



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**Escenarios de emisiones atmosféricas del etanol al usarse
como oxigenante de las gasolinas en la ZMVM**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

ENERGÍA – ENERGÍA Y AMBIENTE

P R E S E N T A:

Carlos Alberto García Bustamante

Director de tesis: **Dr. Fabio Manzini Poli**



Temixco, Morelos. 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Roberto Best y Brown

Secretario: Dr. Fabio Manzini Poli

Vocal: Dr. Jorge Marcial Islas Samperio

1^{er}. Suplente: Dr. Alfredo Martínez Jiménez

2^{do}. Suplente: Dr. José Rubén Dorantes Rodríguez

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA, TEMIXCO MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

Fabio Manzini Poli

FIRMA

Dedicatoria

Tomando palabras de Edgar A. Poe con el más profundo respeto dedico este trabajo:

“A los pocos que me aman y a quienes yo amo, a aquellos que sienten más que a aquellos que piensan, a los soñadores y a quienes depositan su fe en los sueños...”

Agradecimientos

Al Dr. Fabio Manzini por su guía, apoyo, humor e interés para la realización de todo el trabajo.

A los Doctores Jorge Islas, Alfredo Martínez, Roberto Best y Rubén Dorantes por el tiempo y los comentarios para mejorar el trabajo.

Al Ing. Eduardo Olivares de la SEMARNAT por facilitarme el MOBILE6-México y por las asesorías.

Al Dr. Isaac Shifter por sus asesorías por correo electrónico.

Al Ing. Manuel Enríquez por la información proporcionada.

A la UNAM y particularmente al CIE por permitirme realizar mis estudios.

A mis compañeros y amigos del CIE por la amistad, la ayuda desinteresada y el buen humor.

A los contribuyentes que financiaron mis estudios de maestría a través del CONACyT.

A mis amigos.

A Iris que me brindó su cariño, cuidados y ánimos, durante una parte de la realización de este trabajo.

A Gabriela, por la ternura, el cariño, la comprensión y por levantarme en los momentos tristes.

A mi familia.

A mis hermanas.

Y sobre todo a mis padres y a Dios.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 El etanol en el sector transporte a gasolina	
El sector transporte y su consumo de derivados del petróleo	7
El sector transporte y los combustibles alternativos	9
El etanol	10
Producción de etanol	10
Modalidades del uso del etanol en los vehículos del sector transporte	11
Ventajas y desventajas del uso del etanol	11
Experiencias Internacionales	
El Programa Proalcool en el sector transporte Brasileño	12
El etanol en el sector transporte en Estados Unidos	14
Sustitución interenergética de gasolina por etanol en Brasil y Estados Unidos	15
Capítulo 2 Procesos de producción de etanol	
Procesos de producción de etanol	24
Etanol a partir de la caña de azúcar	24
Etanol a partir del maíz	25
Etanol a partir de biomasa lignocelulósica	25
Proceso de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica por hidrólisis enzimática	28
Descripción detallada del proceso	29
Preparación de la materia prima	29
Pretratamiento	30
Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (SSCF)	30
Producción de Enzimas	31

Destilación, Deshidratación y Evaporación	31
Uso de los residuos para generación de energía del proceso	31
Balance de energía	32

Capítulo 3 Aspectos económicos y Potencial del etanol para una sustitución de gasolina en el sector transporte mexicano.

Aspectos económicos de la producción de etanol a partir de caña de azúcar, maíz y biomasa lignocelulósica	39
Costo de materia prima	39
Costos del proceso	41
Ventas de co-productos	42
Costos de la Producción de Etanol	42
Estructura de Costos en la Producción de Etanol	44
Potencial actual de producción de etanol en México	48
Producción actual de etanol en México	52
Consideraciones para la introducción de etanol como oxigenante de las gasolinas en la ZMVM	53

Capítulo 4 Emisiones Contaminantes y Factores de Emisión

Emisiones de Contaminantes por el Sector Transporte	55
Emisiones de Vehículos automotores	56
Contaminantes y tóxicos del aire	57
Emisiones de contaminantes criterio	57
Partículas (PM)	57
Monóxido de Carbono (CO)	58
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	58
Dióxido de Azufre (SO₂)	59
Hidrocarburos Totales (THC)	59
Emisiones Tóxicas	60
Acetaldehído	60
Formaldehído	60
Benceno	61

1,3-Butadieno	62
La contaminación por vehículos en la ZMVM	62
Los Factores de Emisión y el modelo Mobile6-México	
Factores de Emisión	64
Factores de Emisión de Fuentes Móviles	64
El Modelo MOBILE6	64
El modelo MOBILE6-México	65
Efectos de las características locales-regionales en el modelo Mobile6 México	66
Parámetros Requeridos	67
Temperatura	67
Altitud	68
Propiedades del Combustible	68
PVR (Presión de Vapor Reid)	68
Cantidad de Oxígeno	68
Características del parque vehicular	69
Tipos de vehículos en México	69
Las normas de calidad del aire	71
Cálculo de Factores de Emisión de Vehículos en la ZMVM usando MOBILE6-México	74
Características de la ZMVM	75
Combustibles y sus Propiedades para el cálculo de factores de emisión usando MOBILE6-México	76
Los automóviles “flex-fuel” y el E85	79
Factores de emisión calculados por MOBILE6-México	80
Capítulo 5 Escenarios de Emisiones a la atmósfera del parque automotor a gasolina de la ZMVM	
Construcción de Escenarios	85
Simulación de Escenarios	86

Número de Vehículos	87
Cálculo de emisiones	89
Resultados	90
Consumo Energético	90
Monóxido de Carbono (CO)	91
Hidrocarburos Totales (THC)	93
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	94
Dióxido de Azufre (SO₂)	96
Partículas menores a 10 micras (PM10)	96
Benceno	97
Formaldehídos	99
Acetaldehídos	100
1,3-Butadieno	101
Emisiones de CO₂	102
Demanda de etanol para la ZMVM	103
Conclusiones	107
Referencias	110
Glosario	116
Anexo A	119
Anexo B	121
Anexo C	123

Introducción

Los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) representan la principal fuente de energía primaria en el mundo con el 80% del total (348,342 PJ) [IEA, 2004a]. Se ha discutido mucho sobre las características de los combustibles fósiles a las que se les da una connotación negativa, particularmente el caso del petróleo. Entre estos aspectos negativos del uso del petróleo encontramos los mencionados a continuación. El primero de estos aspectos tiene que ver con cuanto tiempo más puede durar el petróleo, ya que como sabemos es una fuente de energía finita y que requiere de muchos miles de años para volverse a formar, lo que para el tiempo de vida humano significa un recurso no renovable. Información de British Petroleum (BP) nos dice que las reservas mundiales al año 2004 ascendieron a 1,188,600 millones de barriles de petróleo, mientras que el consumo fue de 29,295 millones de barriles al año, lo que significó una razón Reservas / Producción promedio mundial de 40.5 años [BP, 2005]. Otro aspecto negativo es que el petróleo se encuentra concentrado en pocos países. Dos tercios de las reservas mundiales se encuentran localizadas en el medio oriente y en África del norte. Esta concentración de recursos ha llevado a crisis y conflictos como la crisis del petróleo en los 1970s y la guerra del golfo en los 1990s [Boyle *et al*, 2003]. También encontramos que la explotación de combustibles fósiles representa riesgos en prácticamente toda su cadena de producción, en la extracción del petróleo pueden ocurrir incendios. Durante su transporte y almacenamiento se pueden presentar accidentes, fugas de los tanques de almacenamiento de los buquestanque que contaminen las costas o que afecten a la vida. Durante su producción y consumo, su combustión genera emisiones atmosféricas que pueden ser dañinas para el ser humano y para otras formas de vida a nivel local, regional y global.

A nivel global el uso de combustibles fósiles como fuente principal de energía ha ocasionado un aumento en la concentración de CO₂ el principal de los gases de efecto invernadero (GEI)¹. Se les llama gases de efecto invernadero porque contribuyen a crear un efecto de retención del calor radiado por la Tierra, tal y como sucede en un invernadero. En un principio la Tierra recibe la radiación solar en un rango amplio de longitudes de onda (desde el UV, visible e infrarrojo), que a su vez es absorbida por los continentes y los mares, ocasionando que se calienten. A su vez de manera simultánea la Tierra reemite este calor pero a una longitud de onda mayor a la cual entró (en el rango del infrarrojo). Los gases de efecto invernadero son capaces de absorber la radiación infrarroja, lo que ocasiona que el calor no sea reemitido hacia el exterior de la atmósfera y que este quede atrapado en la Tierra. Naturalmente existe en la Tierra un equilibrio entre el calor que se absorbe y el que se reemite ya que esto es lo que permite que se den las condiciones de temperatura necesarias para la vida, sin embargo, cada vez hay mayores evidencias de que el aumento en las concentraciones de GEI afecta al mencionado equilibrio.

Científicos de todo el mundo han registrado un incremento de la temperatura media en la superficie de la Tierra (es decir, el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie continental y de la temperatura de la superficie del mar) desde el año 1861 a la

¹ Entre estos gases podemos encontrar el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃), entre otros.

fecha [IPCC, 2007]. A este fenómeno se le da el nombre de Calentamiento Global, y se han hecho numerosos estudios sobre cuales pueden ser los efectos de este aumento de temperatura. El principal problema parece ser un cambio en el clima de la Tierra el cual podría tener consecuencias como temperaturas más elevadas, menos días de frío y de heladas en la mayoría de las zonas terrestres, aumento de lluvias fuertes en latitudes altas y medias del norte, sequías más intensas y frecuentes en otras regiones, disminución en extensión y espesor del hielo marino en el Ártico, derretimiento de los glaciares polares, aumento de las pérdidas económicas asociadas a los fenómenos meteorológicos y el incremento del nivel del mar. [IPCC,2007]. Aunque oficialmente aún no se afirma categóricamente, el nivel de certeza sobre la afirmación de que el aumento de la concentración de GEI es la causa más probable (“most likely”) con un nivel de certeza del 95% [IPCC,2007].

A nivel local y regional se presentan emisiones como las de monóxido de carbono (CO), partículas de diámetros menores a 10 y 2.5 micras (PM10 y PM2.5 respectivamente), estas emisiones acarrearán daños cardiovasculares, cardiopulmonares y respiratorios. Además se encuentran sustancias tóxicas como el benceno que es un cancerígeno [Molina *et al*, 2002].

El principal causante del deterioro de la calidad del aire de la mayoría de las grandes ciudades es el sector transporte debido a sus emisiones de contaminantes óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales, partículas, y los contaminantes tóxicos como benceno, 1,3 butadieno, formaldehído y acetaldehído, así como las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que es el principal Gas de Efecto Invernadero. Este problema del deterioro de la calidad del aire en las grandes ciudades se debe principalmente al incremento de los vehículos automotores que circulan en ellas, como es el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México [SMA, 2002]. Las emisiones de contaminantes tienen efectos negativos en la salud de los habitantes de esos centros urbanos.

Existen dos formas principales de mitigar las emisiones contaminantes de los vehículos hacia el ambiente. Una de estas formas es la aplicación de normas ambientales que permiten limitar las emisiones contaminantes para los diferentes tipos de vehículos. Estas normas se cumplen instalando en los vehículos tecnologías de control de emisiones, el dispositivo más conocido es el convertidor catalítico de una o tres vías. Las normas van cambiando en el transcurso de los años para dar paso a nuevas normas que limitan de manera cada vez más importante las emisiones al aire, por lo que la tecnología de control de emisiones juega un papel fundamental.

La otra forma de mitigar las emisiones de los vehículos es cambiando la composición del combustible, o sustituyendo parcial o completamente los combustibles. La búsqueda de nuevos combustibles debe tomar en cuenta el problema del agotamiento del petróleo, del calentamiento global del planeta y la sustentabilidad de las materias primas a partir de las cuales se obtendrán estos nuevos combustibles.

Uno de los combustibles alternativos para sustituir parcial o totalmente la gasolina en vehículos es el etanol, el cual es usado ampliamente en Brasil y Estados Unidos.

La adición de etanol a la gasolina tiene ventajas como elevar su octanaje y aumentar la oxigenación lo cual mejora la combustión en los motores de combustión interna de ciclo Otto, además de disminuir las emisiones de monóxido y dióxido de carbono.

En México desde 1988 se ha debatido sobre la posibilidad de utilizar etanol como aditivo oxigenante de las gasolinas para lograr mejoras en la calidad del aire [SEMIP, 1988], sin embargo esta iniciativa no prosperó y se prefirió utilizar MTBE como oxigenante. En la actualidad el MTBE es considerado un probable cancerígeno en humanos [EPA, 1993] por lo que se está prohibiendo su uso en algunos estados de la Unión Norteamericana. Por lo anterior y también debido a la necesidad de diversificación energética que sea factible económicamente, la idea de considerar el uso de etanol como oxigenante se ha retomado e inclusive en México en el año 2007 se aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Esta ley pretende servir para promover el uso de biocombustibles (etanol y biodiesel) en los principales centros urbanos del país.

Además de atribuírsele beneficios ambientales al uso del etanol cuando es mezclado con gasolinas o usado como combustible, se le liga a otros beneficios como la contribución a lograr la seguridad del suministro energético, y a la sustitución de importaciones para mejorar la balanza comercial. En 1975 Brasil implementó su programa Proalcool en el que se utiliza el uso de etanol anhidro mezclado con gasolina hasta en un 26% (mezcla llamada gasohol) y etanol hidratado como combustible puro en vehículos modificados para este fin. Esto con el objeto de reducir las altas importaciones de petróleo que ponían al país en dificultades en situaciones de altos precios del petróleo. Estados Unidos también ha ido aumentando fuertemente la producción de etanol en los últimos años con el fin de mitigar su alta dependencia por el petróleo, y tener una mayor seguridad en el suministro energético. Recientemente el Presidente de los Estados Unidos anuncio su mandato de combustibles estándar en donde se requerirían 35 mil millones de galones de combustibles renovables (incluyendo etanol) para el año 2017, lo cual representa cinco veces más el objetivo que tenían al 2012 [White House, 2007]. De hecho, la presidencia de Estados Unidos presentó la Iniciativa de Biocombustibles, en donde se fomenta la investigación para lograr la producción de combustibles procedentes de la biomasa lignocelulósica como son los residuos agrícolas y forestales. Una meta en específico de esta iniciativa es acelerar la investigación y hacer competitivo en costos al etanol lignocelulósico para el año 2012 ofreciendo el potencial de reemplazar hasta el 15% del combustible usado actualmente para el año 2017 [Herrera, 2006]

En general, el etanol se puede obtener de biomasa que contiene azúcares o almidones, tales como la caña de azúcar y el maíz respectivamente. De esta forma la producción de combustibles se ha convertido en una actividad más del sector agroindustrial, en donde la experiencia Brasileña y Estadounidense reporta importantes beneficios sociales en términos de la creación de empleos.

Para evaluar la posibilidad real de la incorporación de etanol como mezcla de gasolina en México se deben tomar en cuenta los aspectos, económico, energético y ambientales. Estudios señalan [Wang, 2005] [Morris, 2005] que el obtener el etanol de los recursos lignocelulosicos es una opción prometedora en los aspectos del balance de energía y de las

emisiones contaminantes en el proceso, sin embargo estos procesos actualmente presentan desventajas económicas. Otros estudios [Wooley, 1999] [Wyman, 1999] señalan que en un futuro cercano el aspecto económico mejorará debido al desarrollo tecnológico y al aumento en precio de las otras materias primas como el maíz y la caña de azúcar, de manera que también puede llegar a competir económicamente con el etanol producido a partir de la caña de azúcar y del maíz.

Es necesario también conocer los efectos ambientales del uso de nuevos combustibles. En este trabajo se crean escenarios donde se oxigenan las gasolinas de la Zona Metropolitana del Valle de México con etanol, de manera que puedan evaluarse cuáles son las ventajas y desventajas de usar etanol como oxigenante de las gasolinas que usan los motores de combustión interna convencionales que funcionan con gasolina, donde también se considere la introducción de las nuevas tecnologías para el control de las emisiones con el objeto de cumplir con normatividades más exigentes. Al mismo tiempo se exploran las condiciones económicas y energéticas para la producción de etanol.

Planteamiento del Problema

En México se observan altas emisiones de contaminantes del aire debido al uso de combustibles fósiles por los vehículos, lo que repercute negativamente en la salud de los habitantes, además de su impacto de cambio climático global; por lo que se hace necesario un mejor conocimiento futuro de las emisiones al utilizar combustibles alternativos, en este caso etanol mezclado con gasolina. Una estimación de las emisiones, y de los factores económicos y energéticos asociados al etanol permitirán contribuir a lograr un proceso de planeación con visión en el largo plazo para lograr una diversificación en la oferta de energía del sector transporte y de mejora en la salud de los habitantes y los ecosistemas.

Hipótesis

Mediante el uso de etanol como biocombustible es posible iniciar una sustitución parcial de gasolina en el parque automovilístico de la Zona Metropolitana del Valle de México que desde el punto de vista ambiental mitigue las emisiones atmosféricas contaminantes en su uso.

Objetivos Generales

Evaluar los efectos en la calidad del aire a largo plazo por el uso de etanol como oxigenante de las gasolinas que se consumen en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Explorar las condiciones económicas y energéticas bajo las cuales se podría dar una sustitución parcial de gasolinas por etanol.

Objetivos específicos

- Conocer los antecedentes del consumo energético y justificación del uso de biocombustibles.

- Evaluación del potencial actual de producción de etanol en México.
- Determinar la viabilidad energética de producción de etanol del proceso de hidrólisis de biomasa lignocelulósica.
- Dependiendo de la normatividad ambiental aplicada, determinar el estado presente y la evolución posible de los factores de emisión por tipo de vehículo y combustible, de los contaminantes atmosféricos CO, CO₂, NO_x, SO₂, HCT, PM10, y de los tóxicos 1,3 Butadieno, benceno, formaldehídos y acetaldehídos. En el espacio de la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Determinar qué emisiones atmosféricas traería el adoptar el uso de etanol en el parque de automóviles de la Zona Metropolitana del Valle de México. Con la normatividad actual y con otra normatividad más exigente.
- Determinación del volumen de etanol necesario para satisfacer los escenarios propuestos y el área de tierra requerida para cultivarse al emplear diferentes tecnologías de producción.

Metodología

- Estudio del etanol como combustible alternativo en el sector transporte, usos, ventajas y desventajas.
- Estudio de las experiencias internacionales en el uso de etanol y análisis de las mismas a través de un estudio de sustitución interenergética.
- Estudio de los procesos más comunes de obtención de etanol.
- Estudio detallado y balance de energía del proceso de obtención de etanol a partir de madera por medio de hidrólisis enzimática. Discusión sobre la importancia del balance energético en los procesos de producción de etanol.
- Estudio de los aspectos económicos de la producción de etanol.
- Cálculo del potencial de producción de etanol en México con información científica de los rendimientos y con información sobre las áreas potenciales para cultivar las materias primas.
- Recomendaciones para la sustitución de gasolina por etanol en las gasolinas de la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Estudio de los contaminantes debidos a la actividad del sector transporte a gasolina
- Cálculo de factores de emisión de contaminantes atmosféricos utilizando el software MOBILE-6 México.
- Elaboración de escenarios del sector transporte en la ZMVM hasta el año 2030.
- Utilizar como herramienta LEAP (Long Energy Alternative Planning) para la simulación de escenarios, obtención del consumo de energía y cuantificación de emisiones.
- Conclusiones.

Contenido

El capítulo 1 describe el uso del petróleo en el sector transporte mundial, estudiando posteriormente el caso específico de México. De igual forma se habla de los combustibles

alternativos para el sector transporte, particularmente del etanol. Se describen las ventajas y desventajas del uso de etanol y se analizan las experiencias internacionales a través de un estudio de sustitución interenergética.

El objetivo del capítulo 2 es hacer una revisión de los procesos de producción de etanol más comunes, así como el estudio de uno de los procesos más prometedores (a partir de biomasa lignocelulósica). También se realiza un balance de energía a partir de los diagramas del proceso para una planta de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica mediante hidrólisis enzimática de la madera. Posteriormente, se discute la importancia de los balances de energía en la producción de etanol, se analizan los resultados del balance de energía del proceso y se inserta en el debate de factibilidad energética de procesos para la producción de etanol.

En el capítulo 3 se revisan los aspectos económicos más importantes para la producción de etanol y se discuten algunas de las ventajas de obtener el etanol a partir de recursos lignocelulósicos al aplicar una visión a mediano plazo. De igual forma se estudia el potencial de producción de etanol en México cuando se obtiene de la caña de azúcar, el maíz y los recursos lignocelulósicos. Finalmente se presentan una serie de recomendaciones que contribuirían para lograr una sustitución parcial de gasolina por etanol en México.

En el capítulo 4 se describen los contaminantes criterio y los tóxicos del aire que provienen de los vehículos automotores que emplean como combustible gasolina y mezclas de etanol y gasolina en diversas proporciones. También se comentan algunos de sus efectos en la salud y el ambiente. Así mismo se revisan las normas ambientales y algunas de sus tecnologías de control. De igual forma se describe la metodología empleada para el cálculo de factores de emisión para los contaminantes considerados, para lo cual se aplicará el modelo MOBILE6-México a los combustibles MTBE5 (5% volumen MTBE y 95% volumen gasolina), E10 (10% volumen etanol y 90% volumen gasolina) y ETBE15 (15% volumen ETBE y 85% volumen gasolina) considerando las condiciones climatológicas y geográficas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Posteriormente se presentan los factores de emisión calculados.

Finalmente en el capítulo 5 se generan y se simulan tres escenarios, uno de referencia y dos alternativos que describen la evolución al año 2030 del parque automovilístico de la ZMVM y sus emisiones a la atmósfera al utilizar los diferentes combustibles. Se discuten los resultados obtenidos y se evalúa el volumen de etanol necesario para oxigenar la flota vehicular de la ZMVM en el año 2030.

Capítulo 1

El etanol en el sector transporte a gasolina

En este capítulo se describe el uso del petróleo por el sector transporte en el mundo, estudiando posteriormente el caso específico de México. De igual forma se habla de los combustibles alternativos para el sector transporte, particularmente del etanol. Se describen las ventajas y desventajas del uso de etanol y se analizan las experiencias internacionales a través de un estudio de sustitución interenergética.

El sector transporte y su consumo de derivados del petróleo

Se calcula que alrededor del 35% del suministro de energía primaria en el mundo proviene del petróleo [Goldemberg, 2007]. A nivel mundial el sector transporte es el que consume la mayor parte de esta energía del petróleo, usando alrededor del 50% (ver figura 1.1).

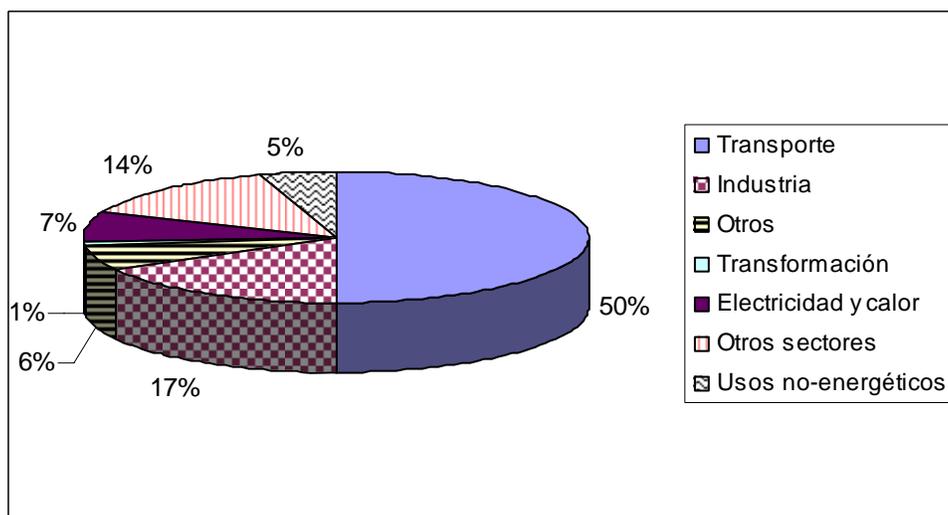


Figura 1.1 Consumo mundial de los productos del petróleo en 2002. Total 146.53 EJ [IEA,2004a].

Se estima que esta tendencia mundial continuará en los próximos años. Según datos de la Agencia Internacional de Energía el sector transporte será en los próximos 30 años el sector que demandará los mayores recursos petrolíferos, con el 54% (65.34 millones de barriles diarios) del consumo de petróleo en el 2030 (121 millones de barriles diarios) [IEA, 2004b].

Por otra parte, en México el sector transporte utiliza el 43% del consumo final total de energía (ver figura 1.2), siendo más específicos se encuentra que el consumo de energía de los automóviles a gasolina fue de 28% del mismo consumo final total de energía.

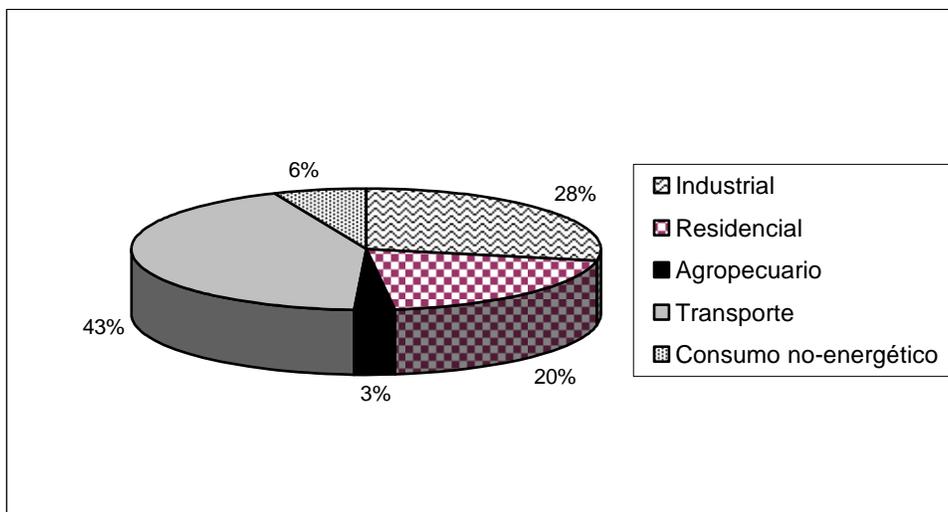


Figura 1.2 Consumo nacional de energía en 2004, participación porcentual de 6,816 PJ [SENER, 2005]

El sector transporte en México está formado por cuatro subsectores: 1) Autotransporte: incluye a los servicios de transporte para el movimiento de personas y carga. 2) Aéreo: los vuelos nacionales e internacionales. 3) Ferroviario. 4) Marítimo: incluye a la marina mercante, la armada nacional, empresas pesqueras y embarcaciones en general.

El sector transporte tiene una muy alta dependencia del petróleo, ya que en su mayor parte está formado por el subsector autotransporte que está compuesto por vehículos que utilizan motores de combustión interna, los cuales funcionan principalmente con gasolina y diesel (ambos derivados del petróleo), combustibles que no parecen poder ser sustituidos en el mediano plazo. Según datos de PEMEX en México en el año 2006 se consumieron 41,675 millones de litros de gasolina, de los cuales se importaron 11,880 millones de litros (28.5% de las ventas) [PEMEX, 2007]. Estas cifras muestran un aumento tanto en las ventas como en la importación en relación con el año 2005, donde las ventas alcanzaron los 38,959 millones de litros y las importaciones llegaron a los 9,854 millones de litros (25.3% de las ventas) [PEMEX, 2007].

En la figura 1.3 se muestra la venta y la importación de gasolinas en México del año 2002 al 2006.

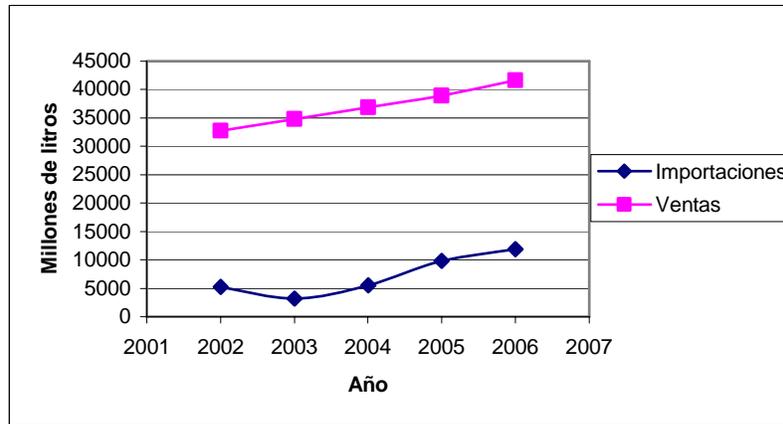


Figura 1.3 Ventas internas e importaciones de gasolinas en México (2002-2006) [PEMEX, 2007].

El sector transporte y los combustibles alternativos

En el mundo la motivación original para el desarrollo de combustibles alternativos a la gasolina y el diesel, fue el darse cuenta que el precio y disponibilidad del combustible depende de las naciones productoras de petróleo que cuentan con las mayores reservas. Estados Unidos, algunos países europeos y Japón han impulsado el desarrollo de combustibles alternativos debido a que se han convertido en naciones dependientes de las importaciones de petróleo para satisfacer sus necesidades de energía.

Hoy en día existe una búsqueda continua de combustibles alternativos debido al agotamiento del petróleo y al problema de cambio climático atribuido a los gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles fósiles.

Entre los combustibles alternativos destacan:

- Éteres, los cuales son utilizados como oxigenantes de las gasolinas: DME (Dimetil Éter), MTBE (Metil Terbutil Éter, compuesto por metanol e isobuteno, el isobuteno proviene del petróleo), ETBE (Etil Terbutil Éter, compuesto por etanol e isobuteno)
- Alcoholes: Metanol (alcohol metílico), etanol (alcohol etílico) y otros alcoholes; en su forma pura, o bien en mezclas de 85 por ciento en volumen de alcohol con 15 por ciento de gasolina regular (M85 y E85).
- Gas Natural Líquido (GNL)
- Gas LP
- Derivados líquidos del carbón
- Biodiesel derivado de aceites vegetales.
- Hidrógeno

El combustible alternativo que más se utiliza en el mundo es el etanol, a nivel mundial en el año 2005 se produjeron alrededor de 12,150 millones de galones (45,988 millones de litros o 968.79 PJ, lo cual corresponde al 8.67% de la energía usada por los vehículos en Estados

Unidos en el año 2004) donde Brasil y Estados Unidos producen alrededor del 70% del total [RFA, 2007]. El etanol es el que tiene grandes perspectivas de seguirse desarrollando ya que ha inducido desarrollos tecnológicos en la industria automotriz, primero al fabricar motores que sólo utilizaban etanol y desde 2003 motores “flexibles” que admiten cualquier proporción de mezcla entre etanol y gasolina.

El etanol

El alcohol etílico o etanol (C_2H_6O) es el más conocido de los alcoholes. Puede obtenerse químicamente a partir del etileno, un producto de la refinación del petróleo; a partir del etano, un constituyente del gas natural; o bioquímicamente a través de azúcares fermentables, derivados típicamente del azúcar, cultivos con almidón, celulosa y otras formas de biomasa. El etanol tiene muchas aplicaciones como disolvente de productos orgánicos y como materia prima en la manufactura de colorantes, fármacos, cosméticos y explosivos. También es un constituyente de las bebidas alcohólicas. El etanol es el único de los alcoholes de cadena lineal que no es tóxico. A nivel industrial la opción de producción bioquímica es más apropiada debido a que la síntesis química usa productos que son muy demandados en la industria química, además sería no renovable.

Producción de etanol

El proceso bioquímico convencional de producción de etanol a partir de biomasa consiste en la conversión de ésta en azúcares fermentables, la fermentación de esos azúcares en etanol, y la separación y purificación del etanol. El etanol contiene 35% de oxígeno. Mediante la fermentación se produce etanol, luego se destila para remover la mayoría del agua hasta obtener un 95 por ciento de etanol en volumen. Esta mezcla es llamada etanol hidratado. Si el agua restante es removida mediante destilación extractiva u otro proceso, al etanol resultante se le llama etanol anhidro y este es el que se utiliza para mezclarlo con gasolina. Finalmente el etanol es “desnaturalizado” para hacerlo no apto para consumo humano, esto se logra adicionando una pequeña cantidad de gasolina.

Los procesos tradicionales de fermentación recaen en levaduras, que convierten en etanol azúcares de seis-carbonos, como la glucosa, la sacarosa, la fructosa en etanol. De aquí que las materias primas más utilizadas sean la caña de azúcar, el betabel y el almidón de maíz.

La materia prima representa uno de los componentes de mayor costo en la producción de etanol [IEA, 2004], de aquí que se busquen otras materias primas de menor costo, como es el caso de la biomasa lignocelulósica. Los materiales lignocelulósicos como la madera pueden ser una opción de materia prima más barata debido a su abundancia y a que esta no significa un alimento para los humanos. Existen tecnologías para “romper” los materiales lignocelulósicos en azúcares, sin embargo todavía son caras, así como también el costo de colectar y transportar esta materia prima.

Modalidades del uso del etanol en los vehículos del sector transporte

El uso que prevalece para el etanol se encuentra como combustible en los vehículos de ignición por chispa. La cantidad de etanol en mezclas con gasolina varía desde el 5% al 100%. El etanol que se mezcla con la gasolina debe ser etanol anhidro, i.e. no debe contener agua, de lo contrario puede ocurrir una separación de fase entre la gasolina y el agua-etanol. El etanol anhidro debe ser transportado separadamente a las terminales de distribución del combustible para minimizar cualquier posible contacto con el agua, ya que es altamente higroscópico y tiende a absorber agua fácilmente. Típicamente se mezcla con la gasolina justo antes de ser cargado a los vehículos.

En algunos países la mezcla más común es la de la gasolina con un 5% a 10% del volumen de etanol anhidro, en Brasil la mezcla es de hasta el 26% de etanol anhidro, y en otros países como en Estados Unidos de 85% del volumen.

El etanol hidratado al 100% también se utiliza, pero en vehículos específicamente diseñados para funcionar con este combustible. El etanol hidratado es más barato de manufacturar que el etanol anhidro, ya que no se necesita el proceso adicional de eliminar el agua por completo. Brasil tiene el mercado más grande de vehículos que funcionan con etanol hidratado.

Otra aplicación del etanol es como materia prima para hacer éteres, el más común es el etil terbutil éter (ETBE), un oxigenante que se mezcla con la gasolina y que ofrece un alto octanaje. Actualmente se utiliza en España y Francia [Malsa, 2006]. El ETBE se sintetiza con un 48% de etanol y un 52% de isobuteno derivado de la destilación del petróleo. El ETBE tiene como ventaja que elimina muchos de los impedimentos históricos para aumentar el uso de etanol, como alta volatilidad que genera en la mezcla etanol-gasolina y su incompatibilidad con los ductos de gasolina debido a que el etanol es higroscópico. Esto permite que el ETBE pueda ser manufacturado a nivel refinería donde ahí mismo puede ser mezclado con gasolina para pasar a las distribuidoras posteriormente. Francia es uno de los países que usa etanol obtenido de la remolacha en forma de ETBE mezclado con gasolina [Malsa, 2006].

Ventajas y desventajas del uso del etanol

Como el etanol es un combustible líquido, requiere de relativamente pequeñas modificaciones en la actual infraestructura de almacenamiento, distribución y expendio de gasolina. Esto ofrece una ventaja significativa sobre otros combustibles alternativos como el gas natural comprimido (GNC), el gas licuado de petróleo (GLP), electricidad e hidrógeno. También es importante señalar que las modificaciones en los vehículos necesarias para funcionar con este biocombustible depende del contenido de etanol. Para la mezcla E10 (10% del volumen es etanol y el 90% restante es gasolina) no se requieren modificaciones en el motor, solamente se debe tener cuidado con algunos sellos y mangueras, ya que el etanol podría causar degradación.

El etanol tiene menor contenido energético (alrededor de un tercio menos) que la gasolina en base a su volumen, lo que puede resultar en una menor economía del combustible (menores distancias recorridas por litro). Ver Tabla 1.1.

	Gasolina	Etanol
Poder calorífico (kJ/kg)	34900	26700
Número de Octano (RON/MON)	91/80	109/98
Calor latente de Vaporización (kJ/kg)	376-502	903
Temperatura de ignición C	220	420
Relación estequiométrica aire combustible	14.5	9

Tabla 1.1 Propiedades y características del Etanol [Goldemberg, 1999].

Una potencial ventaja del etanol es una reducción en de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector transporte. En teoría el etanol permite reducciones en las emisiones de GEI, especialmente si se lleva a cabo a gran escala la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. [Cardona, 2005]

El uso de etanol disminuye las emisiones de GEI, ya que el CO₂ liberado por la combustión del etanol, es el CO₂ que a su vez fue fijado por la planta de la que se obtiene el etanol durante su crecimiento.

También el etanol es un buen mejorador del octanaje cuando se mezcla con la gasolina. El etanol tiene un número de octano de investigación (RON) de 109-120 y un número de octano de motor (MON) de 95-106, ver Tabla 1.1. Por otra parte, el etanol no contiene azufre, benceno, otros aromáticos u olefinas. Todos estos componentes pueden contaminar el aire y afectar la salud pública

El etanol puro tiene una baja volatilidad, pero cuando este se mezcla con las gasolinas, entonces la volatilidad de la mezcla sí aumenta. La volatilidad es mayor cuando la mezcla contiene alrededor del 5% de etanol.

Otra de las ventajas asociadas a la producción de etanol es la creación de empleos en áreas rurales, que es donde se concentra la pobreza. En general los empleos se crean a lo largo de toda la cadena productiva, desde los empleos para la producción de la materia prima ya sea caña de azúcar, maíz, o algún cultivo energético, hasta la conversión de etanol en las plantas y finalmente en la distribución.

Experiencias Internacionales

El Programa Proalcool en el sector transporte Brasileño

El programa Proalcool implementado en Brasil en 1975 surgió como una respuesta a la primera crisis del petróleo así como a la solución del problema de la fluctuación de los precios del azúcar en el mercado internacional [Goldemberg, 1999].

En 1970 se produjeron en Brasil 50 millones de toneladas de caña de azúcar dando una producción aproximada de 5 millones de toneladas de azúcar; en 1996 la producción de caña de azúcar alcanzó las 273 millones de toneladas dando una producción de 13.5 millones de toneladas de azúcar y 13.9 miles de millones de litros de etanol (292.8 PJ). Actualmente, se producen alrededor de 16 mil millones de litros (337 PJ), con un área de plantación de tres millones de hectáreas [Goldemberg, 2007]. Una evaluación oficial de la inversión total en el sector agroindustrial para la producción de etanol para uso en automóviles en el periodo 1975-1989 totalizaron US\$ 12.3 miles de millones (US\$ de 1995) [Moreira, 1995].

El etanol producido en Brasil proviene de la caña de azúcar. Si la producción del azúcar se vuelve menos atractiva por la reducción de los precios en el mercado internacional, se vuelve más rentable cambiar la producción a alcohol.

La decisión de producir etanol además del azúcar fue política y económica. Esta decisión fue tomada por el gobierno federal con el fin de lograr que el etanol sustituyera a la gasolina con la idea de reducir las importaciones de petróleo. Al mismo tiempo el precio del azúcar en el mercado internacional cayó rápidamente volviendo más rentable el cambiar la producción a etanol [Goldemberg, 1999], en término de importaciones de gasolina substituídas por etanol en el periodo 1975-2000 se ahorraron 43.5 miles de millones de dólares y se han generado alrededor de 700,000 empleos [Islas *et al*, 2004].

En Brasil el etanol se usa como combustible de tres formas distintas:

- 1) para oxigenar la gasolina y mejorar su octanaje con la mezcla de hasta 26% de etanol anhidro en el volumen de gasolina (mezcla llamada gasohol).
- 2) Como combustible completo en la forma de etanol hidratado.
- 3) Cualquier mezcla gasolina-etanol, en los automóviles flex-fuel

El incremento de la producción y uso del etanol como combustible fue posible gracias a tres acciones del gobierno:

- La decisión de la compañía estatal PETROBRAS de garantizar la compra del etanol;
- La implementación de incentivos económicos a las empresas agroindustriales para animarlas a producir etanol, ofreciendo bajas tasas de interés.
- Pasos para hacer el etanol atractivo a los consumidores vendiendo este al 59 % del precio de la gasolina. Esto sólo fue posible porque el gobierno estableció el precio de la gasolina a un valor de aproximadamente el doble del precio de Estados Unidos de Norteamérica.

Beneficios sociales

La producción de etanol ha generado alrededor de 700,000 empleos en Brasil con un bajo costo de inversión. Datos de 1983 indican que una destilería autónoma típica con una

capacidad de 120,000 litros de etanol/día en una temporada de 167 días para cosecha, requiere 455 hombres por año en la región centro-sur para fines agrícolas y 150 hombres al año para fines industriales. El costo de crear un empleo en la agro-industria del etanol varía de \$12,000 a \$22,000, intervalo que refleja los requerimientos de capital. En Brasil la generación de empleos implica uno de las mayores inversiones de la industria, para proyectos industriales en el noreste de 1972 a 1982, la creación de un nuevo empleo requería un promedio de inversión de \$40,000 [Goldemberg,1999].

El etanol en el sector transporte en Estados Unidos

Políticas y proceso

El surgimiento del uso de biocombustibles en Estados Unidos se acentuó a principios de los 1990s (la primera legislación para promover la producción de etanol y su uso como combustible en los motores fue aprobada en los 1970s). Las enmiendas del Acta del Aire Limpio de 1990 (The 1990 Clean Air Act ammendments) y su programa de combustibles oxigenados, establecen el requerimiento de que la gasolina vendida debe contener un 2.7% de oxígeno. El uso del etanol producido con maíz, se está promoviendo como sustituto del MTBE (debido a que hay estudios que demuestran que el MTBE contamina las aguas subterráneas y que posiblemente es cancerígeno). De las 14 ciudades que entran en el programa, 10 usan sólo combustibles oxigenados con etanol [EPA, 2002].

Existen otros programas relacionados: el programa de reformulación de gasolinas (RFG), el cual requiere que la gasolina sea reformulada para obtener una combustión más limpia (con un 2.7%vol de oxígeno) para ser consumida en las nueve zonas con los peores niveles de ozono. Alrededor de 40 ciudades han adoptado voluntariamente el programa de reformulación de gasolinas. Además el acta de política energética de 1992 (EPACT) obliga a la flota de vehículos federales, vehículos estatales y flotas de proveedores de combustibles alternativos a operar con un porcentaje de combustibles alternativos en sus vehículos. El Programa de Ciudades Limpias, una medida voluntaria, trabaja para crear mercados locales para vehículos con combustibles alternativos. Se ha trabajado en ciudades para desarrollar flotas que usen una baja mezcla de etanol, además de un mayor uso como E85 (85% del volumen etanol y 15% gasolina) en ciudades del medio oeste, cerca de las plantas de producción de etanol.

Desde 1978 hasta el 2003:

La capacidad de producción de etanol prácticamente creció desde cero hasta 3 mil millones de galones (11,355 millones de litros) por año.

- Ha habido inversiones superiores a los \$5 mil millones USD en instalaciones para la producción de etanol a partir del maíz.
- Se han instalado 75 plantas destiladoras localizadas en veinte estados con capacidades de producción que van desde los 500,000 galones (1,892,500 litros) hasta 310 millones de galones por año (1173 millones de litros).

- Las plantas destiladoras de etanol son propiedad de grandes agro-productores de maíz y de cooperativas de granjeros.
- Ford, GM y Chrysler han construido vehículos que funcionan con gasolina y con hasta un 85% de etanol. Estos vehículos están disponibles hoy en día sin costo adicional.

Beneficios sociales

La producción de etanol en Estados Unidos crea casi 200,000 empleos por año según un la Coalición de Desarrollo de Combustibles limpios de Estados Unidos [Clean Fuels Development Coalition, 2003]. De acuerdo a esta fuente una planta de 40 millones de galones al año (151.4 millones de litros al año) significa:

- Un costo aproximado de \$60 millones de dólares y un año de construcción, con una expansión en la economía local de \$110 millones de dólares.
- La producción de etanol genera un ingreso de \$16.5 millones de dólares.
- La creación de alrededor de 700 empleos permanentes.

Sustitución interenergética de gasolina por etanol en Brasil y Estados Unidos

En esta sección del trabajo se pretende conocer cómo ha evolucionado la penetración del etanol como combustible de los vehículos automotores en Brasil y Estados Unidos. Esta penetración del etanol como combustible puede ser vista como un proceso de sustitución interenergética, ya que el etanol desplaza al uso de gasolinas en el consumo final de energía de los automóviles. La selección de los equipos (en este caso los vehículos automotores) conduce a concentrar la atención en las sustituciones interenergéticas: elegir un equipo es optar al mismo tiempo por una forma de energía, excepto los equipos bi-energéticos como podríamos considerar este caso, ya que seguimos hablando de máquinas de ciclo Otto modificadas para usar una mezcla de etanol y gasolina, así como vehículos que pueden funcionar con sólo etanol o gasolina, o una mezcla de los dos, estos vehículos con motores “flexibles” los cuales son conocidos como flex-fuel. Lo que no excluye que, en algunos casos, la elección de una forma de energía precede y condiciona el equipo.

El estudio de las sustituciones interenergéticas fue puesta en evidencia por los trabajos de Marchetti. La observación del pasado (después de la revolución industrial en el siglo XVIII) parece revelar que las distintas fuentes de energía se suceden a ritmos que pueden calcularse con precisión y extrapolarse con confianza. La idea desarrollada por Marchetti es que existiría así una sucesión de olas energéticas que se suceden las unas a las otras según una periodicidad casi inevitable. El autor pone de manifiesto que a escala mundial las

sustituciones fueron y siguen siendo muy progresivas, la penetración de una nueva fuente exigió alrededor de un siglo para pasar de 1% a 50% alrededor del balance energético primario.

Por su parte, El instituto de la Energía de Grenoble (I.E.J.E.) propuso en 1974, con motivo de un estudio realizado sobre las sustituciones interenergéticas en la Unión Europea y referente al período 1958-1972, recurrir a tres indicadores operatorios para traducir, de manera sintética, los fenómenos observados: Un coeficiente de velocidad, un coeficiente de amplitud, un coeficiente de sustitución.

1) *Un coeficiente de velocidad.* Si se designa por Q la cantidad total de energía consumida durante un año por una economía o un sector determinado y por Qi un componente de esta cantidad, se tiene por construcción $Q = \sum Q_i$, con $i = c, p, g, e$ (dónde c representa los combustibles mineral sólidos, p los productos derivados del petróleo, g el gas y e la electricidad). Si se adopta una forma exponencial para la función Q (t), se obtiene una expresión de la velocidad de progresión o regresión de Qi al procurar analizar la evolución durante el tiempo del informe Qi/Q. Se puede escribir:

$$R_{it} = \frac{Q_{it}}{Q_t} = a_i t + b_i \quad (1.1)$$

Se tiene en cuenta que ai es positivo para una forma de energía en progresión y negativo para una forma de energía en regresión. El valor de este coeficiente ai constituye una buena aproximación de la velocidad a la cual una forma de energía determinada progresa o disminuye, en términos relativos, en el balance energético de un país o de un sector.

En la práctica el estudio del I.E.J.E. se basa en indicadores empíricos y viene determinado del siguiente modo:

$$V_i = + \frac{R_{in}}{R_{io}} \quad \text{para una forma de energía en expansión (1.2)}$$

$$V_i = - \frac{R_{io}}{R_{in}} \quad \text{para una forma de energía en regresión (1.3)}$$

2) *Un coeficiente de amplitud.* Otro indicador, que completa la información proporcionada por el precedente, permite delimitar mejor las sustituciones interenergéticas. Expresa, para un componente energético en expansión, la parte tomada por este componente en la modificación de la estructura del consumo de energía durante el período [0, n]. Así pues, suponen que, entre el año básico y el año terminal, Q haya aumentado en ΔQ, y Qi en ΔQi y que, al mismo tiempo, algunos componentes hayan disminuido en total de un volumen ΔS. Adoptará como indicador de amplitud del componente i el informe:

$$A_i = \frac{\Delta Q_i}{\Delta Q + \Delta S} \quad \text{con} \quad \Sigma A_i = 1$$

Podría esperarse a priori una formulación del tipo:

$$\frac{\Delta Q_i}{\Delta Q} = \frac{Q_{in} - Q_{io}}{Q_n - Q_o} \quad (1.4)$$

Para el análisis de sustitución interenergética de gasolina por etanol utilizamos el cálculo de los coeficientes de velocidad y de amplitud. Para obtener estos valores se consultaron estadísticas históricas de consumo de gasolina en esos dos países. También se recabaron estadísticas sobre la producción de etanol.

Los datos de producción de etanol para Brasil y Estados Unidos fueron tomados de una presentación de la Renewable Fuels Association: Homegrow for the homeland Industry Outlook 2005 [RFA, 2005]. Los datos de consumo de gasolinas para Estados Unidos fueron tomados del Energy Information Administration. Los datos del consumo de gasolina para Brasil se construyeron a partir del consumo histórico de energía en Brasil de la presentación de Roberto Schaeffer que se presentó en un congreso de la Agencia Internacional de Energía en Abril del 2006 en París [Schaeffer, 2006], a partir de el perfil de refinación de Petrobrás mencionado por Goldemberg [Goldemberg,1999] y de la página de Internet de Petrobrás [Petrobrás,2005].

Los cálculos de los coeficientes se realizaron para dos periodos de tiempo en ambos países. Para Brasil se tomó primero el periodo de 1982 a 1992 y posteriormente de 1993 a 2003. En el caso de Estados Unidos el primer periodo abarca de 1983 a 1993 y el segundo de 1994 a 2004.

En las figuras 1.3 se muestran los consumos de energía por los vehículos en Brasil.

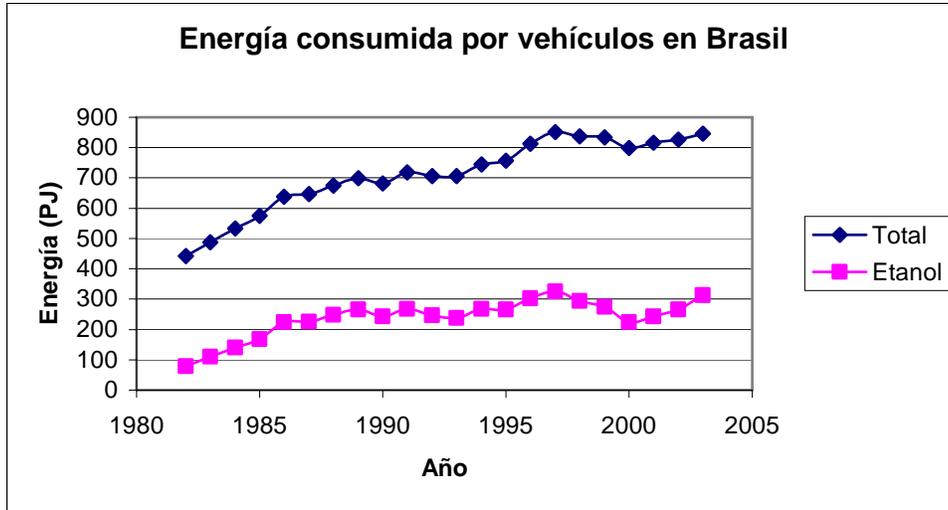


Figura 1.3 Energía consumida por vehículos en Brasil. La serie del total corresponde a la suma de etanol más gasolina.

En la figura 1.4 se muestra el consumo de etanol en Estados Unidos y en la figura 1.5 se presenta la energía consumida por los vehículos.

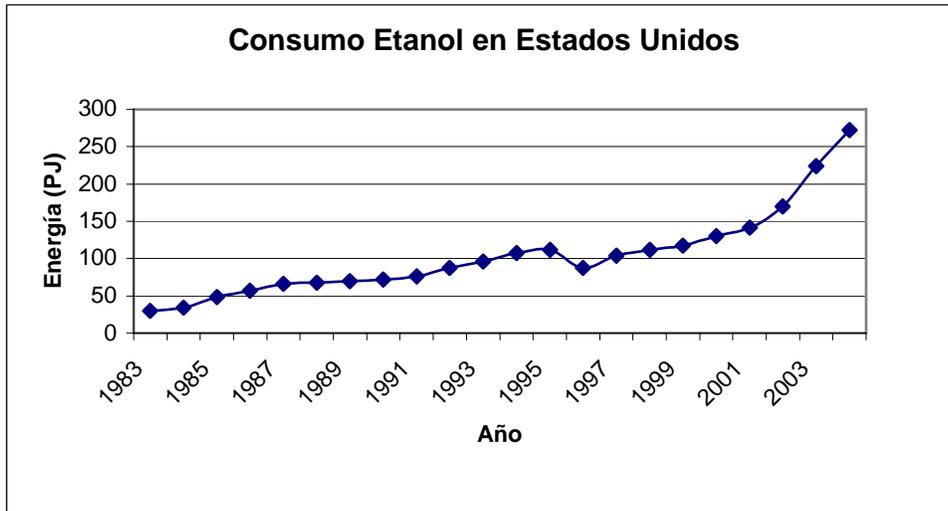


Figura 1.4 Consumo de Etanol en Estados Unidos

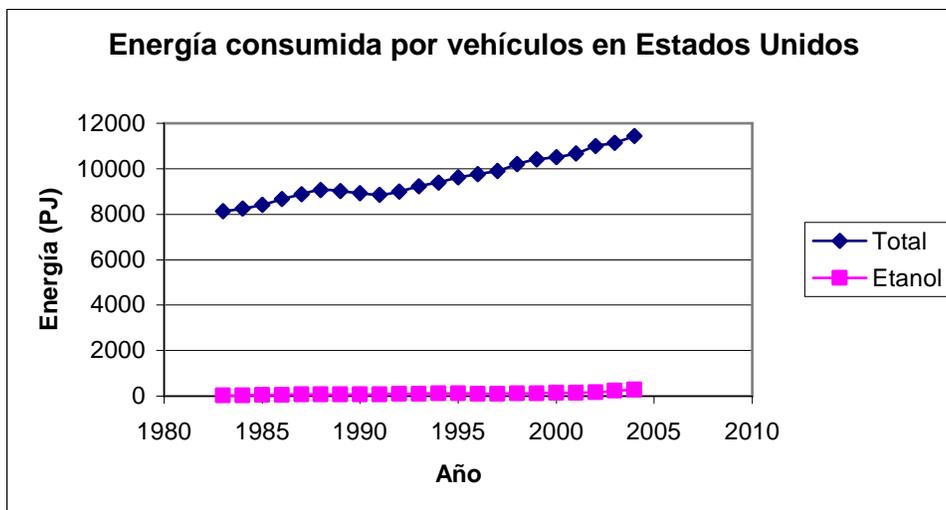


Figura 1.5 Energía consumida por vehículos en Estados Unidos. La serie del total corresponde a la suma de etanol más gasolina.

En la tabla 1.2 se muestran los resultados de los coeficientes de velocidad y de amplitud para ambos países. Los coeficientes de velocidad se calcularon utilizando la ecuación 1.2, después de haber realizado las regresiones lineales necesarias. Los coeficientes de velocidad se calcularon empleando la ecuación 1.4.

Sector	Brasil				Estados Unidos			
	1982-1992		1993-2003		1983-1993		1994-2004	
Transporte (Vehículos Ciclo Otto)	A	V	A	V	A	V	A	V
gasolina	0.362	1.24	0.53	1.20	0.94	1.11	0.92	1.19
etanol	0.638	2.7	0.47	1.02	0.06	2.77	0.08	3.08

Tabla 1.2 Coeficientes de velocidad (V) y de amplitud (A).

Como se puede observar para el caso de Brasil en el primer periodo analizado se tiene un coeficiente de velocidad alto para el etanol comparado con el de la gasolina, esto quiere decir que la expansión de la producción de etanol fue rápida. Ese periodo está cerca del inicio del programa Proalcool en 1975 y de las crisis provocadas por los altos precios del petróleo que se dieron en 1973 y 1979. El gobierno brasileño le dio un gran empuje al programa básicamente debido a los incrementos en los precios del petróleo. El gobierno impulsó el programa dando créditos para la construcción de destilerías y la obligación a Petrobras de garantizar la compra de etanol, además estableció por mandato la mezcla de etanol con gasolina en proporciones de hasta el 26% del volumen. Al mismo tiempo se fijó el precio de la gasolina a un valor de aproximadamente el doble del precio en Estados Unidos, esto con el propósito de hacer más competitivo al etanol en precio. También

observamos que el coeficiente de amplitud es mayor en el caso del etanol que en el de gasolina para este periodo, lo que nos dice la participación del etanol en la demanda de la energía, lo que indica que se incrementó el uso de etanol por gasolina en este periodo debido a las acciones arriba mencionadas.

En el siguiente periodo, se encuentra que el coeficiente de velocidad del etanol disminuye, mientras que el coeficiente de velocidad de la gasolina prácticamente permaneció igual. Los coeficientes de amplitud para este periodo muestran un estancamiento en el uso del etanol y un aumento en el uso de la gasolina. La explicación de esta tendencia podría encontrarse nuevamente en los precios del petróleo y a factores climáticos. Desde 1985 hasta finales de los 1990's se tiene una relativa estabilidad en los precios del petróleo. Aunado a esto, en 1993 y 1994 se tiene una baja en la producción de caña de azúcar debido a condiciones climáticas desfavorables. En el año 2000 se tuvieron incrementos en los precios del azúcar, por lo que muchos productores dejaron de producir etanol con el fin de tener más ganancias con la venta de azúcar. A partir del año 2001 se ve un repunte en la producción de etanol, mismo que coincide con la pérdida de estabilidad de los precios del petróleo donde se tiene un incremento del precio por arriba de los 40 USD por barril.

A partir del año 2004 el precio del litro de etanol fue más competitivo que el litro de gasolina debido al incremento de los precios del petróleo, además de salir a la venta los autos flex-fuel que pueden funcionar con cualquier mezcla de gasolina-etanol. El gobierno Brasileño otorgó incentivos fiscales para la compra de estos automóviles. En los próximos años se espera un repunte importante de producción y uso de etanol en Brasil a partir de esta competitividad de precios del etanol y la mejora tecnológica de los autos flex-fuel.

Por su parte, en Estados Unidos se comenzó a utilizar etanol como un mejorador del octanaje cuando se prohibió el uso del plomo en las gasolinas por los daños a la salud que este provocaba. Posteriormente en 1978 se publicó el acta que eximía del pago de impuestos a la mezcla de 10% de volumen de etanol con 90% de volumen de gasolina (E10). En 1980 se promulgaron incentivos fiscales federales al etanol, de igual forma 25 estados exentaron del pago de impuestos al etanol para fomentar su uso, mientras que el congreso promulgó una serie de beneficios fiscales a los productores de etanol, incluyendo prestamos a los pequeños productores y tarifas de importación al etanol producido en otros lugares. En 1990 se publica el Acta del Aire Limpio teniéndose que oxigenar las gasolinas en un 2.7% oxígeno por volumen en el invierno para disminuir las emisiones de CO, aunque se limitó el uso de etanol en las zonas con climas cálidos debido a que la alta volatilidad de la mezcla gasolina-etanol causaba mayor formación de ozono. Analizando el primer periodo de tiempo para Estados Unidos tenemos que el coeficiente de velocidad es muy similar al de Brasil para el primer periodo, lo que nos da a entender que las acciones arriba señaladas contribuyeron a que se desarrollara de forma rápida la producción del etanol al igual que en Brasil, sin embargo, el coeficiente de amplitud nos muestra que esta participación a pesar de haberse desarrollado rápidamente, es aún pequeña al compararla con el consumo de gasolina, tal y como lo muestra el coeficiente de amplitud de la gasolina para este primer periodo.

Para el siguiente periodo de análisis se observa un incremento en el coeficiente de velocidad del etanol con respecto al del primer periodo. Lo mismo ocurre para el

coeficiente de velocidad de la gasolina al compararlo con el coeficiente de velocidad en el primer periodo. Esto nos indica que los vehículos siguieron aumentando gradualmente su demanda de gasolina y etanol, donde la producción de etanol siguió creciendo y de manera mucho más importante que en el primer periodo, a excepción del año 1996 donde se observó una baja en la producción debido a los altos precios del maíz, la materia prima para la producción de etanol. El coeficiente de amplitud del etanol creció al compararse con el coeficiente de amplitud del primer periodo, mientras que el coeficiente de amplitud de la gasolina disminuyó al compararse con el coeficiente de amplitud del primer periodo, lo cual se traduce en una mayor sustitución de la gasolina por el etanol, aunque en términos generales, la participación del etanol aún es muy pequeña cuando se compara con la participación que sigue teniendo la gasolina para satisfacer los requerimientos de combustible de los vehículos. En este periodo de análisis se han seguido otorgando subsidios federales y estatales al etanol para hacerlo competitivo frente a la gasolina y al MTBE (Metil Terbutil Éte), el cual es un oxigenante de la gasolina que compite directamente con el etanol. La posible eliminación del uso del MTBE como oxigenante de las gasolinas en Estados Unidos (se descubrió contaminación por MTBE en los mantos freáticos de California y que a su vez el MTBE es un posible cancerígeno) abre la posibilidad a un mayor uso del etanol. En 1999 el Gobernador de California anunció la paulatina eliminación de MTBE de las gasolinas, siendo así el primer estado en prohibir el MTBE. Además de los subsidios al etanol para hacer competitivo su precio, el departamento de agricultura otorgó US\$150 millones entre 1995 y 2000 a los productores de etanol, biodiesel y otros biocombustibles, fomentando de esta forma su producción.

En general el crecimiento del uso del etanol en Estados Unidos ha sido posible por una combinación de su uso para mejorar el octanaje de las gasolinas, mandatos de combustibles limpios (para evitar emisiones de CO) y por el otorgamiento de incentivos fiscales y federales. Esta es la razón por la cual a pesar de haber crecido la producción y el uso del etanol, este no representa realmente una sustitución importante de energía para los vehículos, situación contraria a lo que ocurre en Brasil. En el año 2004 la aportación de la energía del etanol (272 PJ) fue a penas el 2.4% del consumo de energía de los vehículos.

En los últimos años, se han visto pronunciamientos del gobierno de Estados Unidos por impulsar de manera más importante la producción y el uso de etanol en Estados Unidos, argumentando motivos de seguridad energética. Se anunció el Estándar de Combustibles Renovables, en donde se dice que se requerirían 28 mil millones de litros de combustibles renovables (entre los que se incluye el etanol) anualmente para el año 2012. Posteriormente a principios del año 2007 se modificaron las metas de producción futura de etanol. El nuevo objetivo consiste en sustituir el 15% del consumo de gasolinas para el año 2017. El gobierno de Estados Unidos argumenta que esa sustitución de gasolina por etanol sería posible si se logra hacer competitivo en precio el etanol proveniente de la biomasa lignocelulósica. Los procesos de producción de etanol más comunes, y el proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica serán estudiados en el capítulo 2.

A continuación se mencionan algunas de las acciones que se han llevado a cabo en Brasil y Estados Unidos tendientes a la sustitución de gasolinas por etanol.

Años	Acciones en Brasil	Acciones en Estados Unidos
1975-1980	<ul style="list-style-type: none"> • El gobierno promueve el programa Proalcool para la usar el etanol como mezcla en las gasolinas. Actualmente el porcentaje de mezclado es determinado por un comité interministerial. • La decisión de producir etanol además del azúcar fue política y económica. Esta decisión fue tomada por el gobierno federal con el fin del lograr que el etanol sustituyera a la gasolina con la idea de reducir las importaciones de petróleo. Al mismo tiempo el precio del azúcar en el mercado internacional cayó rápidamente volviendo más rentable el cambiar la producción a etanol [Goldemberg, 1999]. • La decisión de la compañía estatal PETROBRAS de garantizar la compra del etanol. • El gobierno dio incentivos como créditos para la construcción de destilerías, donde el gobierno ofrecía un subsidio de hasta el 75% de los proyectos. 	<ul style="list-style-type: none"> • El Acta de Impuestos Energéticos define al gasohol como una mezcla de gasolina con al menos el 10% del volumen de etanol anhidro, otorgándole exenciones fiscales que reducen el costo del etanol con respecto a la gasolina.
1980-1985	<ul style="list-style-type: none"> • La implementación de incentivos económicos a las empresas agroindustriales para animarlas a producir etanol, ofreciendo bajas tasas de interés desde 1980-1985 y cerca de US\$ 2.0 miles de millones en prestamos, que representaron el 29% de la inversión total requerida para alcanzar la capacidad instalada actual [Goldemberg,1999]. • Pasos para hacer el etanol atractivo a los consumidores vendiendo este al 59 % del precio de la gasolina. Esto sólo fue posible porque el gobierno estableció el precio de la gasolina a un valor de aproximadamente el doble del precio en Estados Unidos. • El gobierno expandió el programa Proalcool para promover el uso de etanol hidratado como combustible de los automóviles. El gobierno otorgó incentivos fiscales para la compra de automóviles que funcionan con etanol hidratado. • El gobierno ordena que la flota oficial de vehículos funcionaran con etanol como combustible. • El gobierno fija el precio del etanol como un porcentaje de la gasolina regular para que el cambio de vehículos de gasolina a etanol resultara en ahorros para el usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> • La exención del pago de impuestos federal es complementada por incentivos estatales para la producción de etanol. • 25 Estados eximen del pago total o parcial de los impuestos aplicados a la gasolina. • El congreso promulga una serie de beneficios fiscales a los productores de etanol, incluyendo prestamos a los pequeños productores de etanol, y tarifas de importación al etanol producido en otros lugares.
1985-1990	<ul style="list-style-type: none"> • En 1988 se da un incremento considerable en los precios del azúcar, lo que provoca que los productores cambien su producción hacia el azúcar, provocando una baja sensible en la producción. • El gobierno autoriza importaciones de etanol. • Los precios del petróleo bajaron a finales de los 1980s lo que provoca que el gobierno reduzca los subsidios, ocasionando un decremento en la producción de etanol. 	<ul style="list-style-type: none"> • El Acta de Enmienda del Aire Limpio de 1990 (The 1990 Clean Air Act amendments) y su programa de combustibles oxigenados, establece el requerimiento de que la gasolina vendida debe contener un 2.7% de oxígeno. El uso del etanol se está incrementando como un sustituto del MTBE (debido a que hay estudios que demuestran que este contamina las aguas subterráneas y que

	<ul style="list-style-type: none"> • Los precios del petróleo determinan una estabilización en la producción de etanol. 	<p>posiblemente es un cancerígeno), y de las 14 ciudades que entran en el programa, 10 usan sólo combustibles oxigenados con etanol [EPA, 2002].</p>
1990-1995	<ul style="list-style-type: none"> • El gobierno nuevamente obliga a que la flota vehicular oficial use etanol, y se venden vehículos con exenciones en impuestos. • Se tiene una baja producción de caña de azúcar debido a condiciones climáticas desfavorables. • Se reducen los subsidios al etanol hidratado de 0.98 reales por litro a 0.45 reales por litro. Se tiene un decremento en el uso de alcohol hidratado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se publica el Acta de Política Energética de 1992 (EPACT) anima el uso de combustibles alternativos. La flota de vehículos federales, vehículos estatales y flotas de proveedores de combustibles alternativos fueron obligados a operar con un porcentaje de combustibles alternativos en sus vehículos. El Programa de Ciudades Limpias, una medida voluntaria bajo el acta, trabaja para crear mercados locales para vehículos con combustibles alternativos. Se ha trabajado en ciudades para desarrollar flotas que corran con una baja mezcla de etanol y también para E85, principalmente en ciudades del medio oeste, cerca de las plantas de producción de etanol.
1995-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Se liberalizan los precios de la gasolina y el etanol. • Se introducen los autos flex-fuel resultando en una nueva expansión de la producción de etanol. 	<ul style="list-style-type: none"> • El Departamento de Agricultura de Estados Unidos otorga US\$150 millones en 2001 como incentivos a los productores de etanol, biodiesel, y otros biocombustibles.
2000-2005	<ul style="list-style-type: none"> • Debido a que las exportaciones de azúcar afectan el suministro de etanol, el gobierno promueve un impuesto a las exportaciones de azúcar cuando la producción de etanol sea insuficiente para cumplir con la demanda. • El gobierno de Brasil reclasifica los vehículos flex-fuel para que puedan recibir los mismos cortes fiscales que los vehículos que utilizan etanol hidratado como combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se firma el Estandar de Combustibles Renovables, donde se requiere un mínimo de 28 mil millones de litros de combustibles renovables anualmente para el año 2012.
2007		<ul style="list-style-type: none"> • Se anuncia una modificación a las metas de producción futura de etanol, 132 mil millones de litros de biocombustibles al 2017. El objetivo es sustituir el 15% del consumo esperado de gasolina en diez años.

Capítulo 2

Procesos de producción de etanol

El objetivo de este capítulo es hacer una revisión de los procesos de producción de etanol más comunes, así como una revisión de uno de los procesos más prometedores (a partir de biomasa lignocelulósica). También se realiza un balance de energía a partir de los diagramas del proceso para una planta de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica mediante hidrólisis enzimática de la madera. Posteriormente, se discute la importancia de los balances de energía en la producción de etanol, se analizan los resultados del balance de energía del proceso y se inserta en el debate de factibilidad energética de procesos para la producción de etanol.

Procesos de producción de etanol

El etanol puede producirse a partir de cualquier materia prima que contenga cantidades apreciables de azúcar o materiales que pueden ser convertidos a azúcares. El etanol se produce generalmente de la fermentación de los azúcares por medio de enzimas obtenidas de las levaduras. Los procesos de fermentación tradicional recaen en levaduras que convierten azúcares de seis carbonos (principalmente glucosa) en etanol.

Los procesos de producción de etanol varían dependiendo de la materia prima a partir de la cual se obtiene. El etanol se obtiene principalmente de la caña de azúcar, el maíz, y la biomasa lignocelulósica. La llamada biomasa lignocelulósica incluye el bagazo de caña, la madera, los pastos de crecimiento rápido, residuos forestales, rastrojo de maíz, aserrín, residuos de papel, entre otros. En algunos países de Europa también se obtiene etanol a partir de la remolacha o betabel.

Etanol a partir de la caña de azúcar

En México el proceso más utilizado para producir etanol es a partir de la caña de azúcar que consiste en remover el azúcar de la caña, para esto se puede moler la caña, luego se trata el jugo para obtener azúcar y los azúcares incristalizables forman melaza. Posteriormente la melaza es fermentada a alcohol usando levaduras. En este proceso se suele utilizar el bagazo de caña (el residuo de la caña que queda después de ser molida para la extracción del jugo), como combustible para obtener la energía necesaria para la producción de azúcar y la conversión de los azúcares en etanol.

El proceso usado en Brasil para la producción de etanol, utiliza directamente el jugo de caña para la producción de azúcar y etanol, pudiendo usar un 60% del jugo de la caña para la producción de azúcar, mientras que el 40% restante se usa para la producción de etanol. Como usualmente la producción del azúcar se vuelve menos atractiva por la reducción de los precios en el mercado internacional, se vuelve más rentable cambiar la producción a alcohol. Ver figura 2.1.

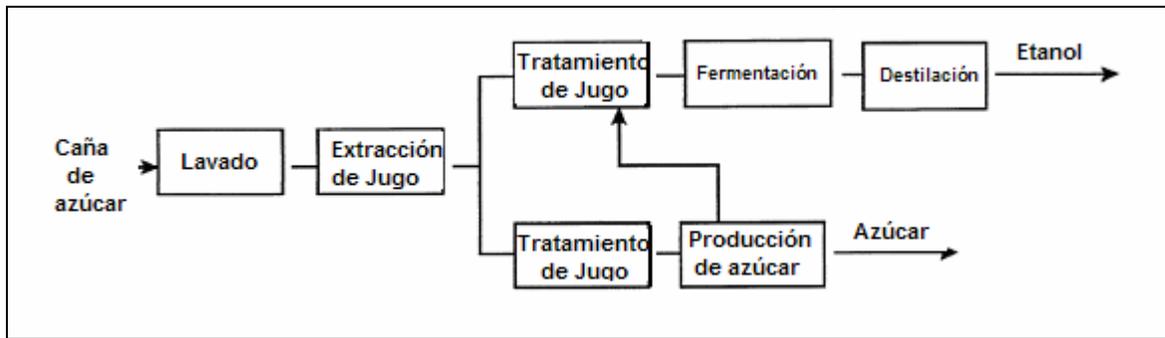


Figura 2.1 Proceso de producción de azúcar y etanol a partir de la caña de azúcar [Goldemberg, 1999].

Etanol a partir del maíz

En Estados Unidos de Norte América, el segundo productor de etanol a nivel mundial con 13 mil millones de litros anuales, la materia prima más utilizada para la obtención del etanol es el maíz.

Este proceso inicia con la separación, limpieza y molienda de los almidones. La molienda puede ser “seca” o “húmeda” dependiendo si el grano es exprimido y roto antes de que el almidón se convierta en azúcar (húmedo) o durante el proceso de conversión (seco). En ambos casos el almidón es convertido a azúcar, típicamente usando un proceso enzimático a alta temperatura. Desde este punto el proceso es similar al de la caña de azúcar, donde el azúcar es fermentada a alcohol usando levaduras u otros microbios. Los pasos finales son la destilación y deshidratación del etanol. Ver figura 2.2.

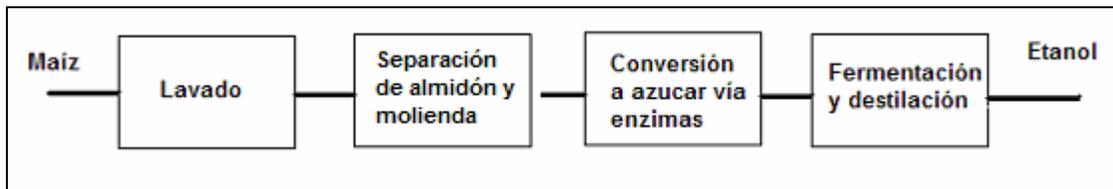


Figura 2.2 Proceso de producción de etanol a partir del maíz

El proceso de molienda “húmeda” tiene otros varios co-productos en relación con el proceso de molienda en seco, sin embargo los costos de construcción y de operación son sustancialmente mayores que con respecto a los costos de molienda en seco.

Etanol a partir de biomasa lignocelulósica

Antes de abordar el proceso es necesario conocer que la biomasa lignocelulósica está formada de polímeros de carbohidratos muy complejos que no tienen un uso como alimento, estos son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

Típicamente una tonelada seca de biomasa lignocelulósica está compuesta en peso por un 22% de lignina, 23% de hemicelulosa, y un 50% de celulosa, alcanzando un rendimiento teórico máximo de 470 L de etanol [Roehr, 2001]. Esta composición varía dependiendo de la materia prima, en la Tabla 2.1 se muestran las composiciones para diferentes tipos de biomasa. Debe tomarse en consideración que las mejores materias primas son aquellas que contienen un mayor contenido de celulosa y hemicelulosa.

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

Tabla 2.1 Composición de diferentes materiales lignocelulósicos [Roehr, 2001].

Para la conversión a etanol se requiere un complejo proceso de pretratamiento para transformar los polímeros en azúcares fermentables. Una vez obtenidos los azúcares estos son convertidos en etanol por medio de levaduras o bacterias y posteriormente se concentran soluciones de etanol diluido para producir etanol anhidro. En general la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica cuenta con cinco pasos:

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

Durante el pretratamiento se rompe la matriz de lignocelulosa de forma que sea más conveniente para el ataque enzimático. En esta parte del proceso la mayor parte de la hemicelulosa es hidrolizada. El hidrolizado de hemicelulosa obtenido durante el pretratamiento es separado en fracciones líquida y sólida. La fracción líquida contiene cantidades significativas de pentosas solubles (principalmente xilosa). En esta fracción también está presente glucosa como resultado de la degradación de hemicelulosa. La fracción sólida contiene principalmente celulosa y lignina.

En el paso de la hidrólisis se rompen cadenas de celulosa para producir glucosa para el paso de fermentación. Este proceso puede ser realizado utilizando ácidos inorgánicos o enzimas. La hidrólisis enzimática ha demostrado mejores resultados durante la fermentación debido a que no se forman productos de degradación de glucosa, sin embargo, el proceso es más lento. Las celulasas experimentan inhibición por las altas concentraciones de glucosa, reduciendo su eficiencia.

Antes de la fermentación de las hexosas y pentosas (ver figura 2.3) se requiere la detoxificación del fluido líquido para remover los inhibidores de la fermentación formados durante el pretratamiento de la biomasa, ya que estos pueden influenciar negativamente en el desempeño de los microorganismos en el curso de la fermentación.

Una vez realizada la fermentación, el caldo es enviado directamente al paso de separación. La separación incluye la destilación convencional de las soluciones acuosas de etanol usando columnas de concentración y rectificación, y la deshidratación del destilado para obtener etanol anhidro. Estos procesos son grandes consumidores de energía, especialmente cuando sólo se utiliza la destilación para obtener etanol absoluto.

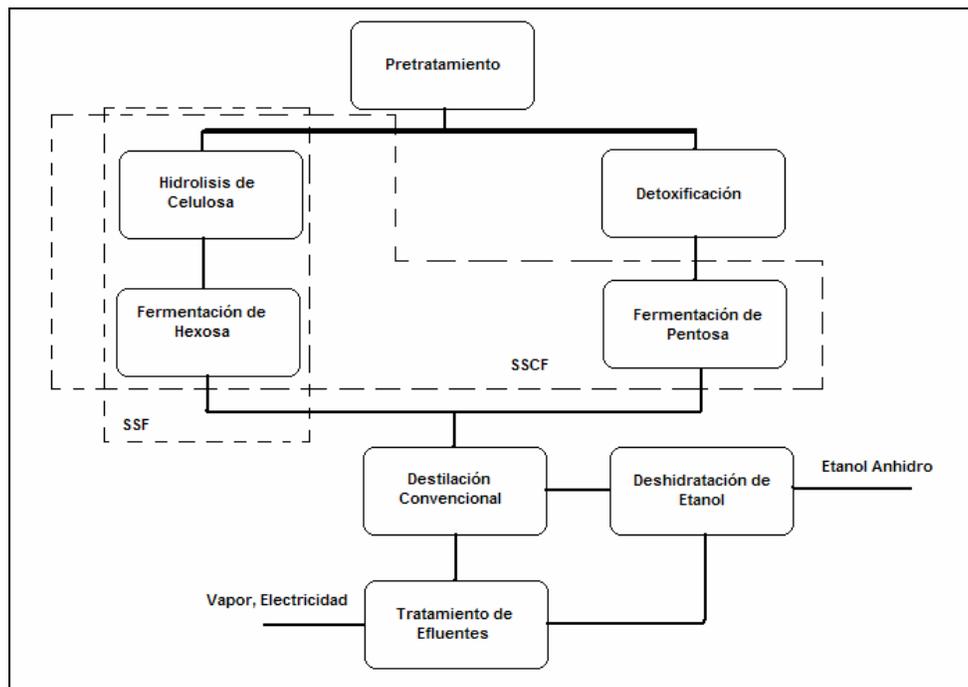


Figura 2.3 Diagrama a bloques genérico de la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. [Cardona, 2005]

El proceso de producción de etanol a partir de biomasa genera grandes cantidades de agua de desecho, la cual debe ser procesada para degradar el contenido de materia orgánica. Los principales efluentes originados en el proceso incluyen los provenientes de las columnas de destilación, los cuales son enviados para evaporación y separación de sólidos. Estos sólidos contienen principalmente lignina, la cual es quemada para cogeneración de vapor y electricidad en el proceso. El efluente es nuevamente evaporado para obtener un efluente líquido concentrado, el cual experimenta un tratamiento de agua de desecho, o aún, incineración.

Los pasos anteriormente mencionados han sido intensamente investigados en los últimos años, de lo que han resultado muchas mejoras tecnológicas. En particular se estudian algunos esquemas que involucran integración de procesos. Entre estos procesos está el SSF (Sacarificación y fermentación simultáneas por sus siglas en inglés). Este proceso implica la realización de la hidrólisis de celulosa y la fermentación de hexosa en el mismo contenedor. La principal ventaja de esta configuración es evitar la inhibición de las celulasas por la glucosa. De esta forma la glucosa producida por la hidrólisis enzimática es inmediatamente consumida por las levaduras para convertirla en etanol. Si se utilizan microorganismos capaces de asimilar pentosas y hexosas (como la *Zymomona mobilis*

genéticamente modificadas, que es la utilizada en el proceso analizado en el Capítulo 2) el proceso se llama SSCF (sacarificación y cofermentación simultáneas por sus siglas en inglés). En este caso ambas fracciones del hidrolizado de hemicelulosa son unificados y utilizados para la conversión de azúcares solubles en etanol.

Los costos del etanol a partir de la caña de azúcar y a partir del maíz están fuertemente relacionados con el precio de la materia prima, es decir, el precio de la caña y del maíz, por lo que un alza en los precios de estos productos incrementarán el costo del etanol. De esta forma, el etanol a partir de residuos agroforestales, o de plantaciones energéticas pueden reducir sustancialmente los costos del etanol, siendo esta la principal ventaja de obtener el etanol de la biomasa lignocelulósica. Sin embargo, es necesario que la tecnología se encuentre madura para que esto suceda, ya que actualmente los costos son mayores para obtener etanol a partir de la biomasa lignocelulósica, donde se tienen costos de alrededor de \$0.312 (USD2005) [Wooley, 1999].

Proceso de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica por hidrólisis enzimática.

En esta parte del trabajo se estudia el proceso de obtención de etanol a partir de madera. Se realiza un balance de energía del proceso para identificar si energéticamente es sustentable este proceso de producción de etanol. Se discute también la importancia de los balances de energía en los procesos de producción de etanol.

En resumen, el proceso de hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica, madera en este caso, se realiza en varias etapas. En primer lugar se hace un tratamiento de la madera para su reducción de tamaño. Posteriormente se realiza un pretratamiento al agregar ácido sulfúrico diluido y calor para hidrolizar la hemicelulosa generándose una fracción líquida y este efluente es detoxificado para ser enviado después a la fermentación. Por otra parte la fracción sólida de la biomasa, que contiene principalmente celulosa es hidrolizada con celulasas, que ahí mismo es fermentada junto con los azúcares de la hemicelulosa, por la bacteria *Zymomonas mobilis*. Este proceso es conocido como Sacarificación y co-Fermentación Simultáneas.

La producción de celulasas (enzimas) y los organismos fermentadores se realizan en etapas adicionales.

Una vez llevada a cabo la fermentación se procede a su destilación y posteriormente la deshidratación del etanol. De la destilación se separan los residuos sólidos y líquidos con el objeto de tratar el agua y recuperar material sólido no fermentable, lignina principalmente, que es utilizada como combustible para producir vapor y electricidad en una caldera. Ver figura 2.4.

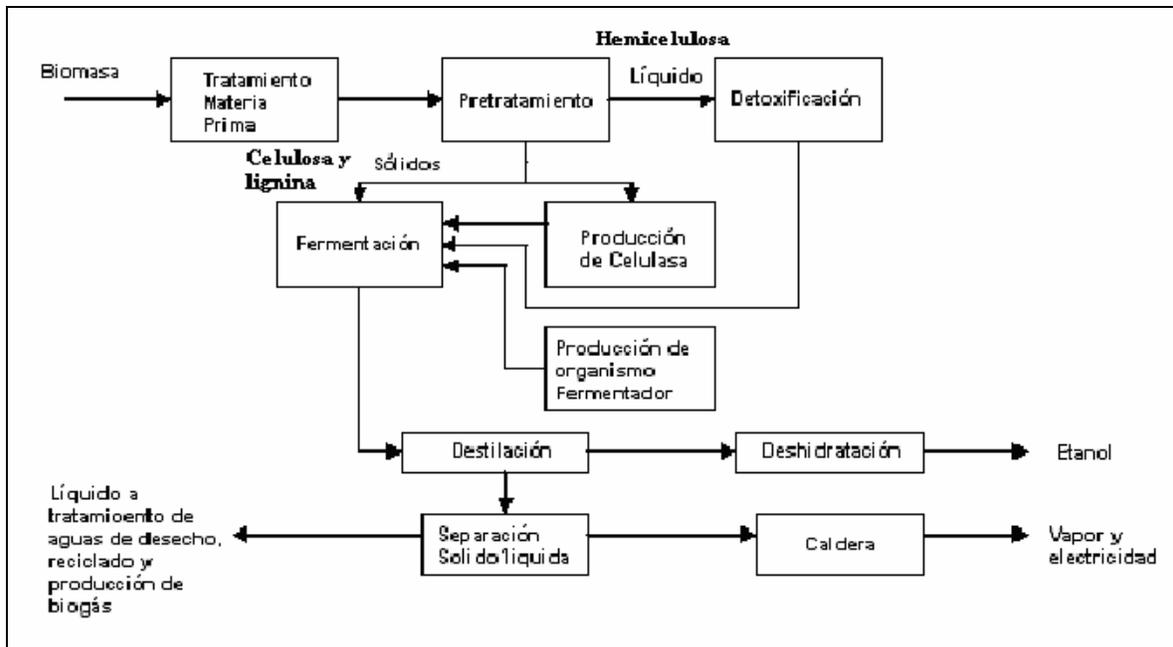


Figura 2.4 Diagrama del proceso de obtención de etanol por hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica.

Descripción detallada del proceso

Preparación de la materia prima

La materia prima del proceso es madera triturada en forma de “chips” (la cual puede provenir de plantaciones energéticas). La materia prima llega en camiones que son vaciados para formar una pila. De esta pila los chips son transferidos bajo un separador magnético para remover las impurezas metálicas, después los chips son enviados a un lavador para quitarles la suciedad. Posterior al lavado los chips son pasados a través de una malla para separar los chips muy grandes, y luego otra malla que separa los chips anchos. Una vez tamizados pasan a la etapa de pretratamiento. Los chips más grandes y anchos se envían a un disco para su reducción de tamaño y posteriormente al área de pretratamiento.

La materia prima tiene la siguiente composición:

Componente	% Base húmeda
Celulosa	42.67
Xilosa	19.05
Arabinosa	0.79
Manosa	3.93
Galactosa	0.24
Acetato	4.64
Lignina	27.68
Cenizas	1
Humedad	47.9

Tabla 2.2 Composición de la madera de Álamo [Wooley, 2002].

Pretratamiento

En esta parte del proceso se llevan a cabo reacciones de hidrólisis, con las que se convierte la mayor parte de la porción de hemicelulosa de la materia prima en azúcares solubles, principalmente xilosa, manosa, arabinosa y galactosa. Esto se logra usando ácido sulfúrico diluido y una alta temperatura. Estas condiciones también hacen soluble una porción de la lignina en la materia prima, y “expone” la celulosa para una subsecuente hidrólisis enzimática. En este proceso conocido como hidrólisis de la hemicelulosa, también se libera ácido acético.

La fracción líquida o líquido hidrolizado que contiene los azúcares de la hemicelulosa disueltos tiene que ser detoxificada para poder ser fermentada, ya que los organismos fermentadores pueden verse afectados por el ácido acético y los otros compuestos furanos. Para esto la corriente y sus sólidos disueltos son enfriados rápidamente mediante una descompresión súbita, (en inglés “flash cooled”), donde se vaporizan una gran cantidad de agua, y una porción del ácido acético. El resto del ácido acético se remueve de la porción líquida usando un intercambiador iónico para remover los furanos. Después al líquido se le agrega cal. Este proceso requiere que al líquido hidrolizado se le tenga que elevar el pH hasta 10 agregando cal. El yeso resultante es filtrado y removido, mientras el hidrolizado se mezcla con los sólidos (celulosa) y con agua, todo esto antes de enviarse a la fermentación.

Sacarificación y Co-Fermentación Simultánea (SSCF)

En esta etapa se realizan dos operaciones diferentes de manera simultánea, por un lado la sacarificación de la celulosa, resultante del pretratamiento, a glucosa utilizando enzimas (*Celulasas*); y por otro lado la fermentación de la glucosa y los otros azúcares provenientes de la hidrólisis de la hemicelulosa a etanol. Para la fermentación de los azúcares en etanol se utiliza la bacteria recombinada *Zimomonas mobilis*. Esta forma de *Zimomonas mobilis* fermenta glucosa y xylosa a etanol.

Las enzimas Celulasa utilizadas en la sacarificación son producidas en otra área, y son mezcladas en el fermentador con la materia prima de la hidrólisis y otros nutrientes.

La bacteria etanológena (*Zimomonas mobilis*) debe ser propagada en un tren de fermentadores semilla. El material hidrolizado-detoxificado y los nutrientes son combinados con un inóculo inicial en un fermentador pequeño. El resultado de cada lote de semilla se usa para inocular el siguiente tamaño de semilla. Esta serie de escalas continúa hasta que el último paso es suficientemente grande para soportar la producción de fermentación.

El inóculo de *Zimomonas mobilis*, las *celulasas* y el hidrolizado detoxificado, son adicionados continuamente a varias líneas de producción continuas junto con la celulosa para la SSCF. El etanol resultante se colecta en un tanque de almacenamiento antes de ser bombeado a la destilación.

Producción de Enzimas

A la colección de enzimas que hidrolizan la celulosa para formar glucosa se le conocen como *Celulasa*. La cual está compuesta por: 1) endoglucanasas, 2) exoglucanasas y 3) β -glucosidasa. Muchas bacterias y hongos producen naturalmente estas enzimas. El organismo más común usado para producir celulasa industrialmente es el hongo *Trichoderma reesei*, el cual se utiliza en este proceso.

T. reesei es un hongo filamentoso que crece y produce *Celulasa* en bioreactores aerobios. La fuente de carbono para los bioreactores es el flujo de biomasa pretratado. Se les agrega sólidos de licor de maíz (CSL) y otros nutrientes. Se utiliza amoníaco como control de pH y provee nitrógeno adicional a los organismos. Los bioreactores son aireados y enfriados, y se adiciona un aceite de maíz como antiespumante. Los reactores son enfriados con agua que fluye por serpentines internos. El inóculo se produce en trenes con tres fermentadores lote en cada tren.

Destilación, Deshidratación y Evaporación

La destilación y las mallas moleculares se usan para recuperar el etanol del caldo fermentado. La destilación se realiza en dos columnas, la primera remueve la mayor parte del agua, y la segunda concentra el etanol a una composición cerca de la azeotrópica. Toda el agua de la mezcla azeotrópica es removida por mallas moleculares mediante adsorción.

Los restos de la primera destilación contienen todos los sólidos insolubles no convertidos, así como los sólidos disueltos. Los sólidos insolubles son separados por centrifugación y son enviados al quemador. El líquido del centrifugado es concentrado usando calor de desecho de la destilación. El jarabe concentrado del evaporador es enviado al quemador, y el condensado del evaporado se usa como agua reciclada para el proceso. Este evaporador se incluye en el proceso debido a que la cantidad de agua de destilación que puede ser reciclada es limitada¹. La concentración de los desechos de destilación líquidos se realiza con este evaporador, usando el calor de desecho.

Uso de los residuos para generación de energía del proceso

Las aguas de desecho, son tratadas por digestión anaerobia y aerobia produciendo biogás, alto en metano. El Biogás se envía a un quemador para recuperación de calor y el agua tratada es considerada apropiada para reciclado, por tanto es regresada al proceso.

Otros residuos como los sólidos de la destilación, el jarabe concentrado del evaporador y el mencionado biogás son quemados en una caldera de lecho fluidizado para producir el vapor

¹ Se requieren de dos a cuatro veces más agua para la producción de etanol lignocelulósico que en la producción de etanol a partir de maíz. En el proceso de producción de etanol a partir de maíz se requieren de 3 a 6 litros de agua para producir un litro de etanol [IATP, 2006].

del proceso. La mayor parte de la demanda de calor está en el reactor de pretratamiento y en las áreas de destilación.

Balance de energía

Algunas iniciativas para llevar a cabo proyectos energéticos que involucran a la biomasa han sido criticados debido a que requieren una mayor entrada de energía que la energía obtenida de la biomasa [Boyle, 1996]. Estos resultados dependen en gran medida de los límites que pongamos en el análisis energético y de si se utilizan los residuos de los procesos para generación de energía [Pimentel, 2005], [Patzek, 2004], [Wang, 2005], [Graboski, 2002].

Un sistema energético optimizado basado en la biomasa debe tender a minimizar la entrada del uso de energía a partir de combustibles fósiles, como la producción de fertilizantes y los combustibles para tractores, y también debe maximizar el reciclamiento y recuperación de energía a través del proceso [Boyle, 1996].

Por lo anteriormente comentado es importante conocer el balance de energía de este proceso debido a que este nos cuantifica la cantidad de energía utilizada para producir una unidad de producto, en este caso para producir un litro de etanol. La energía de salida está dada por el contenido energético de un litro de etanol según su poder calorífico superior (29700 kJ/Kg) [Patzek, 2004]. De igual forma para los combustibles usados en este balance se tomaron los poderes caloríficos superiores tal y como recomienda Patzek [Patzek, 2005].

Metodológicamente se identifica al proceso como una caja negra que tiene su entrada y salida de energía, y un lazo más de producción de calor, el cual depende de si se utilizan los residuos de la fermentación como combustible para la producción de vapor de proceso.

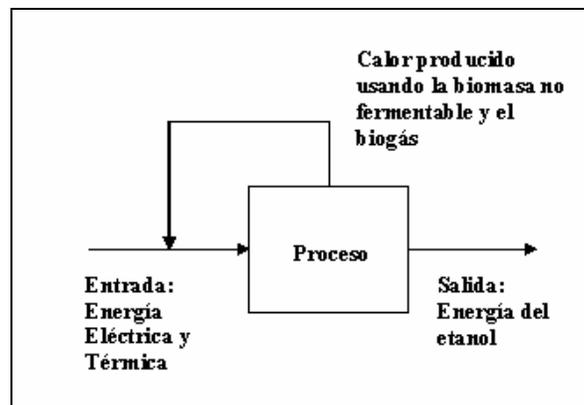


Figura 2.5 Diagrama de la energía de entrada y salida del proceso de hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica.

Para realizar el balance de energía y de masa se utilizaron los datos de los diagramas de flujo del proceso para una planta diseñada por NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable por sus siglas en inglés). Los datos se obtuvieron de un documento de Wooley

[Wooley,1999] que a su vez obtuvo de modelos desarrollados por el propio NREL (por ejemplo para la destilación), de expresiones cinéticas (para el caso de los reactores) , y modelos experimentales. Se usaron las características de los equipos presentados en los diagramas de flujo.

Todos los datos de consumo energético en los equipos están referidos a la energía consumida en una hora, debido a que se conocen los flujos másicos de materia prima y agua que entran al proceso (159948 kg/hr), y a la cantidad de etanol obtenido (18557 kg/hr [Wooley,1999]).

La tabla 2.3 resume el consumo de energía eléctrica en una hora para cada módulo analizado:

Etapa del proceso	kWh	kJ
Tratamiento de materia prima	538.05	1936980
Prehidrólisis	900.04	3240144
Detoxificación	173.78	625608
SSCF	3049.92	10979712
Deshidratación	128.99	464364
Semilla SSCF	94.56	340416
Producción de Celulosa	17364.96	62513856
Producción Semilla Celulosa	404.58	1456488
Agua	120.65	434340
Lavador	2.21	7956
Almacenamientos	0.78	2808
Enfriamiento y aire de proceso	15,004	54014004
Total Eléctrica	37782.41	136016676

Tabla 2.3 Consumo de energía eléctrica del proceso de hidrólisis enzimática de biomasa lignocelulósica.

Esta energía fue calculada de manera aproximada al sumar la potencia nominal de los equipos eléctricos que se encuentran descritos en los diagramas de flujo y multiplicados por una hora de uso. Con base a estos datos se pudo obtener cuánta energía eléctrica se empleó para obtener un kilogramo de etanol, con esta información podemos hacer la comparación de la energía eléctrica consumida para producir un kg de etanol con respecto a la cantidad de energía de un kg de etanol (29700 kJ poder calorífico superior). El resultado es que se requiere el 24.7% de la energía contenida en un kg de etanol para suministrar la energía eléctrica demandada para producir un kg de etanol.

En lo que respecta a la energía térmica, en forma de vapor de proceso, tenemos que este se emplea en las etapas de Pretratamiento, SSCF, Producción de Celulosa, Destilación, Tratamiento de agua, y Deshidratación, dando un total de 499.83GJ. En la tabla 2.4 se resume la energía térmica utilizada en una hora.

Calor de Proceso	GJ
Pretratamiento	204.61
Destilación, evaporación y otros	295.22
Total	499.83

Tabla 2.4 Consumo de energía térmica del proceso.

Este dato de la energía se obtuvo de la siguiente forma:

En los diagramas de flujo aparecen las líneas principales de vapor que van hacia el proceso, donde está especificada la masa, la presión y la temperatura. Para obtener la entalpía del vapor se utilizó el programa de El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés) que proporciona datos termoquímicos, termofísicos y de energía para diferentes compuestos [NIST,2006], después la entalpía se multiplicó por la masa de vapor, y al final se hizo la suma de todas las energías. Esto nos entregó la energía térmica demandada por el proceso.

Haciendo la comparación de la energía térmica requerida para producir un kilogramo de etanol se encontró que se requiere alrededor del 90.7% de la energía del etanol para producir la energía térmica de esa unidad de etanol.

Sumando la energía eléctrica y la energía térmica (635.85 GJ/hr) tenemos que la energía requerida para la producción de un kg de etanol con este proceso es de 1.15 veces el contenido de energía de un kg de etanol. Es decir, considerando únicamente la energía requerida del proceso, es necesaria una mayor cantidad de energía para producir una unidad de etanol que la energía contenida en esa unidad de etanol. Sin embargo, una de las características de este proceso y por lo que resulta atractivo es que los residuos no fermentables del proceso pueden ser utilizados como combustible para la generación de vapor de proceso y electricidad, es decir que parte de la energía térmica requerida puede ser suministrada por el mismo proceso como se muestra en la figura 2.6. La discusión de este resultado se hará más adelante.

Para poder conocer si el balance es energéticamente autosustentable se requirió saber cuanta energía extra se necesitaba para recuperar los desechos y llevarlos hasta el quemador. La tabla 2.5 muestra el consumo extra de energía eléctrica:

	KWh	KJ
Preparación de agua de alimentación a Boiler	925.08	3330288
Evaporadores	251.04	903744
Separación de Lignina y secado	108.75	391500
Digestión anaeróbica	978.55	3522780
Electrica de Proceso sin recuperación	38048.75	136975500
Total	40312.17	145123812

Tabla 2.5 Consumo de energía eléctrica por recuperación de desechos.

El quemador es alimentado por residuos sólidos, que en total son 98.957 toneladas de residuos sólidos, con un contenido de humedad del 53.5%, y 2632 kg de biogás aeróbico. Utilizando valores de poder calorífico superior de la lignina que es 26.674 MJ/kg para los residuos sólidos, y 39.368 MJ/kg para el biogás (compuesto por un 70% de su volumen por metano). Además de la alimentación de residuos y biogás se tiene una entrada de agua con un alto contenido de energía que viene de recirculación de diferentes partes del proceso. Aquí se tiene que gastar energía para remover la humedad de los residuos, y después se considera una eficiencia de la caldera del 62% como lo indica el estudio de NREL [Wooley, 1999]. A la salida de la caldera se le resta la energía térmica del proceso, y la energía resultante se pasa por un turbogenerador con una eficiencia del 80%, de la misma forma esta eficiencia es la presentada por el estudio de NREL. Los resultados se muestran en la figura 2.6.

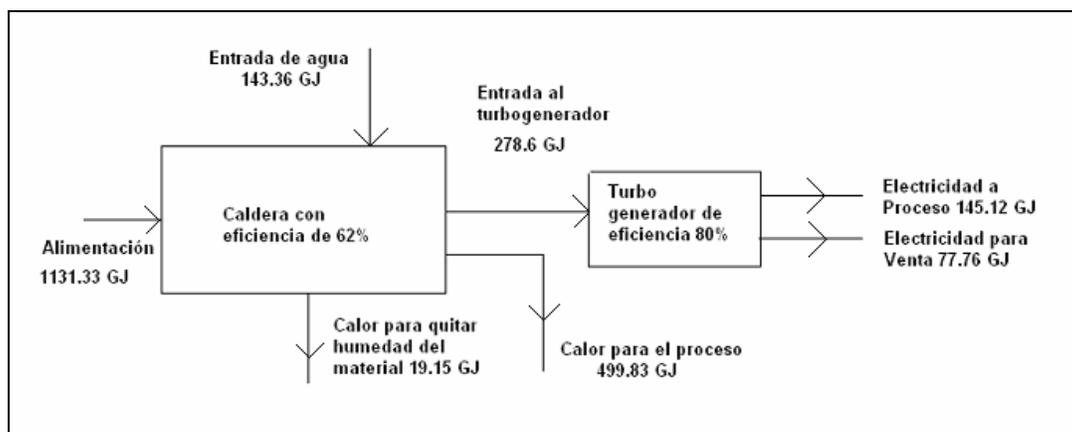


Figura 2.6 Generación y de energía utilizando los residuos del proceso.

Con esta tabla y con los datos obtenidos del consumo de energía podemos observar que el 100% de la energía térmica del proceso se puede generar por la combustión de los residuos; de igual forma ocurre con la energía eléctrica, además existe todavía un sobrante de (77.76 GJ) que pueden ser utilizados para otra actividad.

Por lo que respecta al balance de masa, se puede resumir en lo siguiente:

Al proceso entran 159,948 Kg/hr de materia prima, de estos, 18,557 se convierten a etanol (11.6% de la entrada), el 98,040 es material no fermentable que se ocupa en la producción de energía del proceso (61.3%). El 27.1 se puede considerar como desecho pero se puede estudiar la posibilidad de utilizarlo.

Desde hace más de 25 años se inició el debate sobre el balance neto de energía para producir etanol a partir de cualquier materia prima, esto ocurrió cuando el gobierno de Estados Unidos pidió a investigadores examinar la viabilidad de usar el etanol como combustible. Desde ese tiempo hasta nuestros días se han llevado a cabo un gran número de estudios al respecto con igual número de resultados. En la tabla 2.6 se muestran algunos de estos resultados recopilados:

Combustible y Materia Prima	Balance de Energía Fósil	Dato y fuente de información
Lignocelulosa	2-36	(2.62) Lorenz y Morris (5) DOE (10.31) Wang (35.7) Elsayed
Caña de azúcar	~8	(8.66) Azevedo (~9) Kaltner (9.66) Azevedo
Trigo	~2	(1.2) Richards (2.05) ADEME/DIREM (2.02-2.31) Elsayed (2.81-4.25) Gehua
Sugar beets	~2	(1.18) NTB (1.85-2.21) Elsayed (2.05) ADEME/DIREM
Maíz	~1.5	(1.34) Shapouri (1.38) Wang (1.38) Lorenz y Morris (1.3-1.8) Richards
Gasolina	0.8	(0.84) Elsayed (0.8) Andress (0.81) Wang

Nota: Los números representan la cantidad de energía entregada por el etanol entre la energía de entrada de combustible fósil

Tabla 2.6 Balances de energía para etanol y gasolina [Worldwatch Institute, 2006]

Se ha reconocido que los cálculos de los balances de energía son muy sensibles a las consideraciones sobre las fronteras del sistema y sobre los valores de los parámetros clave, por tal motivo, es difícil comparar estudios entre sí [Farell, 2006].

Algunos estudios toman en cuenta la energía para producir la materia prima (i.e. maíz), la energía usada por la maquinaria en el cultivo y cosecha, la energía para producir esa maquinaria, la energía para construir los edificios donde se procesa la materia prima en etanol, la energía para la producción de fertilizantes y pesticidas, la energía utilizada por los trabajadores, la energía para transportar el etanol de la fábrica al lugar de mezclado y posteriormente al lugar de expendio [Hill, 2006]. Otros estudios además de considerar lo anterior contabilizan la energía requerida para producir y reparar la maquinaria, así como los equipos de fermentación y destilación [Pimentel, 2005]. Algunos otros toman en cuenta la energía que se utiliza para crear los productos que son sustituidos por los co-productos de la producción de etanol, lo que beneficia el balance energético [Wang, 2005].

Varios investigadores argumentan que esta variación tan drástica en los balances se puede sintetizar a los siguientes factores:

- **Uso de la energía en el cultivo**
- **Utilización de energía para producir fertilizantes**
- **Reutilización de energía en la planta de Etanol**

En este trabajo solamente se ha considerado la energía del proceso de conversión de la materia prima (madera) en etanol. Sin embargo se puede apreciar el efecto del uso de los residuos de la fermentación, como se comenta enseguida.

Balance de energía sin reutilización de residuos

Dentro de los resultados obtenidos por Pimentel y Patzek se encuentra que el uso de energía fósil para la producción de etanol a partir de maíz aumenta en un 29%, y a partir de la biomasa celulósica aumenta entre 50-57%. Esto significa que producir etanol a partir de la biomasa celulósica implica una inversión mayor de energía comparado con el proceso a partir de maíz. Esta diferencia se debe a que para obtener los azúcares fermentables de la biomasa se requiere de una etapa de pretratamiento que implica un consumo de energía extra para realizar la hidrólisis de la biomasa en celulosa y hemicelulosa. Expresándolo como el cociente del poder calorífico del combustible entre la energía proporcionada al proceso de producción resulta en un 0.69.

Balance de energía con reutilización de residuos

Del balance realizado con la información del National Renewable Energy Laboratory (NREL) [Wooley, 2002], se concluye que toda la energía requerida en este proceso puede ser obtenida a partir de la combustión de los residuos no fermentables, con un excedente del 12% de la energía consumida por el proceso. Otros estudios de conversión de biomasa lignocelulósica llegan a la misma conclusión, como es el caso del artículo de David Morris del Institute for Local Self-Reliance [Morris, 2005] y Michael Wang del Argonne National Laboratory [Wang, 2005].

El proceso de producción de etanol es importante en cuanto al balance energético, independientemente de las fronteras que se utilicen para el análisis. Según Pimentel, alrededor del 54% de la energía para la producción de etanol a partir del maíz se utiliza en la conversión maíz-etanol; mientras que para el caso madera-etanol el proceso consumiría alrededor del 75% de la energía [Pimentel, 2005]. A su vez Graboski señala que el proceso de conversión maíz-etanol en planta consumiría el 73% de la energía para el caso de la molienda húmeda, y el 68% para el caso de la molienda seca [Graboski, 2002].

En la tabla 2.8 se resumen los resultados del balance de energía de este trabajo para los casos de utilizar y no utilizar los residuos no fermentables. Se usaron los datos de Pimentel sobre los gastos energéticos de la producción y transporte de la materia prima, así como de la distribución del etanol; donde el total de estos gastos energéticos representarían el 25% de la energía consumida por el proceso en planta [Pimentel, 2005].

HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA (balance de energía propio con información del proceso de NREL¹)	Sin uso de Residuos (GJ/hr)	Con uso de Residuos (GJ/hr)
Producción de etanol en Planta	635.85	635.85
Producción y transporte de materia prima, así como distribución del etanol ²	159	159
TOTAL entrada	794.85	794.85
Generación de energía con lo residuos no fermentables	0	713.61
Energía del Etanol	551.142	551.142
TOTAL salida	551.142	1264.752
Energía neta (SALIDA -- ENTRADA)	-243.708	469.902
Energía neta/Energía del etanol	-44%	85%
Relación (SALIDA/ENTRADA)	0.69	1.59

1= [Wooley, 2002], 2= [Pimentel, 2005]

Tabla 2.7 Cálculo propio del balance de la producción de etanol mediante la hidrólisis enzimática de madera con datos proporcionados por el NREL¹.

Es posible concluir que el proceso de conversión de biomasa celulósica a etanol sería sustentable energéticamente sólo en el caso en el que se utilicen los residuos del proceso, i.e. la biomasa no fermentable para producir el vapor y la electricidad del proceso. De lo contrario el proceso no sería energéticamente rentable. Cuando se utilizan los residuos, se obtiene un balance positivo con un 85% adicional a la energía que proporciona el etanol. Expresándolo como el cociente del poder calorífico del combustible entre la energía proporcionada al proceso de producción resulta un 1.59, el cual, comparándolo con otros valores de la Tabla 2.6 resulta menor a cualquier relación reportada para el etanol proveniente de biomasa lignocelulósica, sin embargo no se debe olvidar que el dato de la energía consumida para la producción de etanol fuera de la planta fue tomada de Pimentel, quién en sus trabajos expande de forma importante las fronteras del sistema. De igual forma no se debe perder de vista la importancia que tiene el uso de los residuos para generar el calor y la electricidad del proceso de producción en fábrica, ya que como se estudió en este caso, esto hace la diferencia entre que el proceso sea energéticamente rentable o no.

Capítulo 3

Aspectos económicos y Potencial del etanol para una sustitución de gasolina en el sector transporte mexicano

El este capítulo se revisan los aspectos económicos más importantes para la producción de etanol y se discuten algunas de las ventajas de obtener el etanol a partir de recursos lignocelulósicos al aplicar una visión a mediano plazo. De igual forma se estudia el potencial de producción de etanol en México cuando se obtiene de la caña de azúcar, el maíz y los recursos lignocelulósicos. Finalmente se presentan una serie de recomendaciones que contribuirían para lograr una sustitución parcial de gasolina por etanol en México.

Aspectos económicos de la producción de etanol a partir de caña de azúcar, maíz y biomasa lignocelulósica

Para una decisión de que materia prima utilizar para la producción de etanol, es necesario analizar la estructura de costos de cada proceso, de manera que se pueda identificar en dónde se tienen las mayores oportunidades de reducción de costos. Estas reducciones de costos son importantes debido a que el principal obstáculo que enfrenta el etanol es su costo de producción al ser comparado con el costo de la gasolina convencional.

El costo de producción del etanol es una función de los costos de la materia prima, los costos de procesamiento en la industria, los costos de almacenamiento y transportación, así como de las ventas de los co-productos.

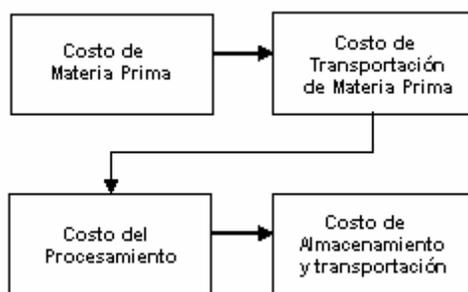


Figura 3.1 Estructura de costos de la producción de etanol para cualquier materia prima

Costo de materia prima

Se identifican 4 puntos principales que deben tener las materias primas para ser factibles económicamente hablando para la producción de etanol [Kojima, 2005]:

- 1) Las características físicas y químicas de la materia prima y que tan bien satisfacen los criterios de producción, rendimiento y pureza.
- 2) La competencia de la materia prima para otros usos y mercados.
- 3) La disponibilidad del suministro
- 4) La cantidad de materia prima disponible dentro de una distancia razonable a la fábrica de producción de etanol (para minimizar los costos de transporte)

Los costos de la materia prima están ligados en primer término a los costos de producción. Para bajar los costos de la materia prima se puede incrementar el rendimiento del cultivo por hectárea. Esto puede conseguirse moviendo el cultivo hacia áreas más fértiles, o con la optimización de fertilizantes, pesticidas y herbicidas. En Brasil el rendimiento de caña de azúcar se incrementó de un promedio de 79 toneladas por hectárea en 1985 en el área de Sao Paulo hasta 85 toneladas por hectárea en 1993 [Goldemberg, 1999]. Estos incrementos se debieron a mejoras en la selección de las variedades de caña (identificación de la mejor variedad de caña para cada tipo de suelo), la reducción en el uso de combustible en la maquinaria para la cosecha, una mayor capacidad de carga de caña de los vehículos de transporte que van del campo a la fábrica de etanol y el manejo de los residuos agrícolas [Goldemberg, 1999].

Por otra parte, los costos de producción del etanol también están ligados a los precios de los cultivos en el mercado. Los mercados a su vez están afectados tanto a nivel nacional como internacional, donde los países con gran desarrollo económico se caracterizan por un apoyo gubernamental fuerte con los productores, así como altas tarifas de importación, restricciones cuantitativas a las importaciones, subsidios a la exportación, y acuerdos comerciales ventajosos [Kojima, 2005].

Algunas materias primas como el azúcar y el maíz se encuentran también dentro de los alimentos para consumo humano. Debido a esto sus precios dependen de la oferta y la demanda en el mercado de alimentos, haciendo estos cultivos relativamente caros y sus precios altamente variables. Cuando los precios de los cultivos son altos, los productores prefieren vender los cultivos al alto precio del mercado doméstico o internacional que vender los cultivos a precios menores para la producción de etanol. Este fenómeno ya fue observado en Brasil, lo cual ocasionó alteraciones en el mercado de etanol y dañando la reputación de la industria [Kojima, 2005].

Las materias primas más utilizadas en el mundo para la producción de etanol son la caña de azúcar y el maíz. Las materias primas más prometedoras para una futura producción de etanol son los recursos de biomasa lignocelulósica. Aquí se analizan las estructuras de costos para etanol a partir de caña de azúcar, maíz y biomasa lignocelulósica.

Una de las ventajas proyectadas de la obtención de etanol a partir de recursos lignocelulósicos tiene que ver con lograr que los precios de la materia prima sean menores. Esto es debido a que muchos de estos materiales son desecho de otras actividades. Entre estos materiales encontramos: residuos de la caña de azúcar (como hojas y tallos), rastrojo de maíz, residuos forestales (como hojas y ramas), residuos municipales como el papel, desechos urbanos de madera, pastos, ramas de árboles, así como también materiales que provengan de cultivos energéticos como pasto aguja, o árboles de crecimiento rápido.

Muchos de los materiales lignocelulósicos a pesar de no competir en el mercado de los alimentos, sí tienen que competir en otro tipo de mercados. Algunos ejemplos serían el uso de papel de desecho que competiría con el uso de papel para reciclar. Los residuos de madera podrían competir con su uso para la producción de electricidad. Así también el uso de árboles de crecimiento rápido para la producción de etanol tendrían que competir por la opción de ser usados por los mercados de celulosa y papel.

Cabe señalar que tiene un costo el coleccionar estos materiales, procesarlos, transportarlos y adecuarlos para su utilización en los procesos de obtención de etanol. La producción comercialmente viable de etanol depende en gran medida de que exista la cantidad suficiente de materia prima a un costo bajo de transportación lo que implica que el área de obtención de la materia prima y la planta de producción de etanol se encuentren dentro de un cierto radio de distancia [McAloon, 2000].

Costos del proceso

Los costos del procesamiento incluyen básicamente dos componentes, el costo de capital y costos de operación y mantenimiento de la planta.

El costo de capital para la construcción de la planta depende principalmente de la materia prima a utilizar, el tamaño de la fábrica y si utilizará los residuos para la generación de energía del proceso.

El tamaño de la planta es un factor importante a considerar debido a las economías de escala. Se puede hablar de economías de escala cuando al aumentar el volumen de producción conduce a costos promedios más bajos por unidad producida.

Las plantas de etanol de menor tamaño en Brasil son de 120,000 litros diarios [Kojima, 2005]. Para una temporada de zafra de 200 días se tendría una producción de 24 millones de litros al año. Usando los valores de rendimiento calculados en el Anexo A, se tiene que en México se necesitarían 5,423 hectáreas cultivadas con caña para alimentar una fábrica de esta capacidad, suponiendo que toda la caña fuera usada para la producción de etanol.

Una ventaja en la producción de etanol a partir de caña de azúcar es el utilizar el bagazo de caña para la generación de calor y electricidad del proceso. En Brasil el uso del bagazo para este fin, así como la eficiencia del proceso de generación y electricidad se incrementaron cuando en 1997 se permitió que se pudiera vender la electricidad que no se utilizaba en el proceso. Actualmente la gran mayoría de las destilerías son autosuficientes energéticamente hablando.

En Estados Unidos las plantas de etanol para el proceso de molienda seca alcanzan las economías de escala cuando producen entre 115,000 y 150,000 litros de etanol al día [Kojima, 2005]. Con los valores de rendimiento calculados en el Anexo A se tiene que se deberían cultivar de 57,658 a 75,206 hectáreas con maíz para lograr estos volúmenes de producción con los rendimientos promedio actuales de producción en México de 2.8 ton/ha de maíz. En un escenario donde se diera una mayor productividad en el campo llegando a 9 ton/ha de maíz, entonces se tendrían que cultivar de 17,939 a 23,398 hectáreas de maíz.

En la tabla 3.1 se muestran algunos costos de capital para diferentes tipos de plantas de etanol.

Capacidad (Millones de litros al año)	Materia Prima	Costo (Millones USD)	Costo unitario (USD\$/litro)	Fuente
253.4	Caña de Azúcar	244.73	0.966	Kojima, 2005
86	Maíz (molienda seca)	28.4	0.330	Kojima, 2005
86	Maíz (molienda seca) con autogeneración de vapor y electricidad	34	0.395	Kojima, 2005
197.6	Madera (recurso lignocelulósico)	233	1.18	Wooley, 1999
757	Material lignocelulósico	660	0.871	California Energy Commission, 2001
94.6	Rastrojo de Maíz	136	1.43	McAloon, 2000

Tabla 3.1 Costo de Capital para Diferentes Tamaños y Tecnologías de Plantas de Etanol.

El segundo componente tiene que ver con los costos de operación y mantenimiento de la planta.

Ventas de co-productos

Algunos de los co-productos de la producción de Etanol son los granos secos residuales de la destilación (DDGS por sus siglas en inglés) que tienen un alto contenido de proteínas, el CO₂, la lignina en el caso de los recursos lignocelulósicos, entre otros. La venta de estos co-productos contribuyen a disminuir el costo de producción del etanol.

La biomasa residual (principalmente lignina) puede ser quemada para generar vapor o electricidad, lo que permitiría bajar o eliminar la compra de energía externa al proceso. En algunos casos el exceso de electricidad puede ser vendido a la red, dependiendo de si la legislación lo permite. El bagazo de caña puede ser usado para generar vapor y electricidad como se mencionó, pero además puede ser utilizado para hacer papel, materiales de construcción como tableros de fibra, para hacer resinas y plaguicidas, carbón activado, entre otros usos. El CO₂ puede ser utilizado para la elaboración de refrescos o extintores de fuego. Los granos secos de la destilación se utilizan como alimento para los animales, etc.

Aquí surge también el concepto de biorefinería que es similar al concepto de refinería de petróleo. La materia prima (biomasa en el caso de la biorefinería), se convierte en una gran variedad de productos. La biomasa se fracciona en sus varios componentes y después estos componentes son procesados en otros productos finales o intermedios. Los productos son combinados para hacer otros productos adicionales.

Costos de la Producción de Etanol

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de diferentes estudios económicos para la producción de etanol a partir de diferentes materias primas y procesos.

Como puede observarse en la tabla 3.2 los costos más bajos de producción pertenecen al etanol obtenido en Brasil a partir de la caña de azúcar. Brasil es el mayor productor de etanol del mundo. Lo sigue la producción de etanol de Estados Unidos a partir de maíz, aunque con una diferencia significativa en costo. De la misma tabla se observa que los costos de producción de etanol para Europa son mucho mayores, incluso para la obtención de etanol a partir de recursos lignocelulósicos en Estados Unidos. Cabe señalar sin embargo que aún no se cuentan con plantas comerciales de etanol a partir de lignocelulosa, por lo que estos costos corresponden a estimaciones.

Para el caso de México se tiene el estudio de J. Aguillón sobre los costos de producción de etanol a partir de la caña de azúcar, específicamente usando las mieles B, en donde el costo obtenido es similar al de producir etanol con maíz en Estados Unidos [Aguillón 2006]. Cabe señalar que este estudio no toma en cuenta los costos de capital de la columna deshidratadora ni de los tanques de almacenamiento. De la misma forma ocurre con el estudio de M. Enríquez sobre costos del etanol a partir de miel B, donde el costo varía dependiendo del precio de la miel B.

Materia Prima	Proceso	Localización	2005 USD/litro	Fuente
Caña de azúcar		Brasil	0.175	Kojima, 2005
Caña de azúcar		Brasil	0.139	Goldemberg, 1999
Caña de azúcar		Brasil	0.154	IEA, 2004
Caña de azúcar (miel B)		México	0.256*	Aguillón, 2006
Caña de azúcar (miel B) \$USD/tmiel B 30.0		México	0.231*	Enríquez, 2005
Caña de azúcar (miel B) \$USD/t.miel B 70.0		México	0.376*	Enríquez, 2005
Maíz	Molienda seca	Estados Unidos	0.258	IEA, 2004
Maíz	Molienda seca	Estados Unidos	0.212	Kojima, 2005
Trigo		Unión Europea	0.311	IEA, 2004
Trigo		Unión Europea	0.551	IEA, 2004
Trigo		Unión Europea	0.414	Kojima, 2005
Remolacha		Unión Europea	0.374	IEA, 2004
Remolacha		Unión Europea	0.534	IEA, 2004
Remolacha		Unión Europea	0.470	Kojima, 2005
Paja (hidrólisis acida)	Hidrólisis acida	Unión Europea	0.571	Kojima, 2005
Madera (hidrólisis acida)	Hidrólisis acida	Estados Unidos	0.295	Kojima, 2005
Madera (hidrólisis enzimática)	Hidrólisis enzimática	Estados Unidos	0.312	Wooley, 1999
Rastrojo de maíz	Hidrólisis enzimática	Estados Unidos	0.338	McAloon, 2000

* No incluye costos de capital de la Columna deshidratadora ni tanques de almacenamiento

Tabla 3.2 Costos de producción de etanol para diferentes localizaciones, materias primas y procesos

Estructura de Costos en la Producción de Etanol

La estructura de costos en la producción de etanol nos dice en donde se encuentra la mayor oportunidad para bajar los costos de producción de etanol.

En la figura 3.2 se muestra cómo es la estructura de costos para la obtención de etanol a partir de la caña de azúcar en Brasil. Como podemos observar el costo mayor está asociado al precio de la caña de azúcar, teniendo un impacto de alrededor del 60% del costo total de producción. La posible reducción de costos de la producción de etanol con esta materia prima esta relacionada al costo de producción de la caña y al costo de producción en fábrica del etanol [Goldemberg, 1999]. Goldemberg menciona un potencial de reducción del costo del etanol de un 23% localizado en una mayor eficiencia de producción tanto en el campo como en la industria. Para el rango de costos presentados en la tabla 3.2, esto representaría un costo aproximado por litro de etanol de entre \$0.107-\$0.134 (USD 2005). La parte de recuperación de capital (o costo de capital) que se debe a la inversión inicial para la construcción y puesta en marcha de la fábrica representa alrededor del 14% del costo de producción.

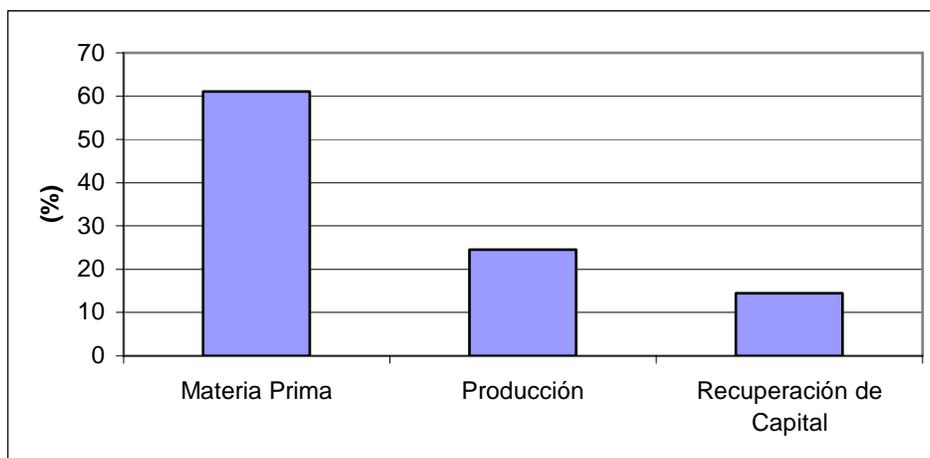


Figura 3.2 Estructura de costos de Producción de Etanol a Partir de Caña de Azúcar [Goldemberg, 1999].

En la figura 3.3 se presenta la estructura de costos de la producción de etanol derivado del maíz en Estados Unidos. Como podemos observar al igual que en el caso de la caña de azúcar la materia prima para la producción de etanol es lo que contribuye con el mayor porcentaje del costo total de producción. Para este caso es aún mayor que para la caña de azúcar con una participación de casi el 80% del costo total. El costo de producción de etanol a partir de maíz es muy sensible a las variaciones del precio de materia prima. Se puede apreciar que la venta de co-productos es negativa debido a que al ser ingresos de dinero debido a las ventas éstas mejoran el costo de la producción

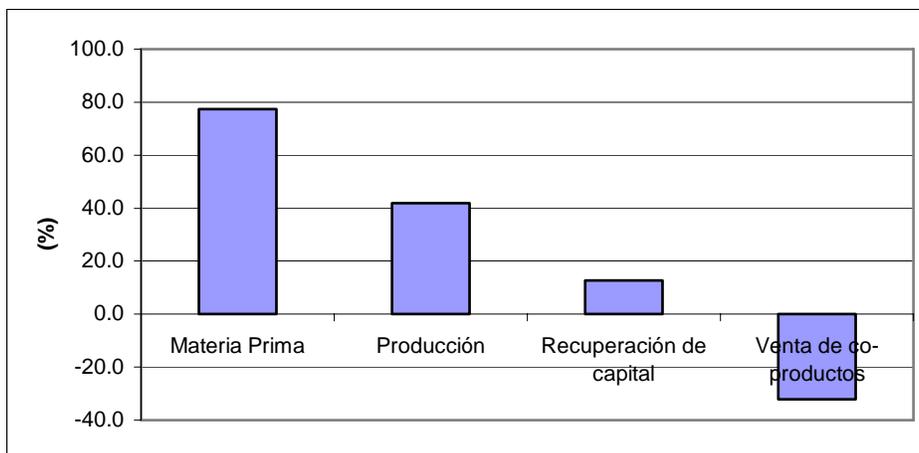


Figura 3.3 Estructura de costos de Producción de Etanol a Partir de Maíz [McAloon, 2000].

En lo que respecta a la producción de etanol en Estados Unidos usando como materia prima el Maíz, se estima que los costos de producción declinan lentamente, a la vez que se asume que los precios de la materia prima no tengan un alza tan importante [IEA, 2004]. En la figura 3.3 se puede apreciar que la venta de los co-productos como los granos secos de la destilación, implican un costo negativo, ya que estamos hablando de una entrada de dinero por las ventas de estos co-productos y no de un costo. En la tabla 3.3 se muestra una proyección creada por la misma IEA donde se observa la posible evolución de los costos entre la gasolina y el etanol a partir de maíz, y derivado de recursos lignocelulósicos.

Litro de:	2002	2010	Post-2010
Gasolina	\$0.21	\$0.23	\$0.25
Etanol de Maíz	\$0.43	\$0.40	\$0.37
Etanol de lignocelulosa (madera)	\$0.53	\$0.43	\$0.27

Tabla 3.3 Proyección de evolución de costos de gasolina, etanol derivado de maíz y etanol derivado de recursos lignocelulósicos (en costo equivalente de gasolina) [IEA, 2004].

El etanol derivado de recursos lignocelulósicos requiere mucho mayor procesamiento que el etanol derivado de azúcar o almidones (caña y maíz). Esto es debido al tratamiento que se le tiene que dar a la biomasa con el objetivo de lograr separar los diferentes azúcares, y que estas estén en condición de ser fermentadas. Esto puede observarse en las figuras 3.4 y 3.5 donde se observan las estructuras de costos para producción de etanol a partir de rastrojo de maíz y a partir de madera. Como puede verse la materia prima ocupa alrededor del 30% del costo total, mientras que el costo del proceso y la recuperación de capital son los principales componentes.

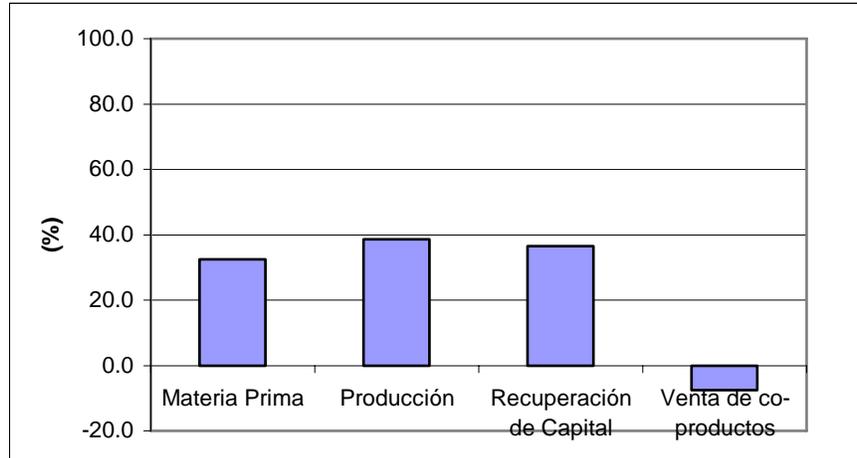


Figura 3.4 Estructura de costos de Producción de Etanol a partir de Rastrojo de Maíz [Mcaloon, 2000].

En el procesamiento de la biomasa lignocelulósica se tiene una gran área de oportunidad para la reducción de costos de la producción de etanol a partir de estos recursos. Prácticamente todas las etapas del proceso pueden ser mejoradas para impactar directamente en el costo de producción de etanol. Estas áreas de oportunidad se listan a continuación:

- **Pretratamiento/hidrólisis de hemicelulosa**
- **Fermentación de azúcares de cinco carbonos**
- **Hidrólisis enzimática de la celulosa**
- **Fermentación de glucosa**
- **Producción de enzimas**
- **Recuperación de residuos**

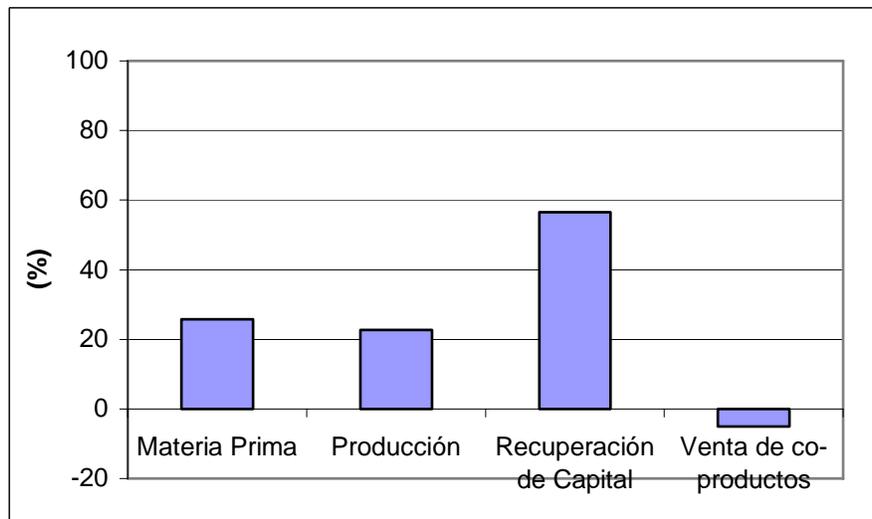


Figura 3.5 Estructura de costos de Producción de Etanol a partir de Madera [Wooley, 1999].

Un estudio de sensibilidad realizado por Wyman [Wyman, 1999] para la producción de etanol a partir de lignocelulosa presenta los siguientes resultados: si el costo de la materia prima baja de USD\$42/ton a USD\$34 (reducción del 19%) se reduciría el costo de producción en un 7.4% (el costo de producción estimado por Wyman es de 0.322 (USD\$ 1990)/litro); si el tamaño de la planta pasara de 1,920 toneladas de materia seca/día a 10,000 toneladas de materia seca/día entonces el costo de producción se reduciría en un 11.5%; por otra parte una mejora de eficiencia de la Sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) desde el 72% del máximo teórico hasta el 90% del máximo teórico, reduciría los costos de producción en un 12.3%.

Es de resaltar el papel importante que juega el tamaño de la planta en la reducción de costos. Esto debido a economías de escala. De igual manera se tiene un impacto considerable al aumentar los rendimientos de la fermentación, esto se pretende lograr haciendo uso de la biotecnología para que los organismos sean más eficientes en la fermentación.

En la figura 3.6 se muestra una proyección futura del costo de la producción de etanol a partir de recursos lignocelulósicos, llegando en el año 2015 a un costo de \$0.76 (USD 1997)/galón de etanol, o \$0.2 (USD 1997)/litro. En términos de moneda del 2005 \$0.62 (USD 2005)/galón de etanol, o \$0.164 (USD 2005)/litro.

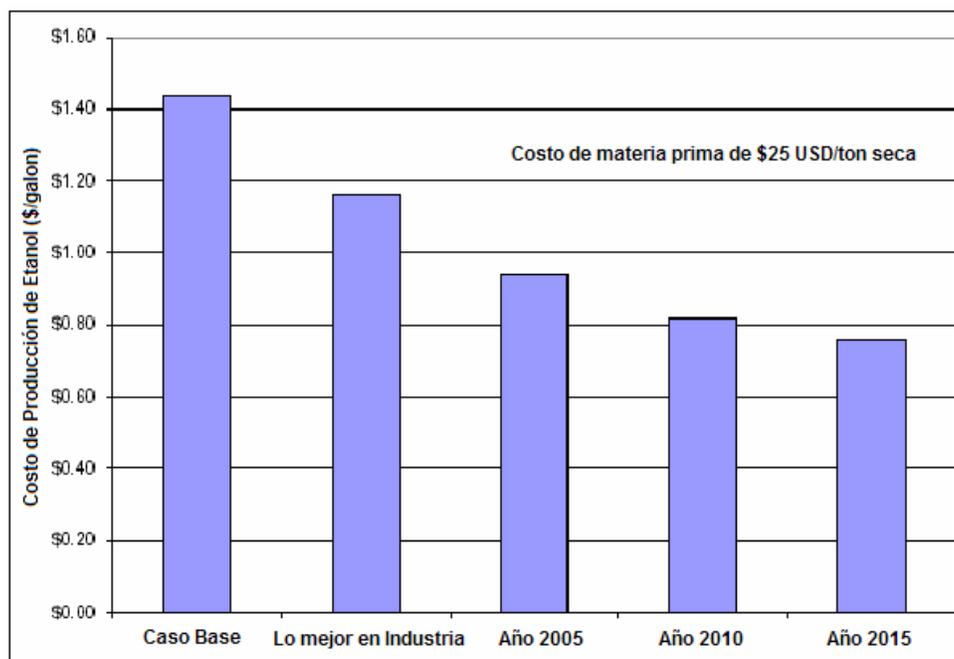


Figura 3.6 Proyección futura de los costos de producción de etanol a partir de recursos lignocelulósicos [Wooley, 1999].

Se espera que los costos de capital se hagan menores a medida que la tecnología mejore, como se muestra en la figura 3.7. Esto se logrará realizando los cambios sugeridos a saber:

disminuyendo las temperaturas del pretratamiento, reduciendo la demanda de enzimas, y reduciendo el tiempo de hidrólisis enzimática.

Otro trabajo de proyecciones futuras de los costos del etanol muestran costos de hasta \$0.12 USD por litro con rastrojo de maíz [Mielenz, 2001].

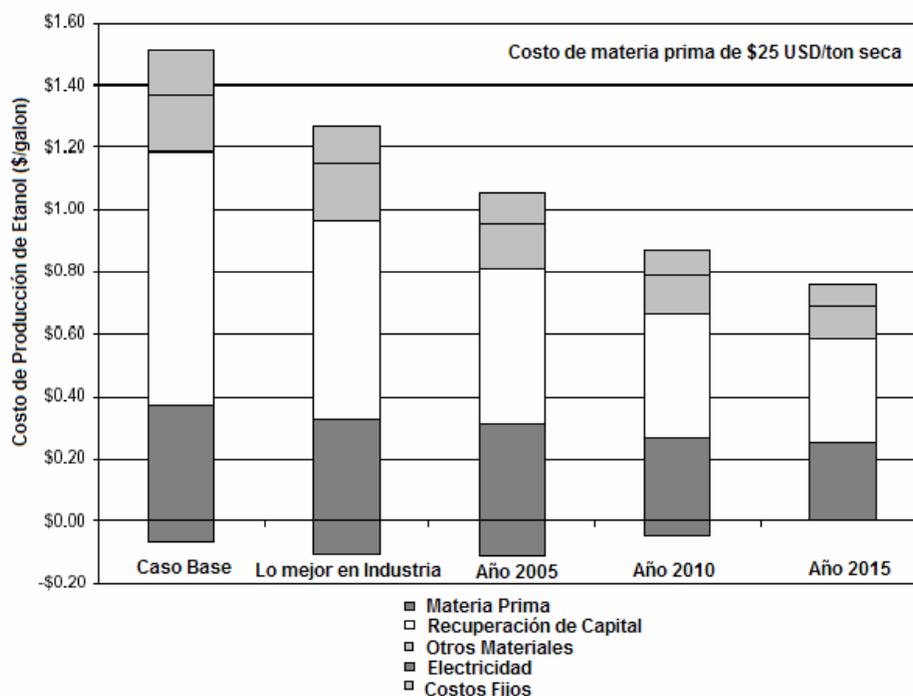


Figura 3.7 Participación de los costos en proyecciones futuras para producción de etanol derivado de recursos lignocelulósicos [Wooley, 1999]

En el caso de los procesos a partir de las materias primas anteriores, se identifica un área de mejora en los costos. Dentro de los puntos de mejora de los costos de producción de etanol a partir de caña de azúcar, se encuentra el uso de el bagazo para la generación de electricidad en el proceso [Goldemberg, 1999]. De igual forma Pimentel señala que después del costo de la materia prima, el costo de la energía para la producción es lo que tiene más peso en el costo del etanol [Pimentel, 2005]. Al ser energéticamente más intensivo, el costo de la energía para la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es un área de oportunidad para la reducción de sus costos de producción.

Potencial actual de producción de etanol en México

En esta parte del trabajo se realiza una estimación del potencial de México para producción de etanol desde el punto de vista técnico. Las materias primas a partir de las cuales se realiza el cálculo del potencial se limitan a los casos del maíz, la caña de azúcar y los recursos lignocelulósicos de madera, rastrojo de maíz, rastrojo de sorgo, bagazo de caña, residuos forestales y Residuos Sólidos Municipales (papel). Se considera el potencial con las superficies cultivadas actualmente para los casos del maíz y la caña, así como las

superficies estimadas por Ghilardi, Riegelhaupt y Saldaña para plantaciones energéticas en el país [Maser et al, 2005]. Del mismo trabajo se tomó la generación de residuos lignocelulósicos. Cabe señalar que este potencial técnico de los cultivos dedicados para la transformación de energía compite directamente con otros usos. Los potenciales técnicos del maíz y la caña de azúcar compiten directamente con la producción de alimentos; el potencial técnico de la obtención de etanol del bagazo compite directamente con el uso del bagazo como combustible para generación de electricidad de procesos, o para la elaboración de celulosa; el uso de la madera para obtención de etanol compite directamente con otros posibles usos energéticos como la gasificación y la combustión directa para la producción de electricidad. En este estudio de potencial no se considera la posible ampliación de las tierras de cultivo de maíz y caña de azúcar. Evaluaciones posteriores deberán tomar en cuenta estos potenciales. En el Anexo A se muestra el cálculo del potencial realizado en este trabajo.

En la tabla 3.4 se muestra el resultado de las estimaciones del potencial.

Materia prima	Superficie cosechada (Miles de ha)	Producción anual (toneladas)	Producción de etanol (Millones de litros anuales)	Energía anual (PJ)
Maíz	8436	22,041,495	5,490	116
Melaza		1,920,000	480	10.1
Azúcar	680	5,376,000	2,533	53.4
Bagazo		14,400,000	2,375	50
Madera	16300	22,500000-62,300000	7,421 – 20,550	156-436
Rastrojo de maíz		10,545,000	3,230	68
Rastrojo de Sorgo		10,100,000	3,093	65.1
Residuos forestales		2,000,000	660	13.9
RSM (papel)		4,504,360	743	15.6
Total			26,025 – 39,154	548.1 – 828.1

Tabla 3.4 Cultivos en México, residuos lignocelulósicos y posible producción anual de etanol.

Los valores de la producción agrícola de maíz se obtuvieron de Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera [SAGARPA, 2005]. En estos datos se encuentra contenida la producción de maíz blanco y maíz amarillo. El maíz amarillo es el que se utiliza en Estados Unidos para la producción de etanol. En México se utiliza el maíz amarillo como alimento para animales, mientras que toda la producción de maíz blanco se destina al consumo interno de alimentos. En 2004 se importaron 5,750 miles de toneladas de maíz amarillo y 205 mil toneladas de maíz blanco [CEDRSSA, 2006].

Los datos de la superficie cultivada y producción de caña de azúcar se tomaron de la presentación del dirigente cañero Carlos Blackaller publicada en la página de la Unión Nacional de Cañeros [Blackaller, 2005]. Las producciones de melazas, caña de azúcar y bagazo, fueron calculadas a partir de estos datos. Los porcentajes de producción de bagazo de caña y de melazas a partir de la producción de caña de azúcar fueron tomados de A. Martínez [Martínez, 2005].

El potencial de las plantaciones energéticas fue tomado del capítulo de Los recursos Bioenergéticos en México elaborado por Ghilardi, Riegelhaupt y Saldaña, del libro La Bionergía en México [Masera et al, 2005].

La disponibilidad de los residuos agrícolas fue calculada por Ghilardi, a excepción del rastrojo de maíz y del papel. Los datos del rastrojo de maíz se calcularon según la relación reportada por Perlack en donde la relación del rendimiento de maíz con la generación de rastrojo es de 1 a 1 (1 tonelada de rastrojo seco por tonelada de maíz) [Perlack, 2002], y para el cálculo de esta tesis se consideró que sólo se puede utilizar el 50% del rastrojo ya que al retirarlo todo se crearía erosión del suelo [Perlack, 2002]. El dato sobre la generación de papel se calculó con datos de la SEDESOL sobre la generación de Residuos Sólidos Municipales; y de ahí mismo se obtuvo el porcentaje de la cantidad de residuos de papel del total de los residuos sólidos (14% aproximadamente) [SEDESOL, 1999].

El resultado total del potencial de producción de etanol al incluir el etanol a partir de residuos lignocelulósicos es de 26,025 – 39,154 millones de litros anuales (548.1 – 828.1PJ). Para comparar esta producción de etanol con el consumo actual de gasolina se tiene que en 2006 se consumieron 41,675 millones de litros de gasolina en México [PEMEX, 2007], considerando que el etanol tiene un 75% del poder calorífico de la gasolina se necesitarían 52,094 millones de litros de etanol para suministrar la misma energía que se consumió en gasolina en 2006. A partir de estos cálculos se encontró que la producción de etanol potencial calculada representaría del 50% al 75% del consumo total de gasolina en 2006.

Analizando el caso de la caña de azúcar para la producción de etanol se encuentra que si se utilizara toda el azúcar y la melaza para la producción de etanol se tendría una producción de 3,013 millones de litros de etanol al año, lo que equivaldría al 5.78% del consumo de gasolina en México en 2006. En caso de que se aprovechara también el bagazo de caña para la obtención de etanol, entonces se tendría una producción de 5,388 millones de litros o el 10.34% del consumo de gasolina en 2006.

Para el caso de la producción de etanol a partir de maíz hay que tener en cuenta dos situaciones que se presentan en la actualidad. La primera es que la productividad promedio en campo para la producción de maíz es muy baja (2.8 ton/ha) [SAGARPA, 2005], situación que elevaría el costo de producción de etanol. La segunda situación es la del actual déficit que se tiene en la producción de maíz (5.955 millones de toneladas), sobre todo en maíz amarillo, el cual no se utiliza comúnmente para consumo humano [CEDRSSA, 2006].

Un incremento en la productividad promedio del campo para la producción de maíz ayudaría a satisfacer la demanda interna del país, de igual forma se lograría mejorar el costo de producción del etanol. En la tabla 3.5 se puede observar como aumentaría la producción de maíz en México de darse un incremento en los rendimientos de producción en el campo.

Materia Prima	Superficie Miles ha	Rendimiento (ton/ha)	Miles Toneladas (año)	Litros/año	%Sustitución gasolina
Maíz	8436	2.5	21090	5.49E+09	1.05E+01
		2.8	23620.8	6.15E+10	1.18E+02
		5	42180	1.10E+10	2.11E+01
		6	50616	1.32E+10	2.53E+01
		9	75924	1.98E+10	3.79E+01
		10	84360	2.20E+10	4.22E+01
Rastrojo de maíz		2.5	10545	3.23E+09	6.20E+00
		2.8	11810.4	3.62E+09	6.94E+00
		5	21090	6.46E+09	1.24E+01
		6	25308	7.75E+09	1.49E+01
		9	37962	1.16E+10	2.23E+01
		10	42180	1.29E+10	2.48E+01

Tabla 3.5 Producciones de etanol a partir de maíz al aumentar los rendimientos en el campo

Actualmente si se pudiera utilizar todo el maíz que se produce en México para hacer etanol, se tendría un volumen de etanol que podría sustituir el 11.8% del consumo de gasolina en 2006. Al aumentar el rendimiento promedio anual de 2.8 ton/ha a 5 ton/ha se podría producir todo el maíz que se consume actualmente en México. El consumo de maíz está conformado por la producción actual (23.62 millones de toneladas) mas las importaciones (5.955 millones de toneladas), lo que resulta en un total de 29.576 millones de toneladas anuales. Con este aumento de rendimiento promedio anual a 5 ton/ha se tendría un excedente de 12.6 millones de toneladas de maíz al año (ver tabla 3.5), mismas que podrían ser utilizadas para exportación como alimento, o bien, se podría sustituir una parte de las superficie cultivada con maíz blanco para cultivar maíz amarillo y usar este para la producción de etanol.

Al aumentar el rendimiento en campo de la producción de maíz, al mismo tiempo se tendría un incremento en el volumen de rastrojo de maíz, mismo que se podría utilizar para la producción de etanol. Si observamos la tabla 3.5 encontramos que de poder usarse todo el rastrojo de maíz para la producción de etanol se tendría una producción de 3,230 millones de litros anuales, lo que equivaldría al 6.2% de la gasolina consumida en México en 2006. Al incrementar el rendimiento a 5 ton/ha de maíz y luego a 10 ton/ha se tendría que el volumen de etanol que se podría producir sustituiría el 12.4% y el 24.8% respectivamente de la gasolina consumida en 2006. Todo esto sin aumentar el área de cultivo.

El etanol que podría producirse a partir de las plantaciones energéticas de madera podría sustituir el consumo de gasolina en 2006 del 14.24% al 39.44%. El rastrojo de sorgo, los residuos forestales y el papel de los residuos sólidos municipales podrían lograr una producción de etanol que sustituiría el 8.63% del consumo de gasolina en 2006.

Hay que señalar la importancia que pudiera representar el uso de los recursos lignocelulósicos para la producción de etanol, ya que al usarse estos recursos se podría sustituir del 34% al 59% del consumo de gasolina en 2006.

El potencial calculado para todas las materias primas es el máximo teórico posible con la tecnología actual (a excepción de la tecnología para lignocelulosa donde los rendimientos son teóricos), la materia prima que se estima existe en México y sobre las posibles plantaciones forestales con fines energéticos. Este potencial se verá reducido a la materia prima a la que se puede acceder para recolección y que resulte económicamente viable. Del mismo modo esta disponibilidad de materia prima tiene que competir directamente con otros usos, como lo son el maíz para alimentos, el bagazo de caña como combustible de procesos en los ingenios azucareros, la madera con la elaboración de celulosa para papel, etc. Esto hace evidente la necesidad del diseño de metodologías y herramientas para la mejor estimación de este potencial.

Producción actual de etanol en México

La producción de azúcar y alcohol etílico derivados de la caña de azúcar es la industria más antigua de la Nueva España. Actualmente el etanol en México se obtiene utilizando únicamente las mieles finales como materia prima. Es importante señalar que la productividad en los campos cañeros de México se encuentra por arriba del nivel promedio de los principales países productores ya que, salvo en India donde el rendimiento promedio es de 70.4 toneladas por hectárea, el resto de los países no supera las 70 toneladas.

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), señala que la superficie cultivada promedio anual de caña de azúcar en México, de 1998 a 2003, fue de 631.2 mil hectáreas, con una tasa de crecimiento de apenas 0.26 por ciento en este lapso. De esta superficie se obtuvo una producción promedio anual, de 45.15 millones de toneladas de caña de azúcar, con lo cual se obtiene un rendimiento promedio, de 71.7 toneladas por hectárea, lo cual sin duda es un indicador del gran potencial productivo que tiene nuestro país. [Cámara de Diputados, 2005].

Para el año 2005 en México se cultivaron alrededor de 657 mil hectáreas de caña de azúcar con una producción de 50.8 millones de toneladas de caña, 14.7 millones de toneladas de bagazo, poco más de 5.7 millones de toneladas de azúcar y alrededor de 59.3 millones de litros de etanol [Aguillón, 2006]. A manera de comparación, Brasil en 2005 produjo alrededor de 16 mil millones de litros, con un área de plantación de tres millones de hectáreas [Goldemberg, 2007].

Otras fuentes señalan que el mercado del etanol en México está conformado como aparece en la tabla 3.6.

Importaciones	Oferta	Exportaciones	Consumo Nacional (CNA)	Consumo Nacional (Otras fuentes)
110,295,317	160,363,413	21,356,338	139,007,075	219,000,000

Tabla 3.6 El mercado del alcohol en México, año comercial 2005/2006. En litros [Cortés, 2006].

Consideraciones para la introducción del etanol como oxigenante de las gasolinas en la ZMVM.

En el año 2005 se presentó en México la Iniciativa de Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, misma que fue aprobada 2007. Esta ley pretende servir para promover el uso de biocombustibles (etanol y biodiesel) en los principales centros urbanos del país.

De las experiencias mostradas y de los estudios de costos de producción presentados anteriormente, podemos extraer algunas conclusiones que se traducen en recomendaciones para la introducción de etanol como oxigenante de las gasolinas en México:

- Las principales acciones para la introducción del etanol como oxigenante de las gasolinas o como combustible para los vehículos tanto en Brasil y Estados Unidos se encuentran principalmente en los mandatos hacia las mezclas de gasolina-etanol y en los incentivos fiscales que logren que el precio del etanol pueda competir con la gasolina. Para lograr las acciones anteriores es de vital importancia la participación del gobierno.
- Al igual que lo hizo Petrobrás en Brasil se debe buscar que PEMEX compre o garantice la compra del alcohol producido. Una obligación a PEMEX a comprar el etanol producido en México debe considerar que se tendrían que otorgarle subsidios al etanol para que el costo sea competitivo con la gasolina, dichos subsidios tendrían que buscar reducirse al máximo al mejorar los costos de producción.
- Debido a la necesidad de reducir lo más posible los costos de producción del etanol de tal forma que se requieran los menores subsidios posibles y por el menor tiempo, es importante el desarrollo de investigación para obtener un mejor rendimiento en campo para la caña de azúcar. En el caso de la caña de azúcar esto podría lograrse optimizando el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas; también es importante la investigación de nuevas variedades de caña que mejor se adapten a las condiciones del lugar donde se van a cultivar. De igual forma se necesita una optimización en la organización de los procesos de cosecha y transportación a la fábrica. También es importante bajar los costos de producción en la fábrica de etanol, el uso del bagazo de caña ayuda a eliminar el uso de combustibles fósiles para la generación de calor y electricidad del proceso, lo cual mejora el costo de producción. Al usar el bagazo para la producción de calor y electricidad se podría vender el excedente de electricidad que no se consuma en las destilerías, lo cual representaría un ingreso extra para la fábrica. En México actualmente solamente dos ingenios azucareros son sustentables energéticamente [Cortés, 2006], por lo que se requiere una inversión en infraestructura para hacerlos autosustentables, además de las posibles inversiones para las destilerías.

- En caso de que la producción de etanol se de en el esquema de producción de azúcar y etanol, entonces se deben tomar las medidas necesarias para garantizar el abasto de etanol en un escenario de altos precios del azúcar.
- Debido a la situación actual de déficit en la producción de maíz para consumo interno (sobre todo de maíz amarillo el cual por lo general no se usa para consumo humano), no parece ser conveniente en el corto plazo el usar al maíz como materia prima para la producción de etanol en México, ya que sería preferible el lograr la autosuficiencia en la producción y mejorar la balanza comercial del país. Para poder revertir la situación de importaciones de maíz es importante reconocer el potencial que existe en mejorar el rendimiento en campo de la producción. Como se comentó anteriormente una mejora en el rendimiento promedio nacional a 5 ton/ha eliminaría las importaciones, e incluso se tendrían excedentes de maíz que pudieran venderse a otros países, o bien, producir etanol.
- Es necesario reconocer el potencial que existe para la producción de etanol a partir de recursos lignocelulósicos, los cuales tienen la ventaja de no competir directamente como alimentos. Al usar estos recursos para la producción de etanol se podría sustituir del 34% al 59% del consumo de gasolina en el 2006. Debido a que la tecnología aún no se encuentra completamente desarrollada para hacer competitiva económicamente la producción de etanol a partir de estos recursos, es importante el invertir en investigación de manera que se pueda contar con tecnología propia, sin tener que recurrir a transferencia de tecnología de otras partes.
- Al igual que como lo ha hecho Estados Unidos sería recomendable una sustitución paulatina de gasolina por etanol, ya que llevar a cabo una penetración y producción a gran escala podría traer situaciones sociales conflictivas y daños ambientales, tal y como ocurrieron en Brasil [Kojima, 2005].
- El gobierno podría aparecer como un actor importante en la promoción del uso de etanol pudiendo usar mezclas de gasolina-etanol en la flota vehicular oficial.

Capítulo 4

Emisiones Contaminantes y Factores de Emisión

En este capítulo se describen los contaminantes criterio y los tóxicos del aire que provienen de los vehículos automotores que emplean como combustible gasolina y mezclas de etanol y gasolina en diversas proporciones. También se comentan algunos de sus efectos en la salud y el ambiente. Así mismo se revisan las normas ambientales y algunas de sus tecnologías de control. De igual forma se describe la metodología empleada para el cálculo de factores de emisión para los contaminantes considerados, para lo cual se aplicará el modelo MOBILE6-México a los combustibles MTBE5 (5% volumen MTBE y 95% volumen gasolina), E10 (10% volumen etanol y 90% volumen gasolina) y ETBE15 (15% volumen ETBE y 85% volumen gasolina) considerando las condiciones climatológicas y geográficas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Posteriormente se presentan los factores de emisión calculados.

Emisiones de Contaminantes por el Sector Transporte

En este siglo y en el siglo pasado se han liberado grandes cantidades de contaminantes hacia la atmósfera que ponen en riesgo la salud humana, los ecosistemas y el clima de la tierra. Las actividades que más han contribuido a la liberación de estos contaminantes son la quema de combustibles fósiles, la deforestación, el desarrollo de la agricultura, entre otros.

La contaminación atmosférica es mayor en los centros urbanos donde se tiene una alta concentración de habitantes. En la tabla 4.1 se muestra la calidad del aire de las megaciudades del mundo. Las megaciudades se definen como las aglomeraciones urbanas con poblaciones que alcanzaron los 10 millones de personas o más en el año 2000 [Molina *et al*, 2002].

Megaciudad	Población (millones) 2000	Partículas Totales Suspendidas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1995	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1998
Tokio, Japón	26,4	49	18	68
Ciudad de México, México	18,13	279	74	130
Mumbai, India	18,07	240	33	39
Sao Paulo, Brasil	17,76	86	43	83
Nueva York, USA	16,64	---	26	79
Los Angeles, USA	13,14	---	9	74
Calcutta, India	12,92	375	49	34
Shangai, China	12,89	246	53	73
Delhi, India	11,7	415	24	41
Jakarta, Indonesia	11,02	271	---	---
Osaka, Japón	11,01	43	19	63
Beijing, China	10,84	377	90	122
Manila, Filipinas	10,87	200	33	---
Río de Janeiro, Brasil	10,58	139	129	---
Cairo, Egipto	10,55	---	69	---
Estándares de la Organización Mundial de la Salud		90	50	40

Tabla 4.1 Megaciudades del mundo y sus datos de calidad del aire [Molina *et al*, 2002]

En el mundo los vehículos a motor son los mayores contribuyentes a la liberación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El sector transporte es el responsable del 25% de las emisiones de CO₂ [Worldwatch Institute, 2006].

En el caso de México se estima que por lo menos el 40% de la población urbana del país está expuesta a niveles de contaminación del aire fuera de la norma, tal y como se muestra en la tabla 4.2.

Zonas Urbanas	No. De días por arriba de la norma
Ciudad de México	332
Guadalajara	155
Monterrey	100
Toluca	77
Mexicali	123

Tabla 4.2 Ciudades del país que sobrepasan la norma de calidad del aire [SEMARNAT, 2004].

Emisiones de Vehículos automotores

Las emisiones de vehículos automotores están integradas por un gran número de contaminantes que provienen de procesos diferentes, su nombre genérico es el de emisiones debidas a fuentes móviles. En general las emisiones más significativas son las que resultan de la quema de combustibles líquidos en motores de combustión interna y son liberadas por el escape del vehículo como gases de combustión. Los contaminantes de interés se dividen en contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y gases tóxicos. Los contaminantes criterio considerados son el CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrógeno), SO₂ (dióxido de azufre), PM (material particulado), THC (hidrocarburos totales), los gases tóxicos del aire estudiados son el 1,3-butadieno, benceno, formaldehído, acetaldehído; y los gases de efecto invernadero CO₂ (dióxido de carbono) y el CH₄ (metano). Además de los contaminantes anteriores existen las especies reductoras de visibilidad como el amoniaco, sulfatos, PM_{2.5}, etc. También existen las emisiones evaporativas que ocurren en el carburador del vehículo, que están formadas principalmente por hidrocarburos y benceno.



Figura 4.1 Las emisiones de los automóviles. [EPA, 2006]

Contaminantes y tóxicos del aire

A continuación se describirán las fuentes principales y los efectos a la salud humana ocasionados por las emisiones contaminantes que posteriormente serán analizados y cuantificados para la ZMVM cuando se utilizan diferentes combustibles.

Emisiones de contaminantes criterio

Los contaminantes criterio se identifican como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones realizadas con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Fueron publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EU) “Clean Air Acts”. Actualmente el término “contaminantes criterio” ha sido adoptado en muchos países, y son principalmente: óxidos de azufre (SO_x), de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃).

Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías y normas. Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido, estos valores límite son diseñados con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente. En este trabajo no se estiman las emisiones de plomo ni de ozono, porque las gasolinas actuales ya no contienen plomo y el ozono es un contaminante secundario producto de contaminantes criterio primarios, los cuales se describen a continuación.

Partículas (PM)

La materia particulada o PM es una mezcla de partículas extremadamente pequeñas y de líquidos. La contaminación por partículas proviene de una gran cantidad de fuentes como los nitratos, sulfatos, químicos orgánicos, metales, y partículas de polvo.

El tamaño de estas partículas está directamente ligado a su potencial para causar daños a la salud. Normalmente se presta atención a las partículas de 10 micras (PM₁₀) o menores ya que estas son las partículas que pueden pasar a través de la nariz y que pueden entrar a los pulmones. Una vez inhaladas, estas partículas pueden afectar el corazón y pulmones y pueden causar serios efectos en la salud, como los siguientes [Molina, 2002]:

- Irritación de las vías respiratorias, tos y dificultad para respirar
- Decrecimiento de la función pulmonar
- Agravamiento del asma
- Desarrollo de bronquitis crónica
- Irregularidades en el ritmo cardiaco

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono o CO, es un gas incoloro que se forma cuando algunos átomos de carbono en un combustible no se queman completamente. Es un componente presente en los escapes de los vehículos a motor. Las emisiones de CO generalmente se encuentran en áreas de alta congestión vehicular. Otras fuentes de CO incluyen procesos industriales (como el procesamiento de metales y manufactura de químicos); la quema de leña, los incendios forestales, etc.

El CO puede afectar negativamente en la salud principalmente en el sistema cardiovascular, el sistema nervioso central y el sistema respiratorio. Para una persona con padecimientos del corazón una exposición a bajos niveles de CO puede causar dolor de pecho y reducir su capacidad para hacer ejercicio. Una persona que respira altos niveles de CO puede desarrollar problemas de visión, reducir la capacidad de trabajar o aprender, reduce la destreza manual, y dificulta el desarrollar tareas complejas. La exposición a niveles extremadamente altos de CO puede envenenar y causar la muerte. Además, el CO es un precursor de ozono que contribuye a la formación de ozono troposférico, el cual puede ocasionar serios problemas respiratorios [Molina, 2002].

Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Se le llama óxidos de nitrógeno al término genérico de un grupo de gases altamente reactivos, los cuales contienen nitrógeno y oxígeno en cantidades variables. Muchos de los óxidos de nitrógeno son incoloros, sin embargo, los óxidos de nitrógeno junto con las partículas en el aire se pueden ver como una capa café sobre muchas áreas urbanas.

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando se quema combustible a altas temperaturas. Se disocia parte del nitrógeno contenido en el aire formando óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO₃) como productos gaseosos de la combustión. Las principales fuentes de NOx son los vehículos automotores, las centrales eléctricas, así como otras industrias y comercios que queman combustibles. De las todas las fuentes mencionadas, los vehículos automotores son los que contribuyen mayoritariamente.

Los NOx tienen varios efectos negativos en la salud y en el ambiente. En general los NOx son precursores del ozono troposférico, al igual que los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), reaccionan ante la presencia de la radiación solar, para formar ozono, que agrava los problemas respiratorios en niños y personas con padecimientos pulmonares como el asma. La gente que trabaja o se ejercita al aire libre son los más susceptibles a presentar efectos adversos como daño a los pulmones [Molina, 2002].

El óxido nitroso (N₂O), uno de los gases agrupados como NOx, es además un gas de efecto invernadero. Se acumula en la atmósfera junto con otros gases de efecto invernadero y causa el incremento gradual de la temperatura de la tierra.

En el aire, los NO_x reaccionan con químicos orgánicos comunes, o con el ozono, para formar una gran variedad de productos tóxicos, en donde algunos de ellos pueden causar mutaciones biológicas [EPA, 2007]

Dióxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es el contaminante con mayor participación en los gases llamados óxidos de azufre (SO_x). Estos gases se disuelven fácilmente en agua. El azufre está presente en algunas materias primas como el carbón y el petróleo. Los gases SO_x se forman cuando se queman combustibles con un contenido de azufre, como las gasolinas. El dióxido de azufre se disuelve en vapor de agua para formar lluvia ácida, e interactúa con otros gases y partículas en el aire para formar sulfatos y otros productos que pueden ser dañinos para la salud [INE, 2006].

El dióxido de azufre tiene efectos en el sistema respiratorio. Bajos niveles de SO₂ en el aire puede causar dificultad para respirar para gente con asma. Altos niveles de SO₂ y largos tiempos de exposición causa padecimientos respiratorios y agrava la existencia de fallas en el corazón. Además, si reacciona con otros químicos para formar sulfatos causa dificultades para respirar, y puede causar muerte prematura.

Por otra parte los NO_x y el dióxido de azufre pueden reaccionar con vapor de agua y otras sustancias en el aire para formar ácidos que caen a la tierra como lluvias, niebla, nieve y partículas secas. Esto provoca la llamada lluvia o deposición ácida que deteriora los autos, edificios, monumentos históricos, bosques, tierras y causa que muchos lagos y ríos se vuelvan ácidos impidiendo que las condiciones sean las adecuadas para la supervivencia de fauna acuática [EPA, 2007]

Hidrocarburos Totales (THC)

Los hidrocarburos son productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los hidrocarburos incluyen a hexano, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, y fluoreno, como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina.

Algunos de los compuestos de los hidrocarburos pueden producir gran cantidad de malestares como perjudicar al sistema nervioso, producir dolores de cabeza y mareo. Inclusive pueden causar una afección a los nervios llamada “neuropatía periferal,” que consiste en adormecimiento de los pies y las piernas. Otros compuestos pueden producir daños a la sangre, al sistema inmunitario, los pulmones, la piel y los ojos. Estudios en animales han demostrado daños a los pulmones, al sistema nervioso central, hígado y los riñones a causa de la exposición a compuestos de hidrocarburos. Inclusive se ha demostrado que ciertos compuestos pueden afectar la reproducción y el feto en animales [Granados, 2000].

Emisiones Tóxicas

Acetaldehído

El acetaldehído se forma durante la combustión incompleta de combustibles basados en hidrocarburos. Está presente como contaminante primario en las emisiones de escape de vehículos a gasolina y diesel. Los convertidores catalíticos han mostrado reducir el acetaldehído en proporciones similares a la reducción de hidrocarburos totales.

El acetaldehído (CH_3CHO) es un aldehído saturado de olor “sofocante” a altas concentraciones, pero de un olor “frutal agradable” a bajas concentraciones. Es incoloro, volátil y flamable a temperatura ambiente. La Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA) lo clasifica como *B2 Probable Cancerígeno Humano*, que es una clasificación de químicos de los que no se cuenta con documentación adecuada sobre los riesgos en humanos pero con suficiente evidencia en animales que sugiere la aparición de cáncer.

El acetaldehído es más ligero que el agua, pero su vapor es más pesado que el aire. Es soluble en agua, benceno, alcohol, éter, acetona. Es muy reactivo en la atmósfera, y es un componente mayor del smog fotoquímico.

El acetaldehído se forma frecuentemente a través de la oxidación de olefinas y parafinas como el propano (C_3H_8) y el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Puede también ser descompuesto mediante fotólisis donde los productos formados pueden reaccionar con óxidos de nitrógeno y generar formaldehídos. Su rango de permanencia en la atmósfera es de unas pocas horas durante los días claros de verano, y más de 60 horas en los días claros de invierno.

En Estados Unidos se han medido las concentraciones de acetaldehído en el aire en zonas urbanas y rurales. Las concentraciones son típicamente $3\mu\text{g}/\text{m}^3$, según la EPA las emisiones de las fuentes móviles representan un tercio de estas emisiones. [ANL, 2000].

Bajo ciertas condiciones los precursores de compuestos volátiles orgánicos pueden formar acetaldehído como contaminante secundario, sin embargo en este trabajo las emisiones estimadas usando MOBILE6-Mexico se enfocan en las emisiones primarias.

Formaldehído

El formaldehído (HCHO) es un gas incoloro con un olor “irritante”. El formaldehído ha sido clasificado por la EPA como *B1 Probable Cancerígeno Humano* pero de mayor toxicidad que el B2. Esta clasificación está reservada para los compuestos químicos de los que se tiene información limitada, basada en estudios epidemiológicos, entre la relación entre la sustancia y la incidencia de cáncer. La información limitada quiere decir que la evidencia está basada en estudios que se centran en una sola especie o que el diseño experimental no fue diseñado con las dosis adecuadas, exposiciones u otros factores.

El formaldehído es un contaminante primario y secundario, con concentraciones máximas de aproximadamente 0.6 partes por billón (ppb) durante las horas de luz del día. Su tiempo de residencia varía de unas pocas horas en los días de verano, y de 10 a 20 horas durante los días claros de invierno.

En las áreas urbanas la exposición a formaldehídos viene de las emisiones de los vehículos y de la fotooxidación de compuestos orgánicos. Las concentraciones de formaldehído en el aire ha sido medido en zonas urbanas y rurales con concentraciones típicamente menores a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas urbanas. Se estima que los vehículos automotores contribuyen con el 28% de las emisiones primarias, y con el 35% de las emisiones secundarias [ANL,2000].

El formaldehido proviene de una variedad de fuentes; siendo la más importante la combustión incompleta del combustible en los automotores. El formaldehído es un contaminante primario y secundario porque también se puede formar de la oxidación de muchos compuestos orgánicos. Las emisiones de formaldehídos pueden ser controladas usando convertidores catalíticos a eficiencia similares para los hidrocarburos totales.

Benceno

La mayor fuente de benceno son los vehículos automotores que representan casi el 50% de las emisiones totales. El benceno es un componente volátil de las gasolinas y otros combustibles y es emitido por vehículos tanto a través el escape, como por emisiones evaporativas. Dependiendo de la tecnología de control de emisiones y de las características del combustible, el benceno representa alrededor del 3 al 5 % de las emisiones de escape totales de gases orgánicos (TOG), y del 1% de las emisiones evaporativas para vehículos de gasolina. El benceno de escape esta formado por el benceno sin quemar y por el benceno formado durante la combustión de otros compuestos aromáticos y no-aromáticos que se encuentran en la gasolina. Hay datos que muestran que las emisiones de benceno de los vehículos automotores provienen principalmente de los vehículos a gasolina, los vehículos a diesel contribuyen con sólo el 3% del total de las emisiones de benceno por fuentes móviles. Otras fuentes del benceno son la combustión de biomasa, la producción de petróleo y gas, la refinación de petróleo y la distribución de gasolina [ANL,2000].

El benceno (C_6H_6) es un hidrocarburo aromático claro, sin color, de un olor un tanto dulce. Tiene baja solubilidad y es relativamente estable en la atmósfera, con tiempos de residencia de 2 a 6 días bajo condiciones de verano. Las concentraciones de benceno en el aire ambiente han sido medidas en Estados Unidos en varias áreas rurales y urbanas. Las concentraciones varían de menos de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero usualmente varía de 2 a $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas urbanas, donde la contribución de los vehículos automotores a las emisiones es de alrededor del 60% del total. En lugares como en estaciones de gasolina, las concentraciones de benceno llegan a los $259 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según mediciones de la EPA, sin embargo hay que considerar que estas son exposiciones de corto tiempo. Estudios recientes de la EPA indican que en vehículos automotores las exposiciones se aumentan de 0.5 a $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los ambientes urbanos, dependiendo de las poblaciones de vehículos y las formulaciones del combustible [ANL,2000].

Se ha encontrado que el benceno ha causado leucemia y cáncer en animales de laboratorio sujetos a exposiciones de largo tiempo. La EPA ha clasificado al benceno en el Grupo de Cancerígenos Humanos Conocidos en base a que se han realizado varios estudios epidemiológicos en humanos que se enfocan en una exposición ocupacional. Esta clasificación está reservada a los contaminantes para los cuales se tiene suficiente evidencia que marca una relación causal entre la sustancia y la incidencia de cáncer.

1,3-Butadieno

La mayor fuente de 1,3-butadieno es la combustión incompleta de combustible en los vehículos automotores. El butadieno es principalmente emitido por los escapes de los vehículos, y debido a las bajas concentraciones de butadieno en los combustibles convencionales, las emisiones evaporativas de 1,3-butadieno de los vehículos son despreciables [ANL, 2000].

El butadieno (C_4H_6) es un hidrocarburo aromático incoloro y flamable. El butadieno está estructuralmente relacionado a cancerígenos conocidos, y al igual que el acetaldehído ha sido clasificado por la EPA como *B2 Probable Cancerígeno Humano*. El butadieno tiene una muy alta tasa de reactividad en la atmósfera, y de aquí un tiempo corto de vida en ella, menos de una hora durante los días de verano.

La oxidación del 1,3-butadieno puede formar formaldehído y acroleína, las cuales también son dos sustancias tóxicas. El formaldehído formado a partir de la oxidación del 1,3-butadieno no representa una porción significativa de la porción total de formaldehído en la atmósfera, aunque este no es el caso de la acroleína en la cual el 1,3-butadieno es su mayor precursor.

No existen suficientes datos sobre los efectos del butadieno en humanos, pero suficientes estudios en animales sugieren que el 1,3-butadieno es un cancerígeno humano. Estudios en ratas expuestas a concentraciones de 1,3-butadieno desarrollaron múltiples tipos de tumores.

La contaminación por vehículos en la ZMVM

Los vehículos automotores generan una gran parte de los contaminantes presentes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), como se puede apreciar en la figura 4.2.

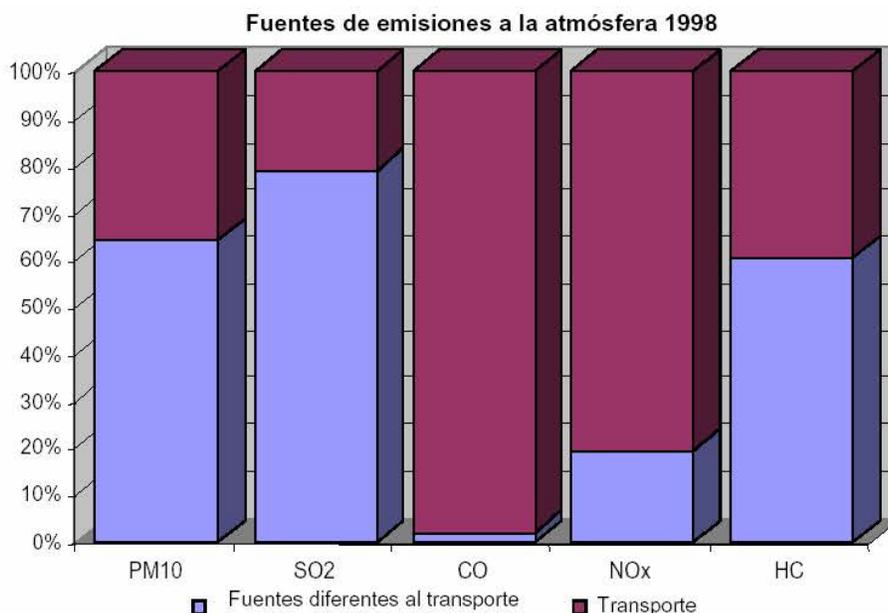


Figura 4.2 Emisiones de contaminantes criterio a la atmósfera debidas al transporte automotor en la ZMVM [Sánchez, 2004].

Según datos arrojados por el inventario de emisiones de la ZMVM para el año 2002 las emisiones que más se generaron en la ZMVM las emitieron las fuentes móviles y de éstas, los autos particulares (de los cuales más del 99% son de gasolina) generan el 42% del CO, el 28% de los NOx, el 30% de SO2 y el 16% de COV, otra emisión importante la tienen los vehículos menores a tres toneladas con casi el 17% de CO, los tractocamiones también son de mencionarse ya que aportarán el 29% de las PM2.5 y 13% de NOx. En total las fuentes móviles generarán el 58% del SO2, el 19% de partículas PM10, el 52.3% de partículas PM2.5, el 99.3% de las fuentes de CO, y el 84% de NOx.

De acuerdo a un estudio del Gobierno del Distrito Federal las emisiones de CO₂ equivalente para el año 2002 para el sector transporte en la ZMVM ascendieron a 20,159,043 toneladas, lo que las ubicaría entre el 40 y el 46% de las emisiones totales [GDF, 2006].

Los daños a la salud por ocurrencias agudas de contaminación están documentados. Las contingencias ambientales en la Ciudad de México provocan un aumento súbito de la morbilidad por neumonías y asma, principalmente en ancianos, niños y gente con padecimientos pulmonares y cardíacos [Ponciano, 1996]. Los daños por la exposición crónica ocasionan irritación de las mucosas del aparato respiratorio. Se habla de un aumento en la sinusitis, tanto en su frecuencia como en la persistencia y la gravedad de la enfermedad. Así mismo se reportan aumentos en las exacerbaciones en los asmáticos, en la bronquitis crónica, y en los enfermos de efisema. Existen además evidencias en el aumento de los casos de cáncer de pulmón por el aumento de la contaminación [Ponciano, 1996].

Una vez descritas las emisiones contaminantes criterio, las tóxicas y las de gases de efecto invernadero, en la siguiente sección se utilizará el modelo MOBILE6-México para calcular

los factores de emisión de la mezcla de gasolina utilizada actualmente (MTBE5) y de los combustibles alternativos E10 y ETBE15, con el fin de determinar la cantidad de emisiones atmosféricas que involucraría la introducción del etanol como aditivo oxigenante en la gasolina. La ZMVM fue la zona de estudio seleccionada para ejemplificar las emisiones del parque automovilístico (el cual constituye el 18.3% del parque total del país) [IMT, 2004], debido a la disponibilidad de información adecuada, se tienen inventarios de varios años del parque vehicular y a la importancia que tiene el mejorar la calidad del aire en la principal concentración urbana del país.

Los Factores de Emisión y el modelo Mobile6-México

Factores de Emisión

Un factor de emisión es un valor promedio de la relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera por una unidad de actividad. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo general, los primeros se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materiales. Por otro lado, los factores de emisión basados en censos se usan generalmente para estimar emisiones de fuentes de área.

Factores de Emisión de Fuentes Móviles

Las emisiones de vehículos automotores o fuentes móviles se calculan utilizando los factores de emisión en relación con los kilómetros recorridos por cada vehículo. En lugar de ser simples factores de emisión que pudieran encontrarse en una publicación, los factores de emisión de los vehículos automotores se obtienen a partir de modelos. Esto es debido a que las emisiones de los vehículos automotores son más complejas y dinámicas que la mayoría de los otros tipos de fuentes. Por ejemplo, los cambios en las características del combustible, las velocidades de operación del vehículo, la tecnología para el control de emisiones, la temperatura ambiente y la altitud sobre el nivel del mar pueden afectar los factores de emisión. Para incorporar éstos y otros factores, generalmente se utiliza un modelo de factor de emisión que incluye los efectos de varios parámetros.

Las unidades de los factores de emisión se encuentran comúnmente relacionadas a la masa del contaminante por unidad de actividad, normalmente gramos/milla o gramos/kilómetro. Éstas son las unidades en que se encuentran expresadas las normas que limitan las emisiones de los vehículos.

El Modelo MOBILE6

Uno de los modelos más utilizados en Norteamérica para calcular factores de emisión del transporte automotor es el MOBILE6. La primera generación del modelo MOBILE fue

creada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) a mediados de los años 70 y desde entonces ha sufrido numerosas actualizaciones y revisiones para incorporar los cambios de la legislación ambiental y los avances tecnológicos. Las versiones actualizadas también incluyen grandes cantidades de datos de emisiones recientemente recopilados, para estimar las emisiones de los vehículos automotores con mayor precisión. La versión más reciente del modelo MOBILE es MOBILE6 que fue emitido en el año 2000.

MOBILE6 es un programa de aplicación que provee estimaciones de emisiones actuales y futuras de automóviles que circulan en calles y carreteras. No incluye las fuentes móviles que no circulan por carreteras como vehículos diseñados para ser utilizados fuera de caminos públicos (palas mecánicas, grúas y equipo de construcción), así como otras fuentes de emisión móviles (generadores eléctricos portátiles). Las estimaciones de emisiones se logran calculando factores promedio de emisión para las flotas de vehículos de una ciudad o región determinada.

MOBILE6 está escrito en FORTRAN y compilado para su uso en computadoras de escritorio, el modelo calcula tasas de emisión para diferentes tipos de vehículos bajo varias condiciones que afectan los niveles de emisión (temperatura ambiente, velocidades promedio, etc) que son especificadas por el usuario.

El modelo MOBILE6 genera factores de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), para vehículos automotores alimentados con gasolina, mezclas gasolina-MTBE, gasolina-etanol, gasolina-ETBE y diesel que circulan por carreteras. Los factores de emisión para hidrocarburos pueden ser expresados como hidrocarburos totales (HCT), hidrocarburos no metánicos (HCNM), compuestos orgánicos volátiles (COV), gases orgánicos totales (GOT), o gases orgánicos no metánicos (GONM). También genera factores de emisión para PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, y para los tóxicos Benceno, 1,3 Butadieno, Acetaldehído, Formaldehído y MTBE.

El modelo MOBILE6-México

La estructura básica del modelo MOBILE6-México está basado en MOBILE6, pero fue expandido y modificado para permitir la adaptación a las condiciones locales en México. Las modificaciones a MOBILE6 fueron realizadas por Radian Internacional con dinero del gobierno mexicano.

Debido a que el modelo MOBILE se basa en pruebas de emisión de vehículos estadounidenses, no sería extraño que su uso directo en regiones fuera de EUA genere resultados inciertos. Para tomar en cuenta las posibles diferencias en el parque vehicular y los hábitos para conducir en México, el modelo MOBILE fue modificado originalmente para las áreas metropolitanas de las ciudades de México, Monterrey y Ciudad Juárez (los modelos MOBILE-MCMA, MOBILE-MMAp y MOBILE-Juárez respectivamente). Posteriormente se concluyó que las características del parque vehicular y los hábitos para conducir eran prácticamente los mismos para todo el territorio Mexicano por lo que a la siguiente versión de MOBILE solamente se liberó la versión MOBILE6-México, que es el

aplicado para cualquier ciudad del territorio nacional. El Modelo MOBILE6-México utiliza una matriz de equivalencia para la tecnología de control que identifica los factores de emisión básicos de MOBILE para los vehículos del parque vehicular mexicano con base en la edad del vehículo y sus controles de emisión. Las ecuaciones utilizadas en el cálculo de factores de emisión se presentan en el ANEXO B.

Dentro de las limitaciones del modelo se encuentra que sólo es apropiado para vehículos automotores a gasolina, gasolina-etanol, gasolina-ETBE, gasolina-MTBE y diesel. Además, como cualquier otro modelo de computadora, la precisión depende de la de los datos de entrada. También cabe resaltar que las tasas básicas de emisión del modelo están basadas en un relativamente pequeño grupo de resultados de pruebas de emisión (menos de 1000 vehículos). En particular, las pruebas de emisiones fueron conducidas en grandes áreas metropolitanas, por tanto las futuras actualizaciones deben considerar pruebas de conducción en áreas rurales. Finalmente, como una recomendación de Radian International está la realización de estudios de tasas de penetración de tecnologías de control de emisiones en la flota vehicular Mexicana. Por ejemplo, ¿qué tan rápidamente serán adoptadas en México las tecnologías desarrolladas para cumplir con los nuevos estándares ambientales en Estados Unidos? La tasa actual de adopción asumida por el modelo esta basada principalmente por evidencia empírica y por observaciones oficiales de Estados Unidos y México.

A pesar de sus limitaciones, MOBILE6-México provee el modelo mas preciso disponible actualmente para calcular factores de emisión de la flota de vehículos automotores en México. El modelo incorpora pruebas de emisión, kilometraje acumulado, y datos de comportamiento de manejo en la Ciudad de México, Ciudad Juárez, Mexicali y Aguascalientes.

Efectos de las características locales-regionales en el modelo Mobile6 México

Existen factores de ajuste que son ampliamente utilizados en los modelos de factores de emisión para corregir las condiciones de operación particulares, que son el resultado de diversas características específicas del área. Algunas de las características regionales que pueden afectar las emisiones de los vehículos automotores incluyen las características físicas (temperatura o altitud), características del combustible, y programas de verificación. En la figura 4.3 se muestran los de manera esquemática los datos de entrada al modelo MOBILE6-México, así como los Factores de Emisión como la salida que entrega el sistema.

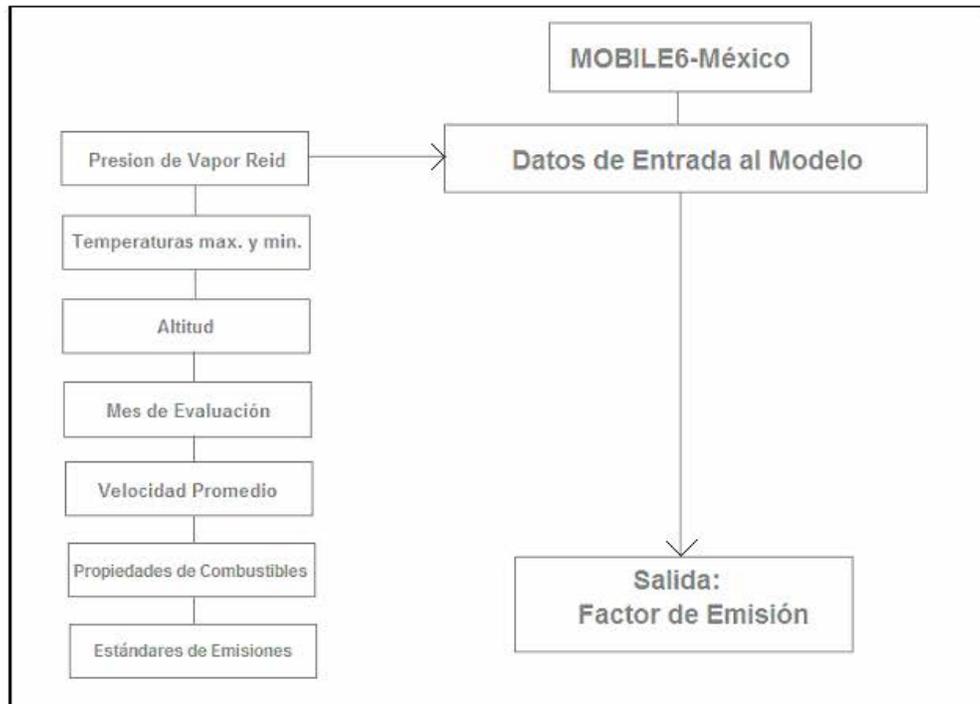


Figura 4.3 Parámetros de entrada al sistema y salida entregada por MOBILE6-México

Parámetros Requeridos

A continuación se describen los parámetros requeridos por el modelo MOBILE6-México para proporcionar valores de factores de emisión.

Temperatura

Algunas emisiones de los vehículos automotores (como el CO y NO_x) tienen una gran dependencia de la temperatura ambiente. La temperatura de operación estándar utilizada en la determinación de las tasas básicas de emisión del MOBILE es de 24°C (75°F); por lo tanto, el modelado de emisiones a cualquier otra temperatura requiere el uso de factores de ajuste para este parámetro. En el modelo MOBILE, estos factores de ajuste son determinados en la sección de corrida del programa, aquí se registra la temperatura diaria mínima y máxima. Dependiendo del valor elegido, los factores de ajuste para las emisiones de escape, emisiones evaporativas del motor recién apagado y las emisiones en reposo y en operación serán calculadas utilizando la temperatura mínima y máxima diaria, o la temperatura ambiente. Se recomienda que siempre que sea posible se utilice la opción de la temperatura mínima y máxima diaria. En algunos inventarios, las emisiones estacionales de fuentes móviles son deseables. En estos casos, debe realizarse una corrida del MOBILE para cada estación (primavera, verano, otoño e invierno), utilizando la temperatura mínima y máxima diaria promedio para cada una. Los valores utilizados en MOBILE6-México para la ZMVM se presentarán más adelante.

Altitud

La altitud sobre el nivel del mar tiene un efecto significativo sobre las emisiones de los vehículos automotores. Conforme la altitud se incrementa, la densidad del aire ambiente disminuye. El resultado de esta disminución en la densidad del aire es que los vehículos afinados para funcionar en una relación aire-combustible estequiométrica, tienden a funcionar con una relación más rica en combustible. Esta desviación resultará en mayores emisiones de hidrocarburos contaminantes. Además, la altitud también puede afectar la eficiencia mecánica de los vehículos que, a su vez, pueden modificar la cantidad de las emisiones. Este efecto debe ser muy cuidado al momento de hacer los cálculos para una región alta como la Zona Metropolitana del Valle de México.

El modelo MOBILE6-México utiliza un conjunto de Tasas Básicas de Emisión para áreas de baja altitud (representando las condiciones aproximadamente a 150 metros sobre el nivel medio del mar), y otro conjunto de Tasas Básicas de Emisión para áreas de altitud elevada (representando las condiciones aproximadamente a 1,700 metros sobre el nivel medio del mar). Los factores de emisión promedio del parque vehicular para GOT y CO en altitudes elevadas son entre 15 y 20% mayores que en altitudes bajas, mientras que los de NO_x disminuyen ligeramente.

Propiedades del Combustible

Las emisiones los vehículos automotores son el resultado final de la combustión de la gasolina, por lo tanto las características del combustible pueden afectar de manera significativa la cantidad de contaminantes emitidos.

PVR (Presión de Vapor Reid)

Una de las características de los combustibles es la volatilidad. Para el modelo MOBILE, la volatilidad del combustible se expresa como Presión de Vapor de Reid (o PVR). Las especificaciones del combustible actual requieren una PVR de combustible de 6.5 a 7.9 PSI en la Zona Metropolitana del Valle de México, y de 6.5 a 9.5 PSI en el resto del país. En general, una volatilidad reducida (o valores de PVR bajos) ocasionará menores emisiones evaporativas. Los valores utilizados para cada combustible analizado se presentarán más adelante.

Cantidad de Oxígeno

La oxigenación de los combustibles (ya sea mezclas de gasolina y alcohol, o de gasolina y éter) es otra característica que puede afectar la cantidad de contaminantes emitidos por los vehículos automotores. Los combustibles oxigenados son introducidos para reducir las emisiones de CO. El mayor contenido de oxígeno en los combustibles oxigenados mejora la eficiencia de la combustión, reduciendo así las emisiones de CO. Se debe definir en MOBILE la participación de mercado y el contenido de oxígeno en las mezclas de combustible con alcohol y éter. Además se pueden simular reformulaciones de la gasolina al cambiar el contenido de Benceno, aromáticos y puntos de destilación.

Características del parque vehicular

Con objeto de utilizar un modelo para estimar factores de emisión, es necesario estimar las características del recorrido de cada tipo de vehículo, entre las que podemos encontrar:

- **Velocidad del vehículo.**- Debe determinarse la velocidad promedio del vehículo por clase vehicular, debido a que este parámetro afecta los factores de emisión.
- **Distribuciones del registro por clase vehicular.**- Las distribuciones del registro permiten conocer la fracción de vehículos de un modelo y año particular con relación a la población general de clases vehiculares. Existe cierto grado de incertidumbre debido a que la población vehicular está compuesta tanto por vehículos registrados como por no registrados, mientras que cualquier distribución del registro, por definición, sólo incluirá a los vehículos registrados. Estos datos deben ser segregados por clase vehicular para asignar los factores de emisión adecuados.
- **Acumulación de kilometraje y distribución del registro (fracción del total de vehículos registrados) para cada modelo y año en una clase vehicular.**- Estas se utilizan para determinar la fracción del recorrido de cada modelo y año dentro de una clase vehicular.

Las distribuciones de registro y las acumulaciones de kilometraje para cada vehículo fueron calculados al hacer la conversión de MOBILE6 a MOBILE6-México por Radian International, y se incluyeron como una base de datos. Las velocidades promedio se introducen como parte de los datos de entrada al sistema.

Tipos de vehículos en México

El gran número de vehículos en una región hace que la medición de las emisiones de cada vehículo individual sea impráctica. En consecuencia, la metodología para el inventario de vehículos automotores se basa en distribuir a los vehículos en categorías con características de emisión similares y, posteriormente, tratar de cuantificar las emisiones para cada grupo. Las variables clave que se utilizan en esta clasificación inicial de los vehículos son el tipo de vehículo (automóvil, camión, autobús, etc.), el tipo de combustible (gasolina, diesel, combustibles licuados, etc.), el peso bruto vehicular (PBV), y el nivel de la tecnología de control de emisiones del vehículo. El PBV es el peso del vehículo cuando transporta la carga máxima permitida por el fabricante con el tanque de combustible lleno. En la tabla 4.3 se muestra la clasificación de vehículos a gasolina para la ZMVM.

Clasificación de Vehículos a Gasolina en la ZMVM			
	Tipo de Vehículo	Número de Vehículos	Participación (%)
LDGV	Autos Particulares	2,707,418	79.144
	Taxis	115,972	3.390
	Total	2,823,390	82.534
LDGT1	Combis	19,485	0.570
	Pick Up	173,422	5.070
	Total	192,907	5.639
LDGT2	Microbuses	24,087	0.704
	Total	24,087	0.704
HDGV	Vehículos = 3 Ton	243,809	7.127
	Tractocamiones	100	0.003
	Autobuses	247	0.007
	Vehículo > 3 Ton	41,910	1.225
	Total	286,066	8.362
MC	Motocicletas	94,437	2.761
	Total	94,437	2.761
	Total Vehículos	3,420,887	100.000

Tabla 4.3 Clasificación de Vehículos a Gasolina en la ZMVM [SMA, 2003]

Las emisiones de los diferentes vehículos automotores pueden variar en múltiples órdenes de magnitud, dependiendo de numerosos factores. En particular, el nivel de la tecnología de control de emisiones en un vehículo ejerce una influencia significativa sobre la magnitud de las emisiones, y es determinado por las normas de emisión aplicables al vehículo. Los vehículos nuevos que cumplen con los mismos estándares tenderán a generar emisiones similares en el uso real con respecto a los vehículos producidos anteriores para cumplir estándares diferentes más antiguos. Cuando se estiman los factores de emisión de los vehículos, éstos son agrupados con base en los estándares de emisión que aplican a los vehículos cuando fueron fabricados. Los modelos modificados para la Ciudad de México (MOBILE-MCMA) y Monterrey (MOBILE-MMAp) utilizan una matriz de equivalencia para la tecnología de control que identifica los factores de emisión básicos de MOBILE para los vehículos del parque vehicular mexicano con base en la edad del vehículo y sus controles de emisión. La Tabla 4.4 presenta un ejemplo de la matriz de equivalencia de tecnología para los factores de emisión del escape y evaporativas. Se observa que en 1971 la diferencia entre normas vigentes en EUA y México era de 3 años máximo, mientras que en 2001 la diferencia entre normas era de 4 años mínimo y 11 años máximo, lo que muestra un mayor desfasamiento.

Año Modelo Mexicano	Modelo Año Equivalente en EUA				
	LDGV	LDGV1	LDGV2	HDGV	MC
1971	1968	1968	1968	1968	1971
1972	1968	1968	1968	1968	1971
1973	1971	1971	1971	1971	1971
1974	1971	1971	1971	1971	1971
1975	1971	1971	1971	1971	1971
1976	1971	1971	1971	1971	1971
1977	1971	1971	1971	1971	1971
1978	1971	1971	1971	1971	1971
1979	1971	1971	1971	1971	1971
1980	1971	1971	1971	1971	1971
1981	1972	1972	1972	1972	1972
1982	1972	1972	1972	1972	1972
1983	1972	1972	1972	1972	1972
1984	1972	1972	1972	1972	1972
1985	1972	1972	1972	1972	1972
1986	1972	1972	1972	1972	1972
1987	1972	1972	1972	1972	1972
1988	1975	1974	1974	1974	1974
1989	1975	1974	1974	1974	1974
1990	1980	1974	1974	1974	1974
1991	1980	1974	1974	1974	1974
1992	1981	1974	1974	1974	1974
1993	1988	1977	1977	1977	1977
1994	1988	1981	1981	1981	1981
1995	1989	1981	1981	1981	1981
1996	1990	1981	1981	1981	1981
1997	1990	1981	1981	1981	1981
1998	1994	1985	1985	1985	1985
1999	1995	1985	1985	1985	1985
2000	1996	1985	1985	1985	1985
2001	1997	1993	1993	1990	1993

LDGV: Autos particulares, Taxis. LDGT1:Combis, Pick ups. LDGT2:Microbuses. HDGV: Vehículos de 3 toneladas en adelante (en peso), Tractocamiones, Autobuses.

Tabla 4.4 Matriz de equivalencia de la Tecnología de Control de Emisiones Típica. [Radian Internacional, 1997].

Las normas de calidad del aire

En México existen normas de calidad del aire expedidas por la Secretaría de Salud que establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera, los cuales se pueden comparar con normas internacionales orientadas a proteger la salud de la población. De igual forma existen normas oficiales mexicanas que regulan la emisión de contaminantes a la atmósfera por diversas fuentes, y otras que regulan la calidad de los combustibles. La norma NOM-042-SEMARNAT-2003 incorpora requerimientos

equivalentes a la norma TIER1 (descrita posteriormente) y durabilidad a 80 mil kilómetros para los vehículos que se comercializan en la actualidad. Esta norma también incorpora límites equivalentes a TIER2, con durabilidad de 194 mil kilómetros y un calendario de introducción para vehículos nuevos a partir del año 2006. En el caso de los límites que establece la TIER2, la disposición está sujeta a la disponibilidad de gasolina con un contenido promedio de azufre de 30 partes por millón y 80 ppm como máximo.

La norma TIER1 regula las emisiones para vehículos ligeros que circulan en Estados Unidos, y estuvieron vigentes de 1997 a 2004, esta norma se sustituyó posteriormente por la TIER2.

Los estándares TIER2 regulan las emisiones para vehículos ligeros que circulan en Estados Unidos y están vigentes a partir del 2004. Este programa fue diseñado para reducir las emisiones de los contaminantes primarios responsables de la formación de ozono (partículas, NOx e hidrocarburos). El programa aplica los mismos estándares de emisión para autos particulares, y camionetas de carga ligera y media.

El estándar TIER2 reducirá las emisiones de NOx de los vehículos nuevos a un promedio de 0.07 gramos por milla. Para los vehículos particulares nuevos la norma entró en vigor a principios del 2004 y se espera que se cumpla en su totalidad para el 2007, mientras que para las camionetas de carga ligera y media el programa debe alcanzar el cumplimiento completo para el 2009. Durante el periodo 2004-2007 todos los autos particulares que no se certifiquen con la TIER2 tendrán que cumplir con un objetivo intermedio de 0.30g/milla de NOx, La TIER2 incluye también normas más severas sobre las emisiones de Partículas [EPA, 1999].

El estándar TIER2 requiere además que la gasolina y el diesel que usan los vehículos contenga bajos niveles de azufre, ya que el azufre degrada rápidamente los catalizadores que se emplean para el cumplimiento de la norma [EPA, 1999].

En México se publicó la norma NOM-042-SEMARNAT el 7 de septiembre de 2005 [DOF, 2005] (Ver tabla 4.5) en la que se establece que los límites de emisión para vehículos automotores nuevos que corresponden al nivel más estricto de control (TIER2) y que se podrán aplicar cuando se garantice la disponibilidad en el país de combustibles de bajo azufre en todo el territorio nacional. Las especificaciones consideradas en esta norma permitirán el incorporar mejores tecnologías de control de emisiones vehiculares disponibles a nivel mundial. Para lograrlo es necesario que PEMEX comercialice combustibles con los estándares internacionales en cuanto a contenido de azufre, y también que la industria automotriz comercialice en el país vehículos con los estándares de calidad mundial en los equipos de control de emisiones.

La norma que regula en México la calidad de los combustibles es la NOM-086-ECOL-1994, la cual establece las especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles. Esta norma es muy importante para el establecimiento de niveles permisibles de emisiones vehiculares por la relación entre las especificaciones de los combustibles y las tecnologías para el control de emisiones contaminantes.

**Estandar de durabilidad de 80 mil km
(gramos/kilometro)**

Estrato	HCNM	CO	NOx
10B (1)	0.099	2.735	0.249
10A (2)	0.078	2.113	0.249
9B (1)	0.087	2.113	0.124
9A (2)	0.046	2.113	0.124
8B (1)	0.078	2.113	0.087
8A (2)	0.062	2.113	0.087
7	0.047	2.113	0.068
6	0.047	2.113	0.049
5	0.047	2.113	0.031

(1) Valores aplicables a los vehículos LDGT2 hasta el 2010.

(2) Valores aplicables a los vehículos LDGV y LDGT1 hasta el 2008.

Tabla 4.5 Límites máximos permisibles de emisión para vehículos que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel (2006 y posteriores) [NOM-42-SEMARNAT, 2003]

En Estados Unidos para hacer posibles las reducciones de emisiones requeridas por los nuevos estándares (TIER2), se reducirá gradualmente el contenido promedio de azufre de los niveles actuales de 120 ppm a 30 ppm para gasolina y a 15 ppm para diesel a partir del año 2006. La adopción de estas nuevas tecnologías en México es inevitable ya que cerca del 75% de los vehículos producidos están destinados a la exportación, alrededor del 52% de los vehículos en el mercado nacional son importados y a partir del primero de enero del 2004 se desgravó en su totalidad la importación de vehículos nuevos provenientes de Estados Unidos. Véase Tabla 4.6.

El Instituto Nacional de Ecología, la SEMARNAT, y PEMEX refinación llevaron a cabo el “Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles” para investigar los costos y beneficios de la reducción de azufre en gasolinas y diesel. El calendario considerado en ese estudio corresponde al que se acordó tras la consulta pública del Proyecto de modificación de la NOM-086. El calendario se presenta en la figura 4.4.

Tecnología	Contaminantes	Niveles de azufre	Beneficios	Aplicaciones
Catalizador de tres vías	NOx, HC y CO	Menos de 50ppm	Reducciones desde 18% en –HC y CO y 9% en NOx con 50 ppm de azufre	Vehículos existentes
Catalizadores de tres vías avanzados	NOx, HC y CO	Menos de 30 ppm	Beneficios incrementales en términos de emisiones, durabilidad y rendimiento	Vehículos nuevos y en proyecto
Trampa de NOx	NOx	Menos de 15 ppm	Reducción de 90-95% de NOx de emisiones no controladas	Vehículos que requerirán cumplir con objetivos de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Tabla 4.6 Tecnologías de control de emisiones [INE, 2006].

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Premium	500 Max.									
		250 Prom. / 300 Max.								
						30 Prom. / 80 Max.				
Magna ZM		500 Max. (Prom. 2004 = 421)								
								30 Prom. / 80 Max.		
Magna RP		1000 Max. (Prom. 2004 = 737)								
								30 Prom. / 80 Max.		

Figura 4.4 Calendario de introducción de gasolinas con bajo contenido de azufre en la México. Donde ZM=Zona Metropolitana, RP=Resto del País [INE, 2006].

En el presente trabajo se asume que en el año 2010 ya existirán los combustibles de bajo azufre para el sector transporte, y que los autos nuevos cuentan con la última tecnología para el control de emisiones. De esta forma está descrito en Mobile6-México, ya que se considera que para ese año las tecnologías de control de emisiones serán las mismas para vehículos nuevos de ambos países.

Cálculo de Factores de Emisión de Vehículos en la ZMVM usando MOBILE6-México

En esta sección del trabajo se calcularon los factores de emisión de los vehículos a gasolina, que circulan en la ZMVM. Como el modelo MOBILE6-México incluye la matriz de mejora tecnológica esperada, se calculan factores de emisión para los años 2002 y 2030. Se tomó el año 2002 como base debido a que es el año del inventario de emisiones más reciente. Se calculan los factores de emisión para los siguientes contaminantes: Hidrocarburos Totales (THC), NO_x, CO, PM10, SO₂, y para los tóxicos: Benceno, Formaldehído, Acetaldehído y 1,3 Butadieno. Estas emisiones fueron calculadas para los combustibles MTBE5 (5% MTBE y 95% gasolina en porcentajes de volumen), E10 (10% etanol anhidro y 90% gasolina), y ETBE15 (15% ETBE y 85% gasolina), con una penetración en el mercado del 100% para cada tecnología, es decir, en el primer caso que todos los autos a gasolina en la ZMVM usaban MTBE5 como combustible, posteriormente que todos los autos usaban E10 como combustible, y al final el mismo caso pero usando ETBE15. Se consideraron estos combustibles porque el MTBE5 es el combustible que se usa actualmente en la ZMVM [Schifter, 2001], el E10 porque existe una propuesta de ley de aprovechamiento de los biocombustibles, que propone la oxigenación de las gasolinas que se usan en México con un 10% del volumen de etanol anhidro, y finalmente el ETBE15 porque es otra forma de introducir etanol en las gasolinas que actualmente es utilizado en Europa. En este trabajo no se calculan los factores de emisión para el uso de etanol como combustible puro E100 (100% del volumen de combustible es etanol) y como E85 (85% del volumen de etanol y 15% del volumen gasolina) debido a que el alcance de este trabajo de limita al estudio del

etanol como un oxigenante de las gasolinas. Los factores de emisión de las mezclas E85 y E100 presentarían ventajas ambientales al eliminar definitivamente el azufre en el caso del E100 y eliminar el 85% de este azufre en el caso del E85. De igual forma disminuiría el contenido de benceno en el combustible por lo que los factores de emisión de este contaminante serían menores.

A continuación se presentan las características de la región de estudio, las propiedades de los combustibles para los cuales se calcularon los factores de emisión, y finalmente los factores de emisión resultantes.

Características de la ZMVM [SMA, 2003]

La Zona Metropolitana de Valle de México (ZMVM) en el año 2002, abarcaba alrededor de 3,500 km² de área, incluye las 16 delegaciones del Distrito Federal (1,486 km²) y 18 municipios conurbados del Estado de México (2,054 km²).

La ZMVM se encuentra en la región central de la República Mexicana, a una altura de 2,240 msnm; forma parte de una cuenca semicerrada de 9,560 km² de superficie. También se encuentra rodeada por una cadena montañosa formada por las sierras del Ajusco, Chichinautzin, Nevada, Las Cruces, Guadalupe y Santa Catarina, esta cadena montañosa alcanza su nivel más alto hacia el sur, con 3,952 msnm, mientras que en el norte la altura máxima es de 3,000 msnm.; debido a esta altura, el contenido de oxígeno del aire de la ZMVM es aproximadamente 23% menor que al nivel del mar, lo que contribuye a que los sistemas de combustión sean menos eficientes y emitan una mayor cantidad de contaminantes. Por otro lado, la cadena montañosa que la rodea impide una adecuada dispersión de contaminantes, lo que propicia su acumulación.

Su latitud es de 19° N, lo que hace que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos, así mismo, su ubicación en el centro del país permite que a lo largo del año resulte afectada por sistemas anticiclónicos, lo que provoca viento débil en superficie y cielo despejado, a causa de la estabilidad atmosférica, con la consecuente dificultad para la dispersión de contaminantes.

En lo que respecta a las temperaturas, normalmente en el Valle de México, la temperatura máxima, mínima y promedio mensual tienden a presentar un patrón estacional como reflejo de acuerdo con la época del año. De esta manera, los valores más bajos se registran en la época seca-fría y los más altos en la seca-caliente, en consecuencia los valores moderados se presentan en la época de lluvias, cuando la formación de nubosidad es significativamente mayor y la insolación es interceptada por esta.

Los meses más lluviosos son de junio a octubre, y se asocia a la entrada de aire tropical, con alto contenido de humedad procedente del Océano Pacífico, Mar Caribe y Golfo de México, se presenta un periodo de descenso de lluvias en agosto conocido como canícula. El aumento de la precipitación pluvial propicia una disminución en los índices de calidad del aire de la zona por efecto de “lavado troposférico”.

En la tabla 4.7 se presentan las características de la ZMVM ingresadas a MOBILE6-México para el cálculo de los factores de emisión. Cabe señalar que estas características de altitud y temperaturas promedio fueron comunes en todas las corridas del modelo. Los cambios sustanciales en los datos de entrada se debieron a los cambios en las propiedades de los combustibles considerados.

Características de la ZMVM que se ingresaron a MOBILE6-México	
Temperatura Máxima	26°C
Temperatura Mínima	12°C
Altitud	2 (mayor a 1700 msnm.)
Mes de evaluación	Julio

Tabla 4.7 Características Generales de la ZMVM ingresadas al modelo MOBILE6-México [SMA, 2003].

En lo referente al parque vehicular de la ZMVM se tiene que del Inventario de Emisiones de la ZMVM se obtuvieron los datos de la tabla 4.8

Número de vehículos por tipo de combustible				
Gasolina	Diesel	GLP	GNC	Total
(95.334%)	(3.76%)	(0.84%)	(0.066%)	(100%)
3,420,887	134,825	30,198	2,380	3,588,290

Tabla 4.8 Número de vehículos por tipo de combustible [SMA, 2003].

Combustibles y sus Propiedades para el cálculo de factores de emisión usando MOBILE6-México

El éter metil-terbutílico (MTBE) es un líquido inflamable de olor característico desagradable. Se fabrica en las refinerías combinando sustancias químicas como isobuteno y metanol, se ha usado desde los 1980s como aditivo para lograr mejor combustión de la gasolina. Sin embargo, el MTBE se ha convertido en uno de los contaminantes más frecuentemente encontrados en las aguas subterráneas [Malsa, 2006]; beber o respirar MTBE puede causar náusea, irritación a la nariz, garganta y efectos sobre el sistema nervioso. Se ha encontrado MTBE en por lo menos 11 de los 1,430 sitios de la Lista de Prioridades Nacionales identificados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos [EPA, 1993]. En este caso el MTBE5 es el combustible resultante de la mezcla de un 95% de gasolina, con un 5% de MTBE en proporción volumétrica.

El éter etil-terbutílico (ETBE) es un oxigenante que se mezcla con la gasolina y que ofrece un alto octanaje. El ETBE se produce a través de la reacción química de un 48% de etanol y un 52% de isobuteno (derivado de la destilación del petróleo) en presencia de calor y un catalizador. El ETBE tiene como ventaja que elimina algunos de los impedimentos históricos para aumentar el uso de etanol, como su incremento en la volatilidad y su

incompatibilidad con los ductos de gasolina. Esto permite que el ETBE pueda ser manufacturado a nivel refinería donde ahí mismo puede ser mezclado con gasolina para pasar a las distribuidoras posteriormente. Francia es uno de los países que usa etanol obtenido de la remolacha en forma de ETBE mezclado con gasolina [Malsa, 2006]. El ETBE15 es el resultado de la mezcla de 85% de gasolina con un 15% de ETBE en proporción volumétrica. En las refinerías de México se puede producir ETBE en lugar de MTBE. Lo que se tendría que hacer básicamente consiste en cambiar las condiciones del proceso y no serían necesarias modificaciones a las terminales de almacenamiento y distribución de gasolina.

El E10 es el combustible resultante de la mezcla de 90% gasolina con 10% de etanol anhidro (descrito en el capítulo 1) en proporción volumétrica. Para lograr la mezcla de gasolina con etanol se requerirían ciertos cambios en PEMEX debido a las propiedades del etanol, dichos cambios se resumen a continuación a partir de lo reportado por Rodrigo Favela de PEMEX Refinación [Favela, 2007]:

- El etanol tiende a absorber la humedad del medio ambiente. Los sistemas de transporte de hidrocarburos no están diseñados para manejar productos con agua. Al transportar etanol se puede causar corrosión en poliductos, bombas y tanques. Debido a lo anterior la práctica internacional es transportarlo en autos tanque o ferrocarril y mezclarlo con una base de gasolina en terminales de almacenamiento o en estaciones de servicio. Los tanques de almacenamiento de etanol en los vehículos de transporte deben estar diseñados para no permitir el contacto del agua del ambiente con el etanol.
- Las refinerías tienen que modificar su infraestructura y modo de operación para producir bases de gasolina Pemex Premium y Pemex Magna de baja presión de vapor (lo cual incrementa el costo).
- Para el manejo separado de bases de gasolina y la elaboración de mezclas con etanol se requerirán: tanques, nueva infraestructura para mezclado e instalaciones para recibir y descargar cargamentos de etanol.
- En las estaciones de servicio se deberán reemplazar y/o adecuar los tanques y sistemas que no sean compatibles con gasolina oxigenada con etanol.

La inversión aproximada requerida en las Terminales de Almacenamiento y Distribución para oxigenar las gasolinas que se distribuyen en las Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y el DF con etanol son de 77 – 120 Millones de USD\$ [Favela, 2007].

En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de cómo y dónde se tiene que llevar a cabo la mezcla de gasolina con etanol.

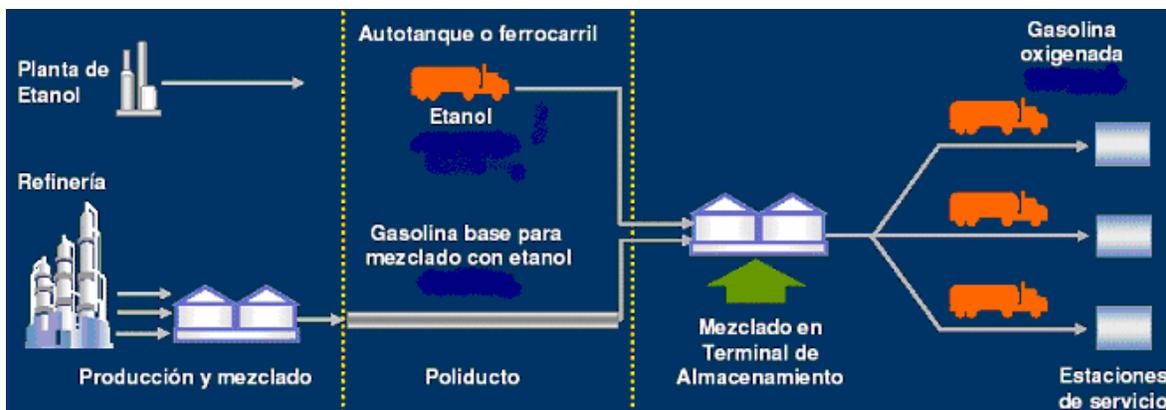


Figura 4.5 Ejemplo de los pasos que se requieren para la mezcla de gasolina con etanol [Favela, 2007].

La tabla 4.9 muestra las propiedades ingresadas a MOBILE6-México para cada uno de los combustibles. Estas propiedades y el tipo de combustible son los valores que cambian en las corridas de MOBILE6-México una vez que ya se establecieron los valores de temperatura y altitud que se tienen en la ZMVM.

Propiedad	MTBE5	E10	ETBE15	Propiedades reguladas federalmente en ZMVM
Presión de Vapor Reid (lb/in ²)	7.27*	8.03*	9.4***	7.8 max
Azufre(ppm)	390** (30 en 2030)	327 (30 en 2030)	361*** (30 en 2030)	
Aromáticos (vol%)	25*	27.1*	28***	25
Olefinas (vol %)	10.2*	11.7*	11.2***	10
Benceno (vol%)	1.1*	1.1*	2***	1
(RON + MON/2)	87.5*	88.3*	92.2***	
Oxígeno (vol%)	1*	3.7*	2.29***	2 - 2.7

* Fuente [Schifter, 2001]

** Fuente [SMA, 2003]

*** Fuente [Vision Engineer,1995]

Tabla 4.9 Propiedades de los combustibles ingresadas a MOBILE6-México

Cabe señalar que las propiedades de los combustibles no pueden ser determinadas a priori, de tal forma que estos datos fueron obtenidos experimentalmente por otros investigadores [Schifter, 2001], de los que a su vez fueron tomados como referencia para realizar las corridas en MOBILE6-México.

Algunas de las propiedades están reguladas por la federación con el objetivo de evitar lo más posible las emisiones contaminantes, ya que el contenido de aromáticos, olefinas y benceno determinan en gran medida emisiones contaminantes (NOM-086). Lo mismo

ocurre con la PVR, ya que al irse aumentando esta presión lo que ocurre es que la gasolina se volatiliza más rápido y se tienen mayores emisiones evaporativas. Cabe señalar que no todas las propiedades cumplen con la regulación federal, aunque como veremos más adelante, a pesar de esto, según resultados de MOBILE6-México algunos combustibles hacen que se reduzcan las emisiones de algunos contaminantes.

Los automóviles “flex-fuel” y el combustible E85

En los alcances del presente trabajo se contempla el uso del etanol como oxigenante de las gasolinas de la ZMVM, por lo que el uso del etanol como combustible no entra dentro de los alcances del trabajo. Sin embargo se debe tener en cuenta que el uso del etanol como combustible podría resultar en mayores beneficios ambientales de los que pudieran obtenerse por el uso del etanol como oxigenante de las gasolinas, lo que daría pie a un mayor impulso en el uso de etanol. Por tal motivo en esta sección del trabajo se describe otra de las modalidades del uso del etanol que está tomando cada vez mayor importancia, en el sentido de la sustitución de gasolina por etanol en los vehículos a gasolina del sector transporte.

Una modalidad del uso del etanol que se está expandiendo en algunos países es su uso como E85 (mezcla volumétrica de 85% etanol anhidro y 15% gasolina o mezclas gasolina-etanol) en los llamados vehículos “flex-fuel”.

Los vehículos flex-fuel son aquellos que pueden usar dos fuentes de combustible. Los más comunes pueden aceptar mezclas volumétricas de 0% etanol y 100% gasolina (o mezclas de gasolina-etanol) hasta 85% etanol y 15% gasolina.

Los vehículos flex-fuel cuentan con sensores que detectan automáticamente la mezcla de combustible, posteriormente un dispositivo electrónico llamado Unidad de Control (ECO) regula la cantidad de combustible y de aire que entra a la máquina para que la combustión se realice de la mejor forma en la máquina de combustión interna.

Los primeros vehículos flex-fuel fueron liberados al mercado en Estados Unidos en 1993, aunque el combustible que usaba era el M85 (85% volumen metanol y 15% volumen gasolina). En 1996 fue liberado por Ford el primer modelo flex-fuel que usaba E85. Posteriormente fueron apareciendo vehículos flex-fuel producidos por General Motors, Chrysler, Dodge, Toyota, Nissan, Mazda, Mercedes, entre otros. Actualmente en Estados Unidos circulan alrededor de 5 millones de vehículos flex-fuel [DOE, 2007] aunque muchos de estos vehículos no usan el E85 debido a que los propietarios desconocen que pueden hacerlo.

Por otra parte en Brasil el primer vehículo flex-fuel fue liberado en 2003 (VW Gol). En el año 2004 se vendieron 328,378 vehículos flex-fuel, mientras que en 2005 se vendieron 865,454 vehículos flex-fuel (55% de los autos nuevos). Se estima que para el año 2010 los autos flex-fuel representen el 25% de la flota de vehículos ligeros [Petrobras, 2007].

El combustible E85 que pueden utilizar los vehículos flex-fuel está compuesto en volumen por una mezcla de 85% etanol hidratado y 15% gasolina o mezclas gasolina-etanol. Debido

a que el etanol contiene un menor poder calorífico que la gasolina, el combustible E85 contiene el 71% de la energía de la gasolina. Algunos fabricantes están instalando tanques de combustible más grandes para mantener un rendimiento similar al rendimiento de la gasolina [DOE, 2007]. Actualmente en estado Unidos existen alrededor de 1000 estaciones de expendio de E85 [DOE, 2007].

El E85 utilizado por los vehículos flex-fuel es otra forma de sustituir la gasolina que se usa en los vehículos del sector transporte por etanol. Al igual que en el caso de usar etanol como oxigenante de las gasolinas, el uso de E85 tiene efectos sobre las emisiones de contaminantes del aire.

El Departamento de Energía de los estados Unidos señala que el uso de E85 por los vehículos flex-fuel produce menores emisiones de CO y CO₂ que los vehículos que usan sólo gasolina [DOE, 2007]. También se comenta que las emisiones de hidrocarburos y de óxidos de nitrógeno (NO_x) por el uso de E85 permanecen prácticamente iguales que en el caso de usar gasolina.

Otro estudio realizado por la Universidad de Stanford señala que el uso de E85 en los vehículos flex-fuel aumenta las emisiones de acetaldehídos, aumenta también la formación de ozono troposférico, así como un aumento en el riesgo de padecer cáncer [Stanford University, 2007].

Factores de emisión calculados por MOBILE6-México

En las tablas siguientes se muestran los factores de emisión de los distintos tipos de vehículos calculados por MOBILE6-México para los diferentes combustibles en los años 2002 y 2030.

2002			2030 TIER 1			2030 TIER 2					
Contaminante	MTBE5	E10	ETBE15	Contaminante	MTBE5	E10	ETBE15	Contaminante	MTBE5	E10	ETBE15
LDGV			LDGV			LDGV					
THC	3.7	3.58	3.96	THC	2.17	1.36	2.48	THC	0.9	0.92	1.08
CO	33.77	28.19	32.59	CO	12.40	7.75	12.39	CO	7.54	6.81	7.72
NOX	1.22	1.21	1.21	NOX	1.37	0.86	1.37	NOX	0.75	0.76	0.76
Partículas PM10	0.03	0.03	0.03	Partículas PM10	0.02	0.01	0.01	Partículas PM10	0.0154	0.0154	0.0154
SO2	0.06	0.04	0.04	SO2	0.0550	0.03	0.02	SO2	0.00425	0.00425	0.00425
Tóxico FE mi/km			Tóxico FE mg/km			Tóxico FE mg/km					
Benceno	128.31	114.7	156.64	Benceno	59.41	37.1	77.7	Benceno	28.85	27.5	38
1,3 Butadieno	17.17	14.73	15.24	1,3 Butadieno	5.4375	3.4	5.0	1,3 Butadieno	2.91	2.2	2.7
Formaldehído	42.73	37.15	36.02	Formaldehído	12.975	8.1	11.1	Formaldehído	6.78	5.9	5.8
Acetaldehído	14.01	31.46	26.02	Acetaldehído	4.65	2.9	8.5	Acetaldehído	2.41	5.2	4.5

Tabla 4.10 Factores de emisión de los vehículos LDGV para los años 2002 y 2030 con TIER1 y TIER2.

2002			2030 TIER 1			2030 TIER 2		
LDGT1			LDGT1			LDGT1		
Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km	
THC	2.41	2.34 2.60	THC	1.73	1.72 1.96	THC	0.98	0.99 1.145
CO	27.02	22.83 26.08	CO	16.28	14.64 16.33	CO	9.90	8.96 10.12
NOX	1.51	1.50 1.51	NOX	1.61	1.60 1.61	NOX	0.84	0.84 0.85
Partículas PM10	0.02	0.02 0.02	Partículas PM10	0.019	0.018 0.018	Partícula PM10	0.0154	0.0154 0.0154
SO2	0.07	0.05 0.05	SO2	0.072	0.055 0.072	SO2	0.0055	0.0055 0.0055
Tóxico	FE mi/km		Tóxico	FE mg/km		Tóxico	FE mg/km	
Benceno	86.05	82.88 110.53	Benceno	62.86	59.84 80.36	Benceno	35.33	34.12 45.91
1,3 Butadieno	9.75	8.62 8.81	1,3 Butadieno	6.03	5.64 5.54	1,3 Butadieno	3.53	2.73 3.29
Formaldehído	31.31	27.74 26.97	Formaldehído	15.78	13.69 13.54	Formaldehído	8.84	7.63 7.62
Acetaldehído	9.57	21.59 18.24	Acetaldehído	5.4	11.6 10.2	Acetaldehído	3.03	6.50 5.81

Tabla 4.11 Factores de emisión de los vehículos LDGT1 para los años 2002 y 2030 con TIER1 y TIER2.

2002			2030 TIER 1			2030 TIER 2		
LDGT2			LDGT2			LDGT2		
Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km	
THC	4.55	4.41 4.82	THC	2.23	2.23 2.53	THC	1.19	1.20 1.39
CO	49.81	40.69 46.83	CO	17.94	16.14 17.99	CO	10.76	9.71 11.00
NOX	1.54	1.53 1.54	NOX	1.74	1.73 1.73	NOX	0.90	0.90 0.91
Partículas PM10	0.02	0.02 0.02	Partículas PM10	0.02	0.02 0.02	Partícula PM10	0.0154	0.0154 0.0154
SO2	0.09	0.07 0.07	SO2	0.09	0.07 0.07	SO2	0.0072	0.0072 0.0072
Tóxico	FE mi/km		Tóxico	FE mg/km		Tóxico	FE mg/km	
Benceno	145.94	143.64 192.23	Benceno	73.31	69.34 94.52	Benceno	40.18	38.45 52.29
1,3 Butadieno	22.12	20.31 20.65	1,3 Butadieno	6.82	6.37 6.25	1,3 Butadieno	4.01	3.05 3.71
Formaldehído	72.11	65.70 63.51	Formaldehído	17.71	15.34 15.17	Formaldehído	9.71	8.38 8.34
Acetaldehído	20.47	45.49 37.71	Acetaldehído	6.075	13.0 11.4	Acetaldehído	3.35	7.19 6.43

Tabla 4.12 Factores de emisión de los vehículos LDGT2 para los años 2002 y 2030 con TIER1 y TIER2.

2002			2030 TIER 1			2030 TIER2		
HDGV			HDGV			HDGV		
Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km	
THC	3.96	4.03 4.52	THC	2.11	2.16 2.52	THC	1.30	1.31 1.50563
CO	59.86	47.81 54.23	CO	18.94	14.01 17.16	CO	20.59	15.74 19.28
NOX	2.55	2.54 2.51	NOX	2.38	2.37 2.33	NOX	2.35	2.34 2.30
Partículas PM10	0.08	0.08 0.08	Partículas PM10	0.03	0.03 0.03	Partícula PM10	0.0201	0.0201 0.0078
SO2	0.15	0.11 0.11	SO2	0.13	0.10 0.10	SO2	0.0103	0.0103 0.0040
Tóxico	FE mi/km		Tóxico	FE mg/km		Tóxico	FE mg/km	
Benceno	91.48	93.44 130.56	Benceno	41.40	39.26 57.74	Benceno	32.44	32.61 43.08
1,3 Butadieno	15.08	17.27 16.88	1,3 Butadieno	2.27	2.19 2.31	1,3 Butadieno	2.02	2.04 2.16
Formaldehído	82.08	83.56 81.19	Formaldehído	16.29	14.94 14.36	Formaldehído	16.23	14.18 13.61
Acetaldehído	16.53	34.68 28.49	Acetaldehído	4.02	9.66 7.8	Acetaldehído	3.83	9.30 7.51

Tabla 4.13 Factores de emisión de los vehículos HDGV para los años 2002 y 2030 con TIER1 y TIER2.

2002			2030 TIER 1			2030 TIER2		
MC			MC			MC		
Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km		Contaminante	FE g/km	
THC	1.89	1.88 1.96	THC	1.89	1.88 1.96	THC	1.89	1.88 1.9625
CO	15.93	13.06 14.36	CO	15.93	13.06 14.36	CO	15.64	13.06 14.36
NOX	0.51	0.51 0.51	NOX	0.51	0.51 0.51	NOX	0.51	0.51 0.51
Partículas PM10	0.02	0.02 0.02	Partículas PM10	0.02	0.02 0.02	Partícula PM10	0.02	0.02 0.02
SO2	0.03	0.02 0.02	SO2	0.03	0.02 0.02	SO2	0.002	0.002 0.002
Tóxico	FE mi/km		Tóxico	FE mg/km		Tóxico	FE mg/km	
Benceno	49.02	52.13 69.32	Benceno	49.02	52.13 69.32	Benceno	48.88	53.33 69.32
1,3 Butadieno	15.81	16.66 16.08	1,3 Butadieno	15.81	16.66 16.08	1,3 Butadieno	15.99	16.66 16.08
Formaldehído	41.54	39.84 38.67	Formaldehído	41.54	39.84 38.67	Formaldehído	42.95	39.84 38.67
Acetaldehído	10.87	20.71 17.05	Acetaldehído	10.87	20.71 17.1	Acetaldehído	11.06	20.71 17.05

Tabla 4.14 Factores de emisión de los vehículos MC para los años 2002 y 2030 con TIER1 y TIER2.

En general se aprecia una mejoría en los factores de emisión al año 2030 al usar tanto TIER1 como TIER2, aunque se puede ver que son aún mejores estos factores de emisión para la TIER2. Esto se debe a que MOBILE6-México considera una mejora tecnológica la

sustitución de vehículos viejos por nuevos que tienen incorporados un “cambio tecnológico” al considerar controles para las emisiones mas eficientes, tal y como se comentó con anterioridad.

Cabe resaltar también que la formulación de los combustibles nos dice en gran medida como serán las emisiones contaminantes, esto puede ilustrarse con las emisiones de HCT del ETBE15, ya que entre sus propiedades encontramos que tiene una muy PVR alta (9.4 PSI) lo que ocasiona que se tengan muchas más emisiones evaporativas debido a la alta volatilidad del combustible. Esto se nota en las emisiones de THC al darnos cuenta que el ETBE15 es el que cuenta con las mayores emisiones de este contaminante con respecto a los otros dos combustibles. Lo mismo ocurre con este contaminante en las emisiones de benceno, esto debido a que entre sus propiedades se encuentra que el contenido de benceno es del doble en comparación con los otros dos combustibles.

La tabla 4.13 muestra factores de emisión que fueron calculados por otros autores, cuando se tenían las mismas propiedades de los combustibles y se utilizaba el 100% de la flota con E10. En el caso de Granados [Granados, 2000], los factores de emisión fueron calculados usando Mobile5-MAMC. La EPA explica las diferencias en emisiones en MOBILE6 y MOBILE5 (son mayores para el caso de MOBILE6 para fechas anteriores al 2003), debido a que se cambiaron las distribuciones de edades de las flotas vehiculares, y los parámetros de operación del vehículo [EPA MOBILE6, 2001].

En el caso de los factores de emisión calculados por Schifter [Schifter, 2001], los factores de emisión fueron calculados a partir de un estudio experimental. En la tabla 4.15 aparecen dos valores, el valor mayor corresponde a los factores de emisión de los autos sin control de emisiones, mientras que el factor de emisión menor corresponde a los autos con convertidores catalíticos de tres vías.

Contaminante g/km	Factor de Emisión de LDGV (E10)		
	Este trabajo	Schifter, 2001	Granados, 2000
CO	28.19	---	17.67
THC	3.58	---	2.24
Nox	1.21	---	1.25
SO2	0.03	---	---
PM10	0.04	---	---
Tóxico mg/km			
Benceno	114.7	8.11-47.54	---
1,3 Butadieno	14.73	0.83-18.35	---
Formaldehído	37.15	1.01-30.29	---
Acetaldehído	31.46	1.62-15.3	---

Tabla 4.15 Comparación en los Factores de Emisión con los obtenidos en otros trabajos.

Se observan diferencias en los factores de emisión calculados en este trabajo con MOBILE6-México al compararse sobre todo con los resultados obtenidos por Schifter. Estas diferencias se deben a que Shifter en su trabajo hizo las mediciones con autos

relativamente nuevos, mientras que los valores reportados por MOBILE son un promedio de las emisiones estimadas generadas por este tipo de vehículos, donde se considera que existen en la flota vehicular autos más viejos que tienen emisiones mayores que los nuevos debido al deterioro.

Capítulo 5

Escenarios de Emisiones a la atmósfera del parque automotor a gasolina de la ZMVM

En este capítulo se describe la construcción y simulación de seis escenarios de emisiones atmosféricas del parque automovilístico consumidor de gasolina de la ZMVM hasta el año 2030. Tres escenarios se construirán aplicando la normatividad vigente al 2007 (basada en la norma TIER1) y los siguientes tres escenarios se construyen aplicando la norma TIER2, que está programada para entrar en vigor a partir del 2010. Se supondrá que en cada caso la norma se mantendrá vigente en todo el periodo considerado. En cada una de las dos normas aplicadas se construye un escenario de referencia y dos alternativos. En los escenarios de referencia, se utiliza la gasolina que actualmente se expende en la ZMVM y que en este estudio se le llama MTBE5 (5% MTBE y 95% gasolina en porcentajes de volumen). En el primer escenario alternativo se considera la mezcla E10 (10% etanol anhidro y 90% gasolina) y en el segundo escenario alternativo ETBE15 (15% ETBE y 85% gasolina) donde el ETBE es un éter compuesto por 48% de etanol y 52% de isobuteno.

Los factores de emisión de los combustibles seleccionados se calcularon en el capítulo anterior utilizando el modelo Mobile6-México, en el presente capítulo éstos factores se insertan como datos de entrada en el programa LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System). Donde se simulan los escenarios propuestos y se analizan y comparan las emisiones resultantes de CO₂, biogénicas y no biogénicas, las emisiones de contaminantes criterio (CO, THC, NO_x, PM10 y SO₂) y las de contaminantes tóxicos (Benceno, Formaldehído, Acetaldehído y 1,3 Butadieno).

Construcción de Escenarios

La descripción de un futuro posible y de la trayectoria asociada al mismo constituye un escenario. Los escenarios representan diferentes imágenes de futuro. Construir estas imágenes de futuro nos ayuda a comprender cómo las decisiones y las acciones que hoy se toman pueden influir en el futuro. La técnica de escenarios es un instrumento de la prospectiva que permite reducir el grado de incertidumbre en la toma de decisiones. La incertidumbre acerca de la evolución futura de los sistemas socioeconómicos es absolutamente inevitable. Sólo es posible realizar ejercicios de exploración del futuro con el objeto de examinar estados posibles de los mencionados sistemas socioeconómicos y sus eventuales implicaciones con relación a ciertos subsistemas o aspectos particulares [Miklos, 1998].

Los escenarios creados representan una posible evolución del parque automovilístico de la ZMVM desde el año 2002 hasta el año 2030. El número de vehículos para los seis escenarios es el mismo. Los primeros tres escenarios se construirán aplicando la normatividad vigente en la Ciudad de México en el 2007, la cual cumple con los estándares que impone la norma estadounidense TIER1, ya descrita en el capítulo anterior. Los siguientes tres escenarios se construyeron bajo el supuesto de que la normatividad vigente

hasta el 2030 cumplirá con la norma TIER2, la cual entraría en vigor en la ZMVM a partir del 2010.

Tanto los escenarios TIER1 como los TIER2 se construyen de una manera similar, en primer lugar se construyen los escenarios de referencia o también conocidos como Business as Usual (BAU), están definidos por la tendencia actual del consumo de gasolinas, es decir, toda la flota automovilística utiliza MTBE5 (5% MTBE y 95% gasolina en porcentajes de volumen). El MTBE (Metil terbutil éter) es el oxigenante actual de las gasolinas que se usan en la ZMVM. Los primeros escenarios alternativos utilizan en todo el parque automovilístico E10 (10% etanol y 90% gasolina) que es una de las mezclas más comunes de la oxigenación de gasolina con etanol. Finalmente los otros dos escenarios alternativos utilizan ETBE15 (15% ETBE y 85% gasolina) como combustible para toda la flota automovilística.

Simulación de Escenarios

Los escenarios fueron construidos y simulados en la versión 2006.35 del LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) desarrollado por el Stockholm Environment Institute-Boston / Tellus Institute. El modelo LEAP es una plataforma computacional diseñada para llevar a cabo una planeación energético-ambiental en forma integrada. Asimismo se puede usar para representar una cadena energética específica. LEAP, es una herramienta para estudios energético – ambientales basados en escenarios:

- Prospectiva energética (Escenarios).
- Planificación integrado de los recursos.
- Análisis de Política Energética.
- Análisis de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero.
- Balances Energéticos e Inventarios medio-ambientales.

Su principal objetivo es brindar un soporte integrado y confiable en el desarrollo de estudios de planificación energética integrada. Es del tipo “bottom-up” y consiste esencialmente en un modelo energético – ambiental basado en escenarios impulsados por la demanda. Esto último significa que frente a un determinado escenario de demanda final de energía, el LEAP asignará los flujos energéticos entre las distintas tecnologías de abastecimiento energético, calculando el uso de recursos, los impactos ambientales y detectando la necesidad de ampliación de determinados procesos de producción de energía. Principalmente se ha utilizado para determinar la evolución del sistema energético tanto en países industrializados como en países en desarrollo, en regiones (incluyendo varios países) o para propósitos de planificación local. Provee por lo tanto un banco de información, por lo que constituye una herramienta para obtener proyecciones de largo plazo en términos de configuraciones de oferta/demanda y/o de un esquema para identificar y evaluar opciones de política y tecnologías alternativas. [COMMEND, 2007]

Número de Vehículos

La evolución de la flota vehicular se construye a partir de la existencia de vehículos en el año base y se especifica un perfil de ciclo de vida que describe la distribución por edades de los vehículos dentro de esa existencia, junto con las ventas de artefactos en el año base. En la figura 5.1 se muestra la distribución de edades de la flota vehicular de la ZMVM, según datos del inventario de emisiones del año 2002 [SMA, 2003].

Debido a la incertidumbre en los datos sobre el número de vehículos (N) que circulan en la ZMVM, se utilizaron los datos del Inventario de Emisiones del 2000 y 2002 para la ZMVM, donde solamente se incluyó el número de vehículos que utilizan gasolina como carburante. De esta fuente en el año 2002 que es el año base se registraron 3,420,887 vehículos, tal y como fueron clasificados en el capítulo 4.

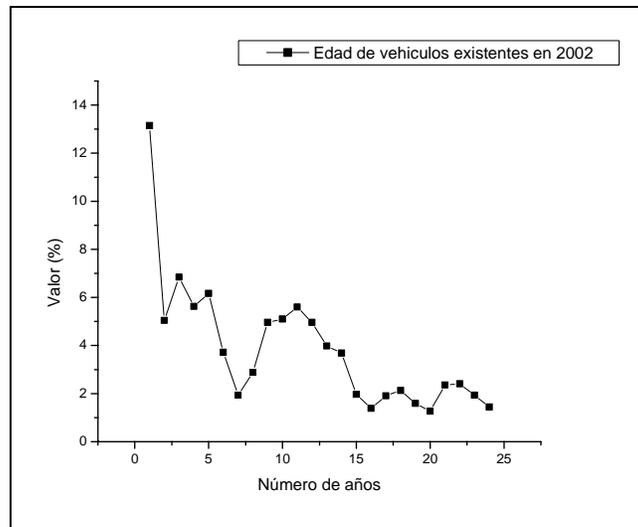


Figura 5.1 Distribución de edades de la flota vehicular de la ZMVM [Inventario de Emisiones de la ZMVM, 2002].

Las existencias de vehículos en los años subsiguientes dependen de las ventas y del perfil de supervivencia tal y como se muestra en la ecuación 5.1. Las ventas (S) para el año base fueron 337,000 vehículos [SMA, 2001].

$$N_{t,y,v} = S_{t,v} F_{t,y-v} \quad (5.1)$$

Donde:

- N = Número de Vehículos
- S = Ventas
- F = Perfil de supervivencia en t
- t = Número de años

y = Año del calendario
 v = Cantidad máxima de años de antigüedad

donde (S) son las ventas, o el número de vehículos agregados en un año en particular, (F) es el perfil de supervivencia, es decir la fracción de vehículos sobrevivientes después de un número de años (t), y (v) es la cantidad máxima de años de antigüedad.

La supervivencia se ingresa como un perfil de ciclo de vida, definido por la ecuación 5.2

$$F(t) = F(t-1)e^{Kt} \quad (5.2)$$

donde

$$K = \frac{\ln F(t) - \ln(F(t-1))}{t} \quad (5.3)$$

El valor de la constante K se obtuvo en este trabajo tomando en cuenta valores del número de vehículos vendidos en un año y de su evolución en los inventarios del parque vehicular de años subsecuentes. Para el caso de la flota automovilística de la ZMVM resultó un valor de $K = -0.0284$ (ver Anexo C para el cálculo), con el que resulta el perfil de supervivencia mostrado en la figura 5.2, donde se observa que el valor para el primer año del perfil de supervivencia es siempre 100%.

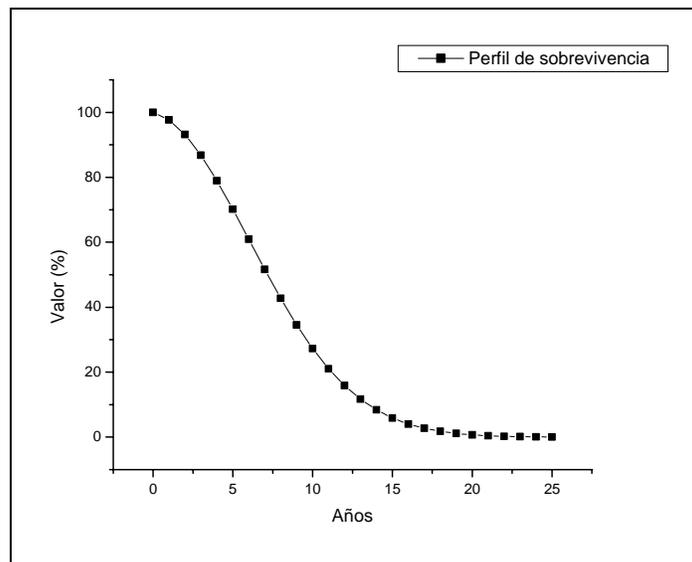


Figura 5.2 Perfil de supervivencia calculado para los vehículos de la ZMVM.

Cálculo de emisiones

En lo que se refiere a las cargas ambientales, en el capítulo anterior se calcularon los factores de emisión por contaminante, expresados en cantidad de emisiones por unidad de distancia (kg de contaminante por km recorrido por el vehículo). En LEAP se introducen los factores de emisión diferenciados para cada contaminante y para cada tipo de vehículo en el año base (2002) y en el año en que termina la simulación, es decir el año 2030. Posteriormente, LEAP interpola linealmente estos valores de forma automática para obtener valores en años intermedios. Para el cálculo del total de emisiones en ambos escenarios se utiliza la ecuación (5.4).

$$Emisión_i = Existencias * Kilometraje * FactordeEmisión_i \quad (5.4)$$

Donde:

Existencias = número de vehículos de un año determinado.

FactordeEmisión = tasa de emisión para el contaminante (kilogramos de i/kilometro veh) en un año determinado.

Kilometraje = distancia anual recorrida por el vehículo.

Este cálculo se realiza para cada tipo de vehículo, para cada año, y para cada uno de los contaminantes.

El kilometraje para cada tipo de vehículo fue tomado del inventario de emisiones, quedando de la forma en que aparece en la tabla 5.1

Kilometraje de vehículos en la ZMVM	
Tipo de Vehículo	Km anuales
LDGV	36500
LDGT1	43800
LDGT2	73000
HDGV	17958
MC	12045

LDGV: Autos particulares, Taxis. LDGT1:Combis, Pick ups.
LDGT2:Microbuses. HDGV: Vehículos de 3 toneladas en adelante (en peso), Tractocamiones, Autobuses.

Tabla 5.1 Kilometraje para cada tipo de vehículo [SMA, 2003]

El consumo energético para cada uno de los escenarios es calculado por LEAP de la siguiente manera

$$ConsumoEnergético = Existencias * Kilometraje * ConsumoEspecífico \quad (5.5)$$

Donde:

ConsumoEspecífico es el uso de energía por unidad de distancia recorrida por el Vehículo (km/m³ de combustible).

Este cálculo se realiza para todos los autos de las diferentes tecnologías, todos los años, y cada uno de los diferentes escenarios, de manera que podamos conocer que escenario es el que consume más energía.

Resultados

El primero de los resultados de los escenarios es el número de automóviles. Al final del periodo del escenario el número de automóviles N calculado por LEAP asciende a 5,103,300.

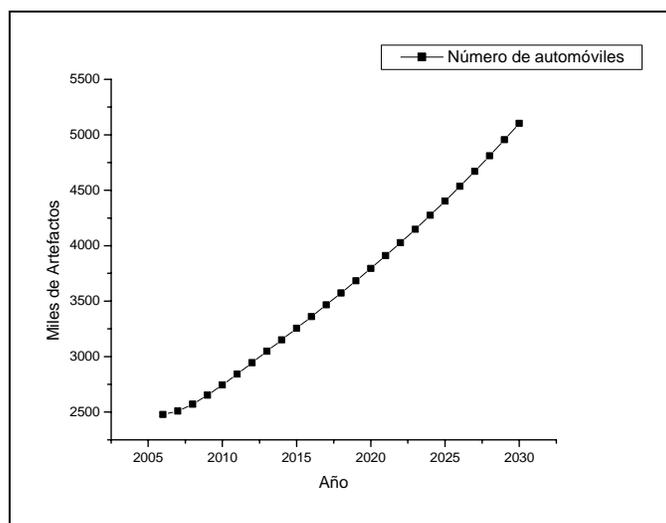


Figura 5.3 Escenario de existencias de vehículos hasta el año 2030

Consumo Energético

Los resultados de los escenarios muestran que el consumo energético acumulado del escenario base desde al año 2006 hasta el año 2030 es de 13330.7 millones de GJ. Para el escenario E10 el consumo se incrementa a 13686.7 millones de GJ que representa un aumento del 2.67% con respecto al escenario base. Para el escenario ETBE15 el consumo energético se incrementa a 13577.9 millones de GJ que representa un aumento del 1.85% con respecto al escenario base. Esto se debe al menor contenido energético del etanol. Ver figura 5.4.

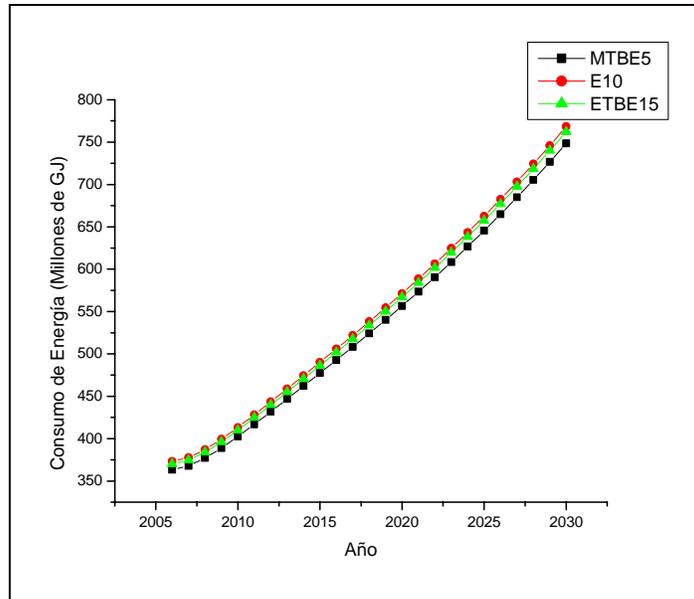


Figura 5.4 Consumo de energía para los combustibles MTBE5, E10 y ETBE15, tanto para TIER1 como para TIER2.

Monóxido de Carbono (CO)

La figura 5.5 muestra los resultados de las emisiones de CO para los seis escenarios. Como podrá observarse posteriormente al comparársele con otros contaminantes, el CO es uno de los contaminantes que tiene una reducción mayor al sustuirse el MTBE5 por E10.

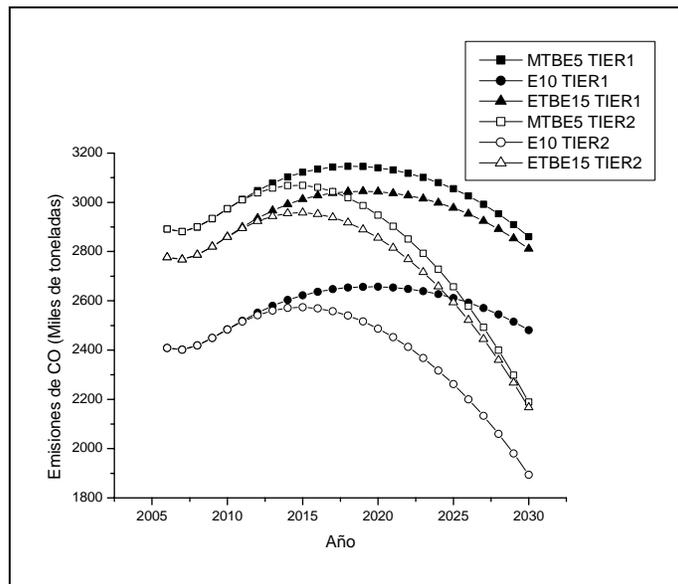


Figura 5.5 Escenario de emisiones de CO hasta el año 2030

Se observa en la figura 5.5 tanto en los escenarios TIER1 como en TIER2 que las emisiones de CO de los combustibles alternativos (E10 y ETBE15) son menores que las del escenario de referencia con MTBE5. Lo anterior se atribuye a que ambos combustibles tienen un mayor contenido de oxígeno y por lo tanto se realiza una mejor combustión, donde teóricamente todo el carbono forma CO₂ dejando de formarse CO debido a una combustión incompleta. En el caso de los escenarios TIER2 se observa que las diferencias en emisiones por el uso de E10 y ETBE15 con respecto al uso de MTBE5, empiezan a decrecer con el tiempo. Aunque también es de notar que las emisiones por el uso de MTBE disminuyen después de alcanzar un máximo. La explicación está en que conforme transcurran los años la flota vehicular se renovará, por lo que el número de autos con los nuevos controles de emisiones irá siendo mayor, disminuyendo así las ventajas de oxigenar las gasolinas.

Se debe recordar que MOBILE calcula la fracción de vehículos que contarán con las nuevas tecnologías para cumplir con la TIER2, y procederá a recalcular los factores de emisión para el año que se le indique. MOBILE6-México fue programado para que a partir del año 2010 los estándares de emisión sean los mismos para México que para Estados Unidos, y para el año 2010 en Estados Unidos ya se aplicará completamente la norma TIER2, lo mismo que sucedería en México. De igual forma el Tratado de Libre Comercio de Norteamérica obliga a la homologación de emisiones de los autos nuevos para el año 2010. Esta explicación puede encontrarse en el archivo Mex_P94_IMP.DAT del MOBILE6-México.

En los escenarios TIER2: cuando se da el caso de utilizar E10 y tecnologías nuevas de control de emisiones se evitarían en todo el periodo 11,097.8 miles de toneladas de CO desde el año 2006, lo que representa una reducción del 15.68% de las emisiones acumuladas con respecto al escenario base MTBE5. Cuando se utiliza ETBE15 y tecnologías nuevas de control de emisiones se evitan 2,221.5 miles de toneladas, que representan una reducción del 3.14% de las emisiones acumuladas con respecto al escenario base. Ver tabla 5.2. En los escenarios TIER1 se tendría al usar E10 una reducción de emisiones con respecto a el MTBE5 de 11,700 miles de toneladas de CO desde el 2006 hasta el 2030, es decir, una disminución del 15.42%; y al utilizar ETBE15 se redujeron 2,372 miles de toneladas, es decir, una disminución del 3.13% con respecto al escenario base.

Un estudio de la EPA [Mayotte, 1994] arroja que las reducciones en emisiones por oxigenar las gasolinas con etanol se encuentran alrededor de 4-5% de reducción en CO/peso % de oxígeno con respecto a las gasolinas sin etanol. Que para el caso de E10 significa un peso en oxígeno del 3.7%, lo que nos arroja una disminución en emisiones de entre el 15% y el 18.5%. Otro estudio experimental del IMP [Schifter, 2001] arroja diferentes resultados dependiendo de la tecnología de control de emisiones utilizada por los automóviles. Para el caso de los autos sin control de emisiones las reducciones de CO al usar E10 están alrededor del 28.36% de emisiones en comparación con oxigenar la gasolina al usar MTBE5. Para el caso del control de emisiones por oxidación catalítica la reducción de emisiones son de alrededor del 38.1% con respecto a MTBE5. Finalmente al usarse un convertidor catalítico de tres vías (TWC por sus siglas en inglés) la reducción de emisiones por el uso de E10 en lugar de MTBE5 están alrededor del 2.9%. En este trabajo las

emisiones se encuentran dentro del rango de reducción de emisiones que se encontraron en la literatura para el uso de E10 con el uso de la TIER1.

Al comparar las emisiones debido al uso de TIER1 y TIER2 para el caso de utilizar MTBE5 se tiene que se reducen las emisiones acumuladas en un 6.7% mediante la aplicación de TIER2. El uso de E10 con la norma TIER1 para el caso de las emisiones de CO, tendría mayores beneficios en las emisiones acumuladas que si solamente se introduce la TIER2 sin cambiar el combustible MTBE5. Para ilustrar lo anterior se debe ver el resumen de las emisiones que se presentan la tabla 5.2. Se puede ver que las emisiones del MTBE5 al usar la norma TIER1 son de 75,874.4 miles de toneladas, mientras que por el uso de E10 con la misma TIER1 se observan emisiones acumuladas de 64,174.2 miles de toneladas de CO. Si se comparan estas emisiones por E10 y norma TIER 1 con las emisiones de MTBE5 con TIER 2 (70,769.2 miles de toneladas) se tiene que las emisiones de E10 son menores. Esto puede resumirse como: el cambiar de MTBE5 a E10 tendría menores emisiones de CO que si mantenemos el combustible MTBE5 e introducimos la norma (o su equivalente) TIER2.

Hydrocarbons Totales (THC)

Las emisiones de hidrocarburos son mayores con ETBE15 que con MTBE5 y E10 tanto en el escenario TIER1 y como en el escenario TIER2, debido a que con esta mezcla aumenta la Presión de Vapor Reid, lo que provoca que se tengan una mayor cantidad de emisiones evaporativas. Con E10 la presión de vapor también aumenta, pero no de la forma en que lo hace con el ETBE15, por lo que las emisiones son menores con E10.

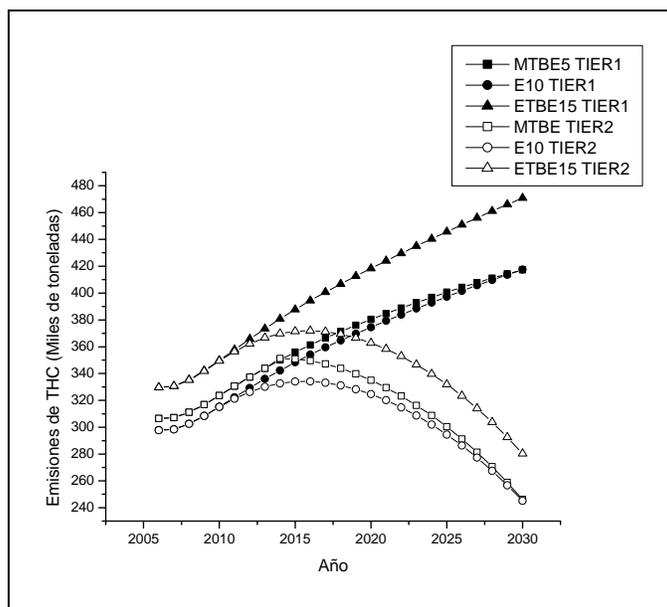


Figura 5.6 Escenario de emisiones de THC hasta el año 2030

Como se presenta en la figura 5.6 el uso de E10 arroja una reducción de 318.2 miles de toneladas de THC hasta el año 2030 al usar TIER2, que equivale a una reducción del 3.9% de emisiones acumuladas con respecto al escenario base MTBE5, lo cual significa beneficios en reducción de emisiones menores comparado con resultados de otros estudios. Resultados de la investigación de la EPA [Mayotte, 1994] concluye que las reducciones en emisiones de THC estarán alrededor de 3.5%/peso % de oxígeno, lo que para el caso de E10 representa una reducción del 12.95% en las emisiones. Por otro lado el estudio del IMP [Schifter,2001] muestra que las reducciones de THC al usar E10 con respecto a MTBE5 para autos sin control de emisiones, autos con control por oxidación catalítica, y autos por convertidores catalíticos de tres vías son de alrededor de 7.05%, 20% y 0% respectivamente. Para este trabajo las reducciones en emisiones se encuentran dentro del rango del trabajo del IMP, estando más cercano el valor a lo reportado por el IMP por el uso de convertidores catalíticos de tres vías.

Para el caso del ETBE15 se tiene un incremento de 589 miles de toneladas en el escenario con TIER2, lo que representa un aumento del 9.53% de emisiones acumuladas con respecto al escenario base MTBE5. Para el escenario ETBE15 con TIER1 las emisiones aumentan en 846 miles de toneladas, esto es el 9.5% comparado con el escenario base MTBE5, quedando el incremento en emisiones en el mismo porcentaje que en el caso de usar TIER2. Podemos observar que las emisiones por E10, ETBE15 y MTBE5 tienden a disminuir con el tiempo a gracias a las mejores tecnologías de control de emisiones, y también se observa como el beneficio de oxigenar las gasolinas con etanol (E10) disminuye con el tiempo a medida que se va renovando el parque vehicular, llegando un momento en el que no se aprecia mucha diferencia en emisiones de THC al usar MTBE5 o E10. No así el caso del ETBE15 que al tener una presión de vapor muy alta las emisiones evaporativas son mayores, de ahí que las emisiones totales de THC sean mayores que para los otros dos escenarios tanto en TIER1 como en TIER2. Ver tabla 5.2. La Presión de Vapor Reid juega un papel fundamental en el comportamiento de las emisiones de hidrocarburos totales, ya que están contabilizadas las emisiones evaporativas.

Si se diera el caso de mantener el uso de MTBE5 y se cambia de la norma TIER1 a la TIER2 se observa que las emisiones acumuladas pasarían de 9,156.8 miles de toneladas a 8009 miles de toneladas, mientras que para el caso de sustituir el MTBE5 con E10 bajo la norma TIER1 se tendrían 9,013.9 miles de toneladas; esto indicaría que para el caso de estas emisiones las reducciones mayores se obtendrían de renovar el parque vehicular con unidades que cumplieran con la TIER2, más que realizar un cambio en el combustible, situación que se presenta de manera opuesta que en el caso de las emisiones de CO.

Óxidos de Nitrógeno (NOx)

A diferencia de otros estudios en donde las emisiones aumentan, en ambos casos del uso de E10 y ETBE15 se obtuvieron reducciones en las emisiones de NOx para los escenarios con TIER2, aunque estas reducciones son pequeñas. Para el E10 se obtuvo una reducción de 93.5 miles de toneladas de NOx al año 2030, lo cual representa una reducción del 2.5% de las emisiones acumuladas con respecto al escenario base. En el caso del ETBE15 la reducción obtenida fue de 95.7 miles de toneladas de emisiones acumuladas al año 2030,

que representa una reducción del 2.56% de las emisiones con respecto al escenario base. Ver tabla 5.2. En los escenarios con TIER1 prácticamente no se aprecian diferencias en emisiones con al usar E10 y ETBE15 con respecto al escenario base MTBE5.

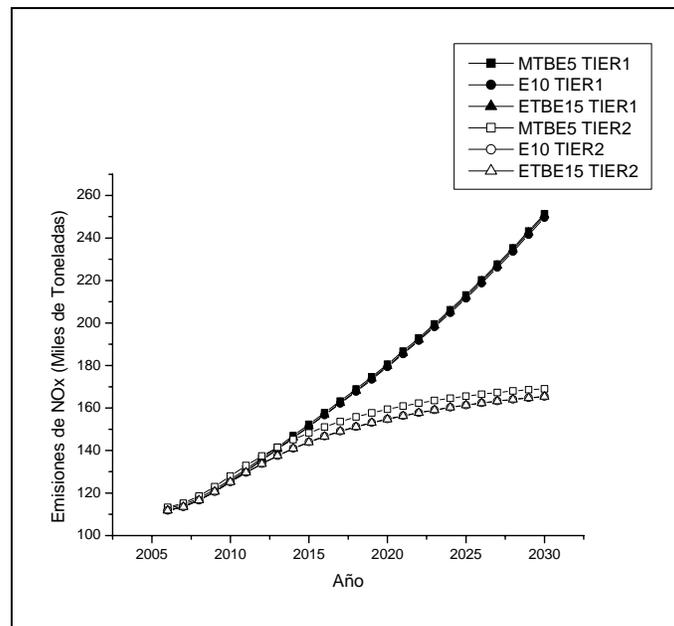


Figura 5.7 Escenario de emisiones de NOx hasta el año 2030

Otros estudios muestran resultados diferentes sobre el impacto en las emisiones de NOx al usar E10. El estudio del IMP [Schifter, 2001] presenta que las emisiones al usar E10 con respecto a MTBE5 aumentaron, de manera que para autos sin control de emisiones, autos con control por oxidación catalítica, y autos por convertidores catalíticos de tres vías los incrementos en emisiones de NOx fueron de alrededor del 0.01%, 1.3% y 17% respectivamente. Una recopilación de estudios sobre el impacto del uso de etanol como oxigenante de las gasolinas [Lynd,1996] presenta que en dos trabajos experimentales, las emisiones de E10 con respecto al uso de gasolinas aumentaron en alrededor del 18-54%. Un estudio para el uso de E10 en la ciudad de Vancouver [Health Canada,1993] determinó que las emisiones de NOx aumentarían en un 1.5% al usar E10 con respecto al uso de gasolina. En otro estudio de la EPA sugiere que los niveles de emisiones de NOx para mezclas E10 varían desde un decremento del 10% hasta un incremento del 5%, con respecto a las emisiones de gasolina [EPA, 2000]. En este trabajo se tuvieron reducciones del 0.72% por lo que los resultados se encuentran dentro del rango de valores encontrados en la literatura.

Las reducciones que se pueden apreciar en las emisiones de NOx se deben principalmente al cambio de la norma TIER1 por la TIER2. Esto era de esperarse ya que como se comentó en el capítulo 4, la norma TIER2 surgió para mitigar las emisiones de ozono, donde la EPA comenta que los NOx son los responsables de la formación de alrededor del 40% del ozono troposférico. Debido a la introducción de la TIER2 se evitarían en general alrededor del 13.55% de las emisiones acumuladas según los resultados del presente trabajo.

Dióxido de Azufre (SO₂)

Las emisiones de dióxido de azufre están determinadas por el contenido de azufre en el combustible. Cabe señalar que para poder utilizar las tecnologías que permiten el cumplimiento de la TIER2 es necesario bajar el contenido de azufre en las gasolinas, ya que este daña los convertidores catalíticos. De tal forma, que la adopción de la norma TIER2, implica necesariamente una disminución en las emisiones de SO₂.

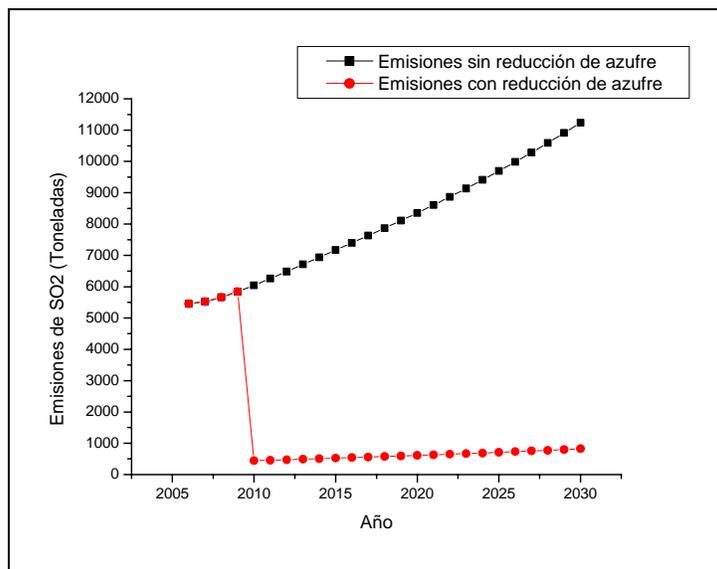


Figura 5.8 Escenario de emisiones de SO₂ hasta el año 2030

Se considera que las reducciones de SO₂ debido al uso de E10 y ETBE15 son muy similares, por lo que podemos ver los beneficios de disminuir los niveles de azufre para poder introducir la norma como en TIER2. La introducción de las nuevas gasolinas con bajo contenido de azufre reducirían las emisiones acumuladas en un 84.7% según los resultados de este trabajo.

Partículas menores a 10 micras (PM10)

En el caso de las emisiones de partículas menores a 10 micras no hay reducciones para el caso del uso de E10 y ETBE15 con la TIER1. Para los escenarios que adoptan la TIER2 se tiene que al usar E10 se reducen las emisiones en un 3.1% con respecto al escenario base, y al utilizar ETBE15 se presenta un decremento del 1.1% en las emisiones. Ver tabla 5.2.

En la mayoría de los estudios sobre los efectos en la contaminación del aire al utilizar el etanol, no se consideran las emisiones de partículas [Lynd, 1996]. Sin embargo, en un libro realizado por la IEA [IEA, 2002] se señala que al mezclar el etanol con la gasolina convencional y con la gasolina reformulada, en ambos casos se presenta un decremento en las emisiones de partículas, aunque no se especifica el porcentaje de reducción. Wang indica que se espera que las emisiones de PM10 sean menores para el uso del etanol que para las gasolinas reformuladas, sin embargo este estudio es de todo el ciclo de vida, donde se toman en cuenta las emisiones liberadas durante la producción de etanol, la producción

de la materia prima, la preparación del combustible, y el uso en los automóviles [Wang, 1996].

La reducción en emisiones acumuladas de PM10 se daría como en el caso de los NOx cuando se va renovando la flota vehicular con autos que cuentan con la tecnología para cumplir con la TIER2. Al igual que con el ozono, la norma TIER2 tiene como otro de sus objetivos el mitigar las emisiones de PM10. Al introducir la norma TIER2 para autos nuevos se tiene que hasta el año 2030 se tiene una reducción en las emisiones acumuladas de un 12.31% que con respecto a la TIER1. Esto se debe a que el azufre contribuye a la creación de partículas.

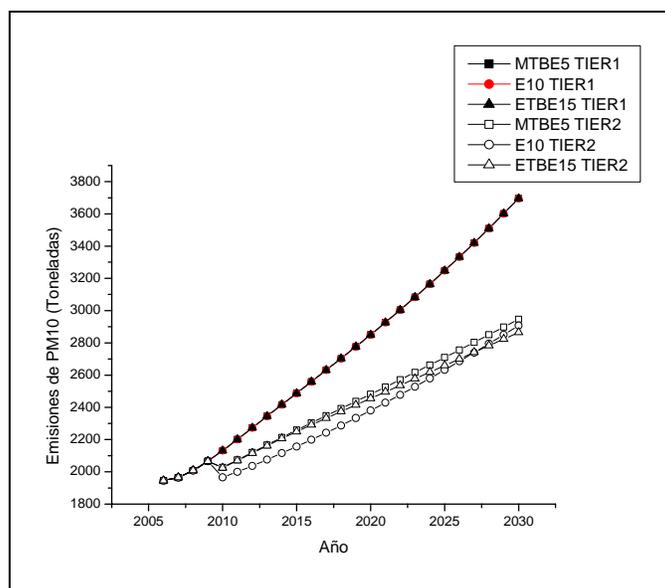


Figura 5.9 Escenario de emisiones de PM10 hasta el año 2030

Benceno

La formulación de las gasolinas, y el contenido de benceno de los combustibles determina en gran parte cuáles serán las emisiones de este tóxico. Según la tabla de propiedades de los combustibles el ETBE tiene el doble de contenido de benceno que los otros dos combustibles, por tanto sus emisiones son más altas que en los otros dos escenarios, tanto bajo la TIER1 como en la TIER2.

Para los escenarios con TIER2 y con el combustible E10 los resultados muestran que se evitan 19.4 miles de toneladas de benceno hasta el año 2030 con respecto al escenario base MTBE5, que representa alrededor del 7.5% de reducción en emisiones acumuladas. No es el caso del ETBE15 en donde las emisiones de benceno aumentan en un 25.2% con respecto al escenario base, lo que sería alrededor de 64.7 miles de toneladas más de benceno con respecto a las emisiones acumuladas del escenario base. Ver tabla 5.2.

Para los escenarios con TIER1 las emisiones de los escenarios alternativos al compararlos con el escenario base son similares en porcentaje que para el caso de haber adoptado la TIER2. Las reducciones de benceno por el uso de E10 son de alrededor del 8.8%, y para el caso del ETBE15 se tiene un incremento del 25.2%.

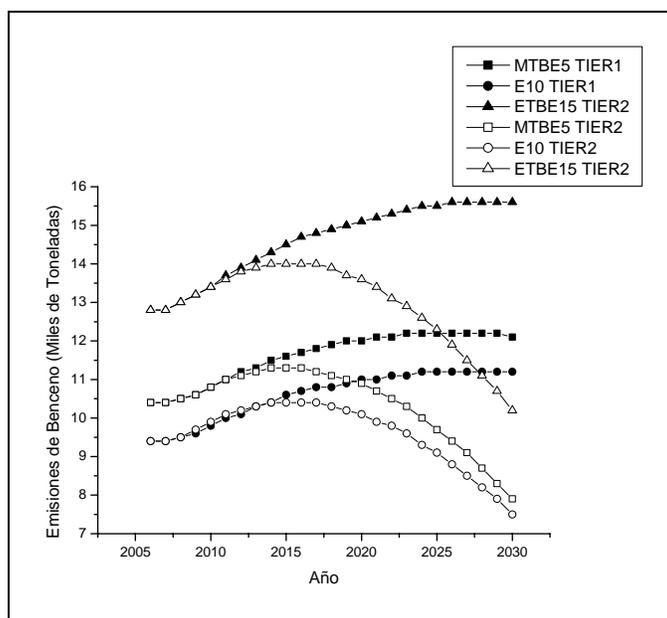


Figura 5.10 Escenario de emisiones de benceno hasta el año 2030

El trabajo del IMP reporta una disminución de las emisiones de benceno del orden del 8% en el uso de E10 comparado con el MTBE5 para los autos sin controles de emisiones [Schifter, 2001]. Para los vehículos con control por oxidación catalítica se muestra una reducción del 28.8% de las emisiones de benceno para el uso de E10 con respecto a el MTBE5 [Schifter, 2001]. Finalmente para los autos con un control de emisiones de TWC presenta que las emisiones de benceno aumentan en un 24% para el uso de E10 con respecto al uso de MTBE5 [Schifter, 2001]. El trabajo de Lynd [Lynd,1996] reporta un decremento en las emisiones de benceno al usar E10, lo mismo que el libro de la IEA cuando compara las mezclas de etanol con gasolina reformulada contra las mezclas de MTBE con gasolina reformulada, aunque no especifica los porcentajes de disminución [IEA, 2002]. En este trabajo las emisiones se encuentran dentro del rango de las emisiones mencionadas en la literatura.

El hecho de sustituir la norma TIER1 por la TIER2 para las emisiones de los autos nuevos implicaría una reducción de aproximadamente el 11% de las emisiones acumuladas cuando se mantiene constante el combustible en MTBE5. Esto representa mayor ahorro en emisiones que el sólo sustituir el MTBE5 con E10 y mantener la TIER1, en donde la reducción en emisiones sólo sería del 8.8%.

Formaldehídos

En este trabajo los resultados de las emisiones de formaldehídos para escenarios con TIER2 fueron de 9,610.2 toneladas para E10, que representa el 11.2% de reducción de emisiones acumuladas con respecto al escenario base MTBE5. En el caso del ETBE15 se evitan 11,969.6 toneladas de formaldehído, que es alrededor del 14% de reducción de emisiones acumuladas con respecto al escenario base. Ver tabla 5.2. Para el caso de los escenarios con TIER1, los resultados en la disminución de emisiones son prácticamente los mismos en porcentaje.

En el caso de introducir la TIER2 manteniendo el combustible MTBE5 se tendrían reducciones en las emisiones acumuladas de alrededor del 7.2% con respecto a las emisiones de MTBE5 y la TIER1.

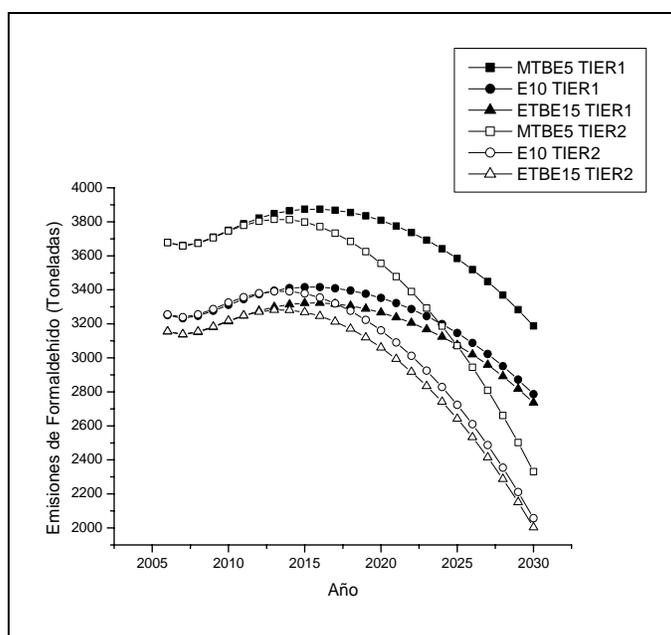


Figura 5.11 Escenario de emisiones de formaldehído hasta el año 2030

Los resultados de otros estudios sobre el comportamiento de las emisiones de formaldehídos por el uso de E10 son diversos. La IEA señala que las emisiones de formaldehído son menores para las mezclas de etanol con gasolina y gasolina reformulada que las emisiones por el uso de la mezcla de MTBE con gasolina y gasolina reformulada [IEA, 2002]. El estudio del IMP [Schifter, 2001] presenta que las emisiones al usar E10 con respecto a MTBE5 aumentaron para dos casos y disminuyeron para uno, de manera que para autos sin control de emisiones y autos con control por oxidación catalítica las emisiones aumentaron en un 27.4% y 98.4% respectivamente, mientras que para vehículos con convertidores catalíticos de tres vías las disminuciones en emisiones de formaldehídos son de alrededor del 24.1%. Lynd comenta en su artículo que los resultados en las emisiones de formaldehído para las mezclas de bajo volumen de etanol son mezclados, es decir, que en algunos aumentan las emisiones y en otros disminuyen [Lynd, 1996], por lo

que no existe un acuerdo sobre que sucede con estas emisiones. En el presente trabajo las reducciones en emisiones por el uso de E10 se encuentran dentro del rango de las reducciones en emisiones reportadas en la literatura.

Acetaldehídos

En este tóxico es en donde se dan las principales diferencias en emisiones por el uso de E10 y el ETBE15, ya que como se aprecia en la figura 5.12, en los escenarios alternativos los resultados muestran un aumento considerable en las emisiones de acetaldehídos respecto al escenario base con MTBE5. Con el combustible E10 las emisiones de acetaldehído aumentan en 33,451 toneladas hasta el año 2030 en caso de usar TIER2. Esto significa un aumento del 224% de las emisiones acumuladas con respecto al escenario base. El escenario de ETBE15 muestra un aumento en emisiones de 23,761 toneladas de acetaldehído, lo que da un aumento en estas emisiones acumuladas del 188.3% con respecto a las emisiones acumuladas del escenario base. Los resultados de los escenarios TIER1 en las emisiones acumuladas son muy similares en porcentaje que en los escenarios con TIER2 cuando se usa E10 y ETBE15. Ver tabla 5.2.

Los resultados con MTBE5 de este trabajo presentan que la introducción de la TIER2 para los autos nuevos tendría el efecto de atenuar las emisiones de este tóxico. Una sustitución de combustible de MTBE5 por E10 o ETBE15 llevaría a aumentar las emisiones del mismo.

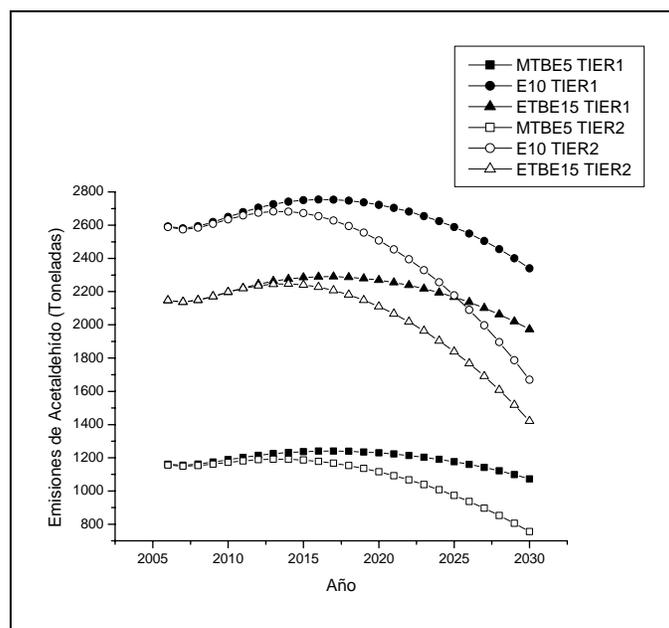


Figura 5.12 Escenario de emisiones de acetaldehídos hasta el año 2030

Existe un acuerdo general en la literatura sobre el efecto en emisiones de acetaldehídos por el uso del etanol mezclado con las gasolinas. El estudio de Health Canada [Health Canada, 1993], señala que existe un aumento en las emisiones de acetaldehídos de alrededor del 10% al usar E10 en lugar de la gasolina convencional MTBE5. El estudio del IMP [Schifter, 2001] muestra incrementos en las emisiones de acetaldehídos para vehículos sin

control de emisiones, para vehículos con controles por oxidación catalítica, y para vehículos con TWC, donde son del orden del 192%, 202% y 247% respectivamente. Todos los estudios recopilados por Lynd muestran que para bajas, medias y altas mezclas de etanol las emisiones de acetaldehído aumentan, de manera que a mayor volumen de etanol en las mezclas, las emisiones de acetaldehídos son mayores también [Lynd, 1996]; de manera que así se explica porque en el presente trabajo se explican menores emisiones de acetaldehídos con el uso de ETBE15, ya que contiene menor volumen de etanol que la mezcla E10, pero al igual que en los otros contaminantes, las reducciones de emisiones por el uso de E10 se encuentran dentro del rango reportado en la literatura..

1,3-Butadieno

El igual que en el caso de los formaldehídos, se puede observar en la figura 5.13 que las emisiones de 1,3-Butadieno van decreciendo a medida que aparecen los autos con nuevos controles de emisiones para cumplir con la TIER2, sin importar el combustible que se esté utilizando. Sin embargo en los resultados de este trabajo se ven reducciones al usar ETBE15 y E10 que con respecto al escenario de MTBE5.

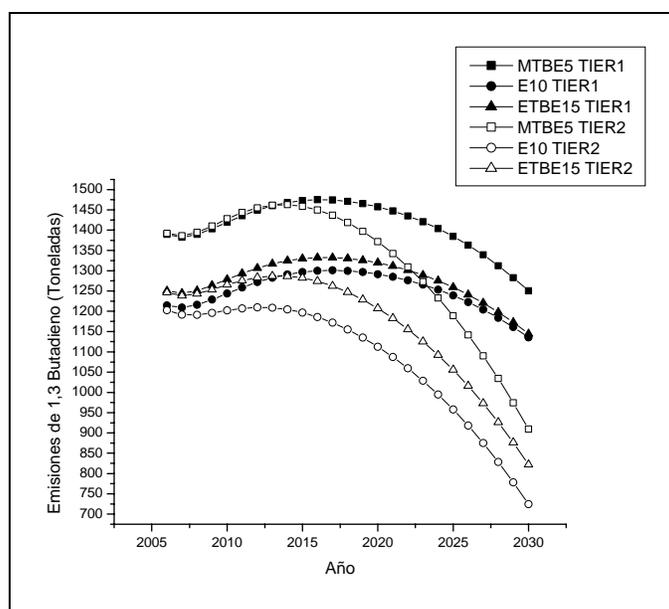


Figura 5.13 Escenario de emisiones de 1,3-Butadieno hasta el año 2030

Las emisiones acumuladas de 1,3 Butadieno tuvieron reducciones para los escenarios alternativos con TIER2. El combustible E10 tiene una reducción de 7,334.5 toneladas de este contaminante, que en porcentaje representa una reducción del 22.3% de emisiones acumuladas con respecto al escenario base. El escenario del ETBE15 muestra una reducción de emisiones acumuladas de 3,311 toneladas, que representa el 10% en reducción de emisiones acumuladas con respecto al escenario base. Ver tabla 5.2. En los escenarios con TIER1, se obtuvo una reducción en emisiones del 11.4% al usar E10, y de 9.5% al usar ETBE15, ambos al ser comparados con el escenario base que usa MTBE5.

En el estudio del IMP [Schifter, 2001] se reportan reducciones en las emisiones de este tóxico al usar E10 comparados con MTBE5, para los autos sin control de emisiones la reducción en emisiones es del 11.8%, para autos con controles por oxidación catalítica las reducciones son de alrededor del 36.4%, mientras que para los autos con TWC las reducciones son de alrededor del 6.7%. El estudio de Health Canada [Health Canada, 1993] reporta reducciones de alrededor del 6% al usar E10 en lugar de la gasolina convencional. La IEA reporta también reducciones en las emisiones de este tóxico [IEA, 2002] lo mismo que los estudios recopilados por Lynd [Lynd, 1996]. Los valores en reducciones de emisiones de este trabajo entra también dentro de los rangos de reducción de emisiones de la literatura.

Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ dependen del contenido de carbono en los combustibles. Estas emisiones fueron calculadas utilizando el consumo total de energía para los diferentes escenarios y la proporción de CO₂ biogénico debido a la presencia de etanol en los combustibles de los escenarios E10 y ETBE15.

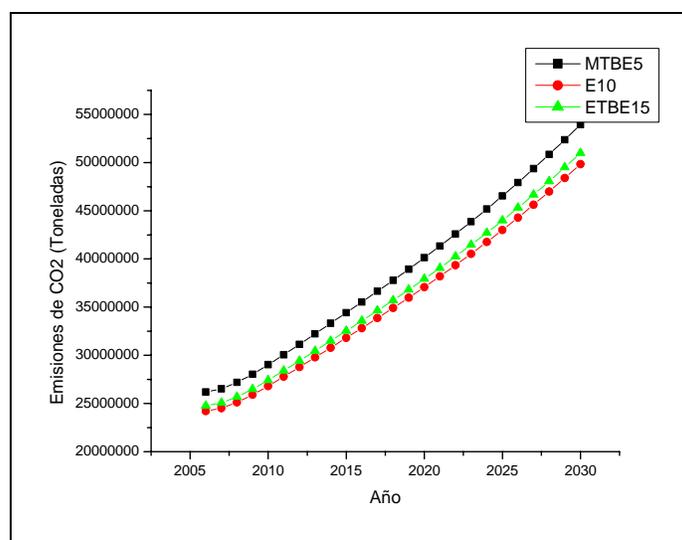


Figura 5.14 Escenario de emisiones de CO₂ hasta el año 2030

Tomando las emisiones acumuladas totales del año 2006 al año 2030 tenemos que para el caso del MTBE5 las emisiones de CO₂ ascendieron a 961,116,809 millones de toneladas, mientras que para el caso del E10 las emisiones son de 888,105,327 millones de toneladas, y finalmente para el ETBE15 las emisiones son de 908,455,795 millones de toneladas.

En la tabla 5.2 se resumen los resultados obtenidos por los escenarios.

	Emisiones Acumul. de MTBE5 hasta 2030 TIER1 (Miles Ton)	Emisiones de E10 hasta 2030 TIER1 (Miles Ton)	Emisiones de ETBE15 hasta 2030 TIER1 (Miles Ton)	% Emisiones evitadas hasta 2030 por E10 con respecto a MTBE5 TIER1	% Emisiones evitadas hasta 2030 por ETBE15 con respecto a MTBE5 TIER1	Valor min y valor max de la literatura en reducciones por uso de E10	Emisiones de MTBE5 hasta 2030 TIER2 (Miles Ton)	Emisiones de E10 hasta 2030 TIER2 (Miles Ton)	Emisiones de ETBE15 hasta 2030 TIER2 (Miles Ton)	% Emisiones evitadas hasta 2030 por E10 con respecto a MTBE5 TIER2	% Emisiones evitadas hasta 2030 por ETBE15 con respecto a MTBE5 TIER2
CO	75,874.4	64,174.2	73,502.3	-15.42%	-3.13%	-2.9 ¹ % a -28.3 ¹ %	70,769.80	59,672.00	68,548.30	-15.68%	-3.14%
THC	9,156.8	9,013.90	10,065.4	-1.56%	9.53%	0 ¹ % a -20 ¹ %	8009.10	7,690.90	8,598.60	-3.97%	9.53%
NOx	4,323.20	4,292.00	4,303.00	-0.72%	-0.47%	-10 ³ % a 54 ⁴ %	3737.20	3643.70	3641.50	-2.50%	-2.56%
SO ₂	200.17	200.17	200.17	0.00%	0.00%	-----	30.06	30.06	30.06	0.00%	0.00%
PM10	68.35	68.35	68.35	0.00%	0.00%	-----	59.93	58.06	59.25	-3.12%	-1.13%
Benceno	290.40	264.90	365.10	-8.80%	25.20%	-28.8 ¹ % a 24 ¹ %	258.70	239.30	323.40	-7.50%	+25.25%
Formaldehído	92.13	81.12	79.02	-12.00%	-14.23%	-24 ¹ % a 98.4 ¹ %	85.49	75.88	73.52	-11.24%	-14.00%
Acetaldehído	29.73	65.85	54.87	221.50%	184.60%	192 ¹ % a 247 ¹ %	26.90	60.35	50.66	224.35%	188.32%
1-3 Butadieno	35.25	31.23	31.91	-11.42%	-9.48%	-36.4 ¹ % a -6 ¹ %	32.86	25.53	29.55	-22.32%	-10.08%
CO ₂	961,116 E6	888,105 E6	908,455 E6	-7.60%	-5.48	---	961,116 E6	888,105 E6	908,455 E6	-7.60%	-5.48

Fuente: 1=Schifter, 2= Mayotte, 3= EPA, 4 = Lynd

Tabla 5.2 Comparativo de diferencias en las emisiones de los escenarios E10 y ETBE15 con respecto al escenario base MTBE5 (el signo menos representa reducciones).

En general puede apreciarse que las principales ventajas de oxigenar las gasolinas con etanol o ETBE se encuentran en las emisiones de CO. Para el caso de las emisiones de NOx y THC, los cuales son los principales responsables de la formación de ozono [Molina, 2002], este trabajo presenta que un cambio en los combustibles no traerá disminuciones apreciables en estos contaminantes, resultando en que una renovación de la flota vehicular con autos con las nuevas tecnologías de control de emisiones sería la opción para deducir las emisiones de estos contaminantes. De igual forma sucede con las emisiones de PM10 y SO₂, dónde la disminución en sus emisiones se daría al lograr la introducción de gasolina combustibles con un bajo contenido de azufre. Para el caso de las emisiones tóxicas se observa que se suman los beneficios de renovar la flota vehicular y de oxigenar los combustibles con etanol o ETBE, a excepción de las emisiones de acetaldehídos, las cuales aumentan en aproximadamente el doble cuando se oxigenan las gasolinas con etanol, sin embargo las tecnologías de control de emisiones ayudarían a atemperar estas emisiones. Las emisiones de CO₂ se reducen al incorporar E10 y ETBE15 al ser combustibles que contienen etanol.

Demanda de etanol para la ZMVM

Con los resultados de la energía consumida por los vehículos a gasolina entregada por la construcción de los escenarios se obtuvo la cantidad necesaria de etanol por año que se requeriría para poder producir las mezclas E10 y ETBE15. Ver figura 5.15.

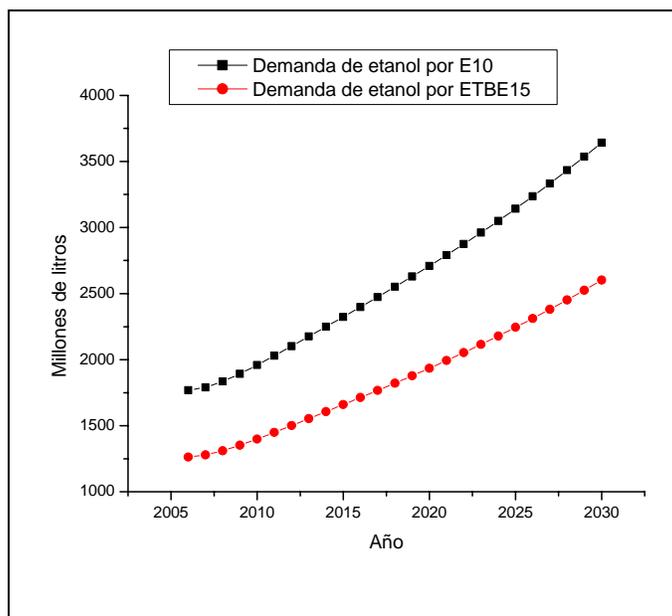


Figura 5.15 Demanda de etanol por año para oxigenar las gasolinas de la ZMVM

Para lograr cumplir con dicha demanda de etanol, se calcularon las superficies de tierra que son necesarias cultivar. Estas superficies se calcularon empleando los rendimientos presentados en el capítulo 2.

La figura 5.16 muestra la superficie necesaria de caña de azúcar para cumplir con la demanda de E10 y ETBE15. Para evitar una polarización entre sembrar para producir energía o para producir alimentos, se establecerá el criterio de utilizar la menor cantidad de tierra cultivable posible para producir energía, de manera que se tenga mayor disponibilidad de tierras para otros sectores prioritarios como la producción de alimentos. La mejor opción para el caso de la caña de azúcar sería el obtener el etanol a partir del jugo de caña, sin ninguna producción de azúcar. Desde luego, que bajo otros puntos de vista, quizá no sea conveniente el dejar de producir azúcar, por lo que tendrían que considerarse las otras opciones como 40% producción de azúcar y 60% producción de etanol. Lo mismo ocurre con el caso del ETBE15, aunque debido a que el ETBE15 contiene un menor volumen de etanol que el E10, siempre se requerirán menos tierras para satisfacer su demanda.

Para el cálculo de la superficie necesaria (H) por método de producción de etanol se utiliza la ecuación 5.6

$$H = (\text{Demanda/Rendimiento Fabrica}) / \text{Rendimiento Campo} \quad (5.6)$$

Donde

Rendimiento Fabrica = litros de etanol por tonelada de materia prima

Rendimiento Campo = tonelada de materia prima por hectárea de cultivo

Demanda = Litros de etanol demandados para satisfacer escenarios de E10 y ETBE15

Se debe notar que satisfacer la demanda de etanol del escenario E10 para el año 2007 se puede lograr sin necesidad de cultivar más tierras con caña, ya que para hacer la mezcla E10 con etanol a partir del jugo de caña se requerirían poco más de 400 mil hectáreas, contra las 680 mil que se cultivan actualmente. Sin embargo esto implicaría que se dejara de producir azúcar con la caña de esas 400 mil hectáreas. En el caso de usar el bagazo de caña para la producción de etanol tampoco se tendría que ampliar el área de cultivo ya que se necesitarían alrededor de 514 mil hectáreas para lograr la mezcla E10 y no se tendría que dejar de producir azúcar. Sin embargo, aún no es económicamente competitivo el costo de producción de etanol a partir de bagazo.

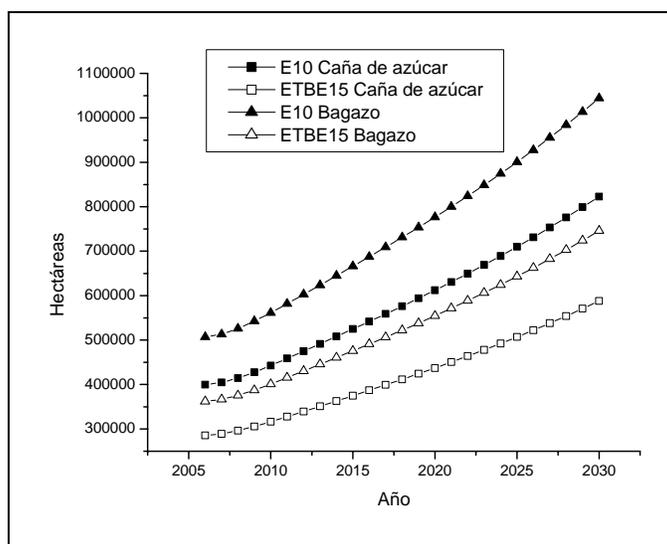


Figura 5.16 Superficie cultivada necesaria para satisfacer los escenarios E10 y ETBE15 con caña de azúcar.

En la figura 5.17 se presentan las superficies de cultivo de maíz para satisfacer la demanda de etanol de los escenarios E10 y ETBE15. En caso de que se pudiera utilizar el maíz para la producción de etanol en lugar de otros usos, para satisfacer el escenario E10 en el año 2007 se requerirían alrededor de 2 millones 460 mil hectáreas de las cerca de 8 millones y medio de hectáreas que se cultivan actualmente. Para satisfacer el escenario de E10 en el año 2007 con rastrojo de maíz se requerirían alrededor de 4 millones 175 mil hectáreas de cultivo. Se debe tener en cuenta que el rastrojo de maíz es un desecho de la producción del maíz, por lo que no sería necesario un cultivo de maíz para la producción de energía sino que se aprovecharían los desechos de la producción de este grano. También cabe señalar que en caso de aumentarse la superficie cultivada de maíz o los rendimientos en campo para lograr satisfacer la demanda nacional sin importaciones, estaríamos contando

automáticamente con una mayor potencial de producción de etanol a partir de este material lignocelulósico.

Para satisfacer la demanda de etanol en el año 2007, también se podría usar la madera de 1,420 a 3,933 hectáreas de plantaciones energéticas. Pero al igual que con el bagazo de caña y el rastrojo de maíz la tecnología de obtención de etanol a partir de madera aún no es económicamente competitiva con la producción de etanol a partir de caña de azúcar y de la producción de etanol a partir de maíz.

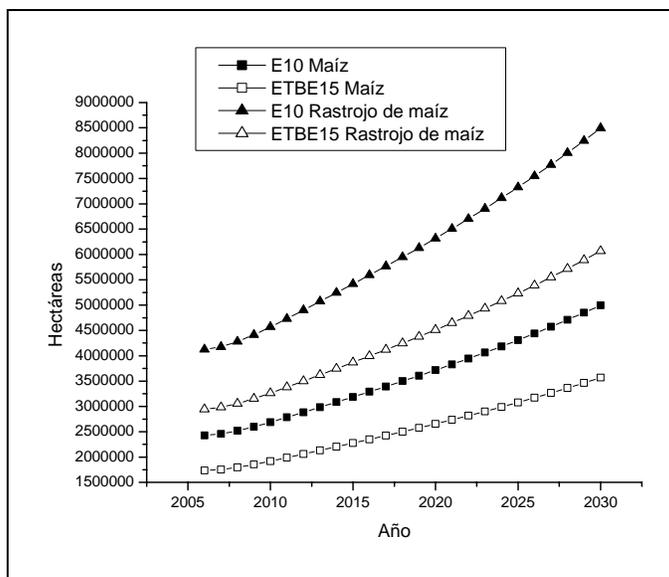


Figura 5.17 Superficie cultivada necesaria para satisfacer los escenarios de E10 y ETBE15 con etanol a partir de maíz y rastrojo de maíz (Rendimiento de 2.8 ton/ha).

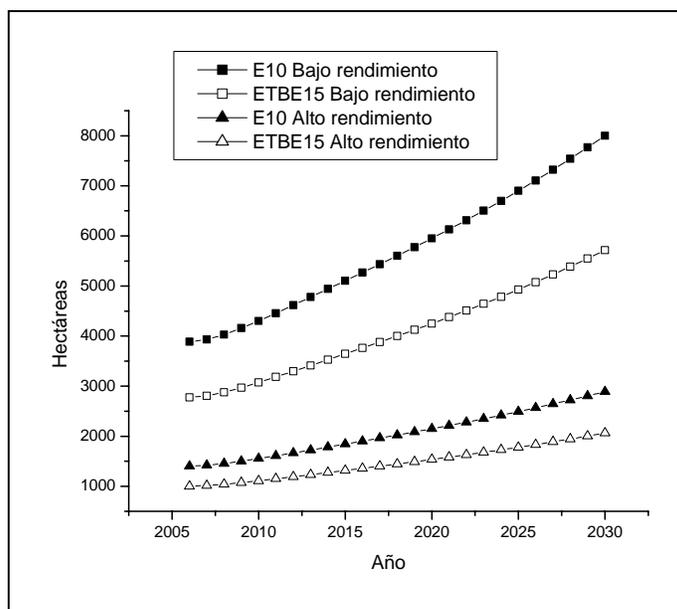


Figura 5.18 Superficie cultivada necesaria para satisfacer los escenarios de E10 y ETBE15 con etanol a partir de madera de plantaciones energéticas.

Conclusiones

Basándose en el criterio de menores emisiones en el uso, los resultados del presente trabajo señalan que el escenario ambientalmente mejor es el que utiliza E10 y que a su vez ha asumido las tecnologías de control de emisiones para cumplir con la norma TIER 2 (presenta las mayores reducciones en emisiones acumuladas de CO, THC, Benceno, 1,3 butadieno, PM10 y CO₂). A diferencia del escenario E10 con TIER 1 el escenario E10 con TIER 2 mitiga las emisiones de acetaldehídos, las cuales como se observó se incrementan al incluir mayores volúmenes de etanol en la mezcla. De igual forma al incluir la TIER 2 además del uso de E10 se reducen las emisiones de NO_x, emisiones sobre las que existen mayores desacuerdos en cuanto a su comportamiento cuando se usa en motores convencionales la mezcla gasolina-etanol. No se debe perder de vista que las normas TIER 2 fueron diseñadas para la reducción de emisiones de NO_x y THC. Las normas TIER 2 así mismo disminuyen las emisiones de SO₂ y PM10 al requerirse combustibles de bajo azufre para que las nuevas tecnologías de convertidores catalíticos puedan ser usadas. Se debe tener presente que otros usos del etanol que empiezan a expandirse, como pudiera ser en autos Flex-fuel en la forma de E85 (el cual no entra en el alcance de este trabajo), podría tener emisiones menores aún, ya que se eliminarían gran parte de los SO₂ (sin necesidad de quitar azufre en las gasolinas), del benceno, así como posibles decrementos en las emisiones de CO.

Los resultados en emisiones del presente trabajo deben deberán ser comparados con otros estudios experimentales que consideren diferentes tipos de vehículos, ya que el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) hizo una evaluación de las emisiones al oxigenar las gasolinas con etanol, pero sólo se consideraron los vehículos tipo ligeros (LDGV). De igual forma en este estudio del IMP sólo se consideró la introducción de la norma TIER 1. También cabe señalar que es importante el darse cuenta que cualquier acción referente al cambio de un combustible para mejorar la calidad del aire, debe considerar el monitoreo de los contaminantes y tóxicos, de tal forma que pueda conocerse de mejor forma el impacto real que se tiene en la calidad del aire. Actualmente no se monitorean los formaldehídos, ni tampoco los acetaldehídos, por lo que sería conveniente hacerlo independientemente de si se da o no un cambio en los combustibles.

Para poder lograr las mezclas E10 del escenario con menores emisiones y poniendo como base el año 2010, se requerirían 1,959 millones de litros de etanol en ese año. Esta producción equivaldría a una superficie de 443,000 hectáreas cultivadas con caña de azúcar (alrededor del 65% de la superficie actual), considerando que toda la caña se usa para la producción de etanol. La misma producción de etanol se podría lograr si se cultivarán 2,688,000 hectáreas de maíz para este fin (alrededor del 32% de la superficie actual cultivada con maíz), con los rendimientos actuales en la producción de maíz (2.8 ton/ha). Debemos tener en consideración la situación actual de déficit de maíz que hay en México, lo que nos hace pensar en buscar la autosuficiencia en producción para el consumo interno antes de buscar producir etanol a partir de maíz.

Para suministrar esta misma demanda de etanol por el escenario E10 en el año 2010 se requeriría el bagazo de caña de 561,592 hectáreas de cultivo de caña de azúcar, o bien el rastrojo de 4,568,000 hectáreas de cultivo de maíz, o la madera de entre 1,554 a 4,302 hectáreas de plantaciones energéticas. Actualmente la tecnología de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica no se encuentra lo suficientemente desarrollada para ser económicamente competitiva con la producción de etanol de caña de azúcar o de maíz, sin embargo no se debe perder de vista la importancia que puede tener en el mediano y largo plazo, sobre todo al considerar el gran potencial que existe en estos recursos para la producción de etanol (de 26,025 a 39,154 millones de litros anuales) y que los recursos lignocelulósicos no compiten en su uso como alimento.

Por los motivos señalados anteriormente parece ser que la mejor opción en el corto plazo es obtener el etanol a partir del jugo de la caña de azúcar. Para lograr que el etanol tenga un costo de producción lo más competitivo posible con la gasolina se debe en principio mejorar el costo de producción de la caña de azúcar, ya que como se estudio en el capítulo 3, este representa poco más del 60% del costo total de producción del etanol. Esto podría lograrse optimizando el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas; también es importante la investigación de nuevas variedades de caña que mejor se adapten a las condiciones del lugar donde se van a cultivar. De igual forma se necesita una optimización en la organización de los procesos de cosecha y transportación a la fábrica. Al igual que en el campo, se debe buscar la reducción de costos en la fábrica de etanol, el uso del bagazo de caña ayuda a eliminar el uso de combustibles fósiles para la generación de calor y electricidad del proceso, lo cual mejora el costo de producción debido a que el costo de la energía es parte importante del costo de producción del etanol [Goldemberg, 1999]. Al usar el bagazo para la producción de calor y electricidad se estaría mejorando el balance energético del etanol, lo cual contribuiría a hacerlo energéticamente sustentable, ya que como se vio en el capítulo 2, el uso de los residuos de la producción puede ser la diferencia entre que un proceso sea energéticamente sustentable o no. Aunado a esto, se podría vender el excedente de electricidad que no se consume en las destilerías, lo cual representaría un ingreso extra para la fábrica. En México actualmente solamente dos ingenios azucareros son sustentables energéticamente [Cortés, 2006], por lo que se requiere una inversión en infraestructura para hacerlos autosustentables, además de las posibles inversiones para las destilerías.

En lo que respecta a la infraestructura necesaria para lograr la mezcla E10 al mismo tiempo de introducir las tecnologías de control de emisiones para cumplir con la norma TIER 2; en principio para hacer la mezcla E10, PEMEX requeriría transportar el etanol en autos tanque desde la fabrica de etanol hasta la Terminal de Almacenamiento, donde sería mezclado con la gasolina. Para esto se requieren rediseñar los tanques de los vehículos de transporte de etanol para no permitir el contacto del agua del ambiente con el etanol. También se requeriría nueva infraestructura para mezclado e instalaciones para recibir y descargar cargamentos de etanol. De igual forma en las estaciones de servicio se deberán remplazar y/o adecuar los tanques y sistemas que no sean compatibles con gasolina oxigenada con etanol. Al mismo tiempo las refinerías tienen que modificar su infraestructura y modo de operación para producir bases de gasolina Pemex Premium y Pemex Magna de baja presión de vapor. Se requiere una inversión de 7 a 9 millones de dólares por Terminal de almacenamiento y distribución [Favela, 2007]. En el caso de las modificaciones en PEMEX

para la producción de gasolinas de bajo azufre para poder utilizar las nuevas tecnologías para el control de emisiones y cumplir con la TIER 2, es necesario reconfigurar las refinerías, lo cual representa una inversión de \$4,683 millones de dólares [INE, 2006].

De acuerdo a las experiencias Brasileña y Estadounidense se pueden obtener recomendaciones para la introducción del etanol como oxigenante en las gasolinas que se consumen en la ZMVM. Las recomendaciones se describen a continuación:

- Las principales acciones para la introducción del etanol como oxigenante de las gasolinas o como combustible para los vehículos tanto en Brasil y Estados Unidos se encuentran principalmente en los mandatos hacia las mezclas de gasolina-etanol y en los incentivos fiscales que logren que el precio del etanol pueda competir con la gasolina. Para lograr las acciones anteriores es de vital importancia la participación del gobierno.
- Al igual que lo hizo Petrobrás en Brasil se debe buscar que PEMEX compre o garantice la compra del alcohol producido. Una obligación a PEMEX a comprar el etanol producido en México debe considerar que se tendrían que otorgarle subsidios al etanol para que el costo sea competitivo con la gasolina, dichos subsidios tendrían que buscar reducirse al máximo al mejorar los costos de producción del etanol.
- En caso de que la producción de etanol se de en el esquema de producción de azúcar y etanol, entonces se deben tomar las medidas necesarias para garantizar el abasto de etanol en un escenario de altos precios del azúcar.
- Debido a la situación actual de déficit en la producción de maíz para consumo interno (sobre todo de maíz amarillo el cual por lo general no se usa para consumo humano), no parece ser conveniente en el corto plazo el usar al maíz como materia prima para la producción de etanol en México, ya que sería preferible el lograr la autosuficiencia en la producción y mejorar la balanza comercial del país. Para poder revertir la situación de importaciones de maíz es importante reconocer el potencial que existe en mejorar el rendimiento en campo de la producción. Como se comentó anteriormente una mejora en el rendimiento promedio nacional a 5 ton/ha eliminaría las importaciones, e incluso se tendrían excedentes de maíz que pudieran venderse a otros países, o bien, usarse para producir etanol.
- Es necesario reconocer el potencial que existe para la producción de etanol a partir de recursos lignocelulósicos, los cuales tienen la ventaja de no competir directamente como alimentos. Al usar estos recursos para la producción de etanol se podría sustituir del 34% al 59% del consumo de gasolina en el 2006. Debido a que la tecnología aún no se encuentra completamente desarrollada para hacer competitiva económicamente la producción de etanol a partir de estos recursos, es importante el invertir en investigación de manera que se pueda contar con tecnología propia, sin tener que recurrir a transferencia de tecnología de otras partes.
- Al igual que como lo ha hecho Estados Unidos sería recomendable una sustitución paulatina de gasolina por etanol, ya que llevar a cabo una penetración y producción a gran escala podría traer situaciones sociales conflictivas y daños ambientales, tal y como ocurrieron en Brasil [Kojima, 2005].
- El gobierno podría aparecer como un actor importante en la promoción del uso de etanol pudiendo usar mezclas de gasolina-etanol en la flota vehicular oficial.

Referencias

- Aguillón, J. Estudio del potencial energético de diversos derivados de la caña de azúcar en el ingenio Motzorongo en el estado de Veracruz. 30 Semana nacional de energía solar. ANES. 2006.
- ANL. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory. Fuel-Cycle Emissions for Conventional and Alternative Fuel Vehicles: An Assessment of Air Toxics. USA. 2000.
- Bechtold, R. Alternative Fuels Guidebook: Properties, storage, dispensing and vehicle facility modifications. SAE International. USA. 1997.
- Beer, T.; Grant, T.; Brown, J.; Edwards, Nelson, P.; Watson, H.; Williams, D. Life-cycle emissions analysis of alternative fuels for heavy vehicles. CSIRO Atmospheric Research Report. Australia. 2000.
- Blackaller, C. Agroindustria de la caña de azúcar: el reto de la productividad y la diversificación. Unión Nacional de Cañeros. 2005.
- Boyle, G. Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future. Oxford, Oxford University Press / The Open University. UK. 2003.
- Boyle, G. Renewable Energy. Power for a sustainable future. Oxford University Press. 1996.
- BP. Statistical Review of World Energy. 2005
- California Energy Comisión. Véase:
<http://www.ethanolrfa.org/objects/documents/122/biomassinca.pdf>. 2001.
- Cámara de Diputados. Comisión de Agricultura y Ganadería de la LIX Legislatura del Congreso de la Unión y miembros de los grupos parlamentarios de Acción Nacional, Revolucionario Institucional, y de la Revolución Democrática. Iniciativa de Ley de Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos. México. 2005.
- Cardona, C.; Sánchez, O. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. Energy. ELSEVIER. 2005.
- CEDRSSA. Balance y expectativas del campo mexicano. 2006.
- Clean Fuels Development Coalition. Ethanol Fact Book. 2003.
- COMMEND (Community for Energy, Environment and Development. Véase:
<http://www.energycommunity.org/default.asp?action=47>

- Cortés, R. Caña de azúcar: Energía del futuro. Presentación en la 30 Semana Nacional de la Energía Solar. Veracruz. México. 2006.
- DOE. Departamento de Energía de Estados Unidos. Página de cálculo de rendimiento en conversión de etanol para materiales lignocelulósicos. Véase: http://www1.eere.energy.gov/biomass/ethanol_yield_calculator.html. 2006.
- DOE. Departamento de Energía de Estados Unidos Véase: www.eere.energy.gov/afdc/afv/eth_vehicles.html. 2007.
- DOF. Diario Oficial de la Federación .2005.
- DSD Group. Study Report on Bio-ethanol production in LDC's. 2005.
- Enriquez, M. "¿Representa el etanol una alternativa viable para la agroindustria de la caña de azúcar?", en Revista *Ingenio*, C.N.I.A.A. 1998.
- Enriquez, M. Producción de etanol anhidro en ingenios azucareros. Véase: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3714/2/artmanuelenriquez.pdf>
- EPA MOBILE6. Véase: http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/trng5day/man_day1.pdf. 2001.
- EPA. Assessment of potencial health risk of gasolina oxygenated with Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE). Véase: <http://www.epa.gov/oust/mtbe/mtbe1193.pdf>. 1993.
- EPA. Clean Alternative Fuels: Ethanol Fact Sheet. U.S. Environmental Protection Agency. 2000.
- EPA. Green book. Véase: <http://epa.gov/air/oaqps/greenbk/index.html>. 2007.
- EPA. Regulatory Impact Analisis – Control of Air Pollution fot New Motor Vehicles: Tier 2 Motor Vehicle Emissions Standards and Gasoline Sulfur Control Requirements. 1999.
- EPA. Véase: <http://www.epa.gov/air/espanol/transporte/sinopsis.html>. 2006.
- Farell, A. et al. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *SCIENCE*. Enero. Vol. 311. 2006.
- Favela, R. Cambios a la infraestructura y operaciones de PEMEX Refinación para formular gasolinas con etanol. Seminario sobre biocombustibles. Presentación oral. México. 2007.
- Gnansounou, E.; Dauriat, A.; Wyman, C. Refinign sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Bioresource Technology* 96. 985-1002. ELSEVIER. 2005.

- Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente. Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México. 2006.
- Goldemberg, J.; Moreira, R. The alcohol program. *Energy Policy* 27, 229-245. 1999.
- Goldemberg, J. Ethanol for a Sustainable Future. *Science*. Vol 315. 808-810. 2007.
- Graboski, M. Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Etanol. Prepared for the National Corn Growers Association. 2002.
- Granados, E. Cálculo de las emisiones producidas por el uso de etanol como oxigenante en la gasolina que se consume en la ZMCM. Tesis para el grado de maestría. Facultad de Química. UNAM. 2001.
- Hall, D.; Grassi, G.; Scheer, H. Biomass for energy ,and industry. Ponte Press. 1994.
- Health Canada Expert Panel Workshop: Potential Health Effects of Ethanol-Blend Gasoline. Summary Report May 12-13, 2003.
- Herrera, S. Bonkers about biofuels. *Nature*. Vol. 4 Number 7. 2006.
- Hill, J. et al. Environmental economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *PNAS*. 30. Vol. 103. 2006.
- IATP. Institute for Agriculture and Trade Policy. Water Use by Ethanol Plants, Potential Challenges. USA. 2006.
- IEA. Biofuel for Transport, an international perspective. 2004.
- IEA. Energy Balances for Non-OECD Countries. 2004a.
- IEA. Transportation and energy. Vease <http://www.iea.org/textbase/work/2002/WSSD/transportation.pdf>.
- IEA. World Energy Outlook Energy. 2004b.
- IMT. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Manual Estadístico del Sector Transporte 2004. 2004.
- INE, SEMARNAT, PEMEX refinación. Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles. México. 2006.
- IPCC. Cambio Climático 2001. Tercer Informe de Evaluación. La base científica. OMM. PNUMA. 2001.

- Islas, J.; Hernández, H.; Manzini, F.; Macías, P. Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (análisis y propuesta). Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. México. 2004.
- Kojima, M.; Jonson, T.; Potencial for Biofuels for Transport in Developing Countries. World Bank. 2005.
- Lynd L. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: Technology, Economics, the Environment, and Policy. *Annu. Energy Environ.* 1996. 21:403-65.
- Malsa, J.; Freire, F.; Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy* 31. 3362-3380. 2006.
- Martínez, A. Datos presentados en una conferencia en el CIE de la UNAM. 2005.
- Mayotte, S. C.; Lindhjem, C. E.; Rao, V.; Sklar, M. S. SAE Technical Paper Series No. 941973; Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1994.
- Mayotte, S. C.; Lindhjem, C. E.; Rao, V.; Sklar, M. S. SAE Technical Paper Series No. 941974; Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1994.
- McAloon, A.; Taylor, F.; Yee, W. Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks. NREL. 2000.
- Mielenz, J. Ethanol production from biomass: technology and current commercialization status. *Current Opinión Microbiology.* 4, 324-329. 2001.
- Miklos.; Tello. Planeación prospectiva, una estrategia para el diseño del futuro. Centro de Estudios Prospectivos Fundación Javier Barros Sierra y Limusa Noriega Editores, México, 1998.
- Molina, M. Air quality in the México Megacity. And integrated assessment. Kluwer academic Publishers. 2002.
- Morris, D. The Carbohydrate Economy, Biofuels and the Net Energy Debate. Institute for Local Self-Reliance. USA. 2005.
- Nakicenovic, N et al. Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. Vienna University of Technology, International Institute for Applied Systems Analysis. International Conference within Austrian EU Presidency Energy Paths-Horizon 2050, Vienna. 1998.
- NIST Véase: <http://webbook.nist.gov/>
- NOM-042-SEMARNAT-2003. México. 2003.

- Patzek, T. Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6):519-567. 2004.
- PEMEX. Indicadores Petroleros. Véase: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionID=2&catID=160&subcatID=244>. 2007.
- Perlack, R.; Turhollow, A. Assessment of options for the collection, handling and transport of corn stover. Oak Ridge National Laboratory. USA. 2002.
- Petrobras. Véase: <http://www2.petrobras.com.br>. 2006.
- Pimentel, D.; Patzek, T. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Petrobras. Véase: <http://www.menergia.gov.ec/secciones/archivos>. 2007.
- Ponciano, G. Cáncer Pulmonar y Contaminación atmosférica. ¿Existe una asociación? Riesgos ambientales para la salud en la ciudad de México. Programa Universitario de Medio ambiente. México. 1996.
- Poulton, M. *Alternative fuels for road vehicles*. Computational Mechanics Publications. UK. 1994. Production Using Soybean and Sunflower. USA. 2005.
- Radian Internacional. Manuales del programa de inventarios de emisiones de México. Volumen VI. Desarrollo de inventario de emisiones de vehículos automotores. 1997.
- Rappo, S. ¿La expropiación resuelve la crisis azucarera? Nuevos y viejos conflictos. Aportes: Revista de la facultad de economía de la BUAP. Número 19, Año VII. 2001.
- Roehr, M. The biotechnology of ethanol: Classical and future applications. Wiley-VCH. Germany. 2001.
- Masera, O. et al. Libro blanco de la bioenergía en México. La bioenergía como catalizador para el desarrollo sustentable. Comisión Nacional Forestal. 2005.
- RFA (Renewable Fuels Association). Véase: <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>
- RFA. Renewable Fuels Association: Homegrow for the homeland Industry Outlook 2005
- SAGARPA, Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera. Véase <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>. México. 2005.
- Saha, B.; Woodward, J. Fuels and chemicals from biomass. American chemical society. USA. 1997.
- Sánchez, S. Objetivos y metas de la fase III del INEM. SEMARNAT. 2004.

Schaeffer, R. Indicators for Sustainable Energy Development in Brazil. Internacional Energy Agency, IEA Paris, 26 April 2006

Schifter I.; Vera, M.; Díaz, L.; Guzman, E.; Ramos, F.; Lopez – Salinas, E. Environmental Implications on the Oxygenation of Gasoline with Ethanol in the Metropolitan Area of Mexico City. Environmental Science & Technology vol. 35, No. 10, 2001 / 9 1893-1901. 2001.

SMA. Secretaría del Medio ambiente. Inventario de emisiones a la atmósfera Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2000. México. 2001.

SMA. Secretaría del Medio ambiente. Inventario de emisiones a la atmósfera Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2002. México. 2003.

SEDESOL. Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. 1999.

SEMARNAT. Importancia de la reducción del contenido de azufre en gasolina y diesel. Presentación. 2004.

SEMIP. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. Programa Mexicano de Etanol como Aditivo de la Gasolina. México. 1988.

SENER. Balance nacional de energía 2004. México. 2005.

Stanford University. Véase:

<http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/E85paperEST0207.pdf>

Visión Engineer. Véase:

www.forum.europa.eu.int/Public/irc/env/aop2wg7/library?l=/working_reports/section_etbe_gasoline/_EN_1.0_&a= . 1995.

Wang, M. The Debate on Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Fuel Ethanol. Argonne National Laboratory. USA. 2005.

White House. Véase: <http://whitehouse.gov/news/releases/2007/01/20070123-2.html>. 2007.

Wooley, R.; Ruth, M.; Sheehan, J. Ibsen, K. Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios. NREL.1999.

Worldwath Institute. Biofuels for transportation: Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century. Extended Summary. 2006.

Wyman, C. Biomass Ethanol: Technical progress, opportunities, and commercial challenges. Energy Environ. 24:189-226. 1999.

Glosario

Aire. Fluido gaseoso que forma la atmósfera de la tierra, que está compuesto en 21% oxígeno, 79% nitrógeno y porciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica.

Antropogénicas. Que son debidas a las actividades del hombre.

Aromáticos. Componentes de alto índice de octano que poseen un anillo de benceno en su estructura molecular.

Atmósfera. Capa gaseosa que rodea la tierra.

Bacteria. Organismos microscópicos esencialmente unicelulares.

Benceno. Uno de los componentes básicos del grupo de los aromáticos. Tiene alto valor en la industria de la transformación.

Biomasa. Cualquier material orgánico que es renovable, como las cosechar agrícolas y sus residuos, la madera, la fauna, las plantas acuáticas, y que se emplean para producir energía.

Catalizador. Sustancia que se añade a una reacción química con el fin de facilitarla o llevarla a cabo.

Celulasas. Preparaciones enzimáticas diseñadas para hidrolizar celulosa, y compuestos similares tales como la hemicelulosa.

Celulosa. Sustancia orgánica presente en las membranas de las células vegetales.

Concentración de una sustancia en el aire. Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen del aire en la cual está contenida. }

Concentración Máxima Permisible. Concentración de una sustancia química que no debe excederse bajo ninguna circunstancia en la exposición.

Contaminación ambiental. Presencia en el medio ambiente de uno o más contaminantes o cualquiera de sus combinaciones que perjudican o resultan nocivas a la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna o que degradan la calidad del aire, agua, suelo o recursos naturales en general.

Convertidor catalítico. Instrumento que sirve para transformar una sustancia por medio de la acción del calor y de un catalizador.

Degradación. Proceso de descomposición o desgaste de la materia, por medios físicos, químicos o biológicos.

Ecosistema. Unidad estructural, funcional y de organización, que incluye a todos los organismos y las variables ambientales bióticas y abióticas que interactúan en un área determinada.

Emisión. Es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, proveniente de una fuente fija o móvil.

Emisiones vehiculares. Emisiones de fuentes móviles.

Energía. Facultad que posee un sistema de cuerpos de proveer trabajo mecánico o su equivalente.

Enzimas. Son proteínas que catalizan reacciones químicas en los seres vivos. No hacen factibles las reacciones imposibles, sino que solamente aceleran las que espontáneamente podrían producirse. Ello hace posible que en condiciones fisiológicas tengan lugar reacciones que sin catalizador requerirían condiciones extremas de presión, temperatura, o pH.

Etanol lignocelulósico. Etanol que se obtien a partir de recursos que contienen

Etanol. Alcohol etílico o de grano. Se obtiene por la fermentación de diferentes granos. Incrementa el octano en la gasolina. Es un carburante oxigenado y puede emplearse casi puro en los autos especialmente diseñados para su uso.

Exposición. Interacción entre un agente tóxico y un sistema biológico. Cantidad de un agente químico o físico particular que llega al receptor.

Fermentación. Degradación biológica de compuestos orgánicos a compuestos más sencillos, generalmente en ausencia de oxígeno, como la fermentación alcohólica.

Fuente móvil. Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Gasolina oxigenada. Gasolina que contiene un compuesto oxigenado como el etanol o el MTBE. Con ellos se busca mejorar la combustión y reducir las emisiones de monóxido de carbono en los gases de escape.

Gasolina reformulada. Gasolina a la cual se le ha alterado su composición o características para reducir la emisión de contaminantes en los vehículos.

Hemicelulosa. Un polisacárido componente de la pared celular primaria, similar a la celulosa, pero degradado más fácilmente,

Hidrólisis ácida. Hidrólisis de la lignocelulosa en hemicelulosa, celulosa y lignina. Se utiliza ácido sulfúrico o ácido sulfúrico diluido, además de altas temperaturas.

Hidrólisis enzimática. Hidrólisis de la lignocelulosa en hemicelulosa, celulosa y lignina a través del uso de enzimas y calor.

Hidrólisis. Reacción química mediante la cual resultan dos nuevos compuestos a partir de una sustancia compleja mediante la adición de agua y su posterior descomposición.

Índice de anticascabeleo. Medida de la habilidad de la gasolina de resistir los golpeteos de la máquina. El índice es el promedio de la suma del Octano Motor y de Investigación dividido por dos.

Inventario de emisiones. Conjunto de datos (ya sea obtenidos mediante determinaciones específicas o por estimación), a partir de los cuales se puede establecer un mapa más o menos detallado de la distribución de las emisiones en un área determinada, con la ubicación de todas las fuentes más importantes y las cantidades que emiten.

Isobuteno. Producto petroquímico obtenido en las refinerías que si reacciona con metanol forma éter metil terbutílico (MTBE) y con el etanol el éter etil terbutílico (ETBE), ambos son oxigenantes e incrementan el número de octano.

Lignina. Molécula orgánica compleja hallada como componente importante de las paredes secundarias; imparte rigidez y fortaleza a las microfibrillas de celulosa.

Lignocelulosa. Materia orgánica que contiene lignina, celulosa y hemicelulosa.

Límite de exposición. Aquel valor de concentración que no deberá excederse en la exposición a una sustancia.

Medio ambiente. Conjunto de elementos naturales, artificiales o inducidos por el hombre, físicos, químicos y biológicos, que propician la sobrevivencia, transformación y desarrollo de los organismos vivos.

Metanol. Alcohol metílico, de madera. Se obtiene industrialmente en los procesos petroquímicos. Se emplea para incrementar el octano de la gasolina en ciertas proporciones aunque también se puede emplear puro sustituyendo la gasolina.

Norma de calidad del aire. La máxima concentración de una sustancia potencialmente tóxica que puede permitirse en un componente ambiental durante un periodo definido.

Octano. 1) Término con el que se describe la habilidad de una gasolina para resistir las detonaciones de la máquina generadas por la combustión. 2) Octano motor. Prueba a la que se somete la gasolina en condiciones severas de operación. Afecta la velocidad y la capacidad del auto de subir calles empinadas. 3) Octano de investigación. Prueba a la que se somete la gasolina en condiciones menos severas de operación empleando un solo cilindro.

Olefinas. Componentes de la gasolina generados durante varios procesos de transformación de los hidrocarburos. Ejemplos son el etileno y el propileno. Suelen contribuir a la formación de gomas y depósitos en los sistemas de inyección.

ppm. Partes por millón.

Presión de Vapor Reid (PVR). Método para determinar la presión de vapor de la gasolina y otros productos cuyo aparato fue diseñado por Reid. Permite relacionar su valor con las características de volatilidad de la gasolina.

Presión de Vapor. Es la medida de la presión superficial que es necesario ejercer para que un líquido no pase al estado de vapor.

Toxicidad. Capacidad de una sustancia para causar daño a un organismo. Para definir la toxicidad en términos cuantitativos se requiere conocer la cantidad de sustancia administrada o absorbida (la dosis), la vía por la cual se administra la sustancia (inhalación, ingestión, etc.), la distribución y frecuencia en el tiempo de la administración (dosis única o repetida), el tipo o gravedad del daño o los daños y el tiempo necesario para causarlos.

Toxicidad. Capacidad de una sustancia química para producir daño a un organismo animal.

Volatilidad. Término con el que se describe la tendencia de la gasolina a pasar de líquido a vapor.

ANEXO A

En la tabla 1 se muestran las materias primas, las superficies cultivadas, diferentes valores de rendimiento en el campo (ton/ha), así como la producción anual de estas materias primas.

Para el caso del maíz se realizaron cálculos para diferentes valores de rendimiento debido a que el promedio nacional de 2.8 ton/ha es muy bajo, ya que en otros países como en Estados Unidos se tienen rendimientos de alrededor de 10 ton/ha. De esta manera se observa como crece el potencial de producción de etanol al aumentar el rendimiento en campo para la producción de maíz.

Materia Prima	Superficie Miles ha	Rendimiento (ton/ha)	Miles Toneladas (año)
Caña	680		48000
Azucar			5376
Melaza			1920
Bagazo			14400
Maíz	8436	2.5	21090
		2.8	23621
		5	42180
		6	50616
		9	75924
		10	84360
Rastrojo de maíz		2.5	10545
		2.8	11810
		5	21090
		6	25308
		9	37962
		10	42180
Rastrojo de Sorgo			10100
Madera	16300		22500
			62300
Residuos forestales			2000
RSM			4504

Tabla 1. Materias primas para la producción de etanol.

En la tabla 2 se muestran los cálculos de la producción de etanol para diferentes materias primas y para diferentes rendimientos en campo. El cálculo de la producción de etanol a partir de melaza se realizó al considerar 0.25 litros por kilogramo de melaza.

Material	Peso (Kg/año)	Sólidos con azúcares	Azúcares	Ef. Conversión azúcares	Ef. Conversión a etanol	Ef. De la conversión	Ef. Destilación	Litros (año)	Litros (día)	Energía MJ año
Bagazo de caña	1.44E+10	0.5	0.7	0.9	0.51	0.9	0.9	2.37E+09	6.51E+06	5.00E+10
Azucar	5.38E+09	1	1	0.9	0.51	0.9	0.9	2.53E+09	6.94E+06	5.34E+10
Melaza	1.92E+09							4.80E+08	1.32E+06	1.01E+10
Maíz	2.11E+10	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	5.49E+09	1.50E+07	1.16E+11
Maíz	2.36E+11	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	6.15E+10	1.68E+08	1.30E+12
Maíz	4.22E+10	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	1.10E+10	3.01E+07	2.31E+11
Maíz	5.06E+10	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	1.32E+10	3.61E+07	2.78E+11
Maíz	7.59E+10	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	1.98E+10	5.42E+07	4.16E+11
Maíz	8.44E+10	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	2.20E+10	6.02E+07	4.63E+11
Maíz amarillo	8.00E+08	0.85	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	2.08E+08	5.71E+05	4.39E+09
Rastrojo de maíz	1.05E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	3.23E+09	8.85E+06	6.80E+10
Rastrojo de maíz	1.18E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	3.62E+09	9.91E+06	7.62E+10
Rastrojo de maíz	2.11E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	6.46E+09	1.77E+07	1.36E+11
Rastrojo de maíz	2.53E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	7.75E+09	2.12E+07	1.63E+11
Rastrojo de maíz	3.80E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	1.16E+10	3.19E+07	2.45E+11
Rastrojo de maíz	4.22E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	1.29E+10	3.54E+07	2.72E+11
Rastrojo de Sorgo	1.01E+10	1	0.65	0.9	0.51	0.9	0.9	3.09E+09	8.48E+06	6.52E+10
Madera	2.25E+10	1	0.7	0.9	0.51	0.9	0.9	7.42E+09	2.03E+07	1.56E+11
Madera	6.23E+10	1	0.7	0.9	0.51	0.9	0.9	2.05E+10	5.63E+07	4.33E+11
Residuos forestales	2.00E+09	1	0.7	0.9	0.51	0.9	0.9	6.60E+08	1.81E+06	1.39E+10
RSM	4.50E+09	0.5	0.7	0.9	0.51	0.9	0.9	7.43E+08	2.04E+06	1.56E+10

ANEXO B

CÁLCULO DE FACTORES DE EMISIÓN EN MOBILE6

El cálculo de los factores de emisión que utiliza MOBILE6 se realiza a través de la fórmula 1. [Radian International, 1997].

$$FEC = \sum_{ma=1}^{25} (FR * Fa * FEB) \quad (1)$$

Donde:

FEC = Factor de emisión compuesto del parque vehicular.

ma = modelo y año.

FR = Fracción del recorrido (Fracción de los kilómetros recorridos con los que contribuye cada modelo y año).

Fa = Factor de ajuste para los efectos de la velocidad, uso del aire acondicionado, carga extra y remolque de trailers.

FEB = Factor de emisión básico por modelo y año.

El factor de ajuste adicional (Fa) toma en cuenta los efectos de las características específicas del área de estudio con respecto a velocidad del tráfico, uso del aire acondicionado, carga extra y remolque de trailers. Después de este ajuste, cada factor de emisión ajustado es ponderado por la fracción del recorrido (en kilómetros recorridos por vehículo) para ese modelo y año. Finalmente, los factores de emisión ponderados para cada uno de los 25 años de antigüedad se suman para generar un factor de emisión compuesto, que es el factor de emisión promedio para un tipo de vehículo específico.

A su vez el FEB se calcula a partir de la fórmula 2

$$FEB = (TBE * FA * FAim) + FAaa \quad (2)$$

donde

FEB = Factor de emisión básico por modelo y año

TBE = Tasa básica de emisión por modelo y año

FA = Factor de ajuste para los efectos de diferentes temperaturas, presiones de vapor Reid, y modos de operación

FAim = Factor de ajuste para el efecto del programa de Inspección y Mantenimiento (I/M)

FAaa = Factor de ajuste para los efectos de la alteración de los controles de emisión y los programas anti-alteración

Los datos para un cálculo primario de las emisiones no requieren los factores FAim y FAaa, los cuales se utilizan en cálculos secundarios que requieren mucha mayor información de

los vehículos. En el presente trabajo no se consideran los efectos de los factores FAim y FAaa.

Las tasas básicas de emisión (TBE) no corresponden exactamente con las emisiones reales de un vehículo automotor; dado que más bien representan las emisiones medidas en condiciones de prueba sumamente controladas. Para reconciliar las diferencias que existen entre las emisiones de prueba y las reales, se deben aplicar diversos factores de ajuste a las emisiones reales. De esta manera, a partir de la TBE es posible calcular un factor de emisión básico (FEB) para cada tipo de vehículo, modelo y año, tal y como se expresa en la fórmula 2.

El cálculo de las tasas básicas de emisión promedio (TBEs) para cada tipo de vehículo, modelo y año es el primer paso para estimar los factores de emisión de vehículos automotores. El fundamento de las TBEs son los datos sobre las emisiones de vehículos en uso obtenidos en condiciones de prueba normalizadas (i. e., temperatura, características del combustible y ciclos de manejo normalizados). Ahora bien, las emisiones varían con la edad del vehículo, de manera que es posible aplicar regresiones lineales que relacionan los datos de las emisiones con las lecturas del odómetro. Estas regresiones dan como resultado ecuaciones TBEs que incorporan una tasa de emisión de cero millas (la intersección “y” de la regresión) y una tasa de deterioro (pendiente). La primera representa las emisiones de un vehículo nuevo, mientras que la segunda describe la manera en que las emisiones se incrementan con el kilometraje (millaje) del vehículo.

ANEXO C

PERFIL DE SUPERVIVENCIA

Para el cálculo de la K para crear el perfil de supervivencia de los automóviles de la ZMVM, se utilizó la ecuación 1.

$$K = \frac{\ln F(t) - \ln(F(t-1))}{t} \quad (1)$$

Como ejemplo tomamos los automóviles modelo 1990, a partir del Inventario de emisiones de la ZMVM [SMA, 2001] del 2000, se tiene que para el año 1994 había 135,221 automóviles del modelo 1990, mientras que para el año 2000 quedaban en circulación 98,577 automóviles de ese modelo. No se encontraron datos de supervivencia para cada año de cada modelo de automóvil, por tal motivo se tomaron los datos de 8 años de diferencia.

Aplicando la ecuación 1 a la información anterior se tiene:

$$K = \frac{\ln(98,577) - \ln(F(135,221))}{8} = -0.034$$

La misma operación se realizó para 5 modelos diferentes, quedando el promedio en -0.0284 que fue el número que se utilizó para crear el perfil de supervivencia de los vehículos de la ZMVM.