necesaria para cultivarlas durante cien años”.

Henry Ford, 1925

Introducción

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión.

El párrafo anterior es una propuesta de definición de los biocombustibles, en la que se hace énfasis en la temporalidad de producción de la biomasa. Los combustibles fósiles como el carbón mineral y el petróleo son producto de la descomposición de ciertas biomásas (como plantas terrestres y árboles en el caso del carbón, y algas marinas en el caso del petróleo) durante millones de años, proceso en el cual no intervino el ser humano. Como la materia que dio origen a los combustibles fósiles fue producida por seres vivos, podrían considerarse también como biocombustibles. En el caso de los biocombustibles, la intervención del ser humano permite controlar las rapidez de producción y consumo de estos recursos energéticos convirtiéndolos en renovables, lo que no sucede en el caso de los combustibles fósiles.

Como la finalidad de los biocombustibles es ser quemados para liberar su energía almacenada en forma química, se les utiliza mayoritariamente en el sector transporte para suplir parcial o totalmente a los combustibles fósiles. También se les emplea en el sector doméstico para la cocción de alimentos, la calefacción y la iluminación. En el sector industrial pueden suplir al diesel y al combustóleo en los equipos de proceso que requieran combustible.

Existen varios tipos de biocombustibles, a los cuales se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. Debido a los

avances tecnológicos en el aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa, la clasificación de los biocombustibles se realiza por generaciones.

Primera Generación

Algunos de los insumos son de procedencia agrícola y están conformados por las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Ejemplos de estas materias son el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de la remolacha o betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuete, entre otros. También se emplean como insumos a las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos.

Los biocombustibles son producidos empleando tecnología convencional como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios orgánicos). De estos procesos se obtiene etanol, metanol y n-butanol (alcoholes puros o hidratados obtenidos a partir de azúcares), biodiesel (mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos obtenida a partir de los aceites), y biogás (mezcla de metano y anhídrido carbónico, también conocidos como gas natural y dióxido de carbono respectivamente, obtenida a partir de los desperdicios orgánicos). Los aceites vegetales puros y los aceites y grasas usados también son empleados de forma directa para fines energéticos, previa refinación.

Las ventajas de estos biocombustibles son su facilidad de procesamiento, sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (excepto en el caso del maíz, donde el balance de estas emisiones es casi nulo) y un balance positivo en dichas emisiones, pero tiene como desventaja el desvío de recursos alimenticios hacia la producción de energéticos.

Segunda Generación

Los insumos son residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa. Ejemplos de ellos son el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallo, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera. Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto que los de primera generación, y como ejemplos destacan la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch. Este último proceso también recibe los nombres de proceso GTL y proceso BTL, cuyas siglas en inglés provienen de "Gas-To-Liquids" y "Biomass-To-Liquids" respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol.

Mediante los procesos de segunda generación se fabrica etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de anhídrido carbonoso, mejor conocido como monóxido de carbono, e hidrógeno), biodiesel, 2,5-dimetilfurano (DMF), entre otros.

La ventaja principal en la producción de estos biocombustibles es la inexistencia de desviaciones de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético, pero su desventaja es la poca ganancia en disminución de las emisiones de gases

de efecto invernadero durante el procesamiento de los insumos, respecto a los biocombustibles de primera generación.

Tercera Generación

Los insumos son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas verdes y verdeazules.

Los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo, sin embargo, se ha logrado producir biodiesel y etanol a nivel planta piloto.

Las ventajas de estos biocombustibles son el secuestro de anhídrido carbónico (CO₂) para la producción de los insumos y un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero, pero su desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas verdes.

Cuarta Generación

Los biocombustibles son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles.

A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles.

Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de anhídrido carbónico, sin embargo, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes.

Como es sabido, la humanidad ha hecho uso de la biomasa por varios miles de años. El uso directo de la misma sin procesamiento alguno podría constituir una Generación Cero de los biocombustibles, entre los cuales se pueden mencionar a la leña, la paja de trigo, el rastrojo de otras plantas de cultivo, el estiércol del ganado, y el carbón vegetal. No es sino hasta mediados del siglo XIX que se comenzó a procesar la biomasa para producir combustibles derivados de la misma. A finales del siglo XX aparecieron los primeros mercados de estos recursos energéticos y se vislumbra un mayor crecimiento, desarrollo y expansión de los mismos tendiente a su globalización. Es por ello que el presente trabajo busca analizar de forma breve el estado actual de estos mercados, sus antecedentes y panorama futuro, así como determinar los nexos entre mercados vía comercio internacional.

Desarrollo de los Primeros Mercados de Biocombustibles: Brasil y Estados Unidos

El surgimiento de los primeros mercados actuales de biocombustibles en el mundo sucedió a raíz de la primera crisis petrolera ocurrida en 1973, cuando el petróleo se encareció enormemente. Esta crisis afectó a todos los países del mundo, principalmente a aquellos países sin reservas petrolíferas o producción suficiente del recurso. Entre estos últimos estaban Brasil y Estados Unidos.

Brasil

El desarrollo de la tecnología de producción, aprovechamiento y uso final de biocombustibles en Brasil tiene origen en el periodo 1905-1925 con las primeras pruebas de etanol como combustible en vehículos automotores. En 1931, el gobierno estableció un decreto que obligaba a mezclar 5% de etanol en la nafta importada. En 1937, la producción de etanol ascendió a más de 50 millones de litros, cifra equivalente al 7% del consumo nacional de combustibles. En 1938, el decreto 737 extendió el mezclado de etanol a la nafta producida en Brasil con petróleo extranjero. Durante la Segunda Guerra Mundial, la producción de etanol creció hasta 77 millones de litros anuales y se alcanzaron niveles de mezclado con gasolina de 50% en 1943. Después de la Segunda Guerra Mundial, el empleo de estas mezclas casi no creció (mas no dejó de usarse) debido a los bajos precios del petróleo, aunque la totalidad de éste era importado.

En 1975, tras la primer crisis petrolera mundial, el gobierno brasileño organizó el Programa Nacional del Alcohol, conocido en portugués como Proálcool, cuyos objetivos principales eran:

- 1) Introducir en el mercado brasileño una mezcla combustible de gasolina con alcohol.
- 2) Incentivar el desarrollo de los motores con capacidad de funcionar quemando alcohol hidratado y mezclas de gasolina con alcohol anhidro.

En 1977, en la Universidad Federal de Ceará, el Dr. Expedito Parente produjo biodiesel a partir de aceite de semilla de algodón, combustible cuyo proceso de obtención patentó en 1980.

En 1979, fueron lanzados al mercado interno dos tipos de etanol:

Anhidro (100% etanol), para mezclarse con la gasolina en proporciones que iban de 20 a 25% en volumen de etanol.

Hidratado (96% etanol, 4% agua), para uso directo en motores de ciclo Otto en automóviles modificados.

Ambos tipos de etanol fueron y son producidos mediante la fermentación del jugo de caña de azúcar, una tecnología de primera generación. A las mezclas de etanol

con gasolina también se les conoce con el nombre de “gasohol”. En este mismo año, fue comercializado el primer automóvil (de la marca Fiat) movido sólo por etanol (de tipo hidratado).

A inicios de la década de 1980, el Dr. Expedito Parente fraccionó biodiesel para obtener bioqueroseno, el cual patentó en 1984 y fue probado con éxito en un avión de pasajeros modelo EMB-110 de la empresa brasileña Embraer.

El periodo de 1995 al 2002 se caracterizó por una serie de reformas legales y constitucionales en materia de desregulación paraestatal y de liberalización de precios de energéticos. Esto motivó la creación y fortalecimiento de un mercado interno para los biocombustibles, el cual compite con el de productos petrolíferos.

En 2003, tras una alianza estratégica efectuada entre el gobierno brasileño y compañías extranjeras ensambladoras de automóviles con instalaciones en Brasil, se comenzaron a fabricar vehículos con la capacidad de funcionar a base de cualquier mezcla de gasolina con etanol anhidro (desde un 0% hasta un 100% de etanol), a los cuales se les denominó “flex-fuel”. En mayo de ese año, Volkswagen comercializó en el mercado el primer automóvil flex-fuel: Gol 1.6 Total Flex, con tecnología diseñada por Bosch. Dos meses después, Chevrolet sacó a la venta el Corsa 1.8 Flexpower, con un motor especial diseñado por Fiat.

En 2004, Petróleo Brasileiro S.A., la empresa petrolera estatal desregulada mejor conocida como Petrobras, inició el desarrollo de la tecnología para convertir aceites vegetales en diesel (no biodiesel), patentándose en 2006 en Brasil y en Estados Unidos bajo el nombre de “proceso HBIO”. A partir de entonces, comienza a implementarse esta tecnología en algunas refinerías de diesel fósil de Petrobras, donde al diesel obtenido a partir del petróleo se le añade aceite vegetal refinado, para luego hidrogenar esta mezcla con la incorporación de otras fracciones petrolíferas y, finalmente, obtener diesel de mejor calidad química y energética.

También en 2004, el gobierno organizó el Programa Nacional de Biodiesel (Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, en portugués), para fomentar la producción del biocombustible y su introducción en el mercado energético interno. Este programa gubernamental consta de varios instrumentos, entre ellos hay dos de carácter social: el Modelo de Impuestos al Biodiesel y el Sello de Combustible Social.

El Modelo de Impuestos al Biodiesel consiste en la aplicación de una serie de exenciones parciales o totales al biodiesel de productores que sostengan granjas familiares, con la finalidad de promocionar la inclusión social y la reducción de desigualdades regionales, a través de la generación de empleos e ingresos en los sectores más desfavorecidos de Brasil. Este modelo asume que el esquema impositivo del biodiesel jamás debe exceder al del diesel fósil.

El Sello de Combustible Social es un certificado otorgado a los productores de biodiesel cuya materia prima provenga de granjas familiares, permitiéndoles gozar

de los beneficios del modelo de impuestos mencionado arriba. Los requisitos para el otorgamiento de este sello son el cumplir con un cierto porcentaje de materia prima proveniente de granjas familiares, y el establecimiento de contratos con granjeros en los que se estipulen las condiciones de entrega de la materia prima, su precio de compra y la provisión de asistencia técnica por parte del productor.

En 2005, el Congreso de Brasil emitió la Ley 11.097/2005 en la cual se establecen los porcentajes mínimos de mezcla de biodiesel con diesel fósil, con la finalidad de escalonar la introducción del biodiesel al mercado energético. De acuerdo a esta ley, en el periodo 2005-2007 se autoriza un 2% de biodiesel mezclado con el diesel convencional; en el periodo 2008-2012 es obligatoria la mezcla al 2%; y a partir del 2013, el diesel tradicional debe contener mínimo un 5% de biodiesel. También fue emitida la Ley 11.116/2005 que establece exenciones de impuestos a las compañías productoras de biodiesel cuya materia prima provenga de granjas familiares en situación de pobreza.

En 2007, se dejaron de fabricar automóviles movidos sólo por etanol, pues por ser éste hidratado, no puede mezclarse con gasolina como en el caso de los autos flex-fuel, los cuales dominarán el mercado automotriz en la próxima década.

En 2008, Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. (Embraer) fabricó y probó la primer aeronave brasileña movida sólo por etanol. Es una avioneta monoplaza utilizada en áreas agrícolas y puede usar como combustible gasolina o etanol, mas no sus mezclas, por el momento.

Estados Unidos

Los biocombustibles comenzaron a ser utilizados en Estados Unidos a finales del siglo XIX, aunque a nivel experimental en motores de combustión. El primer automóvil que construyó Henry Ford en 1896, llamado "Quadricycle", utilizaba etanol como combustible. Después él mismo lo reemplazó por gasolina, pues se percató de que tiene un 43.8% mayor contenido energético por unidad de volumen que el etanol.

En 1906 fueron aprobadas una serie de medidas legales para exentar de impuestos la producción y venta de etanol para uso energético en las granjas del centro-este de Estados Unidos, ya que se buscaba crear un nuevo mercado para los productos agrícolas, además había una preocupación por el futuro agotamiento de los combustibles fósiles al no ser renovables. Dichas medidas no surtieron efecto debido a diversos factores, siendo el más importante la competitividad de precios entre el etanol, la gasolina y el queroseno. Una situación similar se presentó a finales de la década de 1920 e inicios de la década de 1930. Después de estos intentos, el etanol no fue empleado como combustible en Estados Unidos casi todo el siglo XX, excepto en periodos de escasez de petróleo como en las crisis petroleras de 1973 y 1979, durante los cuales se le mezclaba con gasolina para estirar existencias.

En 1978, surge la primer ley actual aplicada a los biocombustibles: Ley del Impuesto a la Energía (Energy Tax Act, en inglés), donde se exenta del 10% del impuesto de 4 centavos de dólar de la gasolina federal a las mezclas de etanol con gasolina, además otorga un crédito de 10% al equipo de conversión de biomasa en etanol. Tras esta ley, se aprobaron muchas otras más relacionadas con los biocombustibles en lo restante del siglo XX y el inicio del siglo XXI.

Para la producción de etanol, fueron desarrolladas diversas líneas tecnológicas de primera generación para la obtención del biocombustible, las dos más usadas tienen al grano de maíz como materia prima. La primera de éstas, conocida como de molienda seca, consiste en moler los granos de maíz para producir harina, a la cual se le añaden agua y enzimas para cocerla. Luego se agrega levadura para fermentar la harina de maíz y obtener etanol por destilación. Esta es la ruta tecnológica más empleada actualmente en Estados Unidos, pues las plantas productoras de etanol por molienda seca constituyen (en 2008) el 80% de la capacidad de producción.

La segunda tecnología, conocida como de molienda húmeda, consiste en cocer el grano de maíz en agua caliente para separar la proteína del almidón. La fracción que contiene al almidón es molida y se le separa el almidón para secarlo. Éste es empleado para obtener azúcares los que son fermentados para obtener etanol. Aunque fue la primer ruta tecnológica en ser desarrollada, está declinando debido a su menor productividad respecto a la de molienda seca.

En cuanto al biodiesel, se le obtiene a partir de una gran variedad de aceites vegetales, destacando de entre todos ellos el de soya, y en menor medida, el de maíz. La tecnología empleada es de primera generación y consiste en transesterificar con metanol al aceite vegetal refinado, para obtener biodiesel como producto principal y glicerina como subproducto. La glicerina es separada del biodiesel, y finalmente éste puede ser mezclado con diesel proveniente del petróleo, o bien, ser utilizado sin mezclar, es decir 100% puro.

En 1993, fue creado el Programa Ciudades Limpias (Clean Cities Program, en inglés) en respuesta a los requerimientos establecidos en la Ley de Política Energética (Energy Policy Act, EPAAct, en inglés) de 1992. Este programa es una colaboración entre gobierno e industria para reducir la dependencia estadounidense de petróleo del exterior en el sector transporte mediante la promoción del uso de vehículos alternativos, el mezclado de combustibles fósiles con biocombustibles, y la mejora de la economía de los combustibles en vehículos automotores, entre otras medidas.

En el año 2000, fue publicada la Ley de Investigación y Desarrollo de la Biomasa (Biomass Research and Development Act, en inglés) en la que los departamentos gubernamentales de energía (Department of Energy, DOE) y de agricultura (Department of Agriculture, USDA) tienen como mandato la coordinación a nivel federal de las actividades de investigación y desarrollo relacionados con los biocombustibles y subproductos asociados a la transformación de la biomasa.

A partir de entonces, se han estado desarrollando otras rutas tecnológicas de obtención de etanol, principalmente de segunda y tercera generaciones, las cuales en general consisten en producir el biocombustible mediante la hidrólisis enzimática de la celulosa de pastos y otras plantas fibrosas que crecen ampliamente en el territorio estadounidense. No se contempla la utilización de caña de azúcar debido a que es un cultivo no apto al clima de Estados Unidos, salvo en ciertas regiones del sur.

En 2001, la entonces recién fundada empresa GreenFuel Technologies patentó un proceso de secuestro de CO₂ y producción de biodiesel basado en algas verdes.

En 2004, el Congreso de Estados Unidos aprobó la Ley de Creación de Empleos Estadounidenses (American Jobs Creation Act, en inglés, o ley H.R. 4520), en cuyo título III subtítulo A fue establecido el Crédito sobre Impuestos al Contenido Volumétrico de Etanol (Volumetric Ethanol Excise Tax Credit, VEETC, en inglés). Este crédito entró en vigor el 1 de enero de 2005 y está constituido por dos incentivos, uno a las mezclas de etanol con algún combustible fósil como la gasolina, y otro a las mezclas de biodiesel con diesel fósil. Ambos incentivos consisten en:

Crédito a las Mezclas Combustibles de Alcohol (Alcohol Fuel Mixture Credit): descuento fiscal de 51 centavos de dólar por galón de etanol o de 60 centavos de dólar por galón de cualquier otro alcohol (generalmente metanol o algún éter) que sea mezclado con gasolina u otro combustible fósil. Aplica para productores de alcohol que comercialicen o hagan uso de estas mezclas para fines energéticos, e incluye al etil-terbutiléter (ETBE) y otros éteres derivados del etanol y el metanol, pero excluye a aquellos alcoholes producidos a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón y turba). Expira el 31 de diciembre de 2010.

Crédito a las Mezclas de Biodiesel (Biodiesel Mixture Credit): descuento fiscal de 50 centavos de dólar por galón de biodiesel o de un dólar por galón de agrobiodiesel (biodiesel obtenido sólo de aceites vegetales puros) o de diesel renovable (diesel proveniente de la despolimerización térmica de la biomasa), que sea mezclado con diesel fósil. Aplica para productores de estos tipos de biodiesel que comercialicen o utilicen sus mezclas con diesel para fines energéticos. Expira el 31 de diciembre de 2009.

En 2005, entró en vigor una nueva versión de la Ley de Política Energética (Energy Policy Act, EAct, en inglés), cuya sección 1501 establece una norma sobre combustibles renovables (Renewable Fuel Standard, RFS, en inglés) en la que se hace obligatoria la incorporación de 7.5 mil millones de galones (28.4 mil millones de litros) de biocombustibles a la gasolina para 2012. Además, esta ley provee una serie de incentivos fiscales a la producción y uso de biocombustibles, entre los cuales están los siguientes:

Crédito al Pequeño Productor de Etanol (Small Ethanol Producer Tax Credit): descuento fiscal al ingreso de 10 centavos de dólar por galón de etanol producido

en instalaciones con capacidad de producción anual menor a 60 millones de galones. Expira el 31 de diciembre de 2009, aunque este plazo podría ampliarse.

Crédito al Pequeño Productor de Biodiesel Agrícola (Small Agri-Biodiesel Producer Tax Credit): descuento fiscal al ingreso de 10 centavos de dólar por galón de biodiesel producido a partir de insumos agrícolas (no incluye aceites ni grasas de desperdicio), en instalaciones con capacidad de producción anual menor a 60 millones de galones. Este crédito sólo aplica a los primeros 15 millones de galones producidos durante el año fiscal correspondiente. Expira el 31 de diciembre de 2009, aunque podría prorrogarse como ha sucedido anteriormente.

Crédito a la compra de equipo surtidor de combustibles alternativos: crédito de 30% del costo del equipo, con un límite en el crédito de US\$ 30,000, para negocios, sean o no gasolineras. Para sector doméstico, se otorga un crédito de US\$ 1,000. Válido para equipo instalado después del 31 de diciembre de 2005. Expira el 31 de diciembre de 2009, con altas probabilidades de extender este plazo, pues el espíritu de la ley EPAct es el fomentar la producción y uso de combustibles alternativos no provenientes de fuentes fósiles, como los biocombustibles.

En 2006, entró en vigor el Crédito al Vehículo Automotor Alternativo Calificado (Qualified Alternative Fuel Motor Vehicle Tax Credit, en inglés), consistente en un incentivo económico para los compradores de vehículos (nuevos o modificados) que utilicen biocombustibles o cualquier otra fuente de energía renovable, previa certificación del vehículo por parte del fabricante ante el Internal Revenue Service (IRS, siglas en inglés del órgano federal recaudador de impuestos en Estados Unidos).

En marzo de 2007, los presidentes de Estados Unidos y de Brasil firmaron un memorándum de entendimiento para establecer una asociación energética con la finalidad de impulsar el uso del etanol y el biodiesel en Norteamérica y Sudamérica. Asimismo, en ese año inició un esfuerzo entre sociedades químicas, universidades, empresas e instituciones gubernamentales de ambos países para fomentar la investigación y desarrollo de los biocombustibles. De esta forma, ambos gobiernos buscan convertir al etanol en un commodity mundial.

En diciembre de 2007, entró en vigor la Ley de Seguridad e Independencia Energéticas (Energy Independence and Security Act, en inglés), cuya sección 202 estipula los porcentajes mínimos de mezcla de combustibles fósiles con biocombustibles, con lo que se reformula la norma RFS de 2005.

En 2009, para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, el gobierno federal comenzará a invertir, con un horizonte de diez años, US\$ 150 mil millones en investigación y desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y menos contaminantes, entre las cuales están los biocombustibles.

Mercados Actuales de Biocombustibles

A continuación, son analizados de forma breve los mercados hoy existentes.

Brasil

Por ser el pionero actual en la producción y uso masivos de etanol como combustible, lo que implicó contar con una infraestructura de producción de los insumos, de transformación de los mismos y de aprovechamiento en el sector transporte, Brasil es referencia obligada al tratar el tema de los biocombustibles. Esto además le ha permitido al país desarrollarse industrial y económicamente, pues en la última década la tasa de crecimiento de su producto interno bruto ha sido de un 5% promedio anual. Aunado a esto, Petrobras ha desarrollado tecnología para exploración y explotación de petróleo en yacimientos ubicados en aguas oceánicas profundas, donde ha descubierto campos petrolíferos grandes, con lo que sus reservas están entre las más grandes de América.

Debido a estos logros, Brasil se ha convertido en exportador neto de energéticos desde 2002. El volumen de las exportaciones de petróleo crudo brasileño aumentó 18.7 veces en el periodo 2000-2006; las exportaciones de derivados de petróleo duplicaron su cantidad de 1997 a 2006; y las exportaciones de etanol se incrementaron 1015% en el periodo 2001-2006. En la actualidad, la balanza comercial de combustibles con el exterior es favorable para Brasil.

Por el lado de la producción, actualmente existen cuatro refinerías con el proceso HBIO que producen diesel mejorado, 107 plantas productoras de biodiesel, y 355 ingenios azucareros (conocidos como “usinas”, al igual que las plantas de biodiesel y cualquier otra fábrica) destilan etanol para su uso como biocombustible. Para transportar al etanol hacia el Océano Atlántico desde los centros de producción, Brasil cuenta con 800 km de ductos, que conforman una red de poliductos denominados alcoholductos (álcooldutos en portugués), y está en proyecto la expansión de esta red hacia la zona central del país. Además, existen planes gubernamentales para expandir la producción de biocombustibles con tecnología brasileña hacia el resto del mundo. En la figura 1 se muestra la ubicación de las regiones cañeras y de las destiladoras de etanol en Brasil, así como la infraestructura de transporte del etanol para su exportación.

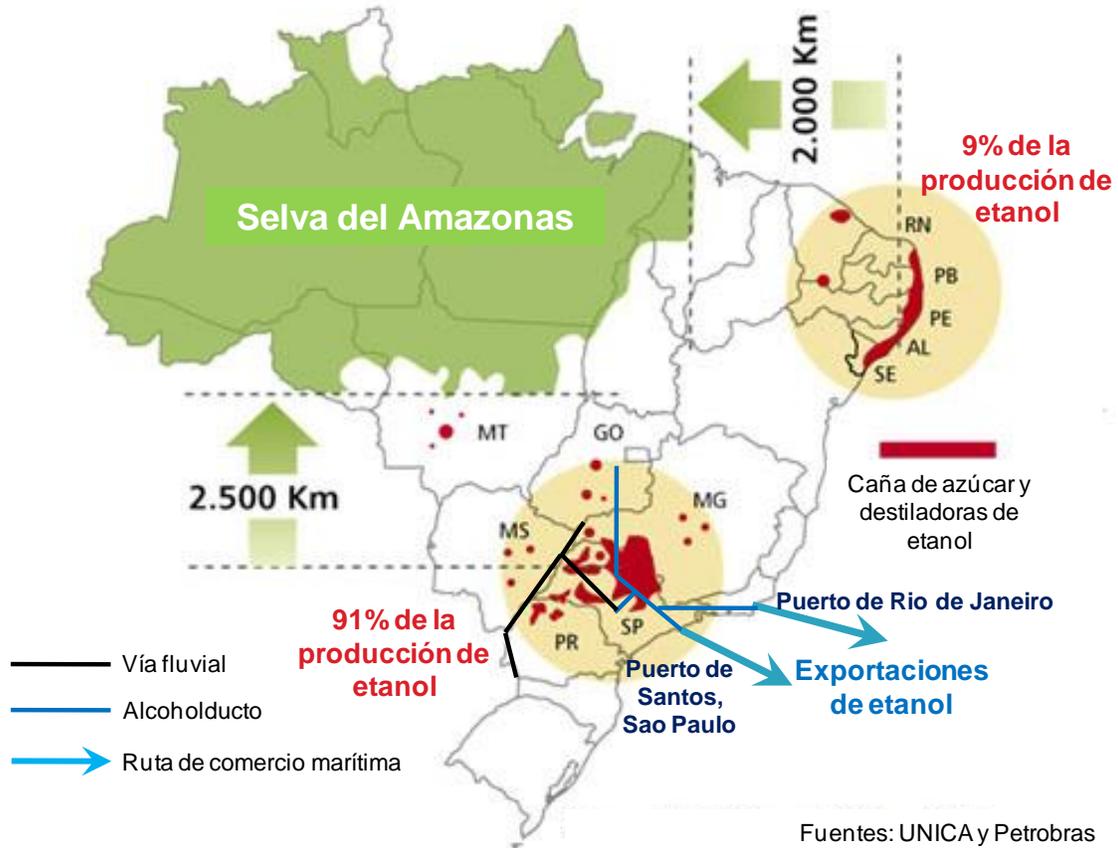
En el año 2007, Brasil produjo 21,300 millones de litros (ML) de etanol y 730 ML de biodiesel, consumió 17,767 ML de etanol, y exportó 3,532.7 ML de etanol principalmente a Europa (Suecia y Países Bajos, mayoritariamente), Estados Unidos, Trinidad y Tobago, El Salvador y Costa Rica. En 2008, produjo 24,500 ML de etanol, por lo que se mantiene como el segundo mayor productor del mismo.

Por el lado del aprovechamiento de los biocombustibles, entre las compañías fabricantes de automóviles flex-fuel están Volkswagen, Chevrolet, Ford, Fiat,

Renault, Peugeot, Mitsubishi, Honda, Toyota y Citroën, y han sido vendidos de 2003 hasta abril de 2009 unos 7.75 millones de vehículos, lo que equivale aproximadamente al 45% del parque vehicular automotor de Brasil no mayor a diez años de antigüedad. En 2008 cesó la venta de automóviles que funcionaban sólo con etanol (de tipo hidratado).

Figura 1

Regiones productoras de caña de azúcar y etanol en Brasil (2007)

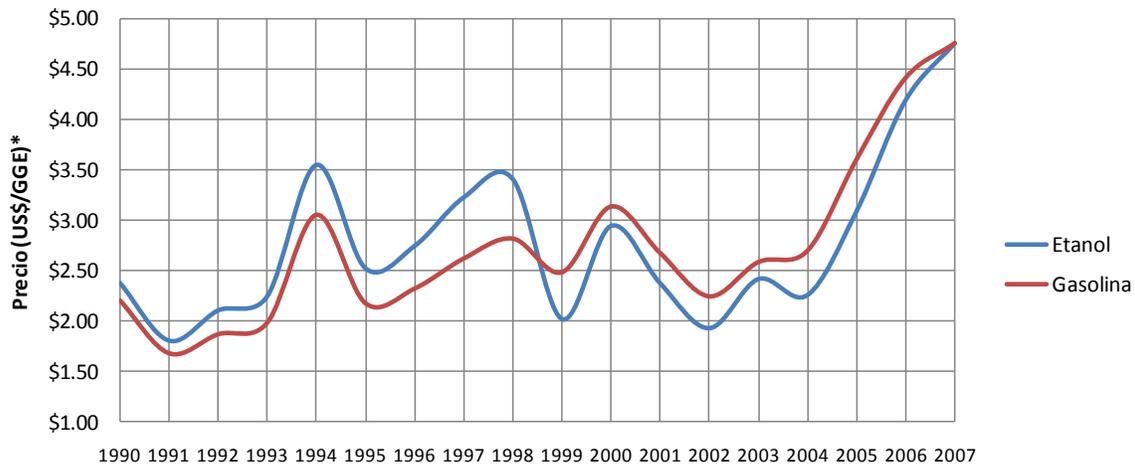


Petrobras es el principal comprador y distribuidor de etanol y biodiesel en Brasil, pues sólo produce combustibles fósiles y los mezcla para su venta en el mercado interno. Esta empresa comercializa el E25 (gasolina con 25% de etanol anhidro) y diversas mezclas de diesel fósil con biodiesel.

Además del E25, el etanol comúnmente es expendido en el mercado brasileño en forma anhidra en las gasolineras, para que el cliente pueda mezclarlo libremente con la gasolina. Los precios de la gasolina y el etanol por unidad de energía son muy cercanos entre sí, por ende el precio del biocombustible es atractivo para el consumidor final. (Ver figura 2)

Figura 2

Precios por unidad de energía de etanol y gasolina en Brasil



* Dólares corrientes, promedio anual.
GGE= Galones de Gasolina Equivalente

Año

Elaborado con datos del Balanço Energético Nacional 2008

Estados Unidos

El uso del etanol en Estados Unidos ha sido incentivado no sólo por el aumento en los precios del petróleo de la década de 1970, sino también debido a prohibiciones en la adición a las gasolinas de tetraetilo de plomo (el cual fue sacado del mercado gradualmente de 1976 a 1986 por la Agencia de Protección al Ambiente, EPA, siglas en inglés) y de metil-terbutiléter o MTBE (el cual sustituyó originalmente al tetraetilo de plomo en la década de 1980, pero fue prohibido en dos de los mayores consumidores de gasolina que son California y Nueva York el 1 de enero de 2004, y en otros estados desde 2002). La adición de etanol a las gasolinas cumple dos propósitos:

- 1) Disminuir las emisiones de contaminantes provenientes de los motores de combustión interna de gasolina mediante una adecuada oxigenación con etanol.
- 2) Aumentar el octanaje de la gasolina, propiedad del etanol conocida desde 1915.

La producción de etanol actualmente (a enero de 2009) se efectúa en 176 plantas, y están en construcción 45 destiladoras. En 2007, Estados Unidos produjo 24,600 ML de etanol, consumió 26,203 ML e importó 1,703 ML. En 2008, produjo 34,962 ML de etanol, consolidándose como el mayor productor mundial del biocombustible, pero importó 1,963 ML con lo que sigue siendo el principal importador de etanol en el mundo.

Respecto al biodiesel, en 2007, Estados Unidos produjo 1,855 ML y exportó 498 ML. En 2008, produjo 2,585 ML y exportó 1,371 ML, con lo cual se consolida como el segundo mayor productor y exportador de biodiesel.

Otro biocombustible producido en Estados Unidos es el biogás. A 2009, existen 485 plantas (con una capacidad instalada de 1,500 MW) de aprovechamiento del energético, y están en proyecto unas 520 plantas más (1,180 MW). En California se han efectuado pruebas en vehículos para suplir al gas natural por biogás.

Instituciones gubernamentales, universidades y empresas estadounidenses están desarrollando otros biocombustibles como el biobutanol (n-butanol obtenido de una fermentación especial de azúcares), DMF (2,5-dimetilfurano obtenido de ciertos azúcares mediante un proceso BTL) y serie P (mezcla de pentanos de los líquidos del gas natural, etanol y metiltetrahidrofurano para usarse en vehículos flex-fuel), entre otros más.

En el mercado energético estadounidense se comercializan los biocombustibles E85 (mezcla de 85% etanol y 15% gasolina), B20 (mezcla de 20% biodiesel y 80% diesel fósil), B2 – B5 (mezcla de diesel fósil con 2 ó 5% de biodiesel) y B99 – B100 (biodiesel puro o prácticamente puro, generalmente es comercializado como B99 ó B99.5 para poder beneficiarse de los incentivos fiscales sobre el diesel fósil por el mezclado de éste con biodiesel), además de otros a nivel local. En 2008, existían más de 1,600 estaciones de servicio que expendían E85 y otras mezclas con biocombustibles.

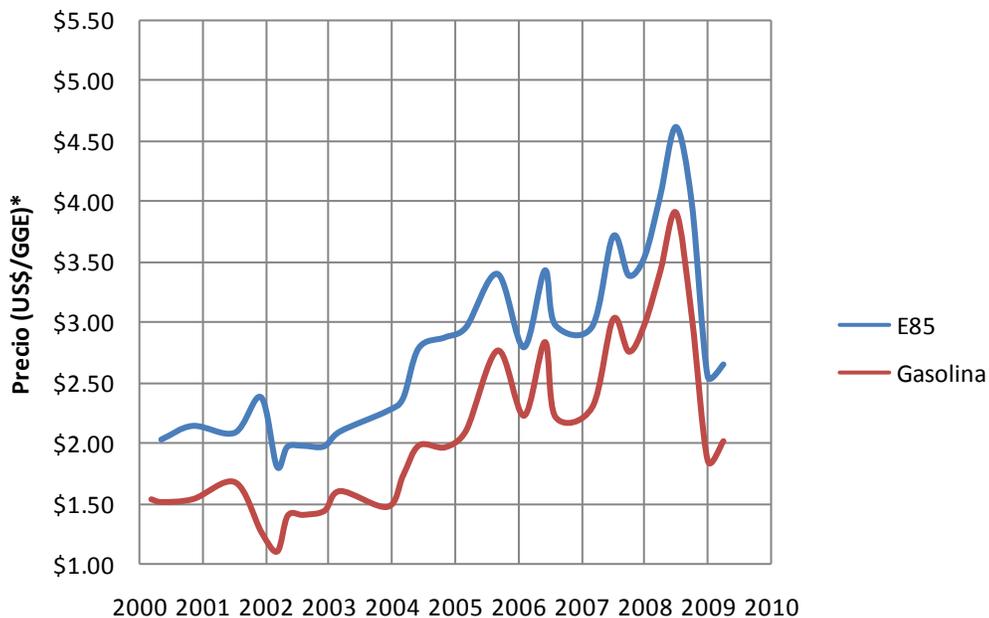
Los precios por unidad de energía de la gasolina (conocida en inglés como “gasoline” o “petrol”) y de su mezcla con etanol E85 han tenido una diferencia promedio de US\$ 0.50, desde el año 2000. En cuanto a los precios por unidad de energía del diesel fósil y de sus diferentes mezclas con biodiesel, se han mantenido similares desde 2002 excepto el de biodiesel puro (B99 – B100) que en promedio es US\$ 1.20 mayor al precio de los demás. (Ver figuras 3 y 4)

De esta forma, las mezclas de biodiesel B2 a B20 son competitivas frente al diesel fósil, por lo que se espera un aumento en su consumo a corto y mediano plazos conllevando una disminución en la dependencia estadounidense de petróleo. De 1994 a 2007 el sector transporte de Estados Unidos ha remplazado con biocombustibles 2,001 millones de galones de gasolina en total, cifra equivalente a 7,574 millones de litros o a 47.6 millones de barriles de la misma.

Los principales consumidores de etanol en Estados Unidos son los vehículos flex-fuel (conocidos como “flexible fuel vehicles”, FFV por sus siglas en inglés, o simplemente “flexifuel”), los cuales totalizaban 4.4 millones en 2007, mientras que había 1,133 gasolineras expendiendo al menos E85, aparentemente casi 4,000 vehículos flex-fuel por cada gasolinera con E85, pero éstas se encuentran distribuidas inequitativamente en todo el territorio estadounidense. El gobierno federal sigue apoyando con incentivos fiscales a las empresas y gobiernos estatales para transformar la infraestructura de uso final de la energía y así poder expandir el mercado de biocombustibles, para cumplir con los objetivos fijados por el presidente Barack Obama en su Ley de Recuperación y Reinversión Estadounidenses (American Recovery and Reinvestment Act, en inglés) del 2009.

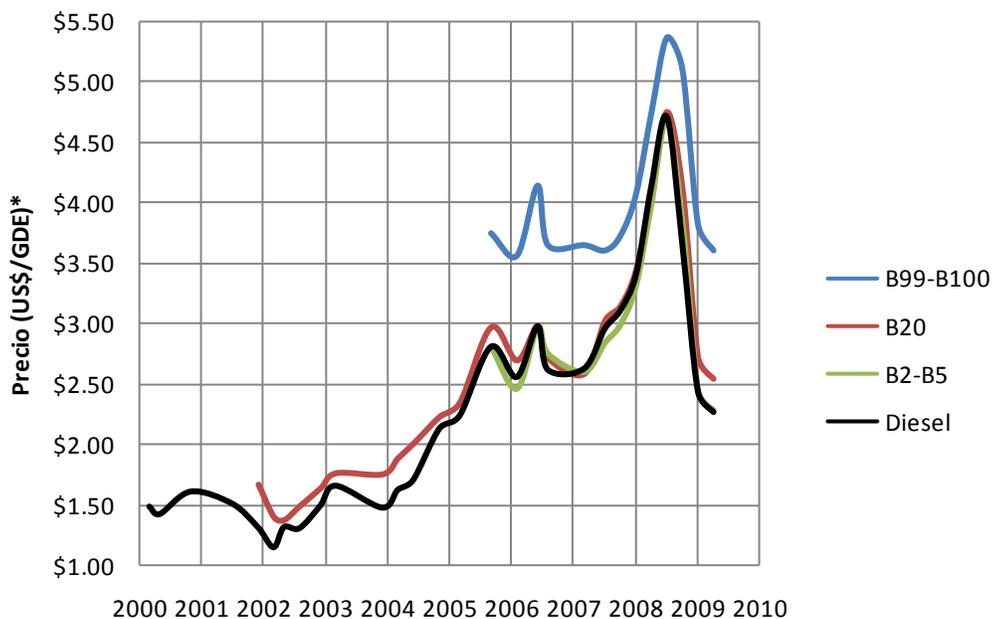
Figuras 3 y 4

Precios por unidad de energía de etanol y gasolina en Estados Unidos



*Dólares corrientes. Año Elaborado con datos de los Alternative Fuel Price Reports 2000-2009, Clean Cities (DOE)
 GGE = Galones de Gasolina Equivalente

Precios por unidad de energía de biodiesel y diesel en Estados Unidos



*Dólares corrientes. Año Elaborado con datos de los Alternative Fuel Price Reports 2000-2009, Clean Cities (DOE)
 GDE = Galones de Diesel Equivalente

Europa

El uso de biocombustibles en Europa se remonta a finales del siglo XIX, cuando estaban en desarrollo los primeros motores de combustión interna. En 1860, el inventor alemán Nikolaus August Otto usó etanol en su primer motor de combustión interna. En 1897 Rudolph Diesel probó con éxito su primer motor en Alemania, el cual utilizó aceite de maní o cacahuete. Otros inventores europeos realizaron pruebas con etanol en motores de su propia fabricación. También en Alemania fue desarrollado el proceso Fischer-Tropsch (procesos GTL y BTL) en 1926, con el cual se transformaba al carbón (muy abundante en Alemania) en petrolíferos sintéticos para compensar la escasez alemana de petróleo.

Alemania y Francia fueron los pioneros en la producción y uso de etanol como biocombustible a finales del siglo XIX, debido a sus casi nulas reservas de petróleo. Durante la Primera Guerra Mundial, Alemania utilizó etanol en la mayor parte de su parque vehicular. A raíz de una escasez de suministros de petróleo ocurrida durante esta guerra, Francia inició un programa de investigación en el Instituto Pasteur para desarrollar tecnología de obtención de etanol a partir de diversas fuentes biomásicas, entre las cuales se encontraban las algas marinas. En 1921 y 1923, el gobierno francés hizo obligatorio el mezclado de gasolinas con etanol en proporciones de 20% a 50%. Con la implementación de estas medidas, el consumo de etanol como biocombustible en Francia creció de 7.8 millones de galones (Mgal) al año (29.5 ML/año) en 1925 a 20 Mgal anuales (76 ML/año) en 1932. Este modelo francés para el etanol fue emulado en aquella época por otras naciones del mundo, entre ellas Brasil. En Inglaterra (en 1917) y en Italia (en 1924) se realizaron pruebas de obtención y uso de alcoholes mezclados con gasolina para el transporte. En Alemania, con la invención del proceso Fischer-Tropsch, comenzaron a efectuarse pruebas de producción y mezclado de alcoholes sintéticos con gasolina a finales de la década de 1920. En Finlandia, Noruega y Suecia, en la década de 1930, el etanol era producido a partir de los licores de la pulpa de papel, con lo que los costos de su papel se redujeron 20%.

En esa misma época (décadas de 1920 y 1930), otros países europeos también estuvieron interesados en desarrollar una industria de los biocombustibles, para lograr una independencia de los combustibles fósiles, pues por ser recursos no renovables existía el temor de un futuro agotamiento de los mismos. Alemania, Italia, Hungría, Polonia, Austria, Letonia y Lituania, al igual que Francia, hicieron obligatorio el uso de mezclas gasolina-etanol, mientras que Reino Unido, Suecia, Irlanda, Suiza, Alemania y Checoslovaquia (actuales República Checa y Eslovaquia) otorgaron incentivos fiscales a la producción y uso energético de estas mezclas. Debido a la crisis económica de 1929 varios países europeos mezclaron sus gasolinas con etanol para estirar sus reservas, las cuales eran mayoritariamente importadas. En la Alemania Nazi, la participación de los petrolíferos sintéticos fue del 54% y la del etanol fue de 8%, llegándose a producir 124,000 barriles de petrolíferos sintéticos al día (a inicios de 1944, cifra equivalente a 19.7 ML/día ó 7,190 ML/año), que también llegaron a ser mezclados con etanol (obtenido

principalmente de papa), cuya producción en 1937 ascendió a 197 ML/año. El máximo consumo de etanol en Europa se dio en 1935, con un parque vehicular de 4 millones de unidades que utilizaron 500 ML de mezclas gasolina-etanol. Los mayores consumidores en ese año fueron Francia (290 ML), Alemania (178 ML) y Checoslovaquia (41 ML). En el periodo 1920-1940, la sustitución de petrolíferos por etanol en Europa fue menor al 5% y por combustibles sintéticos en un 7%.

También en las décadas de 1920 y 1930, Bélgica, Francia, Italia, Reino Unido y Alemania realizaron pruebas de uso de aceites vegetales puros en motores Diesel. El 31 de agosto de 1937, G. Chavanne de la Universidad de Bruselas en Bélgica consiguió la primer patente de biodiesel en el mundo, el cual obtuvo del aceite de palma, invento que probó con éxito en un autobús en el verano de 1938.

Durante la Segunda Guerra Mundial, casi toda la industria del etanol se dedicó a producir armamento, por lo que prácticamente no hubo producción de alcohol en Europa. Asimismo, fueron empleados aceites vegetales puros sólo como combustibles de emergencia. Con el fin de la Segunda Guerra Mundial en 1945 y con los precios del petróleo muy bajos, el etanol dejó de utilizarse para fines energéticos. Tras las crisis petroleras de la década de 1970 y para cumplir los compromisos adquiridos con la firma y aprobación del Protocolo de Kyoto, el cual fue adoptado en diciembre de 1997 y entró en vigor el 16 de febrero de 2005, diversos gobiernos europeos iniciaron planes y esfuerzos tendientes a la incorporación de combustibles renovables en su mercado energético con la finalidad de disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero y su dependencia petrolera.

En la actualidad, Alemania, España, Francia, Polonia y Ucrania son los mayores productores de etanol en Europa, cuyas materias primas son principalmente trigo, remolacha (también conocida como betabel), centeno, cebada, vino o residuos de la uva vinífera, entre otros. Los principales productores de biodiesel son Alemania, Austria, Bélgica, España, Francia, Grecia, Italia, Portugal y Reino Unido, lo cual realizan mayoritariamente a partir de semilla de colza.

La Unión Europea es uno de los más grandes mercados de biocombustibles en el mundo, y en cuanto al biodiesel es el mayor mercado, pues en 2008 consumió 7,694,097 toneladas de petróleo equivalente (TPE) de biocombustibles, cifra conformada por 1,166,243 TPE (2,325 ML) de etanol, 5,774,207 TPE (7,326 ML) de biodiesel y 753,617 TPE de otros biocombustibles (aceite vegetal puro en Alemania, Irlanda y Países Bajos, y biogás en Suecia). Los países productores y consumidores de etanol en Europa están enlistados en la tabla 1, y los correspondientes a biodiesel se encuentran en la tabla 2, así como sus respectivas materias primas.

Tabla 1. Producción y consumo de etanol biocombustible en Europa (cifras de 2007 en ML/año)

País	Producción	Consumo	Materias Primas***
Alemania	394	584	Trigo, centeno, cebada, remolacha y carbón
Austria	0	44	Trigo, maíz y remolacha
Bulgaria	*	132	Maíz
Dinamarca	*	12	*
Eslovaquia	30	26	*
Eslovenia	*	1.6	*
España	348	225	Vino, centeno, trigo y remolacha
Francia	539	544	Remolacha, trigo, vino, residuos de uva vinífera y melazas
Hungría	30	18	Granos
Irlanda	0	4.7	Trigo y remolacha
Italia	60	0	Vino, remolacha, maíz y frutas (manzana)
Letonia	18	3.5	*
Lituania	20	23	Granos
Luxemburgo	*	1.7	*
Países Bajos	14	17	Remolacha
Polonia	155	170	Papa, trigo, maíz, cebada, centeno y melazas
Reino Unido	20	156	Trigo, remolacha, colza
República Checa	33	0.36	Granos
Suecia	70	362	Vino
Suiza	2.5	6.9**	Pulpa de papel
Ucrania	100**	*	Colza, trigo y melazas

* Dato no disponible.

**Estimado a partir de información y datos de las fuentes abajo citadas.

***El término "Granos" se refiere principalmente al trigo, aunque puede incluir al centeno, cebada y maíz.

FUENTE: BIOFUELS PLATFORM, *Production of bioethanol in Switzerland*
 BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM
 EUROBSERVER; Le Baromètre des Biocarburants; June 2008
 EUROPEAN BIOETHANOL FUEL ASSOCIATION (eBIO)
 ROTHKOPF, Garten; *A Blueprint for Green Energy in the Americas*; IADB, USA: 2007

Tabla 2. Producción y consumo de biodiesel en Europa (cifras de 2007 en ML/año)

País	Producción	Consumo	Materias Primas
Alemania	3,255	3,792	Colza
Austria	301	471	Colza
Bélgica	187	117	Colza
Bulgaria	10	59	Girasol y colza
Chipre	1	*	Aceites usados
Dinamarca	96	0	*
Eslovaquia	52	*	*
Eslovenia	12	17	Colza

País	Producción	Consumo	Materias Primas
España	189	334	Aceites vegetales puros y usados
Finlandia	44	*	Grasa animal y colza
Francia	982	1,489	Colza y girasol
Grecia	113	104	Girasol y colza
Hungría	8	0	Colza
Irlanda	3	6	Colza, aceites usados y grasa animal
Italia	409	179	Colza
Letonia	10	0.0026	Colza
Lituania	29	53	Colza
Malta	1	0	Aceites usados
Países Bajos	96	*	Colza
Polonia	90	0.20	Colza
Portugal	197	204	Aceites usados
Reino Unido	169	347	Colza y aceites vegetales reciclados
República Checa	69	42	Colza
Rumania	41	*	Colza y girasol
Suecia	71	128	Colza
Suiza	10	3.6**	Colza y aceites usados

* Dato no disponible.

**Estimado a partir de información y datos de las fuentes abajo citadas.

FUENTE: BIOFUELS PLATFORM, [Production of biodiesel in Switzerland](#)

BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM

EUROBSERVER; Le Baromètre des Biocarburants; June 2008

ROTHKOPF, Garten; [A Blueprint for Green Energy in the Americas](#); IADB, USA: 2007

Como puede observarse en las tablas 1 y 2, el mercado de biodiesel en Europa es 3.15 veces mayor que el de etanol, ambos consumidos en su totalidad por el sector transporte. Asimismo, el consumo de biocombustibles es mayor que su producción, por lo que Europa, en general, es un consumidor neto. Para satisfacer la demanda europea de biocombustibles, estos países importan etanol de Brasil, Paquistán, Sudáfrica y Ucrania, y biodiesel de Brasil y Estados Unidos.

Países como República Checa, Francia y Alemania transforman el etanol en etil-terbutiléter (ETBE) para utilizarlo como oxigenante de sus gasolinas. Suecia es el país europeo con el mayor consumo de mezclas gasolina-etanol, y por ende, es el único donde se comercializan autos flex-fuel. De 2001 a mayo de 2009, en Suecia se han vendido 301,054 automóviles flex-fuel de fabricación nacional (Volvo, SAAB, y marcas extranjeras como Ford y Volkswagen). A partir de 2007, en Alemania es obligatoria la mezcla de 4.4% de biodiesel con diesel fósil, y de 1.2% de etanol con gasolina (con incrementos graduales para el periodo 2007-2009 hasta alcanzarse un 3% para 2010), además que la mezcla B100 está exenta de impuestos.

En Europa se produce y consume biogás, además de etanol y biodiesel. En 2006, fueron producidos en la Unión Europea un total de 4.8989 millones de TPE (MTPE)

provenientes de rellenos sanitarios y granjas. Los principales productores de biogás son Alemania (1.6653 MTPE en 2006), Reino Unido (1.4985 MTPE), Italia (0.3832 MTPE), España (0.3197 MTPE), Francia (0.2981 MTPE), Países Bajos (0.1411 MTPE) y Austria (0.1181 MTPE). Existen plantas generadoras de electricidad a base de biogás en Europa, las cuales generaron en total 16,973.2 GWh en 2006. Además, en plantas cogeneradoras se recuperó el 50% de un total de 0.3483 MTPE de energía térmica en el mismo año, lo restante fue utilizado para la calefacción en edificios y en servicios industriales. Suecia y Suiza son los únicos países europeos que comercializan biogás puro como combustible en el sector transporte.

En septiembre de 2001 y en mayo de 2003, la Unión Europea emitió las directivas 2001/77/EC y 2003/30/EC para promover el uso de los biocombustibles y de otras fuentes renovables de energía. Ambos documentos fijaron dos objetivos para cumplirse en el año 2010:

- 1) Incrementar la participación de las fuentes de energía renovable a un 12% del consumo interno bruto, que fue de 7.1% en 2006. Cada país además tiene objetivos específicos en este rubro.
- 2) Incrementar la participación de los biocombustibles en el mercado a un 5.75% de la oferta energética, la cual fue de 2.6% en 2007.

En 2006, fue delineada la visión al 2030, año en el que la Unión Europea deberá suplir un cuarto del consumo de combustibles para el sector transporte con biocombustibles limpios y eficientes, los cuales sean mayoritariamente ofertados por una industria europea competitiva.

El 5 de junio de 2009, la Unión Europea enmendó las directivas arriba mencionadas con la emisión de la Directiva 2009/28/EC, la cual entrará en vigor el 1 de enero de 2012 y señala dos nuevos objetivos:

- 1) La participación de las energías renovables deberá ascender al 20% para el año 2020, y al 10% específicamente para el sector transporte.
- 2) La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por el uso de biocombustibles deberá ser de al menos 35% en 2012 y 50% en 2017.

Actualmente, Alemania es el único país europeo que ha cumplido los objetivos vigentes para el 2010, pues las energías renovables tuvieron en 2006 una participación del 12.6% (siendo 12.5% su objetivo específico) y los biocombustibles 7.4% en 2007. Luxemburgo, Países Bajos y Suecia están próximos a cumplir dichos objetivos. Chipre, Letonia y Eslovenia muy probablemente no los cumplan para 2010 debido a la falta de un fuerte marco legal y normativo en esta materia.

América

Además de Brasil y Estados Unidos, que son los dos mayores productores de biocombustibles en el continente americano y en el mundo, producen etanol como

biocombustible Canadá (800 ML en 2007), Colombia (284 ML), El Salvador (277 ML), Costa Rica (149 ML), Perú (30 ML), Argentina (20 ML) y Paraguay (18 ML). Otros países como Guatemala (79 ML en 2006), Cuba (45 ML), Ecuador (45 ML), México (49 ML) y Nicaragua (30 ML), también producen etanol pero no tiene un uso final como biocombustible.

En el primer conjunto de países destaca Argentina por haber comenzado a promover el uso de biocombustibles desde hace mucho tiempo (1922) a la par que Brasil. En 1928, fue realizada una prueba con éxito moviendo un Ford T con una mezcla de gasolina-etanol al 80% (E80). Durante la Segunda Guerra Mundial, se efectuaron pruebas con aceites vegetales puros en motores Diesel. En 1979, varios fabricantes de automóviles ayudaron a crear el primer programa de uso de etanol denominado Programa Alconafta. En 1985, la totalidad de la región noroeste de Argentina fue parte de este programa, y se iniciaría una segunda fase con la promoción de exportaciones de azúcar. Tras una serie de cosechas perdidas, un alto precio internacional del azúcar y condiciones desfavorables de mercado, el Programa Alconafta se extinguió a principios de la década de 1990.

En 2001, el gobierno argentino estableció el Programa Nacional de Biocombustibles (Resolución 1076/2001), junto con el Plan de Competitividad del Biodiesel (Decreto 1396/2001), con lo cual se buscaba restablecer al extinto Programa Alconafta pero con una mayor amplitud de espectro. En 2006, el gobierno decidió englobar todos estos programas y planes en una sola Ley de Biocombustibles 26-093/2006, para promover un modelo de industria de estos energéticos semejante al modelo brasileño. En 2007, Argentina además produjo 180 ML de biodiesel para su mercado interno.

Costa Rica inició el desarrollo de una industria de los biocombustibles en 1974 con su Programa de Energías Renovables, cuyo objetivo principal era disminuir la dependencia energética del exterior. En 1978, fue instalada la primer destilería de etanol a base de jugo de caña. Desde entonces, el gobierno costarricense ha fomentado la producción y uso de etanol. En cuanto al biodiesel, será producido en el corto plazo a partir de aceite de palma, el cual se usa para cocinar. Además, en Costa Rica se ha desarrollado tecnología de producción de biodiesel a partir de algas verdes.

El Salvador fue seleccionado en 2007 por Brasil y Estados Unidos para que este último contara con un suministro de etanol producido con tecnología brasileña pero con un menor costo de transporte, por estar más cerca El Salvador a Estados Unidos que Brasil. Además, este proyecto pretende desarrollar el mercado salvadoreño del etanol con la sustitución completa de los petrolíferos a mediano y largo plazos. La industria salvadoreña del biodiesel es incipiente, y tiene como insumos la soya, jatropha (piñón), higuierilla (ricino) y semilla de algodón.

Otros países americanos como Chile, Uruguay, Panamá y Cuba, han tenido experiencias con el etanol como biocombustible, aunque actualmente no lo consuman para fines energéticos. Chile y Uruguay, junto con Argentina y Brasil, a

inicios de la década de 1930 intentaron crear una industria del etanol como lo realizó Francia. Uruguay no pudo hacerlo, y aunque el gobierno de Chile obligó el uso de una mezcla E10 en 1931, sólo se logró comercializar (de 1932 hasta la Segunda Guerra Mundial) una mezcla E3 con etanol obtenido de melazas importadas de Perú. Panamá emitió una ley que obligaba la producción y uso de una mezcla E10 en 1925. En 1934, el gobierno panameño exentó de impuestos a la gasolina importada con la finalidad de ser mezclada con etanol, con lo cual se logró una competencia de precios entre la gasolina y las mezclas con alcohol, hasta que en la década de 1940 los precios del petróleo bajaron, provocando el desuso del etanol como combustible.

Cuba comenzó a utilizar etanol a principios de la década de 1920 para el sector transporte, debido a los bajos precios del alcohol de caña de azúcar producida en la isla y a la presencia de compañías estadounidenses que deseaban exportar este producto hacia el incipiente mercado del biocombustible en Estados Unidos. En los años 1920 fue comercializada una mezcla E20 llamada “Espíritu”, la cual dio paso a una gran variedad de mezclas de etanol con gasolina importada de Estados Unidos, destacando entre ellas en la preferencia del consumidor de los años 1930, una mezcla llamada “Nofuco” consistente en 64% etanol y 22% gasolina con benceno, gasóleo y otros aditivos. Durante la Segunda Guerra Mundial, el gobierno cubano obligó la producción y uso de una mezcla E65 en 1940, y una mezcla E75 en 1943. Después de esta guerra, siguió empleándose el etanol para el transporte hasta después de la Revolución Cubana de 1959, ya que la Unión Soviética (URSS, siglas en español, actual Rusia) en la década de 1960 inició el envío de gasolina y otros petrolíferos a su aliado caribeño. Con la caída de la URSS en 1992, Cuba sustituyó los petrolíferos soviéticos con petróleo mexicano (década de 1990) y venezolano (década del 2000), además de iniciar la exploración de su talud oceánico en el Golfo de México en busca de petróleo. No obstante lo anterior, desde los años 1980 varias instituciones cubanas han efectuado estudios y pruebas de obtención y uso de etanol y biodiesel (éste desde 1992 y es obtenido de jatropha) como combustibles industriales y para el transporte, con la finalidad de disminuir su dependencia del petróleo extranjero.

En América Latina, el etanol es obtenido principalmente del jugo de la caña de azúcar, aunque en Paraguay también se le produce a partir de trigo, maíz y cassava (yuca o mandioca). En Canadá, el 73% del etanol es producido a partir de maíz, el 17% de trigo y el 3% de cebada, y el biodiesel es obtenido de canola y grasas animales.

Asia

La producción y uso de biocombustibles en Asia se remonta a inicios del siglo XX, pues en la década de 1930 Filipinas, China e Indochina Francesa (actuales Vietnam, Cambodia y Laos) comercializaban mezclas combustibles con etanol. En Filipinas se usaba una mezcla de 75% gasolina, 5% queroseno y 20% de etanol de caña de azúcar, la cual era conocida como “gasonol”, mientras que en China se vendía una mezcla de 40% benceno, 5% queroseno y 55% etanol, denominada “benzolute”. En

Indochina Francesa se utilizaba una mezcla E10 a fines de la década de 1930, y en 1941 se llegó a comercializar una mezcla E50. Japón (1938) e India (1940) obligaron el mezclado de gasolina con etanol en proporciones del 5% en Japón y 20% en India.

Durante la Segunda Guerra Mundial, en China e India fue usado etanol puro en vehículos militares como combustible de emergencia a falta de petróleo, y realizaron pruebas con aceites vegetales y sus derivados para poderlos emplear en lugar del diesel. Asimismo, Japón usó etanol y metanol puros o parcialmente mezclados con gasolina y otros petrolíferos, para mover la mayor parte de sus jeeps, tanques, camiones militares, barcos de guerra y aviones de combate, y además empleó aceite de soya refinado como combustible en uno de sus barcos de guerra. Los biocombustibles dejaron de producirse y usarse a fines de la década de 1940 e inicios de la década de 1950 debido a los bajos precios del petróleo. Indochina Francesa dejó de usar etanol debido a la destrucción de toda su industria alcoholera durante la guerra. A inicios de los años 1950, India prohibió el empleo de granos y tubérculos en la obtención de etanol para evitar el desvío de alimentos hacia la producción de combustibles. Tras las crisis petroleras de 1973 y 1979, surgieron iniciativas gubernamentales para introducir los biocombustibles en sus mercados energéticos internos.

En la actualidad, los mayores productores de etanol en Asia son China (1,840 ML en 2007), Tailandia (300 ML), India (250 ML), Turquía (60 ML) y Paquistán (35 ML). Otros productores de etanol son Japón, Indonesia y Filipinas. Los principales países productores de biodiesel son Indonesia (760 ML en 2007), China (338 ML) y Malasia (150 ML). Otros países productores de biodiesel son Filipinas, Japón, Tailandia e India.

China es el tercer mayor productor de etanol en el mundo y es el segundo mayor productor de biodiesel en Asia. El 80% del etanol producido en China proviene del maíz, el restante es obtenido de trigo, sorgo, cassava (yuca o mandioca) y patata dulce (camote). Por su parte, el biodiesel es producido a partir de aceites de cocina usados y grasas animales, pues debido a los hábitos de cocina chinos se producen anualmente cerca de 3 millones de toneladas de estos aceites y grasas. Debido a la baja calidad del biodiesel, no se le usa para mezclarlo con diesel fósil para el transporte, actualmente es utilizado como solvente industrial y como un aditivo para el carbón en plantas termoeléctricas. Actualmente existen proyectos para producir etanol de rastrojos agrícolas y biodiesel de *Jatropha* (piñón).

La industria actual de biocombustibles en China comenzó a mediados de la década de 1980, cuando el gobierno chino lanzó un programa temporal para la utilización de etanol como biocombustible, pues existían excedentes agrícolas y tenían que ser aprovechados. En 2001, el gobierno impulsó un programa del etanol en el cual se establecieron incentivos fiscales para la producción del biocombustible. En el 11° Plan Nacional 2006-2010 emitido en 2005, están incluidas por primera vez las metas de desarrollo del mercado de biocombustibles en China. De acuerdo a este plan, en 2010 la producción de etanol deberá llegar a las 3 millones de toneladas anuales

(casi 4,000 ML/año) y la de biodiesel a 300,000 ton anuales (340 ML/año), y además deberá comercializarse la mezcla E10 en todo el país. Para 2020, la producción de etanol deberá ser de 10 millones de toneladas anuales (cerca de 13,000 ML/año) y de 2 millones de toneladas (más de 2,000 ML/año) para el biodiesel, además deberá suplirse el 15% de los combustibles fósiles en el sector transporte con biocombustibles con lo cual deberán introducirse las mezclas E20, E85 y B5 ó B10. En 2006, el subsidio derivado de este plan fue de 1,373 yuanes (aproximadamente US\$ 180) por cada tonelada de etanol producido, y se destinaron 1,100 millones de yuanes (US\$ 143 millones) a Beijing para desarrollar vehículos automotores a base de biocombustibles. China exporta actualmente etanol a Japón, Corea del Sur, Singapur y Estados Unidos, aunque en los tres primeros países el etanol chino no es empleado como biocombustible.

China es el segundo mayor mercado de automóviles en el mundo, por lo que en 2005, el gobierno obligó el mezclado de gasolinas con etanol en un 10% para el transporte de todo el país. En 2006, la Comisión Nacional de Reforma y Desarrollo (National Development and Reform, NDRC, en inglés) promovió una ley sobre el uso extensivo del etanol en automóviles, esfuerzo que fue apoyado por las dos principales compañías petroleras chinas China Petroleum and Chemical Corporation (SINOPEC, siglas en chino) y China National Petroleum Corporation (CNPC, siglas en inglés). Esta ley, a través de la NDRC, pidió usar la mezcla E10 a las zonas más urbanizadas del país como lo son las provincias de Helongjiang, Jilin, Liaoning, Henan y Anhui, a 27 ciudades de las provincias de Hubei, Shandong, Hebei y Jiangsu, y a las ciudades de Beijing, Tianjin y Shanghai. De esta forma, el consumo de gasohol en estas provincias y ciudades fue de casi el 20% del consumo total de combustibles para transporte.

Indonesia ha sido un país productor de petróleo miembro de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP, siglas en español, u OPEC en inglés), pero debido al agotamiento de sus reservas y a la caída de su producción, se convirtió en un país importador neto de petróleo, lo que produjo su separación de la OPEP en 2008. Previendo esto, en 2006 el gobierno indonesio emitió una serie de decretos tendientes a crear un mercado de biocombustibles, con el objetivo de incorporarlos a la oferta energética interna en un 5% para el año 2025. El etanol es producido a partir de melazas de caña de azúcar y se planea obtenerlo también de cassava. El biodiesel se fabrica a partir de aceite de palma, insumo del que es el mayor productor en el mundo desde 2007. Existen proyectos para fabricar biodiesel a partir de aceite de coco y jatropha. La empresa petrolera estatal Pertamina (Perusahaan Tambang Minyak Negara, en bahasa indonesio) comercializa en el mercado interno las mezclas B5 (conocida como Biosolar) y E5 (ofertada como Biopertamax). Indonesia exporta etanol a Japón, y biodiesel a China, Europa y Estados Unidos.

Japón está comenzando a desarrollar una industria de los biocombustibles, debido a sus compromisos con el Protocolo de Kyoto y al incremento en los precios del petróleo, del cual es el tercer mayor consumidor del mundo y uno de los principales importadores. En 2002, fue publicada la Estrategia Nacional de la Biomasa

(Biomass Nippon Strategy, en inglés), entre cuyos objetivos está el impulso a la industria de la energía alternativa. En 2005, el Banco Japonés para la Cooperación Internacional (Japan Bank for International Cooperation, en inglés) firmó un acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, MAPA, en portugués) de Brasil para establecer lineamientos de un programa bilateral de biocombustibles con el que Japón los importaría de aquel país. A partir de entonces, varias empresas japonesas invierten en el sector productivo de Brasil para desarrollar cultivos y tecnologías que permitan disminuir el precio del etanol y el biodiesel brasileños. También en 2005, Petrobras y la compañía japonesa Nippon Alcohol Hanbai (NAH) se asociaron para crear una empresa llamada Nippon Ethanol, con el objetivo de importar etanol brasileño. En 2006, la Ley sobre el Control de la Calidad de la Gasolina y Otros Combustibles (Law on the Quality Control of Gasoline and Other Fuels, en inglés) establece el uso de una mezcla de gasolina con 3% de etanol (E3) en el sector transporte. Japón ha planteado como objetivos para el 2010 la introducción de 210 ML anuales de etanol en forma de ETBE como oxigenante de gasolinas, además de 500 ML anuales de etanol para sustituir combustibles fósiles. Actualmente, el etanol es producido a partir de melazas de caña de azúcar, trigo, maíz, sorgo y residuos de madera, y el biodiesel es obtenido de colza. Existen proyectos para obtener etanol de residuos agrícolas y biodiesel de aceite de palma y aceites de cocina usados.

Paquistán produce etanol a partir de caña de azúcar, el cual exporta a la Unión Europea y a Suiza, compitiendo con el etanol de Brasil. El desarrollo del mercado de etanol en Paquistán comenzó en 2005 cuando la Unión Europea impuso un arancel al etanol paquistaní, con lo cual disminuyeron las exportaciones hacia Europa y produjo excedentes del alcohol en el país. De esta forma, la Asociación de Ingenios Azucareros de Paquistán (Pakistan Sugar Mills Association, PMSA, en inglés) cabildeó con el gobierno para implementar medidas tendientes a crear un mercado interno del etanol. En 2007, la compañía petrolera estatal Pakistan State Oil (PSO) y el Instituto de Hidrocarburos de Paquistán (Hydrocarbon Institute of Pakistan, en inglés), por instrucción del gobierno paquistaní, iniciaron un proyecto piloto para introducir y fomentar el uso de mezclas de gasolina con 10% de etanol (E10). PMSA sigue presionando a PSO para comercializar E10 en todo el país. Fueron exportados 34 ML de etanol en 2007 principalmente hacia Europa. No existen planes de producción de biodiesel en Paquistán.

India produce etanol a partir de azúcar y melazas de la caña, y biodiesel de jatropha. En 2002, el gobierno comenzó a emitir planes para introducir biocombustibles al mercado energético nacional. En ese mismo año, firmó un memorándum de entendimiento con el gobierno brasileño para intercambiar tecnología de producción de etanol y biodiesel con el país sudamericano. En 2006, el mezclado de gasolinas con 5% de etanol se hizo obligatorio en todo el país. A pesar de la falta de leyes y un mayor impulso por parte del gobierno hindú, el país se ha consolidado como uno de los mayores productores de etanol en Asia, pues es una potencia mundial en producción de azúcar.

Malasia produce biodiesel a partir del aceite de palma, del cual era el mayor productor en el mundo hasta 2007 cuando fue superado por Indonesia. En 2006, fue implementada la Política Nacional de Biocombustibles para fomentar el uso local de biodiesel, así como su exportación. En 2008, el Ministerio de la Industria de la Plantación y Commodities (Ministry of Plantation Industries and Commodities, en inglés, Kementerian Perusahaan Perladangan dan Komoditi, KPPK, en bahasa malayo) puso en marcha una ley en la que se hace obligatoria la mezcla de diesel fósil con 5% de aceite de palma, no biodiesel, conocida como Envo Diesel. No tiene planes de producir ni de utilizar etanol como biocombustible. Exporta biodiesel a Estados Unidos, la Unión Europea y Japón.

Tailandia es el tercer mayor productor de aceite de palma en el mundo, insumo que mayoritariamente utiliza para producir biodiesel, junto con el aceite de cocina usado, y existen proyectos para fabricar biodiesel de jatropha. El 90% del etanol tailandés es producido a partir de melazas de la caña de azúcar y el 10% restante proviene de la cassava, insumo que incrementará este porcentaje en el corto y mediano plazos. El etanol comenzó a producirse desde 1981 y el biodiesel desde 1985. Actualmente, las mezclas E10 y B2 son comercializadas en todo su territorio, con la E10 teniendo una participación de mercado del 20%. Las compañías petroleras estatales PTT (siglas en tailandés) y Bangchak Petroleum Public Company Ltd introdujeron al mercado las mezclas E20 (en enero de 2008) y B5 (en 2007), además esta última compañía expende la mezcla E85. Ford, Toyota, Honda y Nissan venden automóviles compatibles con la mezcla E20. Tailandia exportó 14.4 ML de etanol en 2007 hacia Singapur, Filipinas, Taiwán, Australia y Europa.

Filipinas es un importador neto de etanol, el cual es obtenido de caña de azúcar, y un gran productor de biodiesel de aceite de coco, insumo del que es una potencia productiva. En 2005, el gobierno filipino lanzó el Programa de Bioetanol, del cual derivó la Ley de Biocombustibles (Biofuels Act, en inglés) en la que se establece la obligación de mezclar gasolina con 5% de etanol y diesel con 1% de biodiesel. En 2006, Ford Filipinas comercializó en el mercado interno el primer vehículo flex-fuel filipino, convirtiéndose esta fábrica en el principal centro tecnológico flexifuel de Ford en la región Asia-Pacífico, de donde planea exportar estos vehículos a Sudáfrica y otros países asiáticos. La compañía filipina SEAOIL comercializa en todo el país las mezclas E10 (desde agosto de 2005) y B1 (mezcla de diesel fósil y 1% de éster metílico de aceite de coco o biodiesel de coco, expendida bajo el nombre de BioXceed Diesel desde mayo de 2007). Las exportaciones de biodiesel de coco fueron de 500,000 L en 2007 y tuvieron como destino Alemania, China, Taiwán, Corea del Sur y Malasia.

Turquía produce etanol de remolacha y biodiesel a partir de aceites vegetales. Actualmente es un importador neto de estas materias primas, pero existen proyectos para incrementar la producción de los mismos. Como requisito para la incorporación de Turquía a la Unión Europea, el gobierno ha modificado sus leyes para permitir el uso de biocombustibles. Exporta toda su producción a Europa.

África

La historia de los biocombustibles en África inicia en la década de 1910, durante la Primera Guerra Mundial, cuando debido a una escasez de petróleo en Sudáfrica, el gobierno colonial británico desarrolló y comercializó una mezcla E60 (con etanol de melazas de caña de azúcar) llamada “natalite” para uso en el transporte. Posteriormente, en la década de 1940, varios países europeos dictaron leyes obligando la producción y uso de mezclas gasolina-etanol y efectuaron pruebas con aceites vegetales en motores Diesel, todo esto se implementó para darle una cierta independencia energética a sus colonias africanas. Además, a inicios de los años 1940, en Zaire se realizaron pruebas con biodiesel (recién inventado por G. Chavanne) por parte de Bélgica, metrópoli de este país colonial conocido en ese entonces como Congo Belga. Tras el fin de la Segunda Guerra Mundial, con la independencia de los países africanos y una baja de los precios del petróleo, la producción y uso de biocombustibles cesó en África.

En la actualidad, los únicos países que producen etanol para uso energético son Etiopía, Malawi y Sudáfrica. Etiopía lo obtiene de la fermentación del jugo de la caña de azúcar y lo mezcla con queroseno en un 50% (K50, sigla en inglés) para uso doméstico (cocción de alimentos, iluminación y calefacción). Malawi produce etanol a partir de las melazas del procesamiento de la caña de azúcar, y lo ha mezclado con gasolina en un 12% (E12) desde 1982 para uso en el sector transporte.

A diferencia de estos países, Sudáfrica ha producido etanol de forma sintética desde la década de 1950, mediante los procesos GTL y BTL. La empresa sudafricana SASOL (Suid-Afrikaanse Steenkool en Olie Ltd., en afrikaans) desarrolló esta tecnología en 1955, y es pionera en la producción de combustibles sintéticos (conocidos en inglés como “synfuels”). La empresa estatal Petroleum, Oil and Gas Corporation of South Africa Ltd., mejor conocida como PetroSA, también produce combustibles sintéticos desde 1987, entre los que se encuentran el etanol anhidro y otros alcoholes como el metanol. PetroSA exporta actualmente 150,000 ton de alcoholes GTL anhidros a Europa, Estados Unidos, el Caribe y Asia. Asimismo, la empresa Illovo Sugar produce etanol a partir de la fermentación de las melazas de la caña de azúcar. Sin embargo, el mercado actual para el uso del etanol como biocombustible es limitado.

Sudáfrica utilizó mezclas de gasolina con etanol de caña de azúcar desde la década de 1920 hasta la de 1960, dejó de hacerlo debido a los bajos precios del petróleo, el cual era importado principalmente de Irán. De 1998 a 2002 el gobierno sudafricano emitió una serie de políticas encaminadas a incentivar el uso de biocombustibles en el sector transporte. En 2004, entró en vigor la Ley de Enmienda de los Productos Petrolíferos (Petroleum Products Amendment Act, No. 58, en inglés) en la que se obliga a los productores a fabricar petrolíferos a partir de materia vegetal. Durante 2005, fueron establecidos descuentos a productores de biodiesel y exenciones fiscales totales a pequeños productores, así como subsidios al uso de etanol y biodiesel. En mayo de 2007, el gobierno de Sudáfrica hizo pública su Estrategia Industrial de Biocombustibles Nacionales (National Biofuels Industrial

Strategy, en inglés), donde plantea el desarrollo de la industria de los biocombustibles para alcanzar una penetración de mercado del 2% de los combustibles usados en el sector transporte (cifra equivalente a 400 ML/año) en el año 2020. Este documento también recomienda que en una primera fase las mezclas de biocombustibles con combustibles petrolíferos, sean fósiles o sintéticos, alcancen niveles de 2% para el biodiesel (B2) y 8% de etanol (E8). Actualmente (2008), Sudáfrica tiene 10 proyectos en construcción conformados por 3 plantas productoras de biodiesel (de canola, soya y girasol) y 7 de etanol (de caña de azúcar, remolacha y maíz).

En países como Malawi y Sudáfrica también es producida y comercializada una mezcla de etanol con celulosa y agua denominada “gelfuel”, el cual es un gel combustible empleado en el sector doméstico para la cocción de alimentos. Se le ha usado como sustituto del gas licuado de petróleo (LP) en Malawi y del queroseno en Sudáfrica. Aunque tiene varias ventajas en materia de seguridad y transporte, su precio no es competitivo con el del queroseno y es 25% mayor respecto al precio del etanol líquido, para el que se han desarrollado estufas eficientes y baratas.

El biodiesel no es producido actualmente en África, sin embargo existen planes y programas para poderlo fabricar en un futuro no lejano.

Australia

Los biocombustibles en Australia comenzaron a producirse y usarse desde 1927, cuando en la provincia nororiental de Queensland fueron comercializadas algunas mezclas de gasolina con etanol de caña de azúcar para el sector transporte. En 1933, el gobierno obligó el mezclado de gasolina con 10% de etanol, lo cual dejó de hacerse en 1957. En la década de 1990 volvió a mezclarse la gasolina con etanol en las provincias orientales. En 2007, el país-continente produjo 140 ML de etanol a partir de caña de azúcar, trigo y sorgo. También en ese año, se comercializó el primer vehículo flex-fuel: el SAAB 9-5 BioPower. En cuanto al biodiesel, se le produce a partir de grasas animales, aceites usados, aceites vegetales puros, soya y semilla de la planta de opio (ésta es cultivada en Tasmania). Actualmente, en 2009, existen 3 plantas productoras de etanol con una capacidad instalada de 243 ML anuales, y 7 plantas de biodiesel capaces de producir 245 ML al año. El gobierno australiano pretende a mediano plazo exportar biocombustibles a Japón, Filipinas, Tailandia, Malasia y Estados Unidos. Además, existen plantas eléctricas a base de biogás con una capacidad de producción nacional de 218 MW en 2007, año en el cual se generaron 642 GWh de electricidad (equivalente a 55,238 TPE ó 0.28% del total de generación eléctrica).

Mercados Futuros de Biocombustibles

Europa

Países como Rusia, Ucrania y Finlandia están planeando producir etanol para su uso como biocombustible, pues ya cuentan con una producción de esta sustancia pero se le destina a usos no energéticos. Estos países prevén exportar dicha producción a Europa y, en el caso de Rusia, también a China, compitiendo directamente con el etanol de Brasil y Paquistán.

Asimismo, respecto al biodiesel, Rusia y Ucrania planean producirlo para exportarlo a Alemania y el resto de la Unión Europea, para tratar de competir con la producción local.

América

Existen otros países americanos con un potencial de desarrollo de los biocombustibles como Bolivia, Chile, Ecuador, México, Uruguay, Venezuela, Cuba, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, Nicaragua, Panamá y, Trinidad y Tobago. En pleno conocimiento de ese potencial, los gobiernos de estos países han comenzado a implementar programas para producir y usar biocombustibles mezclados con la gasolina y el diesel. Existen incluso proyectos en los que participan empresas estadounidenses y brasileñas, como son los casos de Chile, Bolivia y Guatemala, entre otros. El caso de México será tratado más adelante.

El caso de Guatemala destaca por ser el mayor productor de etanol entre los países mencionados en el párrafo anterior. En 2005, los gobiernos de Guatemala y Brasil firmaron un acuerdo mediante el cual el país centroamericano recibirá apoyo tecnológico para crear un mercado interno de los biocombustibles. En abril de 2005, la Unión Europea impuso una tarifa arancelaria al etanol de Paquistán y Guatemala, por lo que las exportaciones de etanol guatemalteco hacia Europa disminuyeron considerablemente. A partir de entonces, Guatemala ha recibido inversiones por parte de empresas brasileñas para la construcción de más plantas destiladoras de etanol (obtenido a partir de melazas de caña de azúcar) y para la creación de una infraestructura de uso final del alcohol como energético, pues Brasil planea exportar automóviles flex-fuel hacia el mercado guatemalteco.

Venezuela, aunque es uno de los mayores productores de petróleo en el mundo y es miembro de la OPEP, tiene planes para la incorporación de etanol a las gasolinas. Por esta razón, la empresa petrolera estatal de este país (Petróleos de Venezuela, S.A., mejor conocida como PDVSA) y la de Brasil (Petrobras) están planeando la construcción de un ducto por el cual fluya etanol brasileño hacia territorio venezolano, además de que Petrobras desea desarrollar un mercado de etanol en Venezuela en sociedad con PDVSA en el mediano plazo.

Asia

Kazajstán, Corea del Sur, Brunei, Singapur, Taiwán y Vietnam están elaborando planes para producir biocombustibles en el corto o mediano plazos. Kazajstán planea producir etanol para exportarlo a la Unión Europea. Corea del Sur produce biodiesel de soya pero no cubre sus necesidades internas por lo que importa aceite de soya de Argentina y Estados Unidos. Desde 2006, se comercializan las mezclas B5 y B20, y está en prueba la introducción de las mezclas E3 y E5 con etanol importado, pues su producción es muy pequeña. Singapur está construyendo 5 plantas de biodiesel a base de aceite de palma, y las empresas Daimler Chrysler y Shell iniciaron pruebas de biodiesel en automóviles en 2007. Taiwán produjo 3.8 ML de biodiesel en 2007 a partir de aceites de cocina usados, y fabrica etanol de caña de azúcar para la industria de bebidas. Desde 2006, son comercializadas en el mercado taiwanés las mezclas E3 y de la B1 a la B20.

África

Benin, Burkina Faso, Costa de Marfil, Guinea Bissau, Mali, Mozambique, Nigeria, Senegal, Suazilandia, Zambia y Zimbabwe están planeando producir etanol a partir de diversos insumos agrícolas como la caña de azúcar, la cassava y el fruto del marañón, para poderlo exportar a Europa. En 2007, Nigeria, Senegal y Costa de Marfil importaron etanol de Brasil para comenzar a mezclarlos con sus gasolinas, con la finalidad de suplir al tetraetilo de plomo por etanol como antidetonante, pues tal aditivo es empleado actualmente en sus gasolinas en lugar del metil-terbutiléter (MTBE) usado en el resto del mundo. Otros países africanos podrían sustituir al tetraetilo de plomo por etanol, como es el caso de Kenia, Egipto, Sudán, Mauricio, Zimbabwe, Zaire y Suazilandia.

De entre los países mencionados arriba destacan Mozambique y Zambia. Mozambique es considerado “el Brasil de África” por su ubicación respecto al Ecuador, lo que define su clima, y porque su potencial de producción de caña de azúcar es similar al de Brasil, además de compartir el idioma portugués. Zambia es importante porque en el periodo 1980-1992 estableció un mercado de etanol, mezclándolo con sus gasolinas, por lo que tiene experiencia en biocombustibles.

Respecto al biodiesel, Burkina Faso, Mali, Mozambique, Níger, Nigeria, Sudáfrica, Tanzania, Togo y Zambia están implementando programas tendientes a la producción de biodiesel. Existen proyectos de empresas europeas y brasileñas (entre ellas Petrobras), para crear una industria del biodiesel en el continente africano, cuyos insumos principales serían la jatropha y la semilla de algodón.

Oceanía

Islas Marshall, Vanuatu, Samoa, Fiji, Islas Salomón, Kiribati y Papúa Nueva Guinea han establecido un mercado interno de aceite de coco para uso energético, y además lo comercian entre ellos. La producción total de aceite de coco en esta región es de 126.7 ML al año, siendo los principales productores Papúa Nueva Guinea (53.91 ML), Vanuatu (30.51 ML), y Fiji (17.47 ML). Todos estos países junto con algunos países asiáticos (India, Indonesia, Malasia, Filipinas, Sri Lanka, Tailandia y Vietnam) y del Pacífico (Micronesia) conforman la Comunidad del Coco de Asia y del Pacífico (Asian and Pacific Coconut Community, APCC, en inglés).

Entre estos países destaca Vanuatu, pues es el pionero en el uso de aceite de coco como sustituto del diesel fósil en el Pacífico. En el mercado interno es comercializada una mezcla de 80% aceite de coco y 20% de queroseno, mezcla denominada "Island Fuel 80", cuyo precio por litro es 30 centavos de dólar estadounidense menor que el precio del diesel fósil, el cual importan. Además, Vanuatu es el país del Pacífico con el mayor descuento sobre impuestos por el uso de biocombustibles: US\$ 0.05/L respecto a US\$ 0.28/L en los demás países isleños. En Islas Marshall son comercializados aceite de coco puro y una mezcla de diesel con 50% de este aceite, cuyos precios son inferiores al del diesel fósil. Fiji es el país del Pacífico con mayor potencial de producción de biocombustibles, pues es uno de los mayores productores de aceite de coco, puede obtener etanol de caña de azúcar (es exportador neto de azúcar hacia la Unión Europea), y puede fabricar biodiesel a partir de aceite de coco y de aceites usados. En Islas Salomón se expende una mezcla similar a la de Vanuatu denominada "cocoline", mientras que en Papúa Nueva Guinea es comercializado aceite de coco puro y algunas de sus mezclas con diesel, además experimentos realizados en este país han sugerido un contenido máximo de 40% de aceite de coco en estas mezclas para el consumo interno, porcentaje por arriba del cual se ha recomendado el uso de biodiesel de coco. Otros países con potencial de uso del aceite de coco como biocombustible son Micronesia, Tonga, Tuvalu, Islas Cook y Palau.

En cuanto al etanol, estos países del Pacífico estiman que es viable producirlo localmente cuando el precio del petróleo en el mundo sea de al menos US\$ 100 por barril, y sólo se construirían pequeñas instalaciones con una capacidad de hasta 10 ML/año. Los mayores importadores de petróleo son Papúa Nueva Guinea y Fiji, seguidos de todos los demás países isleños. Por esta razón, han comenzado a realizar planes de sustitución de petróleo extranjero con biocombustibles, principalmente aceite de coco y etanol (sólo en Fiji y Papúa Nueva Guinea).

Nueva Zelanda planea producir biodiesel y etanol en el corto plazo, pues en 2007 el gobierno neozelandés fijó como objetivos la introducción de biocombustibles para cubrir el 0.53% del mercado de energéticos en 2008 y el 3.4% en el 2012. A partir de 2007, es comercializada la mezcla E10 en la ciudad de Auckland.

México

El uso de biocombustibles en México es casi inexistente aún, no obstante el país produce etanol para su uso en bebidas alcohólicas, productos farmacéuticos y alimenticios, y como solvente y reactivo industriales. El etanol producido actualmente proviene del jugo de la caña de azúcar y se obtiene en algunos ingenios azucareros, a través de la fermentación del jugo y la destilación.

Sin embargo, existe una planta de generación de electricidad a partir del uso de biogás producido en un relleno sanitario ubicado en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, la cual tiene una capacidad instalada de generación de 12.72 MW y puede producir 40,000 MWh anuales (3,442 TPE/año). Con la quema de biogás para producir electricidad, esta planta, primera en América Latina, ha generado cerca de 202,500 MWh de energía eléctrica (equivalente a 17,423 TPE) desde el inicio de su operación (2003) hasta 2007, cuya producción ha sido destinada para abastecer el 40% del alumbrado público de la zona metropolitana de Monterrey.

El gobierno de México inició una serie de medidas tendientes a crear un mercado interno de los biocombustibles, para elevar los niveles de eficiencia en el uso final de la energía y para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. El 22 de agosto de 2005 fue publicada la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, en la cual se fundan los lineamientos para el aprovechamiento futuro de la caña de azúcar como energético. Esta ley menciona la creación del Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Caña de Azúcar (CICTCAÑA), el cual elaborará estudios y proyectos de desarrollo y aprovechamiento del etanol como carburante y oxigenante de gasolina a partir de mieles, así como del aprovechamiento del bagazo de caña con fines de industrialización para la cogeneración de energía y la obtención de gas sintético.

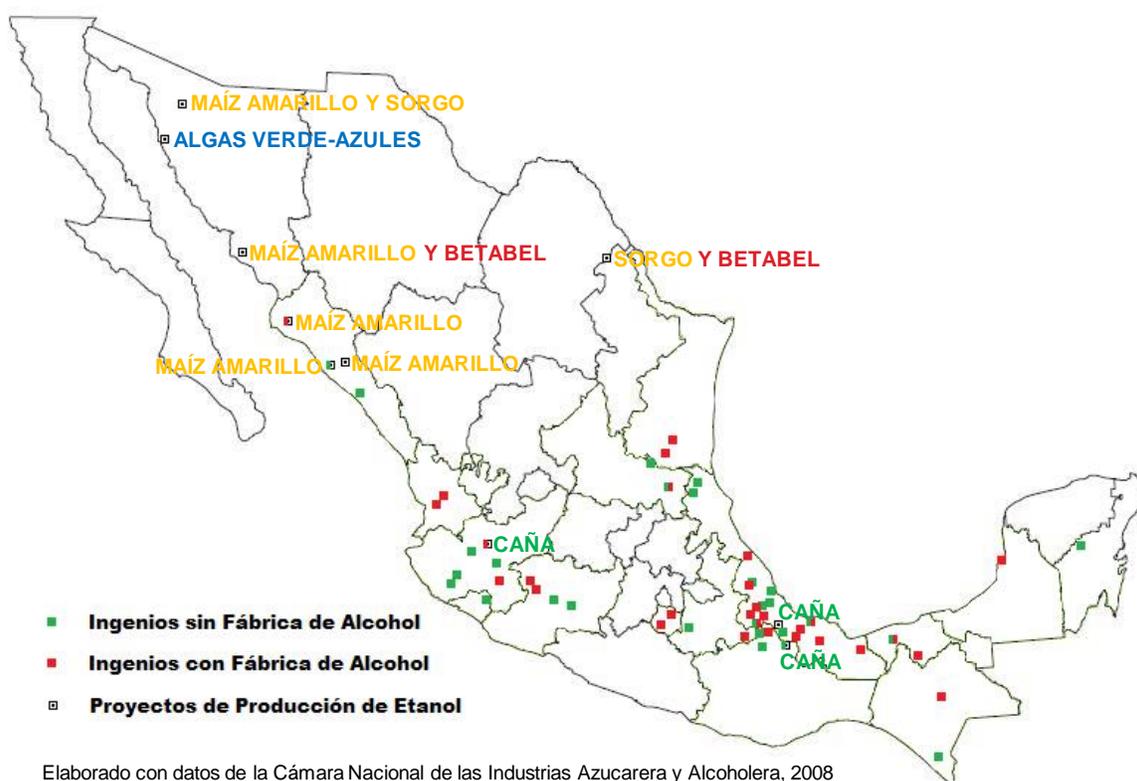
A principios de 2007, el Congreso de la Unión elaboró la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual entró en vigor el 2 de febrero de 2008. Las líneas actuales de desarrollo de biocombustibles en México, de acuerdo a esta ley y diversos estudios de la Secretaría de Energía, parten de dos materias primas con niveles altos de producción en el país, que a saber son la caña de azúcar y el maíz amarillo. Se plantea la utilización de trigo, sorgo, yuca y remolacha azucarera o betabel, además de algas verdes, para la obtención de biocombustibles, principalmente el etanol. En el artículo 11 de esta ley, fracción VIII, se estipula el otorgamiento de permisos para la producción de biocombustibles a partir de granos de maíz, pues los mismos sólo serán otorgados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) cuando existan inventarios excedentes de producción interna de maíz para satisfacer el consumo interno.

Actualmente (2009) existen diez proyectos para producir etanol a partir de diversos insumos, cuya ubicación se muestra en la figura 5, junto con los ingenios azucareros productores o no de etanol. Existen también algunos proyectos entre empresas nacionales y extranjeras para la producción de biodiesel, principalmente utilizarían

como insumo a la palma africana, el frijol de soya y la semilla de *Jatropha curcas*, conocida en México como piñón. Asimismo, existe en construcción una planta en Aguascalientes para producir electricidad a partir de biogás, y se estima un gran potencial de utilización del biogás de rellenos sanitarios en Ciudad Juárez (Chihuahua), zona metropolitana de la Ciudad de México (D.F. y México), Guadalajara (Jalisco), Tijuana (Baja California), Puebla (Puebla), Acapulco (Guerrero), León (Guanajuato), Culiacán (Sinaloa), Torreón (Coahuila) y Mérida (Yucatán). Además, varias granjas mexicanas cuentan con biodigestores que producen biogás a partir del excremento de los animales, combustible utilizado para la cocción de alimentos y para el servicio de agua caliente en sustitución del gas LP.

Figura 5

Plantas productoras y proyectos de producción de etanol en México (2007)



En 2010, Petróleos Mexicanos (PEMEX) introducirá gasolinas mezcladas en un 10% con etanol en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco, mediante un convenio de inversión en dos ingenios azucareros próximos a esa ciudad. Se estima una demanda de 200 ML anuales de etanol. También se contempla la producción de etil-terbutiléter (ETBE) y teramil-etiléter (TAEE), en lugar de sus respectivas sustancias homólogas metiladas, para los mismos fines.

En 2011, entrará en operaciones una planta productora de etanol a partir de algas verdes de la empresa mexicana BioFields, cuya tecnología fue desarrollada por la

compañía estadounidense Algenol Biofuels, estará ubicada en Puerto Libertad, Sonora y su producción será destinada principalmente al mercado de Estados Unidos, específicamente el del estado de California.

Dimensión de los Mercados de Biocombustibles

Para poder darle a los mercados de biocombustibles su correcta dimensión, voy a retomar las frases de los dos grandes visionarios de inicios del siglo XX en torno al uso de estos energéticos: Rudolph Diesel y Henry Ford, cuyas palabras me hacen plantear la siguiente pregunta: ¿tendrían razón Diesel y Ford en sus afirmaciones o acaso su entusiasmo por los biocombustibles les nublaría el juicio y los colmaría de un idealismo falaz? Comenzaré a responder esta inquietud analizando primero la frase de Ford para luego terminar este análisis con la de Diesel.

Henry Ford afirmó que hay combustible en cada trozo de materia vegetal que pueda ser fermentada. Esta parte de la frase es cierta, pues los vegetales están compuestos mayoritariamente por carbohidratos (azúcares), los cuales al ser extraídos del vegetal pueden fermentarse bajo la acción de levaduras y bacterias, con la consecuente producción de alcoholes como el etanol. Ford continuó afirmando que hay suficiente alcohol en la cosecha anual de un acre de papas como para mover la maquinaria necesaria para cultivarlas durante cien años. Para verificar esto haré el siguiente cálculo.

El volumen de etanol producido a partir de papa es de 96 L/ton de acuerdo al libro de Robert Brown. Este dato sólo depende de la tecnología empleada para producir etanol a partir de los carbohidratos de la papa, y como esta tecnología es única y bien conocida (solubilización, fermentación y destilación), entonces el dato es una constante.

Para introducir la variable tiempo es necesario tomar en cuenta la cantidad de papa cosechada durante un año, lo cual varía con el clima, la región o país, el cultivo y el tipo de agricultura. Tomaré datos de Estados Unidos, pues Henry Ford era originario de ese país. De acuerdo con el Departamento de Agricultura (U.S. Department of Agriculture, USDA, en inglés), la producción anualizada (se cultiva las cuatro estaciones del año) de papa por acre cultivado y cosechado es de 380 cwt/acre en promedio para el periodo 2000-2007, cifra equivalente a 17.2 ton/acre.

Multiplicando la producción de papa por la de etanol a partir de la misma, se obtiene la cantidad de etanol que puede producirse por acre cosechado de papa, lo cual resulta en 1,651.2 L/acre. Si la máxima cantidad de energía que puede extraerse de la combustión del etanol es de 22.3 MJ/L, dato correspondiente al etanol anhidro y no difiere en gran medida al del etanol hidratado (21.3 MJ/L), entonces la cantidad de energía obtenida de un acre de papas es de 36.8 GJ/acre.

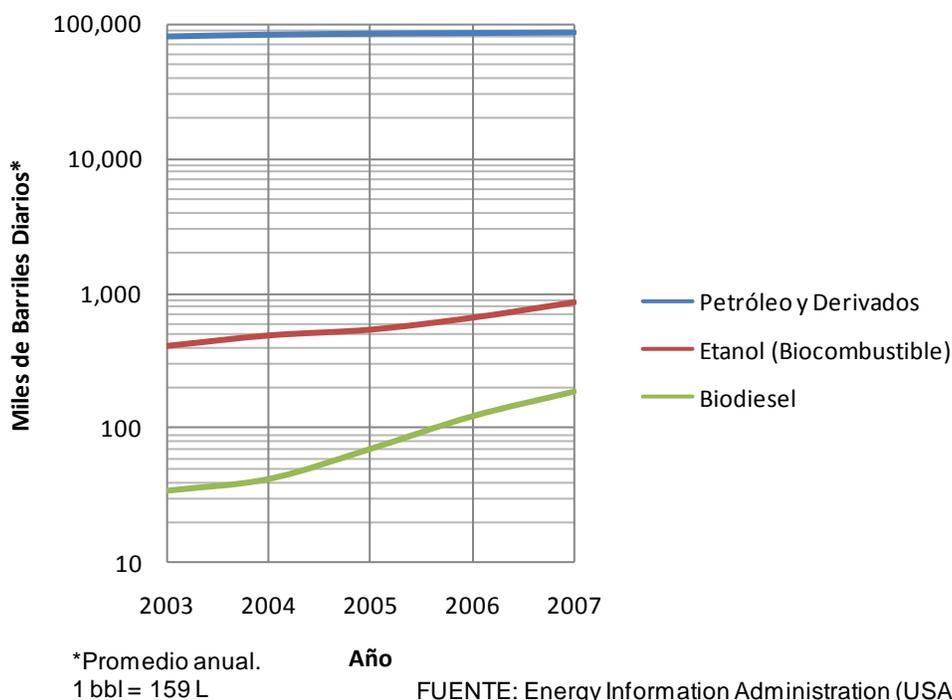
Según datos del Departamento de Asuntos Ambientales, Alimenticios y Rurales (DEFRA, siglas en inglés) del Reino Unido, la cantidad máxima de energía utilizada

para producir una cosecha anual de papa es de 44.5 GJ/ha, y por acre equivale a 18.0 GJ/acre. Dividiendo la energía del etanol obtenido de un acre de papas (36.8 GJ/acre) entre la energía utilizada en la producción agrícola del acre de papas (18.0 GJ/acre), se obtiene el número de años en que puede moverse la maquinaria a partir de etanol para cultivar y cosechar el acre de papas, cifra que resulta ser de 2.04 años. Este valor es muy inferior a los 100 años que afirmaba Henry Ford para esa misma cosecha de papas. Él estaba firmemente convencido de que el etanol era “el combustible del futuro” y por ende exageró en su afirmación. Sin embargo, el etanol sí puede ser empleado como combustible para producir papa en lugar de usar gasolina, por lo que este ejercicio de cálculo valida su frase y le da la magnitud debida.

Rudolph Diesel por su parte afirmó que el uso de los aceites vegetales como combustible y fuente energética pudo ser insignificante en su época, pero con el curso del tiempo sería tan importante como el usar petróleo y carbón para los mismos fines. Esta frase es aplicable aún a la época actual, pues sigue habiendo dudas en torno al uso de los biocombustibles en competencia con los derivados del petróleo. La siguiente gráfica muestra los consumos mundiales de etanol, biodiesel y petróleo con sus derivados, para fines energéticos. (Ver figura 6)

Figura 6

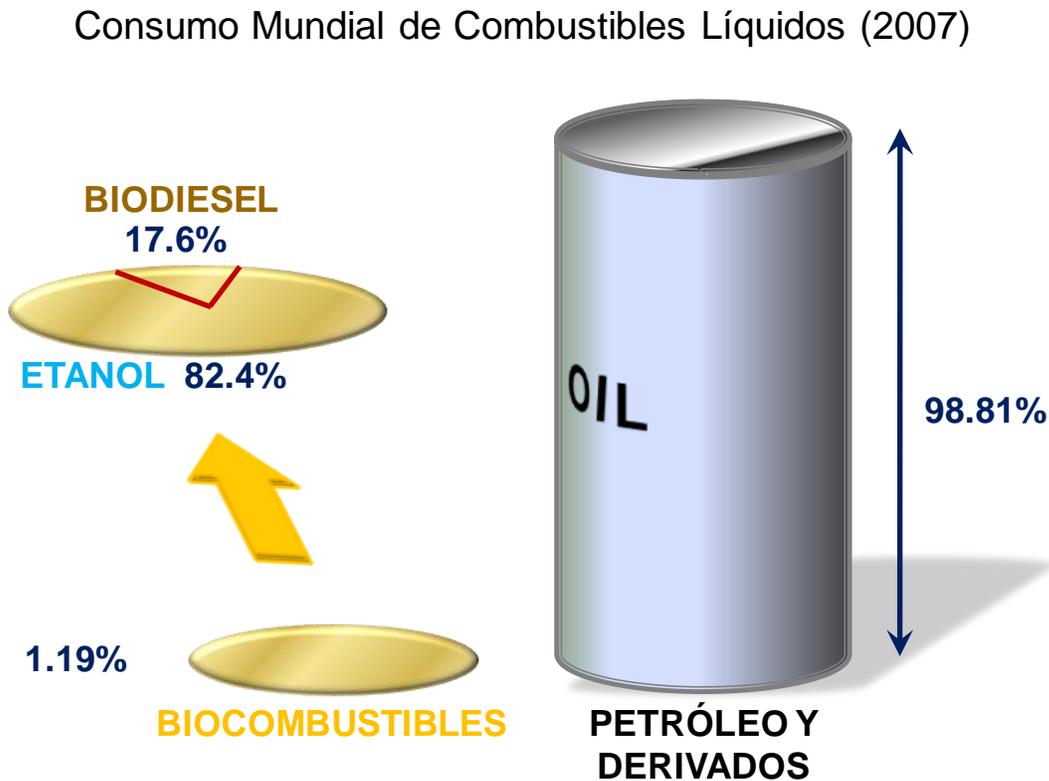
Consumo de Combustibles Líquidos en el Mundo



Como puede observarse en la figura 6, la tendencia en el consumo de los biocombustibles es creciente. Nótese la escala del eje de las ordenadas (eje vertical), es logarítmica, por lo que la diferencia entre el consumo de

biocombustibles y el del petróleo es de dos órdenes de magnitud. Esto se muestra de forma gráfica en la figura 7.

Figura 7



Elaborado con datos del Energy Information Administration (EIA) de Estados Unidos.

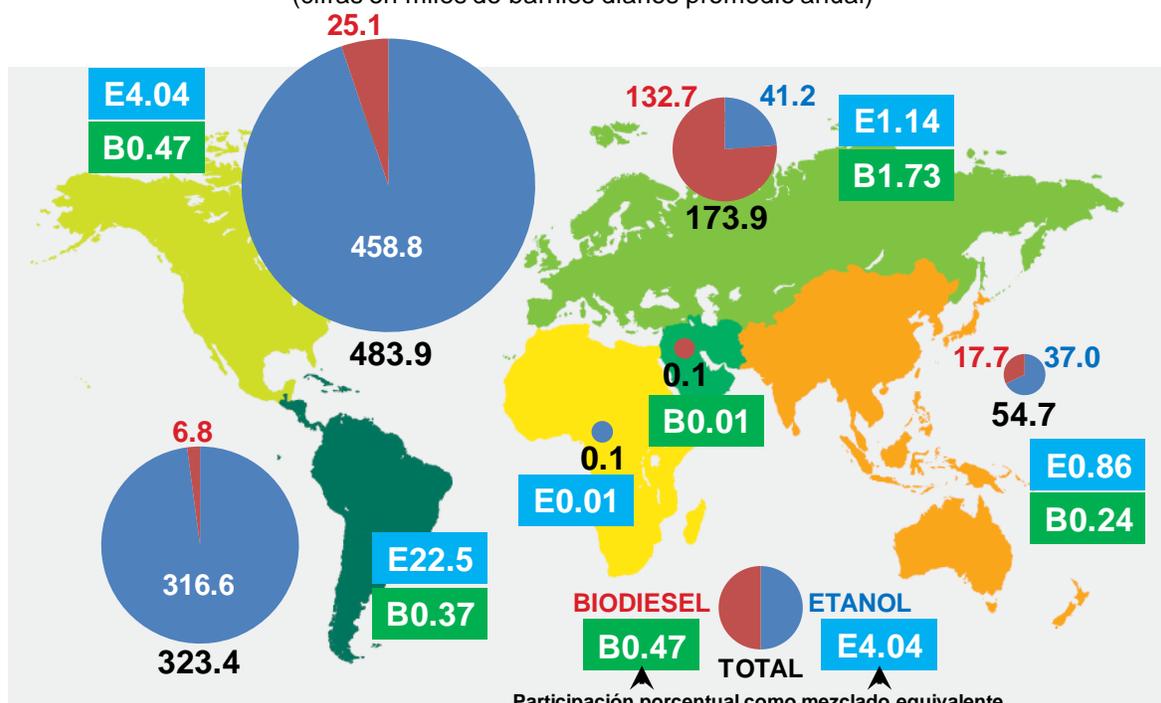
Aunque el uso de biodiesel, el cual se deriva principalmente de aceites vegetales, aún es muy bajo respecto al diesel proveniente del petróleo, la aceptación del biocombustible ha crecido en los últimos años y todo el análisis previo realizado en el presente trabajo confirma dicha tendencia hacia el futuro, hasta ser comparable con la del diesel petrolífero, por lo que se demuestra con ello la veracidad de las palabras de Diesel.

Para completar el dimensionamiento de los mercados de biocombustibles, presento a continuación un mapa donde se muestra la magnitud del consumo de biocombustibles por regiones del mundo. (Ver figura 8)

Se observa en el mapa de la figura 8 que Norteamérica es el mayor consumidor de biocombustibles en el mundo, seguido de Sudamérica, Europa y Asia. Norteamérica y Sudamérica consumen principalmente etanol como combustible, mientras que Europa y Asia prefieren al biodiesel. Esta diferencia se debe a la infraestructura de uso final (sector transporte) presente en cada una de estas regiones. En el continente americano, los vehículos mayoritariamente emplean gasolina por tener

motores Otto, y en Europa y Asia sus vehículos generalmente poseen motores Diesel. Esto se ve reflejado en el porcentaje de participación del etanol y del biodiesel en cada región del mundo, lo cual es presentado en la figura 8 como un nivel de mezclado equivalente con los combustibles fósiles respectivos.

Figura 8
Consumo de Biocombustibles Líquidos por Región (2007)
(cifras en miles de barriles diarios promedio anual)



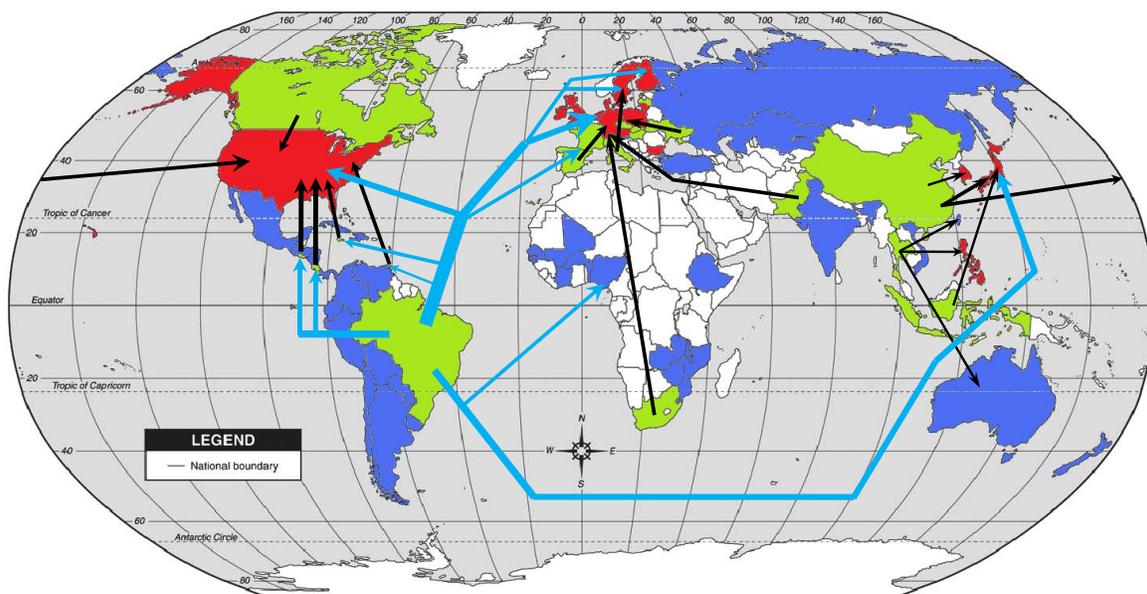
Datos: ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, USA: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>
 Mapa de fondo: BP Statistical Review of World Energy, June 2009: <http://www.bp.com/statisticalreview>
 Estimaciones propias del consumo de gasolina y diesel para el año 2007.

Comercio Internacional de Biocombustibles

A partir de datos de producción y consumo de etanol, y de flujos y destinos de importaciones y exportaciones del energético, he catalogado a los países en productores netos y consumidores netos de etanol. En el gráfico de la figura 9 se muestran las vías en que se desarrolla el comercio internacional de este biocombustible.

De igual manera, en la figura 10 se muestran las vías de intercambio comercial de biodiesel entre los países productores netos y consumidores netos del energético.

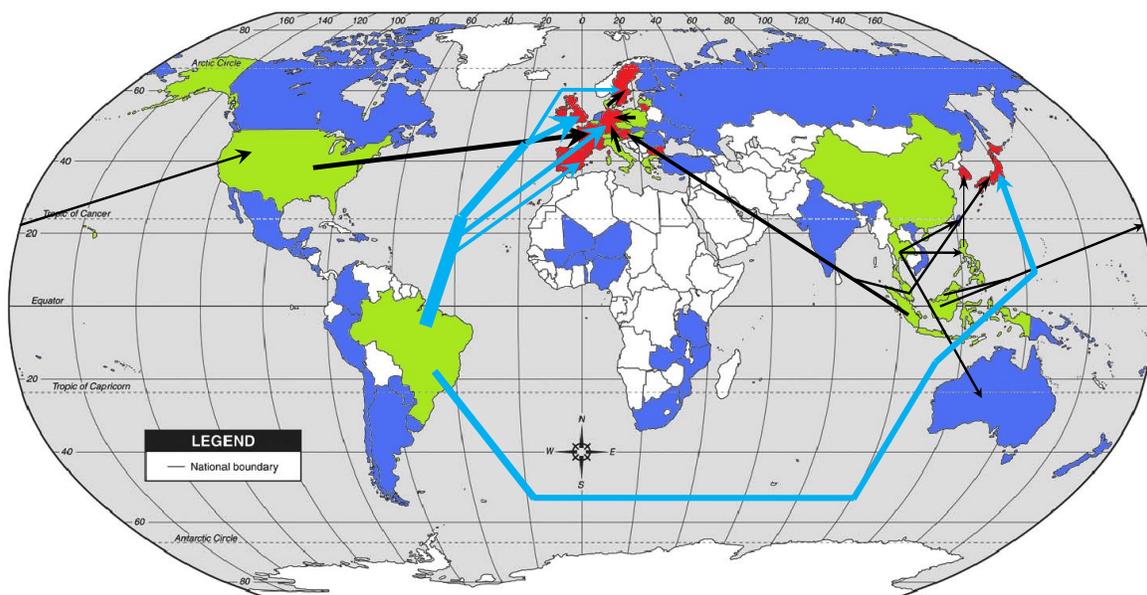
Figuras 9 y 10
 COMERCIO INTERNACIONAL DE ETANOL COMO BIOCOMBUSTIBLE (2007)



- Países exportadores netos
- Países importadores netos
- Países productores o potencialmente productores sin comercio internacional

Elaborado con datos de
 diversas fuentes
 correspondientes al 2007

COMERCIO INTERNACIONAL DE BIODIESEL (2007)



- Países exportadores netos
- Países importadores netos
- Países productores o potencialmente productores sin comercio internacional

Elaborado con datos de
 diversas fuentes
 correspondientes al 2007

En ambas figuras, he destacado en azul claro las exportaciones de Brasil, y se puede observar la existencia de ciertas regiones netamente importadoras de biocombustibles, como son Estados Unidos, Unión Europea y Japón. Los intercambios comerciales mostrados mediante flechas son los de mayor importancia por su volumen de flujo, por ende, hay otras vías de comercio internacional menos importantes no representadas en las figuras 9 y 10.

Conclusiones

Contrario a lo mostrado por los medios de comunicación en años recientes, los biocombustibles surgieron hace más de cien años, no en el 2006 tras la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto en febrero de 2005. Y aunque es un tema de actualidad, realmente estos energéticos son tan antiguos como la humanidad, pues el etanol, los aceites vegetales y las grasas animales han sido empleados como combustibles desde hace muchos siglos, principalmente para la cocción de alimentos y la iluminación (lámparas de alcohol y de aceite). Con las revoluciones industriales de los siglos XVIII y XIX, fueron introducidos los combustibles fósiles, primero el carbón mineral (Primera Revolución Industrial, siglo XVIII en Inglaterra) y luego el petróleo (Segunda Revolución Industrial, siglo XIX en Estados Unidos), y desplazaron a los biocombustibles debido a que poseen una mayor densidad de energía. Fue a finales del siglo XIX cuando los biocombustibles retomaron importancia, pues a diferencia de los fósiles, son energéticos renovables. Aunque generalmente los biocombustibles emiten una menor cantidad de gases de efecto invernadero respecto a los combustibles fósiles, siguen siendo una fuente de emisiones de dichos gases, además de generar una serie de externalidades negativas e impactos a la economía del mundo y al ambiente de nuestro planeta.

Los biocombustibles, a pesar de no ser la solución final a los problemas energéticos, económicos y ambientales, son un medio por el cual se puede llevar a cabo la transición energética de una economía sustentada en los combustibles fósiles a una economía mundial basada en fuentes renovables de energía, entre ellas el hidrógeno. Este es el siglo donde debe dejar de quemarse al petróleo, pues es un bien de alto valor industrial, ya que de él se producen plásticos, medicinas, aditivos para alimentos, colorantes, detergentes, lubricantes, pinturas, y otras sustancias importantes. En este siglo XXI debe impulsarse una economía de los biocombustibles no provenientes de recursos alimenticios ni de algunos otros recursos que impacten a la sustentación humana ni al ambiente, para así lograr de forma sustentable nuestra independencia de los combustibles fósiles.

Fuentes de Información

ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION (APEC); Biofuels:
<http://www.biofuels.apec.org/index.html>

BIOALCOHOL FUEL FOUNDATION (BAFF) (Suecia): <http://www.baff.info/english/>

BIOENERGÍA DE NUEVO LEÓN, S.A. DE C.V. (BENLESA); Descripción general del proyecto de ampliación de la infraestructura para el uso y captura de biogás para la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario de SIMEPRODE, en el Municipio de Salinas Victoria, Nuevo León:
http://www.nl.gob.mx/pics/pages/simeprode_bioenergia_base/Descripcion_ProyectoMonterreyII.pdf

BIOFIELDS (México): <http://www.biofields.com>

BIOFUELS ASSOCIATION OF AUSTRALIA (BAA) (Australia):
<http://www.biofuelsassociation.com.au/>

BIOFUELS PLATFORM, Production of biodiesel in Switzerland (Suiza):
<http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/ch-biodiesel.php>

BIOFUELS PLATFORM, Production of bioethanol in Switzerland (Suiza):
<http://www.biofuels-platform.ch/en/infos/ch-bioethanol.php>

BIOFUELS RESEARCH ADVISORY COUNCIL; Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond; European Commission, Bélgica: 2006:
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/biofuels_vision_2030_en.pdf

BIOFUELS TECHNOLOGY PLATFORM (Europa): <http://www.biofuelstp.eu/>

BROWN; Robert C.; Biorenewable Resources; Iowa State Press, USA: 2003

CÁMARA NACIONAL DE LAS INDUSTRIAS AZUCARERA Y ALCOHOLERA (CNIAA) (México): <http://www.camaraazucarera.org.mx/>

CLOIN, Jan; Liquid Biofuels in Pacific Island Countries; SOPAC, Fiji: 2007

COMISIÓN NACIONAL PARA EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE) (México):
<http://www.conae.gob.mx> , <http://www.conuee.gob.mx>

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES; The Renewable Energy Progress Report; European Commission, Bélgica: 2009: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0192:FIN:EN:PDF>

CURTIS, Brian; U.S. Ethanol Industry: the next inflection point; DOE, USA: 2008:
<http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/2007ethanolreview.pdf>

DE CASTRO, Júlio F. M.; Biofuels-An overview. Final Report; Biofuel-Africa, May 2007: http://www.biofuel-africa.org/IMG/pdf/Biofuels_Final_Report.pdf

DE NORA SOUTO, João José; Política Nacional de Biocombustíveis; Ministerio de Minas e Energia, Brasil: 2006: <http://www.mme.gov.br>

DEPARTMENT OF MINERALS AND ENERGY (DME); Biofuels Industrial Strategy of the Republic of South Africa; DME, Sudáfrica: 2007: [http://www.dme.gov.za/pdfs/energy/renewable/biofuels_indus_strat.pdf\(2\).pdf](http://www.dme.gov.za/pdfs/energy/renewable/biofuels_indus_strat.pdf(2).pdf)

DEPARTMENT OF RESOURCES, ENERGY AND TOURISM (Australia): <http://www.ret.gov.au/energy/Pages/index.aspx>

DIRECTIVE 2001/77/EC (Unión Europea) (texto publicado el 27 de octubre de 2001 en *Official Journal of the European Union*, L 283): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:283:0033:0033:EN:PDF>

DIRECTIVE 2003/30/EC (Unión Europea) (texto publicado el 17 de mayo de 2003 en *Official Journal of the European Union*, L 123): http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/en_final.pdf

DIRECTIVE 2009/28/EC (Unión Europea) (texto publicado el 5 de junio de 2009 en *Official Journal of the European Union*, L 140): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>

EUROBSERV'ER; "Le Baromètre des Biocarburants"; en *Le Journal des Énergies Renouvelables*, No. 179, mayo 2007: http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro179_b.pdf

EUROBSERV'ER; "Le Baromètre du Biogaz"; en *Le Journal des Énergies Renouvelables*, No. 186, julio 2008: http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro186_a.pdf

EUROPEAN BIOETHANOL FUEL ASSOCIATION, Statistics (Europa): <http://www.ebio.org/statistics.php>

EUROPEAN COMMISSION'S MARKET OBSERVATORY FOR ENERGY; Europe's energy position - present & future; European Commission, Bélgica: 2008: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2008_moe_maquette.pdf

INDÚSTRIA AERONÁUTICA NEIVA; Aeronave Ipanema (Brasil): http://www.aeroneiva.com.br/site/content/produtos/produtos_ipanema_apresentacao.asp

IEA BIOENERGY; Market Evaluation: Fuel Ethanol; Unicamp, Brasil: 2007: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/finalreportethanolmarkets.pdf>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (Brasil): <http://www.ibge.gov.br>

INSTITUTO DE ESTUDOS DO COMÉRCIO E NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS; Potential and challenges in the international market for ethanol and bio-diesel; Seminar on Biofuels Study in Mozambique, 11-12 de julio de 2007: <http://www.iconebrasil.com.br/arquivos/noticia/1455.pdf>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI) (México): <http://www.inegi.gob.mx>

JOHNSON, Francis X.; MATSIKA, Emmanuel; Bio-energy trade and regional development: the case of bio-ethanol in southern Africa, en *Energy for Sustainable Development*, X (1) 2006

KNOTHE, Gerhard; Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels; en *Inform*, 12, noviembre 2001: http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/20011101_gen-346.pdf

KOVARIK, William; Ethanol's first century. Fuel blending and substitution programs in Europe, Asia, Africa and Latin America: <http://www.runet.edu/~wkovarik/papers/International.History.Ethanol.Fuel.html>

KOVARIK, William; Henry Ford, Charles Kettering and the Fuel of the Future; en *Automotive History Review*, No. 32, primavera 1998: <http://www.radford.edu/~wkovarik/papers/fuel.html>

LEY DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CAÑA DE AZÚCAR (México) (texto vigente publicado en DOF 22-08-2005, última modificación publicada en DOF 20-10-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDSCA.pdf>

LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS (México) (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 01-02-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil): <http://www.mme.gov.br>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; Balanco Energético Nacional 2008; MME-EPE, Brasil: 2008

PARENTE, Expedito; Lipofuels: Biodiesel & Biokerosene; Tecbio, Brasil: 2006: <http://www.nist.gov/oiaa/TECHBIO1.pdf>

PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX) (México): <http://www.pemex.com/>

- PEMEX; Uso de etanol como oxigenante en gasolinas; Mayo 2008:
<http://www.pemex.com/files/content/etanol.pdf>
- PEREIRA HERNÁNDEZ, Guillermo; Situación actual y perspectivas del uso de biocombustibles en Cuba; Industria Básica, Cuba: 2006:
<http://www.olade.org.ec/biocombustibles/Documents/PDF-22-1Cuba.pdf>
- PETROBRAS (Brasil): <http://www2.petrobras.com.br>
- PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DO BIODIESEL (Brasil):
<http://www.biodiesel.gov.br>
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (Estados Unidos): <http://www.ethanolrfa.org>
- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, Ethanol: Industry Statistics (Estados Unidos): <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>
- RITTER, Stephen K.; “Biofuel Bonanza”; en *Chemical & Engineering News*, **85** (26) June 25, 2007
- ROTHKOPF, Garten; A Blueprint for Green Energy in the Americas; Inter-American Development Bank, USA: 2007: <http://www.iadb.org/biofuels/>
- SECRETARÍA DE ENERGÍA (México): <http://www.sener.gob.mx>
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA); Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (México):
<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>
- SENER; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; SENER-GTZ-BID, México: 2006:
http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf
- SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA (México): <http://sie.energia.gob.mx>
- THE UNIVERSITY OF WARWICK; Environmental Footprint and Sustainability of Horticulture (including Potatoes)-A Comparison with other Agricultural Sectors; DEFRA, UK: 2007
<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/nitrogenandenvironment/footprint/>
- THE WHITE HOUSE; Energy & Environment (Estados Unidos):
http://www.whitehouse.gov/issues/energy_and_environment/

THOMAS, Valerie; KWONG, Andrew; “Ethanol as a lead replacement: phasing out leaded gasoline in Africa”; en *Energy Policy* **29** (2001) 1133-1143

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA) (Brasil):
<http://www.unica.com.br/>

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA), Economic Research Service (Estados Unidos): <http://www.ers.usda.gov/Data/>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (Estados Unidos):
<http://www.energy.gov> , <http://www.doe.gov>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Alternative Fuels & Advanced Vehicles Data Center (Estados Unidos):
<http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/index.html>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Clean Cities Program (Estados Unidos):
<http://www1.eere.energy.gov/cleancities/index.html>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) (Estados Unidos):
<http://www.eere.energy.gov/>

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA) (Estados Unidos):
<http://www.bea.gov>

ANEXO 3

Biocombustibles en México

Trabajo completo realizado por el autor de la presente tesis para el Proyecto Santander – Universidad Autónoma de Madrid de enero a noviembre de 2010. Dicho proyecto tuvo la finalidad de hacer un análisis comparativo del marco regulatorio para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como evaluar los impactos sobre el uso de la tierra y la expansión de los biocombustibles en América Latina y la Unión Europea. Para ello se reunió a expertos de la Universidad Autónoma de Madrid (España), de la Universidad de São Paulo (Brasil), y de la Universidad Nacional Autónoma de México (México). Este anexo sólo consta de mi contribución a dicho proyecto.

BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

Ing. Carlos Alvarez Maciel
Posgrado de Ingeniería, Facultad de Ingeniería
Académico, Facultad de Química
Universidad Nacional Autónoma de México
Correo electrónico: zeravla7mx@gmail.com

En años recientes, México ha buscado diversificar sus fuentes energéticas en los sectores transporte, industrial y doméstico, pues depende mayoritariamente de energéticos fósiles como el petróleo y sus derivados, y el gas natural. Como una consecuencia de la introducción de normas de calidad del aire en las grandes ciudades y de la adquisición de compromisos de reducción de gases de efecto invernadero, México ha decidido desarrollar y producir biocombustibles, específicamente etanol, biodiesel y biogás, para lo cual se ha ido creando un marco regulatorio.

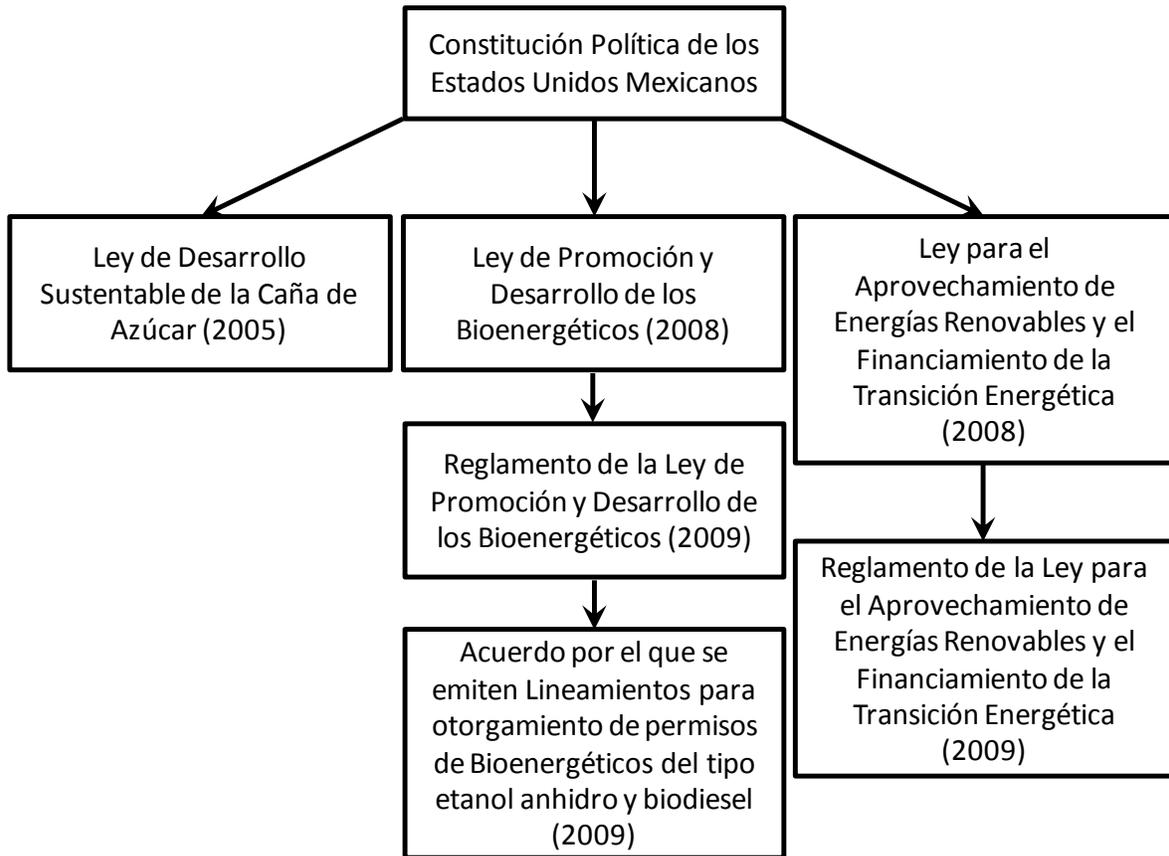
Actualmente, el uso de biocombustibles en México es casi inexistente, no obstante el país produce etanol para su uso en bebidas alcohólicas, productos farmacéuticos y alimenticios, y como solvente y reactivo industriales. El etanol producido actualmente proviene del jugo de la caña de azúcar y se obtiene en algunos ingenios azucareros, a través de la fermentación del jugo y su consecuente destilación.

Marco regulatorio de los biocombustibles

El gobierno de México inició una serie de medidas tendientes a crear un mercado interno de los biocombustibles, para elevar los niveles de eficiencia en el uso final de la energía y para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre esas medidas está la expedición de leyes y regulaciones que permiten el desarrollo de proyectos de producción y aprovechamiento de biocombustibles en el país (figura 1). En la legislación mexicana se llama bioenergéticos a los biocombustibles y a todos aquellos materiales de procedencia biológica reciente con un uso final energético.

El 22 de agosto de 2005 fue publicada la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, en la cual se fundan los lineamientos para el aprovechamiento futuro de la caña de azúcar como energético. Esta ley, fundamentada en los artículos 25 (sobre desarrollo económico nacional) y 27 fracción XX (sobre desarrollo rural) de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, menciona en su artículo 97 (Título Quinto) la creación del Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Caña de Azúcar (CICTCAÑA), el cual elaborará estudios y proyectos de desarrollo y aprovechamiento del etanol como carburante y oxigenante de gasolina a partir de mieles, así como del aprovechamiento del bagazo de caña con fines de industrialización para la cogeneración de energía y la obtención de gas sintético (artículos 105 y 115).

Figura 1. Esquema general del marco regulatorio mexicano en materia de biocombustibles.



A principios de 2007, el Congreso de la Unión elaboró la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual entró en vigor el 2 de febrero de 2008 y también está fundamentada en los artículos 25 y 27 fracción XX de la Constitución. Las líneas actuales de desarrollo de biocombustibles en México, de acuerdo a esta ley y diversos estudios de la Secretaría de Energía, parten de dos materias primas con niveles altos de producción en el país, que a saber son la caña de azúcar y el maíz amarillo. Se plantea la utilización de trigo, sorgo, yuca y remolacha azucarera o betabel, además de algas verdes, para la obtención de etanol como biocombustible, además esta ley promueve el desarrollo y aprovechamiento de otros biocombustibles como el biodiesel y el biogás. En el artículo 11 de esta ley, fracción VIII, se estipula el otorgamiento de permisos para la producción de biocombustibles a partir de granos de maíz, pues los mismos sólo serán otorgados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) cuando existan inventarios excedentes de producción interna de maíz para satisfacer el consumo interno. Además, el artículo 13 fracción IV de esta ley faculta a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a vigilar que no se realicen cambios de uso de suelo de forestal a agrícola efectuados con la finalidad de establecer cultivos para la producción de bioenergéticos, acción

tendiente a evitar la deforestación. En el Título III de esta ley se establecen los instrumentos y acciones para incentivar e impulsar los bioenergéticos en el país.

El 19 de junio de 2009 entró en vigor el Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, cuyo objetivo es el desarrollo de una infraestructura nacional de investigación científica, producción, transporte y aprovechamiento de los biocombustibles que permita el desarrollo de los sectores rural e industrial del país, sin menoscabo de los recursos naturales (principalmente el agua) y evitando o abatiendo posibles impactos ambientales. El artículo 14 de este reglamento faculta a la SAGARPA a otorgar permisos (con vigencia de un año y prorrogables por periodos iguales) para el uso del maíz en la producción de bioenergéticos, y a la Secretaría de Energía (SENER) a otorgar permisos (con una vigencia de treinta años y prorrogables por periodos iguales) para la producción, almacenamiento, transporte y distribución por ductos, y la comercialización de bioenergéticos. Respecto a los permisos de la SAGARPA, el artículo 20 excluye de los mismos a la producción de biocombustibles a partir de maíz importado, previo aviso del productor hacia dicha dependencia.

El 13 de noviembre de 2009 fue publicado el “Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos para el otorgamiento de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel”. El lineamiento sexto, en el capítulo II, exenta de solicitud de permiso de la SENER a aquellos productores de etanol anhidro y de biodiesel cuya capacidad de producción sea menor o igual a 500 L/día, y cuya capacidad de almacenamiento sea menor o igual a 1000 L, siempre que éste se realice en el mismo lugar de producción.

Además de la ley anterior relacionada con el biogás, la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, en vigor desde el 29 de noviembre de 2009, regula la generación de electricidad a partir del mismo en rellenos sanitarios que cumplan con la normatividad ambiental, cuyos fines sean distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica. La generación de electricidad para servicio público empleando biogás no está regulada aún, pues la titularidad de los derechos sobre la explotación del energético en los rellenos sanitarios es ambigua en la mayor parte del país.

Producción y uso actual de los biocombustibles

México tiene 58 ingenios de azúcar, de los cuales 54 están en operación y 30 producen etanol hidratado. En 2007, México produjo 49 ML de etanol hidratado destinado a las industrias farmacéutica y de alimentos, principalmente. El ingenio San Nicolás en Cuichapa, Veracruz, es el primer ingenio productor de etanol anhidro con una capacidad de producción de 50,000 L/día (18 ML/año), el cual es empleado en la industria farmacéutica pero se planea utilizarlo en mezclas con gasolina para el sector transporte. A enero de 2010, existen nueve proyectos para producir etanol a partir de diversos insumos (tabla 1). El noveno proyecto corresponde a la

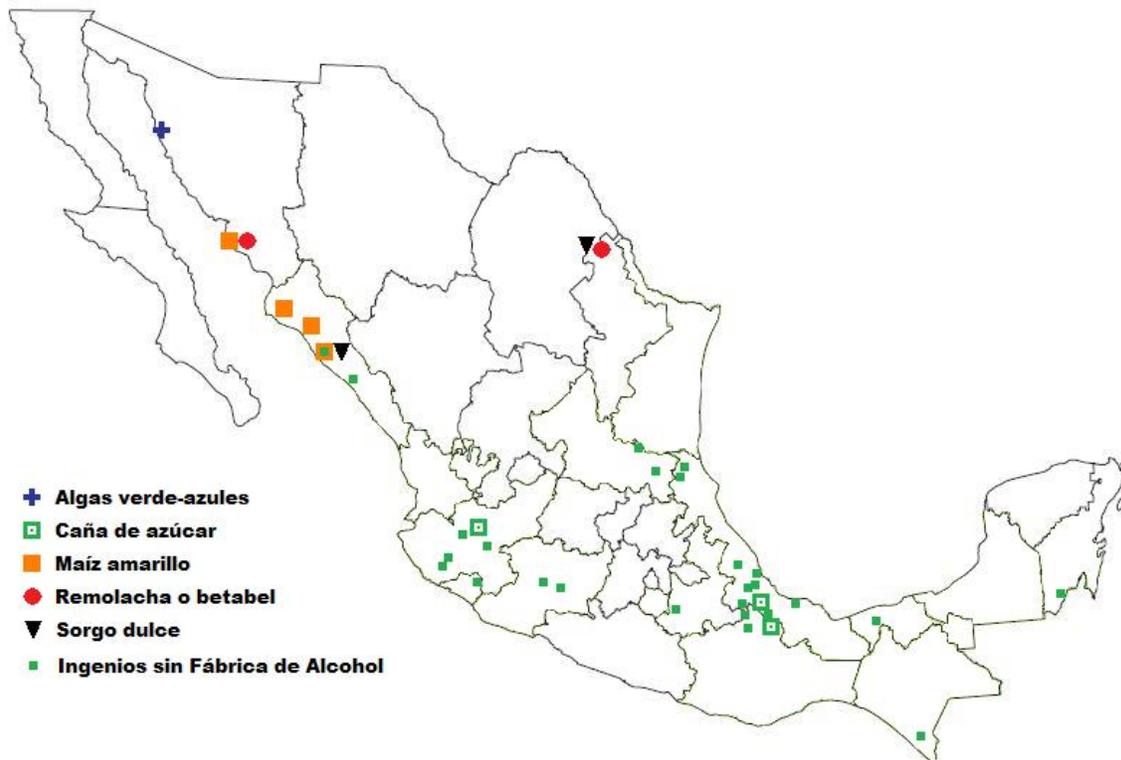
incorporación de etanol anhidro a las gasolinas de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, tema a tratarse más adelante. (Ver figura 2)

Tabla 1. Proyectos de producción de etanol (2009).

Ubicación	Compañía	Materia Prima	Capacidad (ML/año)
Valle del Yaqui, Son.	Integral Bioenergy	Maíz y remolacha	360
Guamúchil, Sin.	Industrial Mexstarch (Indumex)	Maíz	120
Puerto Libertad, Son.	Sonora Fields (BioFields)	Algas verde-azules	114.42
Navolato, Sin.	Destilmex (Biocyclos)	Maíz y sorgo	114
Don Martín, Coah.	Integral Bioenergy	Remolacha y sorgo dulce	108
San Juan Bautista Tuxtepec, Oax.	Destiladora del Papaloapan	Caña de azúcar	90
Los Mochis, Sin.	Industrial Mexstarch (Indumex)	Maíz	41
Ciudad Cardel, Ver.	Ingenio La Gloria (SEOANE)	Caña de azúcar	No Disponible

FUENTE: BIOCYCLOS (Destilmex), BIOFIELDS, CNIAA, LA JORNADA (Sección Estados), DESTILADORA DEL PAPALOAPAN

Figura 2. Proyectos de producción de etanol por tipo de insumo (2009).



Elaboración propia a partir de datos de diversas fuentes a enero de 2010.

FUENTE: BIOCYCLOS (Destilmex), BIOFIELDS, CNIAA, LA JORNADA (Sección Estados), DESTILADORA DEL PAPALOAPAN, UNIÓN NACIONAL DE CAÑEROS, PEMEX, SAGARPA-SIAP

La planta productora de etanol a partir de algas verdes entrará en operaciones en 2011, con lo que será la primer fábrica de este tipo en el mundo. Empleará tecnología de la empresa estadounidense Algenol, la cual opera una planta piloto en Florida, Estados Unidos. Esta planta perteneciente a la empresa BioFields estará ubicada en Puerto Libertad, Sonora y su producción estará destinada principalmente al mercado de Estados Unidos, específicamente se exportará a los estados de California y Arizona.

La planta de Navolato, Sinaloa, propiedad de Destilmex (Biocyclos), ya está terminada pero no ha entrado en operaciones debido a que SAGARPA no le ha otorgado el permiso, pues su materia prima es el maíz blanco del cual Sinaloa tiene excedentes. Su mercado de exportación estaría conformado por los estados de California, Arizona y Nuevo México en Estados Unidos. Asimismo, el proyecto de construcción de la planta de Los Mochis, Sinaloa, propiedad de Industrial Mexstarch (Indumex) está suspendido desde 2008 por emplear maíz, sin embargo, ha estado prorrogándose por lo que se espera su eventual desarrollo.

La planta de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, población colindante con el estado de Veracruz, inició operaciones en diciembre de 2008. La fábrica es propiedad de Destiladora del Papaloapan, la cual produce y comercializa cinco tipos de etanol:

- 1) *Alcohol carburante*: etanol anhidro para mezclado con gasolina (combustible para transporte conocido como gasohol).
- 2) *Alcohol neutro*: para su uso como solvente industrial y como anticongelante.
- 3) *Alcohol extra neutro*: mezcla de 95% etanol y 5% metanol.
- 4) *Alcohol fino*: etanol anhidro para uso médico y como solvente para limpieza de equipos.
- 5) *Alcohol común*: etanol hidratado de 96°GL (96% etanol, 4% agua) para la elaboración de bebidas alcohólicas.

Respecto al biogás, existe una planta de generación de electricidad a partir de biogás producido en el relleno sanitario de Salinas Victoria, ubicado en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, la cual tiene una capacidad instalada de generación de 12.72 MW y puede producir 40,000 MWh anuales (3,440 TPE/año). Con la quema de biogás para producir electricidad, esta planta, primera en América Latina, ha generado cerca de 393,341 MWh de energía eléctrica (equivalente a 33,821 TPE) desde el inicio de su operación (19 de septiembre de 2003) hasta diciembre de 2009. La electricidad producida es transmitida a través de la red del sistema eléctrico nacional de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y ha sido destinada para abastecer al 45% del alumbrado público de la zona metropolitana de Monterrey durante la noche (de 7:00 pm a 7:00 am), así como al tren subterráneo (Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey), a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, y a las oficinas del Gobierno del Estado de Nuevo León y del DIF local (Sistema para el Desarrollo Integral de la Familia). Actualmente está en construcción una planta en Aguascalientes para producir electricidad a partir de biogás, y se estima un gran potencial de utilización del biogás de rellenos sanitarios

en Ciudad Juárez (Chihuahua), zona metropolitana de la Ciudad de México (D.F. y México), Guadalajara (Jalisco), Tijuana (Baja California), Puebla (Puebla), Acapulco (Guerrero), Durango (Durango), León (Guanajuato), Culiacán (Sinaloa), Torreón (Coahuila) y Mérida (Yucatán). Además, en varias granjas mexicanas se cuenta con biodigestores para producir biogás a partir del excremento de los animales, el cual es utilizado para la cocción de alimentos y para el servicio de agua caliente, en lugar del gas LP y del gas natural.

El biodiesel en México ha comenzado a ser desarrollado y utilizado por el sector transporte de un par de localidades en el país. El primer proyecto en operación fue desarrollado en el año 2005 a nivel planta piloto en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Monterrey, donde se transforma el aceite vegetal usado en las cafeterías en biodiesel. Este combustible es mezclado con diesel de petróleo en una proporción de 20% biodiesel y 80% diesel petrolífero (mezcla B20), el cual es utilizado para generar electricidad en una planta de emergencia y para mover un autobús de transporte escolar.

El segundo proyecto en operación se está llevando a cabo en Chiapas, donde se han creado el Instituto de Energías Alternativas, Renovables, Biocombustibles y Energías Eléctricas (IEARBYEE), el 31 de diciembre de 2008, y la primer planta industrial productora de biodiesel en el país, ubicada en Puerto Chiapas, en mayo de 2008. Se tienen sembradas 10,000 ha de *Jatropha curcas*, conocida en México como piñón, además de higuera y palma de aceite. Además, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, fue creada la empresa Transporte Urbano Tuxtla Gutiérrez que cuenta con una flota de 71 autobuses urbanos de pasajeros. Estos autobuses, denominados “conejobuses” por el logotipo que portan en los costados, fueron puestos en circulación el 3 de enero de 2010 cubriendo dos rutas y empleando la mezcla B20, la cual será remplazada en marzo de 2010 por el combustible B100 (biodiesel puro). Posteriormente este sistema de transporte será puesto en circulación en la ciudad de Tapachula, Chiapas.

Existen otros dos proyectos de producción de biodiesel en el país, uno de ellos está siendo construido en Monterrey, Nuevo León por la empresa Grupo Energéticos (Energex) con apoyo del ITESM, y el otro se encuentra en el puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán por la empresa Bioenergex. Esta última planta entró en operaciones el 28 de septiembre de 2007, pero en diciembre de 2008 suspendió indefinidamente la producción de biodiesel debido a falta de insumos.

Existen algunos proyectos que aún están en fase de planeación, pero puede destacarse de entre ellos un proyecto a nivel planta piloto en Morelia, Michoacán, el cual tiene como objetivo recolectar los aceites usados de restaurantes y negocios de dicha ciudad para evitar que sean vertidos al drenaje. Esta labor es realizada gratuitamente por la empresa Moreco Biodiesel desde junio de 2006. Durante los años 2005 y 2006 fueron recolectados estos insumos, se les transformó en biodiesel y probó en cuatro vehículos particulares marca Volkswagen con resultados positivos, que permitieron a la empresa seguir operando. Estos cinco proyectos de producción de biodiesel son presentados en la tabla 2, junto con sus materias primas y su

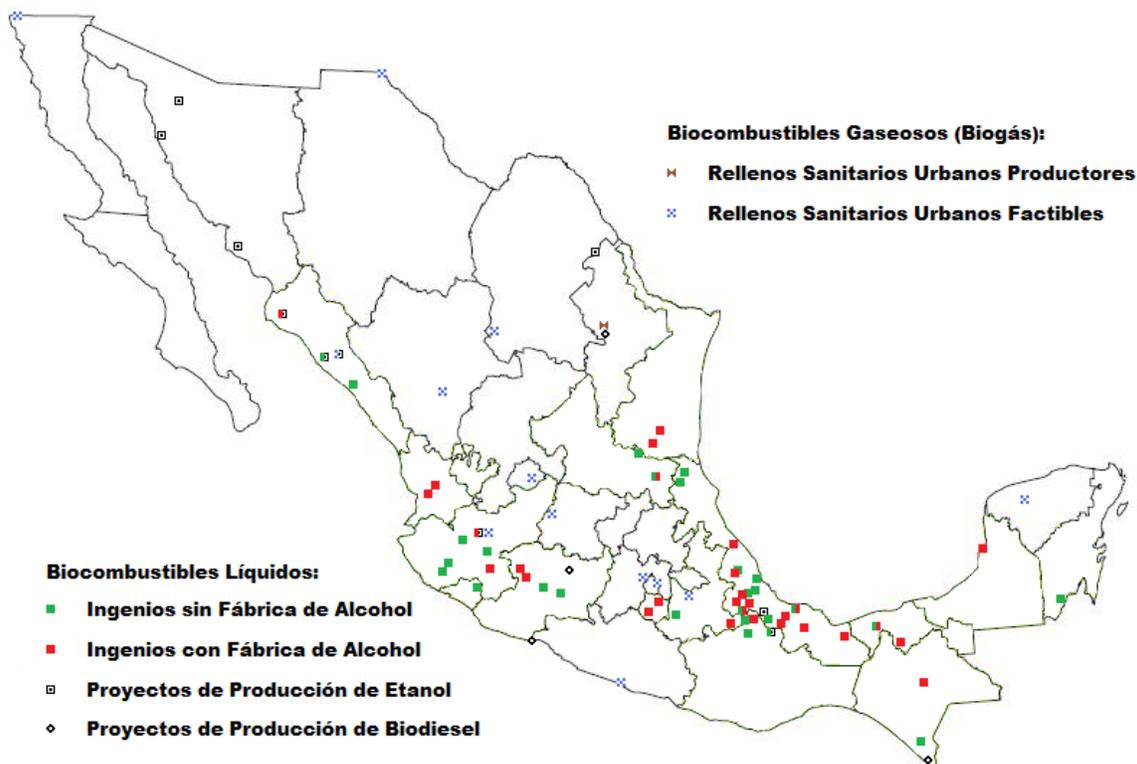
capacidad instalada. La ubicación geográfica de los proyectos de biodiesel son mostrados en un mapa de la República Mexicana en la figura 3, junto con los de etanol y de biogás.

Tabla 2. Proyectos de producción de biodiesel (2009).

Ubicación	Compañía o Institución	Materia Prima	Capacidad (ML/año)
Monterrey, N.L.	Grupo Energéticos (Energex)	Grasa animal usada	18
Lázaro Cárdenas, Mich.	Bioenergex (Propalma)	Aceite de palma africana	9
Puerto Chiapas, Chis.	Tecnasur (Tecnología y Naturaleza del Sureste)	Piñón (<i>Jatropha curcas</i>) e higuera	7.2
Monterrey, N.L.	ITESM	Aceite vegetal usado	0.26
Morelia, Mich.	Moreco Biodiesel	Aceite vegetal usado	0.15

FUENTE: ENERGEX, EL MEXICANO (Sección Finanzas), EL UNIVERSAL (Sección Finanzas), GOBIERNO DEL ESTADO DE CHIAPAS, ITESM, MORECO BIODIESEL

Figura 3. Proyectos de producción de biocombustibles e ingenios azucareros (2009).



Elaboración propia a partir de datos de diversas fuentes a enero de 2010.

FUENTE: BIOCYCLOS (Destilmex), BIOFIELDS, CNIAA, LA JORNADA (Sección Estados), DESTILADORA DEL PAPALOAPAN, ENERGEX, EL MEXICANO (Sección Finanzas), EL UNIVERSAL (Sección Finanzas), GOBIERNO DEL ESTADO DE CHIAPAS, ITESM, MORECO BIODIESEL, BENLESA, UNIÓN NACIONAL DE CAÑEROS, PEMEX, SAGARPA-SIAP

Futuro de los biocombustibles

En 2010, Petróleos Mexicanos (PEMEX) introducirá gasolinas mezcladas en un 10% con etanol en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco, mediante un convenio de inversión en dos ingenios azucareros próximos a esa ciudad. Se estima una demanda de 200 ML anuales de etanol, el cual implica un consumo de 3 millones de toneladas de biomasa que podría ser suministrada por los estados de Jalisco, Michoacán, Colima y Nayarit. También se contempla la producción de etil-terbutiléter (ETBE) y teramil-etiléter (TAEE), en lugar de sus respectivas sustancias homólogas metiladas, para los mismos fines.

En 2012, se contempla la introducción de gasolinas mezcladas con etanol en un 10% (mezcla conocida como E10) en las áreas metropolitanas de Monterrey, Nuevo León y de la Ciudad de México, D.F. de manera similar a Guadalajara. Para llevar a cabo este proyecto PEMEX, SAGARPA y SENER contemplan que Monterrey demandará 150 ML anuales de etanol, con un consumo de biomasa de 2.3 millones de toneladas cuyo suministro podría ser efectuado por el estado de San Luis Potosí. Asimismo, PEMEX y las citadas dependencias estiman una demanda de 530 ML anuales de etanol en la Ciudad de México, con un consumo de 7.9 millones de toneladas de biomasa que puede ser suministrada por los estados de Morelos, Puebla, Veracruz y Oaxaca.

Estos proyectos han sido planeados por el gobierno de México y sus dependencias, particularmente SAGARPA y SENER, en conjunto con empresas públicas (CFE y PEMEX, principalmente) y privadas, para poder desarrollar una cadena de producción y consumo de biocombustibles competitiva, rentable y sustentable hacia el año 2012. A través de la emisión del Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico (de la SAGARPA) y del Programa de Introducción de Bioenergéticos (de la SENER), el gobierno ha fijado como meta de 300 mil hectáreas de superficie para cultivos que sirvan a la producción de las 13.2 millones de toneladas de biomasa necesarias para la obtención de etanol y para su incorporación a las gasolinas como agente oxigenante en las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Valle de México (Ciudad de México y su área conurbada de los estados de México e Hidalgo).

Con estas medidas, México busca cumplir el compromiso asumido en la Cumbre de Copenhague en diciembre de 2009, el cual consiste en reducir 50 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) totales a partir del 2012. Además, el Programa Sectorial de Energía 2007-2012 plantea entre sus objetivos mitigar el incremento en las emisiones de GEI en el sector energético y de transporte. En las emisiones de GEI provenientes de la generación de electricidad, donde está incluido el uso de biogás, éstas deben pasar de 14 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtonCO₂) en 2006 a máximo 28 MtonCO₂ en 2012. Por estas obligaciones adquiridas es de esperarse un auge de los biocombustibles en México en el mediano plazo, por lo que también surgirán modificaciones y ampliaciones al marco regulatorio, así como la aparición de incentivos fiscales para el desarrollo completo de proyectos relacionados con los bioenergéticos.

Impacto a la alimentación humana

La producción de biocombustibles líquidos a partir de insumos agrícolas alimenticios genera una desviación de recursos originalmente destinados a la alimentación humana, para transformarlos en energéticos. Este hecho provocó un alza en los precios del azúcar y del maíz en el periodo 2006-2008, lo cual afectó a todos los países del mundo, principalmente a México, nación cuya base alimenticia es el maíz y es uno de los mayores consumidores de azúcar.

Hasta la fecha (2010), en México no existe una desviación de productos agrícolas para la producción de biocombustibles líquidos (etanol y biodiesel), debido a que la producción de estos es escasa y se realiza a partir de insumos importados, específicamente el biodiesel de Chiapas se obtiene a partir de insumos provenientes de Centroamérica y Colombia.

La introducción a mediano plazo de los biocombustibles líquidos al mercado mexicano estará acompañada por un cambio en el uso de suelo agrícola, pues parte del mismo será destinado para la producción de insumos cuyo destino será la industria de los bioenergéticos, dejando de usarse dichos recursos para la alimentación humana y pecuaria. Para la obtención de etanol en México a partir de productos de origen agrícola, se tiene planeado utilizar maíz, caña de azúcar, remolacha y sorgo, principalmente, insumos cuyas características productivas son mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Principales insumos agrícolas para la producción de etanol (2009).

Insumo	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Superficie (Ha)
Maíz forrajero ¹	9,240,107.56	27.22	339,460.23
Maíz grano ²	20,142,815.76	3.24	6,216,918.44
Caña de azúcar	48,764,224.27	70.41	692,575.26
Remolacha forrajera	153	19.12	8.00
Betabel ³	13,708.09	18.9	725.30
Sorgo forrajero verde ⁴	5,081,264.25	22.74	223,450.49
Sorgo grano	6,108,085.15	3.61	1,691,990.35

1) Maíz amarillo.

2) Maíz blanco.

3) Remolacha para consumo humano.

4) Sorgo dulce, sin grano.

FUENTE: SIAP-SAGARPA

De acuerdo al consumo de gasolina, la introducción de la mezcla E10 al mercado mexicano demandaría un total nacional de 4,596 ML de etanol anhidro al año, según cifras de PEMEX del 2009. Cuando entre en operación el programa de uso de etanol como oxigenante de la gasolina en un 10% en las zonas metropolitanas de Guadalajara (Jalisco), Monterrey (Nuevo León) y del Valle de México (Ciudad de México y área conurbada de los estados de México e Hidalgo) en el periodo 2010-2012, se demandarán 1,100 ML/año de etanol. Esto implica una serie de

desviaciones de alimentos como el maíz para ser transformados en etanol, lo cual se muestra en la tabla 4. En la columna titulada “Nacional”, se indican las hectáreas y la cantidad de insumo en toneladas anuales requeridas para sustituir las gasolinas actuales por la mezcla E10 en toda la República Mexicana. En la columna titulada “Zonas Metropolitanas”, se señalan las hectáreas y las toneladas anuales de insumos agrícolas requeridas sólo para abastecer a las ciudades de Guadalajara, Monterrey y México con la mezcla E10 para el sector automotriz. Respecto a la caña de azúcar, la sustitución nacional de las gasolinas por la E10 provoca una utilización de 5,846,404 toneladas anuales de azúcar, y si esta introducción de la mezcla E10 se efectúa sólo en las zonas metropolitanas antes descritas, la desviación del alimento azúcar es de 1,399,270 toneladas por año, cifras que corresponden al 118% y al 28% de la producción nacional de azúcar, respectivamente.

Tabla 4. Cantidad de insumos agrícolas necesaria para la introducción de la mezcla E10 (con datos del 2009).

Insumo	Nacional		Zonas Metropolitanas (ZM)*		%Producción Nacional	
	Hectáreas	Ton/año	Hectáreas	Ton/año	Nacional	ZM*
Maíz amarillo	422,116	11,490,000	101,029	2,750,000	124%	14%
Maíz blanco	3,546,296	11,490,000	848,765	2,750,000	57%	14%
Caña de azúcar	815,935	57,450,000	195,285	13,750,000	118%	28%
Sorgo dulce	505,277	11,490,000	120,932	2,750,000	226%	54%
Sorgo grano	3,182,825	11,490,000	761,773	2,750,000	188%	45%

*Guadalajara, Jal.; Monterrey, N.L.; Ciudad de México, D.F. y su área conurbada (Hgo. y Méx.).
Estimación propia a partir de datos de SIAP-SAGARPA y PEMEX.

Respecto a la producción de biodiesel, los insumos agrícolas que se emplearían son la jatropha, la palma africana o de aceite y la higuera. De estas materias primas, la jatropha está sembrándose en el estado de Chiapas. La palma africana es el insumo para biodiesel de mayor producción en México (ver tabla 5). Aunque la jatropha no es comestible, podría desplazar a los cultivos alimenticios, por lo cual se ha planteado la posibilidad de sembrarla en tierras degradadas y no aptas para cultivo alimenticio.

Tabla 5. Principales insumos agrícolas para la producción de biodiesel (2009).

Insumo	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Superficie (Ha)
Jatropha curcas	0	5	0
Palma africana o de aceite	367,084.27	13	28,237
Higuera	3.5	0.7	5

FUENTE: SIAP-SAGARPA

Según datos de consumo de diesel, la introducción de la mezcla de diesel fósil con biodiesel en un 20% (mezcla conocida como B20) implicaría una demanda del biocombustible de 4,166 ML/año, lo cual corresponde a 274,603 hectáreas de cultivo de palma africana. La producción de esta materia agrícola ascendería a unas

3,570 mil toneladas anuales, cifra equivalente al 972% de la producción nacional de palma africana en 2009.

México se convertirá en un productor de biocombustibles líquidos en el corto o en el mediano plazo, ya sea a partir de insumos agrícolas o a partir de alguna otra materia prima, como las algas verde-azuladas, cuya producción en el desierto de Sonora no desplaza a los cultivos de alimentos. Sin embargo, se estudia la utilización de otros energéticos como el hidrógeno, por lo que el uso extendido de los biocombustibles líquidos en la República Mexicana podría no presentarse en el futuro, con lo cual el etanol probablemente sólo se emplearía para sustituir los oxigenantes actuales de la gasolina y el biodiesel sería utilizado en ciertas localidades del país.

Emisión de gases de efecto invernadero

Uno de los objetivos de producción y utilización de los biocombustibles es el evitar o disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en español, o GEE, por sus siglas en portugués), los cuales tienen el efecto de producir un calentamiento del ambiente troposférico de la Tierra, y por ende, un cambio en los patrones climáticos. Los GEI comúnmente emitidos durante la producción y uso de los combustibles líquidos, tanto de origen fósil como agrícola, son el anhídrido carbónico (CO_2 , también conocido como dióxido de carbono), el metano (CH_4) y el anhídrido hiponitroso (N_2O , comúnmente conocido como óxido de nitrógeno u óxido nitroso).

La demanda potencial de etanol anhidro en México para la producción de la mezcla E10, sería de 28.9 millones de barriles anuales, según cifras de consumo nacional de gasolina en 2009. Pero si sólo entrara en operación el Programa para Uso de Etanol en Zonas Metropolitanas 2010-2012, la cantidad demandada de etanol anhidro en Guadalajara, Jal., Monterrey, N.L. y México, D.F. y su zona conurbada de los estados de México e Hidalgo, totalizarían los 6.9 millones de barriles anuales, de acuerdo a datos de consumo de gasolina en 2009 en dichas zonas metropolitanas. Las emisiones de GEI debido a la introducción de la mezcla E10 al mercado mexicano son presentadas en la tabla 6. En esta tabla, se muestra una estimación de las emisiones de GEI para cada escenario de introducción de E10; en el primer renglón se dan las emisiones si esta mezcla se comercializara en toda la República Mexicana, y en el segundo renglón están las emisiones correspondientes a la utilización de la mezcla E10 sólo en las zonas metropolitanas arriba mencionadas. Las emisiones se dan en millones de toneladas (Mton) anuales, y están desglosadas por tipo de GEI. En la última columna, con el título de "Total", las emisiones de todos los gases están expresadas en millones de toneladas de CO_2 equivalente, donde la conversión de las emisiones de CH_4 y de N_2O a una emisión equivalente a CO_2 fue realizada considerando los potenciales de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) para cada GEI respecto al potencial del CO_2 (ver tabla 7).

Tabla 6. Emisiones anuales de GEI debidas a la introducción de la mezcla E10.

Introducción de E10	Mton CO ₂	Mton CH ₄	Mton N ₂ O	Total (Mton)**
Nacional	102.7	0.049	0.016	108.6
ZM*	24.58	0.012	0.004	25.99

*Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Jal., Monterrey, N.L., y México, D.F. y su zona conurbada (Méx. e Hgo.).

**Equivalentes a CO₂.

Estimación propia a partir de datos de consumo de gasolina correspondientes a 2009, dados por PEMEX.

Tabla 7. Potenciales de calentamiento global para cada GEI, referenciados al CO₂.

Gas de Efecto Invernadero (GEI)	GWP
Anhídrido carbónico (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	21
Anhídrido hiponitroso (N ₂ O)	310

FUENTE: SEMARNAT-INE; Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002

En cuanto al biodiesel, se estima una demanda potencial de 26.2 millones de barriles anuales en toda la República Mexicana, según datos de consumo nacional de diesel en 2009. Las emisiones de GEI debidas a la introducción de la mezcla B20 se muestran en la tabla 8. De forma semejante a la tabla 6, las emisiones están desglosadas para cada GEI, además en la columna "Total" se da la suma de emisiones en millones de toneladas de CO₂ equivalente.

Tabla 8. Emisiones anuales de GEI debidas a la introducción de la mezcla B20.

Introducción de B20	Mton CO ₂	Mton CH ₄	Mton N ₂ O	Total (Mton)*
Nacional	55.9	0.003	0.003	56.8

*Equivalentes a CO₂.

Estimación propia a partir de datos de consumo de diesel correspondientes a 2009, dados por PEMEX.

Para poder comparar estas emisiones de GEI de las mezclas E10 y B20 con las correspondientes a los combustibles fósiles, en la tabla 9 se presentan las emisiones de GEI debidas al consumo de gasolina y diesel, de forma semejante a las tablas 6 y 8 para facilitar la comparación entre las cifras de estas tablas. En el caso de la gasolina, en esta tabla se muestran las emisiones correspondientes a toda la República Mexicana en el renglón "Nacional", y las emisiones de GEI provenientes sólo de las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Ciudad de México, en el renglón "ZM".

Tabla 9. Emisiones anuales de GEI por consumo de combustibles fósiles.

Combustible		Mton CO ₂	Mton CH ₄	Mton N ₂ O	Total (Mton)**
Gasolina	Nacional	111.0	0.053	0.013	116.1
	ZM*	26.6	0.013	0.003	27.8
Diesel		57.8	0.003	0.003	58.8

*Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Jal., Monterrey, N.L., y México, D.F. y su zona conurbada (Méx. e Hgo.).

**Equivalentes a CO₂.

Estimación propia a partir de datos de consumo correspondientes a 2009, dados por PEMEX.

Al efectuar la comparación entre las emisiones de GEI, es de observarse que la introducción de las mezclas E10 y B20 disminuye la cantidad de estas emisiones. En la tabla 10 se muestran estas reducciones, para cada combustible y escenario. La reducción de emisiones de GEI es presentada tanto en millones de toneladas de

CO₂ equivalente por año como en porcentaje, el cual está referido al total nacional por consumo de combustibles fósiles (gasolina y diesel).

Tabla 10. Reducción en las emisiones totales de GEI por la introducción de las mezclas E10 y B20 al mercado mexicano.

Combustible		Mton/año**	% Nacional
E10	Nacional	7.51	6.47%
	ZM*	1.80	1.55%
B20		1.96	3.33%

*Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Jal., Monterrey, N.L., y México, D.F. y su zona conurbada (Méx. e Hgo.).

**Equivalentes a CO₂.

Estimación propia a partir de datos correspondientes a 2009, dados por PEMEX.

Aunque el abatimiento de las emisiones de GEI por el uso de las mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles E10 y B20 es pequeño, cabe la posibilidad de implementación de proyectos de producción y programas de aprovechamiento de biocombustibles en algunas zonas de la República Mexicana, particularmente en localidades rurales, donde el abasto de gasolina y diesel es escaso o inexistente. Estos proyectos y programas podrían ser desarrollados bajo el esquema MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) y ser sujetos a emisión de bonos de carbono. Falta incorporar más incentivos fiscales al marco jurídico para que pueda crearse un mercado de bonos de carbono provenientes de la producción y uso final de los biocombustibles.

Fuentes de Información

ALGENOL BIOFUELS: <http://www.algenolbiofuels.com/default.html>

BIOCYCLOS (Destilmex, S.A. de C.V.):

<http://www.destilmex.com/biocyclos2008/index.html>

BIOENERGÍA DE NUEVO LEÓN, S.A. DE C.V. (BENLESA); Descripción general del proyecto de ampliación de la infraestructura para el uso y captura de biogás para la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario de SIMEPRODE, en el Municipio de Salinas Victoria, Nuevo León:

http://www.nl.gob.mx/pics/pages/simeprode_bioenergia_base/Descripcion_ProyectoMonterreyII.pdf

BIOFIELDS (Sonora Fields, S.A.P.I. de C.V.): <http://www.biofields.com>

CÁMARA NACIONAL DE LAS INDUSTRIAS AZUCARERA Y ALCOHOLERA (CNAIA): <http://www.camaraazucarera.org.mx/>

COMISIÓN NACIONAL PARA EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE): <http://www.conae.gob.mx> , <http://www.conuee.gob.mx>

COYLE, William; “The Future of Biofuels: A Global Perspective”, en *Amber Waves*, Noviembre 2007:

<http://www.ers.usda.gov/AmberWaves/November07/Features/Biofuels.htm>

DESTILADORA DEL PAPALOAPAN, S.A. DE C.V.:

<http://ddp.sc/espanol/index.html>

EL MEXICANO; “Suspende Bioenergía operaciones de forma temporal”; Finanzas, 11 de diciembre de 2008:

<http://www.oem.com.mx/elmexicano/notas/n966116.htm>

EL UNIVERSAL; “Bioenergía, lista para el biodiesel”; Finanzas, 7 de febrero de 2008:

<http://www.eluniversal.com.mx/finanzas/62574.html>

GOBIERNO DEL ESTADO DE CHIAPAS; Instituto de Comunicación Social; “Inicia la era de bioenergéticos en Chiapas”; Comunicado 1538, 6 de mayo de 2008:

<http://www.cocoso.chiapas.gob.mx/documento.php?id=20080507124558>

GOBIERNO DEL ESTADO DE CHIAPAS; Instituto de Comunicación Social; “Chiapas, pionero en el uso de biodiesel en transporte público”; Boletín 0200, 3 de enero de 2010:

<http://www.comunicacion.chiapas.gob.mx/documento.php?id=20100103114121>

GRUPO ENERGÉTICOS (ENERGEX); Biocombustibles Internacionales:

<http://www.grupoenergeticos.com/biocombustibles.html>

INSTITUTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS, RENOVABLES, BIOCMBUSTIBLES Y ENERGÍAS ELÉCTRICAS (IEARBYEE) (Chiapas):

<http://www.energiaschiapas.gob.mx/>

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI): <http://www.inegi.gob.mx>

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY (ITESM); Biodiesel ITESM: investigación y aplicaciones; Taller Práctico sobre Bioenergía, Monterrey, N.L., Agosto 2006:

http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/bioenergia_10_morones.pdf

LA JORNADA; “Construyen en Sinaloa tres plantas para producir etanol”; Estados, 27 de junio de 2008:

<http://www.jornada.unam.mx/2008/06/27/index.php?section=estados&article=038n1est>

LA JORNADA; “Planta de etanol en Sinaloa, parada por demoras de Sagarpa”; Estados, 29 de septiembre de 2008: <http://www.jornada.unam.mx/2008/09/29/index.php?section=estados&article=039n2est&partner=rss>

LEY DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CAÑA DE AZÚCAR (texto vigente publicado en DOF 22-08-2005, última modificación publicada en DOF 20-10-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LDSCA.pdf>

LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 01-02-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>

LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 28-11-2008): <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAERFTE.pdf>

MORECO BIODIESEL: <http://www.moreco.com.mx/inicio>

PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX): <http://www.pemex.com/>

PEMEX; Uso de etanol como oxigenante en gasolinas; Mayo 2008: <http://www.pemex.com/files/content/etanol.pdf>

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA; Sala de Prensa del Gobierno Federal; “El Presidente Calderón en la Ceremonia de Entrega del Premio Globe”, 17 de diciembre de 2009: <http://www.presidencia.gob.mx/prensa/?contenido=51550>

REGLAMENTO DE LA LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 18-06-2009): http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LPDB.pdf

REGLAMENTO DE LA LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA (texto vigente sin modificaciones publicado en DOF 02-09-2009): http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LAERFTE.pdf

ROTHKOPF, Garten; A Blueprint for Green Energy in the Americas; Inter-American Development Bank, USA: 2007: <http://www.iadb.org/biofuels/>

SASSE, Diana; “La titularidad del gas metano como insumo para Proyectos de generación de electricidad”, en *El Mundo del Petróleo*, Agosto 2009

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA); Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP):

<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA); FIRCO; Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario; SAGARPA-FIRCO, México: 2007:

[http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO de BIOGAS.pdf](http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO_de_BIOGAS.pdf)

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGARPA); Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico; SAGARPA, México: 2009:

http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/PROINBIOS_20091013.pdf

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER): <http://www.sener.gob.mx>

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER); Marco Jurídico de los Bioenergéticos; SENER, México: 2009:

http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/Marco_Juridico_Bioenergeticos.pdf

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER); Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México; SENER-GTZ-BID, México: 2006:

[http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles en Mexico Estudio Completo.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf)

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER); Programa de Introducción de Bioenergéticos; SENER, México: 2009:

<http://www.energia.gob.mx/webSener/res/0/Prog%20Introd%20Bioen.pdf>

SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER); Programa Sectorial de Energía 2007-2012; SENER, México: 2007:

<http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/Programa%20Sectorial%20de%20Energia%202007-2012.pdf>

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT); INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE); Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002; INE, México: 2006:

http://cambio_climatico.ine.gob.mx/descargas/inventario90_02.pdf

UNIÓN NACIONAL DE CAÑEROS, A.C.: <http://www.caneros.org.mx/>