



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE QUÍMICA

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL MEZCLADO DE
COMPONENTES EN LA REFORMULACIÓN DE
GASOLINAS EN MÉXICO: ESTUDIO DE UN CASO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA

CAMPO DEL CONOCIMIENTO: INGENIERÍA DE SISTEMAS

CAMPO DISCIPLINARIO: INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE
PROYECTOS

P R E S E N T A :

I. Q. RICARDO BARRAGAN ACEVEDO

TUTOR:

DR. CARLOS ENRIQUE ESCOBAR TOLEDO



2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en C. Alejandro Anaya Durand

Secretario: M. en C. Jorge Luís Aguilar González

Vocal: Dr. Ricardo Aceves García

1^{er.} Suplente: Dr. Carlos Enrique Escobar Toledo

2^{do.} Suplente: M. en C. Ezequiel Millán Velasco

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE QUÍMICA
CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Enrique Escobar Toledo

FIRMA



AGRADECIMIENTOS

Dedico especialmente esta tesis a Dios por haber guiado mis pasos...

A través de estas paginas expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por su formación integral durante esta etapa de mi vida, que culmina con la presentación de esta tesis, fruto y muestra de la calidad de dicha institución.

El apoyo brindado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), mediante su programa de Proyectos de Apoyo para la Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) me proporcionó una experiencia muy enriquecedora para mi formación al participar en el proyecto Proyecto PAPIIT No. IN 106203-2 "Restitución del Valor Agregado y de la Productividad de Algunas Cadenas Improductivas de la Industria Petroquímica en México a través de la Reestructuración, Simulación y Jerarquización Tecnológica y de Inversiones"; por otra parte, pero no menos importante agradezco a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP), por su Programa de Becas para Estudios de Posgrado.

Siento un profundo agradecimiento a este gran país y a su gente, que me ha cobijado como uno de sus hijos.

A mi familia, por su amor que a pesar de la distancia, me alienta a seguir adelante.



A mis amigos que me enseñaron la existencia de una amistad sincera, llegando a convertirse en una familia para mí.

A todos mis verdaderos Maestros, cuyos consejos son factor clave para mi proceso formativo.

Con especial gratitud quiero mencionar al Dr. Julio Landgrave Romero (Q.E.P.D.), por quien gracias a su ayuda fue posible llegar a este momento culminante de mi vida.

A mi querida Dulce, por su amor incondicional.

Ricardo Barragan Acevedo



INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
INDICE	III
INTRODUCCIÓN	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
1. PRODUCCIÓN DE GASOLINAS EN MÉXICO	
1.1 Proceso de Producción	1
1.1.1 Procesos de Destilación del Crudo	3
1.1.1.1 Destilación Atmosférica	4
1.1.1.2 Destilación al Vacío	4
1.1.1.3 Estabilización de Naftas y Fraccionamiento de Gas	5
1.1.2 Procesos de Elaboración de Gasolinas	5
1.1.2.1 Hidrodesulfurización de Naftas y Destilados Intermedios	5
1.1.2.2 Reformado Catalítico	6
1.1.2.3 Isomerización	7
1.1.2.4 Desintegración Catalítica Fluidizada (FCC)	7
1.1.2.5 Producción de Oxigenantes	8
1.1.2.6 Alquilación	9
1.1.3 Endulzamiento	9
1.1.4 Mezclado	10
1.1.5 Procesos de Fondo de Barril	10
1.2 Problemática e Impacto	10
1.3 Evolución en las Especificaciones de Gasolinas	11
1.3.1 Inicios	12
1.3.2 Expropiación	13
1.3.3 Expansión	13
1.3.4 Reformulación	14
1.3.5 Perspectivas Futuras	16
1.4 Marco Regulatorio y Normativo	17
1.4.1 Calidad de los Combustibles	18
1.4.2 Política Energética	18
1.5 Reconfiguración de las Refinerías	19
2. PANORAMA NACIONAL DEL SECTOR AUTOTRANSPORTE	
2.1 Desarrollo del Parque Vehicular	20
2.2 Tendencias Tecnológicas del Autotransporte	24
2.2.1 Tecnología Diesel	25
2.2.2 Tecnología Eléctrica	26
2.2.3 Tecnología Híbrida	28



2.2.4	Biocombustibles	29
2.2.5	Celdas de Combustible	30
2.2.6	Tecnología de Gas	31
2.3	Panorama Mundial del Desarrollo Automotriz	32
3.	MERCADO NACIONAL DE GASOLINAS	
3.1	Evolución del Mercado de 1995 a 2006	37
3.1.1	Producción	38
3.1.2	Importación y Exportación	42
3.1.3	Demanda	43
3.1.4	Precios	48
3.2	Pronóstico de la Oferta y la Demanda de Gasolinas	49
3.2.1	Perspectivas del Sistema Nacional de Refinación	49
3.2.2	Prospectiva de la Producción de Gasolinas 2007-2015	53
3.2.3	Perspectivas en la Importación y Exportación de Gasolinas 2007-2015	55
3.2.4	Evolución de la Demanda de Gasolinas 2007-2015	56
4.	MODELOS DE MEZCLADO PARA LA FORMULACIÓN DE GASOLINAS	
4.1	Número de Octano	59
4.1.1	Método del Número de Octano del Mezclado	59
4.1.2	Método Etil RT-70	60
4.1.3	Método de Stewart	61
4.1.4	Método de Interacción	62
4.1.5	Método de Transformación	63
4.1.6	Método de Exceso	66
4.1.7	Método Zahed	67
4.1.8	Comparación entre Métodos	68
4.2	Presión de Vapor Reid	68
4.2.1	Método de Aproximación Teórica	69
4.2.2	Método de Interacción	71
4.2.3	Método del Índice de Mezclado	72
4.2.4	Otros Métodos	72
4.2.5	Comparación entre Métodos	72
4.3	Puntos de Destilación	73
4.3.1	Destilación ASTM	73
4.3.2	Método de Interacción	73
4.3.3	Método Empíricos	74
4.3.4	Curvas de Destilación en Forma de "S"	75
4.4	Cambios de Volumen	75
4.4.1	Método de Reeves	76
4.4.2	Correlación API	76
4.5	Concentración de PIONA, Oxigenantes y Azufre	76
4.6	Simulación del Mezclado	77
5.	FORMULACIÓN DE GASOLINAS EN LA REFINERÍA DE ESTUDIO	
5.1	Planteamiento del Problema	79



5.1.1	Objetivos Específicos del Proyecto	80
5.1.2	Beneficios Esperados del Proyecto	81
5.1.3	Filosofía del Proyecto	81
5.2	Descripción General del Proyecto	82
5.2.1	Disponibilidad de Componentes	83
5.2.2	Especificaciones de Componentes	83
5.2.2.1	Isómeros y Reformado	84
5.2.2.2	Butanos-Butilenos	85
5.2.2.3	Pentanos-Hexanos	85
5.2.2.4	Alquilado	85
5.2.2.5	Nafta Catalítica de FCC1 y FCC2	85
5.2.2.6	Nafta Reformada	86
5.2.2.7	TAME	86
5.2.2.8	Anilina	86
5.2.2.9	Detergente	86
5.2.3	Especificaciones de Productos	87
6.	MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA REFORMULACIÓN DE GASOLINAS EN LA REFINERÍA DE ESTUDIO.	
6.1	Estructuración de las Ecuaciones	90
6.1.1	Función Objetivo	90
6.1.2	Restricciones de Calidad	90
6.1.2.1	Índices RON y MON	90
6.1.2.2	Presión de Vapor Reid	91
6.1.2.3	Punto de Destilación	92
6.1.3	Restricciones Ambientales	92
6.1.3.1	Contenido de Azufre	93
6.1.3.2	Concentración de Aromáticos	93
6.1.3.3	Concentración de Olefinas	93
6.1.3.4	Contenido de Oxígeno y Benceno	94
6.1.4	Restricciones de Disponibilidad de Componentes	94
6.2	Solución Óptima Mediante el Método del Gradiente Reducido	94
6.3	Experimentación con el Modelo Mediante un Ajuste de Regresión	99
6.4	Análisis de Resultados	103
6.5	Análisis de Sensibilidad	105
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
ANEXOS		
A.	Normatividad Vigente	110
B.	Título XV de la Energy Policy Act 2005	132
C.	Diagramas de Flujo del Proceso	140
FUENTES DE INFORMACIÓN		142



INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los procesos de refinación.	2
Tabla 1.2. Agrupamiento de los procesos.	3
Tabla 2.1. Evolución del Parque Vehicular del Sector Autotransporte, 1995-2004 (Miles de Unidades)	21 21
Tabla 2.2 Características del Biodiesel y el Diesel	29
Tabla 3.1. Producción total por tipo de gasolina de 1995-2006 en MBPD	38
Tabla 3.2. Producción de gasolinas por refinería de 1995 a 2006.	40
Tabla 3.3. Importación y Exportación de gasolinas 1995-2006 (MBPD).	42
Tabla 3.4. Producción, Importación, Exportación y Consumo Aparente de Gasolinas de 1995 a 2006	44 44
Tabla 3.5. Demanda regional de gasolinas de 1995 a 2006 en MBPD	45
Tabla 3.6. Demanda nacional de gasolinas por tipo de combustible de 1995 a 2006 en MBPD	46 46
Tabla 3.7. Precio de gasolinas de 1995 a 2006	48
Tabla 3.8. Capacidad Instalada de los Procesos por Refinería 2006-2015, (MBPD)	50
Tabla 3.9. Procesamiento de Crudo Pesado 2007-2015 (MBPD)	51
Tabla 3.10. Procesamiento de Crudo Ligero 2007-2015 (MBPD)	52
Tabla 3.11. Rendimientos en la Producción de Gasolinas en 2015 (%)	53
Tabla 3.12. Evolución de la Producción de Gasolinas 2007-2015	54
Tabla 3.13. Importación de Gasolinas 2007-2015 en MBPD	56
Tabla 3.14. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2025 en MBPD	58 58
Tabla 3.15. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015 Por Tipo de Combustible en MBPD	59 59
Tabla 4.1 Comparación entre modelos de octano del mezclado	70
Tabla 4.2 Precisión de los modelos de Octano mezclado	70
Tabla 4.3 Precisión de los modelos de RVP del mezclado	75
Tabla 4.4 Coeficientes de la Ecuación 4.3.4	77
Tabla 5.1 Componentes Disponibles en la Refinería	85
Tabla 5.2 Propiedades de los componentes	86
Tabla 5.3 Puntos de destilación de los componentes en °F	86
Tabla 5.4 Características de la Anilina	88
Tabla 5.5 Características del aditivo detergente	89
Tabla 5.6 Especificaciones de las gasolinas Magna y Premium	89
Tabla 6.1 Resultados Iniciales	98
Tabla 6.2. Propiedades de las gasolinas de las iteraciones iniciales	99
Tabla 6.3 Resultados del Modelo	100
Tabla 6.3 (Continuación) Resultados del Modelo	101
Tabla 6.4. Parámetros de Regresión	102
Tabla 6.5 Estadística de la Regresión	104
Tabla 6.6 Análisis de Varianza	104



Tabla 6.7 Significancia Estadística	104
Tabla 6.8 Costos de importación	106
Tabla 6.9 Características de las Gasolinas Propuestas	106
Tabla 6.10 Formulación óptima propuesta	107
Tabla 6.11 Gradiente reducido para los componentes	108
Tabla 6.12 Multiplicadores de Lagrange para las restricciones ambientales y de calidad	108
Tabla 6.13 Multiplicadores de Lagrange de los componentes	109



INDICE FIGURAS Y GRAFICOS

Figura 1.1. Diagrama típico de una refinería	2
Figura 1.2. Proceso de destilación atmosférica en la refinería.	4
Figura 1.3. Proceso de Destilación al vacío dentro de la refinería	4
Figura 1.4. Estabilización de Naftas y Fraccionamiento de Gas.	5
Figura 1.5. Hidrodesulfurización de Naftas y Destilados Intermedios.	6
Figura 1.6. Reformado Catalítico	7
Figura 1.7. Proceso de isomerización en la refinería.	7
Figura 1.8. Proceso FCC en la refinería.	8
Figura 1.9. Producción de Oxigenantes en la refinería.	9
Figura 1.10. Alquilación.	9
Gráfica 2.1. Evolución del Parque Vehicular del Sector Autotransporte, 1995-2004 (Miles de Unidades)	23
Figura 2.1 Esquema General del Motor Diesel	26
Figura 2.2 Esquema General de Celda de Combustible	30
Gráfica 3.1. Producción de gasolinas por tipo durante el 2006	39
Gráfica 3.2. Producción de Gasolinas por Refinería en 2006	41
Gráfica 3.3. Producción de Gasolinas 1995-2006	41
Gráfica 3.4. Importación y Exportación de Gasolinas de 1995 a 2006	43
Fuente: Informe Estadístico de Labores, 2006. PEMEX Refinación.	
Gráfica 3.5. Consumo Aparente de Gasolinas de 1995 a 2006	45
Gráfica 3.6. Demanda de gasolinas por regiones durante el 2006	46
Gráfica 3.7. Demanda nacional de gasolinas por tipo de combustible de 1995-2006 (MBPD)	47
Gráfica 3.8. Demanda de Gasolinas Durante 2006	47
Gráfica 3.9. Precio de gasolinas de 1995 a 2006	49
Gráfica 3.10. Procesamiento de Crudo Pesado 2007-2015 (MBPD)	51
Gráfica 3.11. Procesamiento de Crudo Ligero 2007-2015 (MBPD)	53
Gráfica 3.12. Evolución de la Producción de Gasolinas por Refinería. 2007-2015 en MBPD	55
Gráfica 3.13. Producción de Gasolinas por Refinería 2015, MBPD	55
Gráfica 3.14. Importación de Gasolinas 2007-2015 en MBPD	57
Gráfica 3.15. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015 en MBPD	58
Gráfica 3.16. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015 Por Tipo de Combustible en MBPD	59
Gráfica 6.1 Comparación entre los datos del modelo y los obtenido por la correlación lineal.	105



SÍMBOLOS

a_n	Coeficientes de correlación del contenido de aromáticos
A	Contenido de aromáticos en porcentaje de volumen
B	Constante de mezclado dependiente del peso molecular.
B_i	Contenido de benceno de cada componente
$C_n,$ k_n Q_n	Constantes teóricas requeridas por el modelo.
C_i	Costo del componente
D	Abstracción de términos $D_i = \frac{\bar{a}(O_i - O_{Mezcla})}{1 - \exp[\bar{a}(O_i - O_{Mezcla})]}$
D_P	Demanda de Premium
D_M	Demanda de Magna
DBV	Destilación del mezclado
FO	Función objetivo
G	Diferencia de gravedad específica entre el componente más ligero y el más
RON	
H	Efecto de la interacción entre tipos de hidrocarburos
$I_{x,y}$	Coeficiente de interacción entre los componentes i y k entre un par de MON
\bar{L}	Masa de la fase líquida
m	MON sustituido en las ecuaciones
M_1	Peso molecular del componente ligero
O	Contenido de olefinas en porcentaje de volumen
ON	Número de Octanos
Ox_i	Contenido de oxígeno de cada componente
p_M	Precios de importación de Magna
p_P	Precios de importación de Premium
P	Contenido de parafinas en porcentaje de volumen
r	RON sustituido en las ecuaciones
\bar{R}	Constante de los gases
RON	Número de Octano de Investigación
RVP	Presión de vapor de Reid
s	Sensibilidad (RON-MON)
s_i	Sensibilidad a un nivel de severidad de referencia de la máquina
S	Factor de contracción expresado como porcentaje de volumen.
u_i	Fracción del Volumen del componente "i"
V_i	Volumen del componente i en la mezcla
VABP	Promedio volumétrico del punto de ebullición en °F
	componentes.
w	Porcentaje en peso de la fracción pesada de la mezcla
x	Cantidades empleadas de cada componente
X	Cantidades totales disponibles de cada uno de los componentes
X_i	Fracción mol del componente i
X_P	Cantidades de Premium que se pueden elaborar (MBPD)
X_M	Cantidades de Magna que se pueden elaborar (MBPD)



$\alpha,$	
β	Coeficientes de la ecuación de regresión
δ	
ε	Error de ajuste.
ϑ	Fracción molar del componente.
v_i	Fracción mol del componente i en la fase líquida
λ_t	Coeficiente de actividad del componente i
ρ	Densidad de la mezcla como líquido saturado a 60°F en libras-mol por barril
\bar{v}	Masa de la fase vapor obtenida por el flasheo. pesado.
%Evap	Porcentaje de evaporado a una temperatura específica indicada
$\begin{matrix} E \\ \\ M \\ \\ P \end{matrix}$	Término de exceso asociado. Referente a la gasolina Magna Referente a la gasolina Premium



PRESENTACIÓN

Las actividades de refinación y comercialización de los productos derivados del petróleo constituyen la cadena de valor de la industria petrolera, ya que toman en consideración el óptimo desempeño económico de esta industria. Esto se logra por medio de una operación a bajos costos, atendiendo a la disponibilidad de la materia prima, su acceso y su precio. Asimismo, mediante la integración de la cadena de suministro y distribución, así como la obtención de combustibles de alta calidad y valor, sin dejar de buscar el equilibrio entre la oferta y la demanda. Por lo tanto, resulta evidente que ampliar el margen de refinación se traducirá en una mayor rentabilidad de las inversiones[SENER, 2006].

No obstante, el panorama actual de la industria de la refinación en México no atraviesa por los mejores momentos de su historia. Entre los setentas y noventas, la industria contaba con una capacidad de refinación superavitaria debido a la inversión que se tuvo en esas décadas. Pero en 1991 el país perdió su autosuficiencia en gasolinas, básicamente a partir del cierre de la refinería de Azcapotzalco, motivado por razones ambientales. Sumado a esto, durante la última década no se han realizado inversiones en nuevas refinerías, por lo que el sistema nacional de refinación permanece limitado. Esto ocasionó que los volúmenes de importación de gasolinas empezaran a crecer de manera consistente, para suplir la creciente demanda del parque automotor[SENER, 2006].

En México, el Sistema Nacional de Refinación (SNR) está integrado exclusivamente por PEMEX Refinación (PR), que es la empresa encargada de elaborar, distribuir, almacenar y vender los productos petrolíferos mexicanos de primera mano, aunque comparte las actividades de distribución y comercialización con el sector privado. Para procesar el crudo PR cuenta con seis refinerías: Cadereyta, Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula, cuya capacidad total instalada es de 1,540.0 MBPD.

En el 2003 se concluyeron las obras de reconfiguración de cuatro de las refinerías mencionadas, permitiendo incrementar la producción de gasolinas en 41.3 MBPD y los destilados intermedios en 31.3 MBPD. Actualmente se adelantan proyectos para reconfigurar las plantas restantes con el fin de satisfacer la demanda nacional. La conclusión de estos proyectos contribuirá a que el SNR aumente el procesamiento de crudo pesado en un 24.7%[SENER, 2006].

El objetivo de este trabajo, consiste en el desarrollo de un modelo para encontrar el flujo óptimo de mezclado de componentes para cumplir con la reformulación de gasolinas, maximizando la ganancia a obtener por su comercialización. Este modelo deberá satisfacer las restricciones ambientales exigidas por la SEMARNAT, la calidad de los combustibles requeridos por la flota vehicular y la disponibilidad de componentes en la refinería, usados para elaborar las gasolinas que se expenden comercialmente.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizará como caso de estudio, la reestructuración de una refinería que produce actualmente 55 MBPD de gasolina Magna, por medio de un sistema de mezclado secuencial por lotes, a partir de los componentes recibidos directamente desde las plantas de producción. Esta refinería no cuenta con un sistema informático para el análisis de muestras del laboratorio (LIMS) y solamente produce



gasolina Premium para ajustar el índice de octano de la gasolina Magna. Sin embargo, el proyecto de reconfiguración contempla, entre otros, un incremento a 95 MBPD en la producción de gasolina Magna y la obtención de 56 MBPD de gasolina Premium; además de un sistema para el manejo automático de órdenes de mezcla.

Debido a que las operaciones de mezclado presentan un gran número de opciones, el problema se centra en determinar las proporciones óptimas de los componentes de la mezcla, para asegurar que los productos cumplan con las especificaciones deseadas al mejor costo posible.



INTRODUCCIÓN

Los productos de la refinación del petróleo se consideran como una de las fuentes de energía primaria más importantes del mundo, ya que son compuestos de alto poder energético obtenidos en grandes volúmenes, cuyo costo depende del precio de su materia prima: el petróleo crudo. Las características de estos productos, han producido un impacto significativo sobre varios sectores del mercado, resultando en un incremento sostenido de su demanda; especialmente sobre las denominadas gasolinas. Estos compuestos son en su mayoría utilizados por los motores de combustión interna para proporcionar la energía necesaria para transportarnos. En efecto, el sector de mayor consumo a nivel mundial, ha sido el del parque automotor, por su alta dependencia de las gasolinas para su funcionamiento. Esta dependencia se atribuye a una limitada oferta de otros combustibles no fósiles y a otros factores de orden tecnológico que aún no han logrado ser superados. Como resultado, actualmente no existe un combustible alternativo que represente una fuerte competencia en este segmento del mercado, es decir, para los motores de combustión interna.

Sin embargo, el continuo crecimiento del parque vehicular, ha hecho del automóvil la principal fuente de contaminación atmosférica en los centros urbanos, debido a la cantidad de emisiones que genera como resultado de la reacción de combustión. Su crecimiento se debe a que la aparición del automóvil trajo consigo una nueva dimensión de libertad: la capacidad de desplazarse de forma rápida e independiente. Tal ha sido su grado de preferencia que, a pesar del incremento de otros medios de transporte, se estima que más del 80% del transporte humano en el siglo XXI seguirá realizándose en automóvil, por razones de flexibilidad, rapidez, eficacia y costo[ANFAC, 2004].

En consecuencia, la industria automotriz ha tenido que evolucionar para responder a las crecientes exigencias en materia de normatividad ambiental y a los avances tecnológicos. Por ello, ha introducido varias mejoras tecnológicas al motor de combustión interna, pero esto ha ocasionado que demande nuevas formulaciones de combustibles que le permitan al motor un desempeño óptimo, tratando de generar un mínimo de emisiones contaminantes.

Teniendo en cuenta el alto nivel de calidad del combustible exigido por los vehículos modernos y la compatibilidad con la flota actual, la solución más prometedora a corto plazo es la reformulación de los combustibles convencionales. De esta forma, se garantizará un suministro de energía menos contaminante al parque automotor, mientras se realiza una transición gradual a otras tecnologías de transporte. No obstante, la principal limitante para la reformulación de gasolinas ocurre en la parte final de su producción, donde se lleva a cabo el mezclado de sus diferentes componentes que puedan estar disponibles acordes con la propia operación de la refinería.



RESUMEN

Esta tesis proporciona un modelo del mezclado óptimo de componentes para reformular gasolinas a un mínimo costo de producción, satisfaciendo, al mismo tiempo, las nuevas restricciones ambientales exigidas por la SEMARNAT. Para su desarrollo, se analizó los procesos de refinación relacionados con la elaboración de gasolinas, con el fin de proporcionar un panorama general de las operaciones corriente arriba del proceso, que influyen finalmente en la calidad de las mezclas combustibles. Así mismo, se estudiaron las ventajas y desventajas de las nuevas tecnologías de transporte y se compararon con los vehículos de combustión interna, para justificar la necesidad de seguir elaborando gasolinas. De igual forma, se incluyó un estudio del mercado nacional de gasolinas, sus proyecciones futuras y la evolución del parque automotor en México, con el objeto de definir la calidad y cantidad de los combustibles requeridos por la flota vehicular actual.

Como caso de estudio, se tomó el proyecto de implementar un sistema de mezclado de componentes en línea, de una refinería que actualmente produce 55 MBPD de gasolina Magna, por medio de un sistema de mezclado secuencial por lotes, a partir de los componentes recibidos directamente desde las plantas de producción. Para construir la estructura del modelo, se analizaron diferentes métodos de cálculo de predicción de las propiedades de las mezclas a obtener con los componentes disponibles en la refinería, enfocándose especialmente en el índice de octano medido en laboratorio (RON), índice de octano probado en un motor estático (MON), Presión de Vapor Reid (PVR) y Puntos de Destilación. No obstante, también se tuvo en cuenta que el contenido PIONA (Parafinas, Isoparafinas, Olefinas, Naftenos y Aromáticos), la Concentración de Oxigenantes y el Contenido de Azufre de las gasolinas cumplieran con la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.

Una vez establecidas la función objetivo y cada una de las restricciones, se procedió a la implementación de la programación matemática para obtener una solución óptima del mezclado de componentes, empleando el método del Gradiente Reducido. Esto permitió encontrar las mezclas de gasolinas Magna y Premium que cumplieran con las restricciones antes enunciadas y que maximizara la ganancia a obtener por su comercialización. Después, se construyó una ecuación de regresión que ajusta las variables del proceso para, entonces, decidir cual sería el punto óptimo de producción dentro del conjunto de soluciones factibles, tratando de satisfacer la mayor demanda del mercado. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad que refleja las consecuencias de introducir una mayor cantidad de cada uno de los componentes en las formulaciones finales, o las secuelas si se variaran las especificaciones de las gasolinas a obtener.

Las principales conclusiones que se obtuvieron son: El sector autotransporte en México presenta un gran rezago tecnológico comparado con otros países y una baja diversificación del parque automotriz que ha privilegiado el uso de las gasolinas. La producción de gasolinas ha permanecido prácticamente estancada, teniendo que importar cada vez más estos combustibles con el fin de suplir la creciente demanda. En el caso del pronóstico de la oferta, se prevé que se mantendrán las importaciones de gasolinas, pese al aumento proyectado en su capacidad de producción. En relación con la hipótesis general planteada, fue posible encontrar el mejor punto de mezclado de componentes, maximizando la ganancia a obtener por la comercialización de gasolinas. No obstante, se encontró que no es posible formular simultáneamente 95 MBPD de gasolina Magna y 58 MBPD de Premium, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones ambientales y de calidad estipuladas por



la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Por otra parte, también se encontró que la cantidad de Magna que se puede elaborar en la refinería de estudio, varía linealmente en función de la cantidad de Premium obtenida y la concentración de azufre, especificada para la gasolina Magna, y que la propiedad limitante para formular gasolinas en la Refinería es la presión de vapor Reid.



ABSTRACT

This thesis provides a model of optimal blending components for reformulated gasoline to a low cost of production, while also meeting the new environmental restrictions required by SEMARNAT. In this work was discussed the refining processes related to the production of gasoline, in order to provide an overview of the upstream process, which can affect the quality of the fuel mixtures. It also studied the advantages and disadvantages of new transportation technologies and compared them with internal combustion engines, in order to justify the need for further elaboration gasoline. Likewise, it was also included a study about domestic market for gasoline, its evolution and future projections of the fleet in Mexico, with the aim of defining the quality and quantity of fuel required by the current vehicle fleet.

As a steady case, it was selected the project to implement a system of blending components in-line for a Mexican Refinery where currently it is produced 55 MBPD of Magna gasoline through rundown tanks to blend the streams come directly from the upstream process. To built the structure of model, were analyzed different methods for predicting the properties of fuel mixtures can be made with the components available at the refinery, focusing on the Research Octane Number (RON), Motor Octane Number (MON), Reid Vapor Pressure (RVP) and Distillation Points. Also, it was consider that PIONA concentration (Paraffines, Iso-paraffines, Olefines, Naphthenes and Aromatics), Oxygen concentration and Sulfur concentration must full fit the standard NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.

Once the objective function and restrictions were defined, Reduced Gradient method was used in order to obtain an optimal solution of blending components. This allowed find mixtures of Magna and Premium that could comply with the restrictions listed above and maximized the profit. Then, it was built a regression equation to adjust the process variables, in order to decide the optimum point of production within the set of feasible solutions, which can meet the demand in the best way. Finally, we conducted a sensitivity analysis that reflects the consequences of introducing a greater amount of each component in the final formulations, or if we vary the specifications of gasoline.

The main conclusions were: The Mexican fleet presents a huge technological backwardness compared to other countries and low diversification of automotive technologies because it has been preferred gasoline. The production of gasoline has remained virtually stagnant, so Mexico have increased imports of fuels in order to satisfy the growing demand. It seems Mexico will maintain imports of gasoline for the next years, despite the projected increase in its production capacity. It was possible to find the best point of blending components maximizing the profit to obtain. However, it was found that it was not possible to make simultaneous 95 MBPD of Magna and 58 MBPD of Premium, while meeting the quality and environmental restrictions stipulated by the Mexican Official Standard NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Moreover, it was also found that the amount of Magna, which can be obtained in the refinery, varies linearly depending on the amount of premium obtained and the concentration of sulphur concentration specified for Magna, and that the limiting factor for property makes gasoline at the refinery is the Reid Vapor Pressure (RVP).



1. PRODUCCIÓN DE GASOLINAS EN MÉXICO

Desde 1886 México ha producido diferentes tipos de gasolinas para satisfacer las necesidades del parque vehicular. Las primeras formulaciones surgieron en respuesta a los requerimientos mecánicos de los motores automotrices, desarrollados a lo largo del tiempo. No obstante, en la década de los 80's cobraron fuerza las cuestiones ambientales, lo que obligó a buscar nuevas alternativas para formular combustibles, buscando disminuir la contaminación ambiental. Paralelamente, la industria automotriz fue introduciendo diferentes mejoras tecnológicas a los motores de combustión interna, que demandaron nuevas formulaciones para permitirle al motor un mejor desempeño, tratando de generar un mínimo de emisiones contaminantes. Como resultado, la industria de la refinación ha tenido que evolucionar produciendo nuevos combustibles, para responder a las crecientes exigencias en materia de normatividad ambiental y a los avances tecnológicos, con el objeto de hacerse más eficiente, rentable, segura y limpia [SENER, 2006].

El presente capítulo tiene como objetivo analizar los diferentes aspectos relacionados con la evolución histórica de la producción de gasolinas en México, tomando en consideración los principales sucesos que han influido en su desarrollo. Con tal objeto, se describe el proceso de producción, la calidad de los combustibles exigidos por los vehículos de cada época, las formulaciones generadas para responder a sus crecientes necesidades y las implicaciones ecológicas que han afectado a esta industria. De esta manera, se busca reflejar claramente las situaciones que ha tenido que afrontar el Sistema Nacional de Refinación y los elementos que han intervenido en su problemática actual.

1.1 Proceso de Producción

El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos con diferentes puntos de ebullición, que en su forma natural no proporciona ninguna aplicación útil, ya que como combustible es muy pobre y difícil de quemar, además, contiene muchas impurezas como azufre, metales y otros compuestos químicos. Sin embargo, al separar sus componentes en fracciones determinadas por sus puntos de ebullición y someterlas a tratamientos adicionales, se da origen a los principales productos demandados por el mercado.

En la industria de la transformación del petróleo, el crudo proveniente de los yacimientos se recibe en las refinerías y es convertido en diferentes productos, a través de una secuencia de transformaciones.

Una refinería es un conjunto de instalaciones, constituida principalmente por diversos procesos donde se transforma el petróleo crudo en productos útiles y valiosos como los combustibles automotrices, de aviación, industriales y domésticos.

Una refinería típica, como la presentada en la 1.1, emplea procesos físicos y químicos para transformar las fracciones del petróleo en diferentes compuestos con diversas propiedades. En la tabla 1.1 se presentan los principales procesos que se llevan a cabo en una refinería típica.

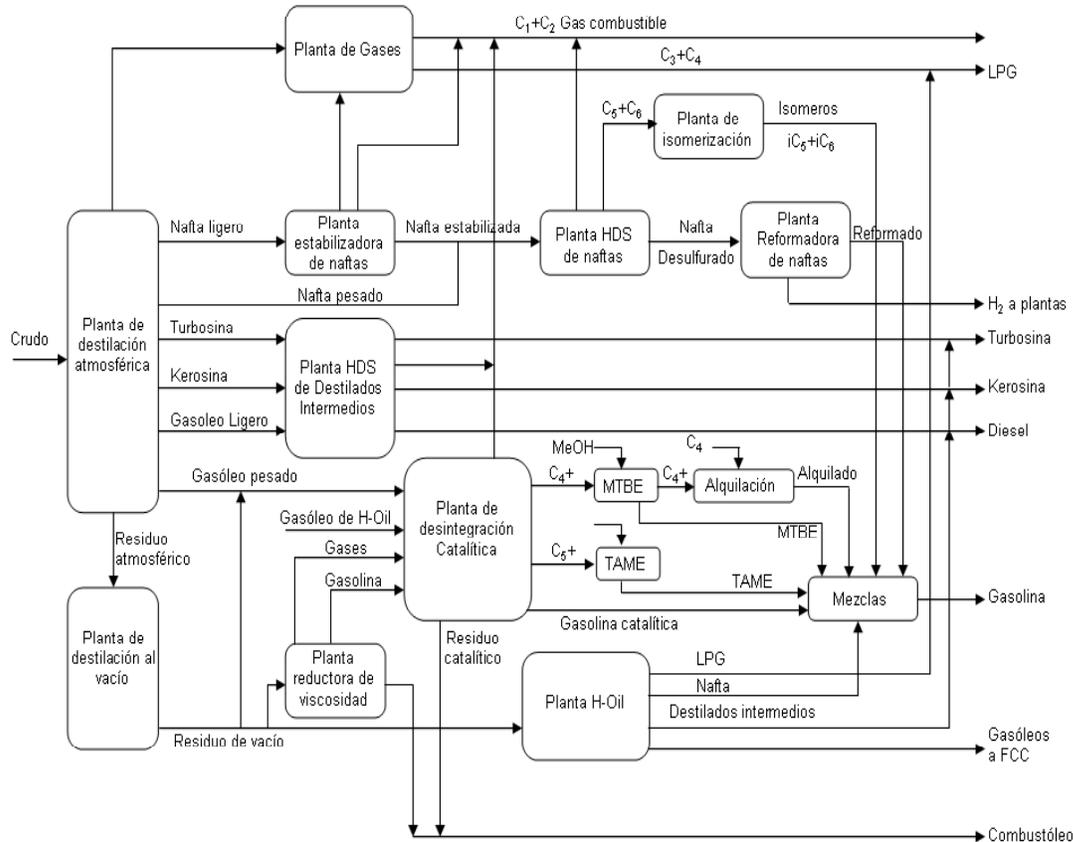


Figura 1.1. Diagrama típico de una refinería

Tabla 1.1. Clasificación de los procesos de refinación.

Físicos		Químicos	
Separación	Rearreglo molecular	Desintegración	Construcción molecular
El crudo se separa en sus fracciones	Los hidrocarburos cambian su estructura molecular.	Las moléculas grandes y complejas de los hidrocarburos se desintegran formando moléculas más pequeñas.	Una molécula de hidrocarburo se une con otra molécula para formar moléculas más grandes.
Destilación atmosférica	Reformación catalítica	Desintegración catalítica	Alquilación
Destilación al vacío	Isomerización	Reductora de viscosidad	Esterificación: MTBE, TAME
Fraccionamiento de gases	Hidrosulfuración	Hidrosintegración	

FUENTE: ARDINES, ISABEL A.; FONG, Ana T. y RUÍZ, Eric E. El Petróleo y su Proceso de Refinación [en línea]. Universidad Tecnológica de Panamá. [citado Abril 30, 2007]. Disponible de World Wide Web: <http://www.monografias.com/trabajos5/petroleo/petroleo2.shtml>.



Para facilitar la comprensión de los procesos de refinación es conveniente agruparlos en etapas, de acuerdo a la secuencia de separación y transformación del crudo hasta obtener los productos finales, tal como se ilustra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Agrupamiento de los procesos.

ETAPA	NOMBRE	PROCESO	DESCRIPCIÓN
1	Destilación del crudo	Destilación atmosférica y de vacío	Incluye los procesos que separan al crudo en varias fracciones, los cuales constituyen los primeros productos intermedios.
2	Elaboración de gasolina	Hidrodeshidrosulfuración de naftas y destilados intermedios. Reformación, isomerización y desintegración catalítica.	Incluye a los procesos que transforman la nafta amarga y gasóleo obtenidos en la primera etapa, en gasolina dulce.
3	Fondo de barril	Coquización, hidrodeshidrosulfuración catalítica y reductora de viscosidad.	Incluye a los procesos que transforman el residuo en productos más ligeros.

FUENTE: ARDINES, ISABEL A.; FONG, Ana T. y RUÍZ, Eric E. *El Petróleo y su Proceso de Refinación [en línea].* Universidad Tecnológica de Panamá. [citado Abril 30, 2007]. Disponible de World Wide Web: <http://www.monografias.com/trabajos5/petroleo/petroleo2.shtml>.

1.1.1 Procesos de Destilación del Crudo

Las columnas de destilación del crudo son las unidades de mayor tamaño en la refinería. Se utilizan para separar el crudo en fracciones de acuerdo a su punto de ebullición. Debido a que las temperaturas de salida del horno, requeridas para la destilación atmosférica de las fracciones más pesadas del crudo son muy altas, es necesario destilarlo en dos etapas. Primero se fracciona la totalidad del crudo a la presión atmosférica, y luego se alimenta la fracción de los residuos de punto de ebullición más alto a un segundo fraccionador operando a alto vacío, ya que la temperatura de ebullición desciende al disminuir la presión. De lo contrario se daría lugar al craqueo térmico, con la consiguiente pérdida de producto y ensuciamiento del equipo.

En la industria de la refinación es común denominar como destilados a las fracciones o productos que se separan del crudo, evaporándose por calentamiento. Por esta razón, se conoce como destilados intermedios, a los compuestos obtenidos durante la destilación atmosférica del crudo; tales como la kerosina, turbosina y al gasóleo ligero, principalmente. De la misma forma, se llaman destilados ligeros, a las fracciones ligeras obtenidas de la destilación completa del crudo y a los gases: metano, etano, butano y propano. Así mismo, el residuo que queda después de extraerle los destilados al crudo, se conoce como fondos de barril.



1.1.1.1 Destilación Atmosférica

El primer proceso de separación en una refinería es el de “destilación atmosférica”, llamada así porque la separación del crudo se lleva a cabo a una presión de 0.3 a 0.5 Kg/cm² manométricos, ligeramente arriba de la presión atmosférica, como se indica en la figura 1.2. Este proceso tiene como objetivo principal, separar el crudo en varias corrientes, llamadas productos o fracciones primarias, por lo cual, a esta separación también se le llama fraccionamiento del crudo.



Figura 1.2. Proceso de destilación atmosférica en la refinería.

1.1.1.2 Destilación al Vacío

El proceso de la destilación al vacío, tiene como objetivo principal extraer los destilados ligeros que contiene el residuo atmosférico (llamado también crudo reducido) debido a que estos destilados ligeros ya separados, tienen mayor valor económico y aprovechamiento en la refinería.

Este proceso se lleva a cabo a presiones absolutas, en la zona de alimentación de la columna, de 25 a 40 mmHg y se realiza inmediatamente después de la destilación atmosférica, como se presenta en la figura 1.3.

Los gasóleos y el residuo de vacío que se obtienen, pueden tener varios usos dependiendo del tipo de crudo procesado, la configuración de la refinería, la capacidad de los procesos y la demanda de los productos.

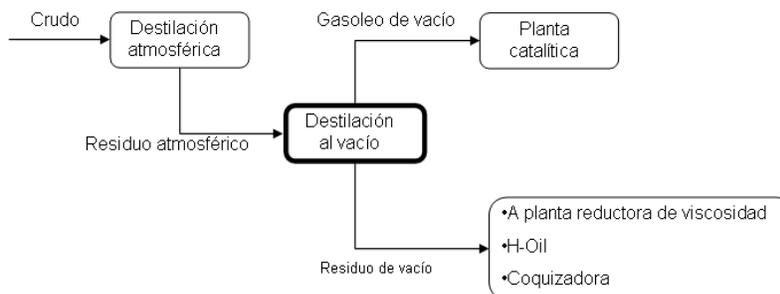


Figura 1.3. Proceso de Destilación al vacío dentro de la refinería



1.1.1.3 Estabilización de Naftas y Fraccionamiento de Gas

La corriente de gases que salen del acumulador de nafta de las plantas de destilación atmosférica está compuesta de hidrocarburos ligeros (metano, etano, propano y butano) y sulfuro de hidrógeno. El objetivo de este proceso es recuperar de esta corriente el propano y el butano para ser utilizados como gas licuado de petróleo (GLP) o como materia prima para elaborar otros productos petroquímicos. Para hacerlo, al salir del acumulador, la corriente de gases se dirige a la succión de un compresor centrífugo, para aumentar su presión y ser alimentado a la sección de fraccionamiento y tratamiento de gases, como se puede observar en la figura 1.4.

Por otra parte, la corriente líquida de nafta ligera que proviene del fondo del mismo acumulador, contiene aún hidrocarburos ligeros, los cuales deben separarse para obtener la nafta estabilizada. Esta corriente se alimenta a la torre “estabilizadora de naftas” donde se separan y salen por la parte superior los hidrocarburos ligeros y por el fondo se obtiene la nafta estabilizada, libre de butano y más ligeros, ésta es enviada a la planta hidrodesulfuradora (HDS) de naftas para eliminar los compuestos de azufre.

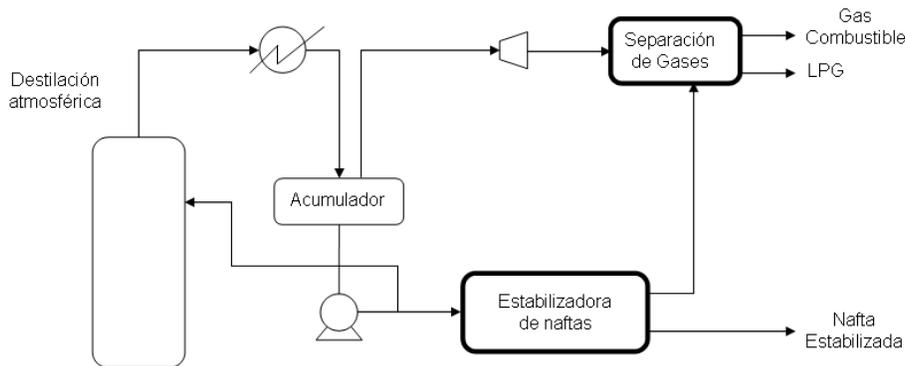


Figura 1.4. Estabilización de Naftas y Fraccionamiento de Gas.

1.1.2 Procesos de Elaboración de Gasolinas

1.1.2.1 Hidrodesulfurización de Naftas y Destilados Intermedios

Los crudos que se procesan en una refinería contienen contaminantes como azufre y metales, aún después de separarse en varias fracciones durante la destilación atmosférica. Estos contaminantes se distribuyen, concentrándose más en medida que la fracción se compone de hidrocarburos cada vez más pesados.

En cuanto a las corrientes de gases compuestos de hidrocarburos ligeros, el azufre está presente en forma de sulfuro de hidrógeno (H_2S); y a partir de hidrocarburos con seis átomos de carbono, forma compuestos con los propios hidrocarburos o está ocluido en ellos.

Existen varias razones para eliminar los contaminantes, entre los más importantes pueden mencionarse los siguientes:

- El azufre y los metales envenenan a los catalizadores, que son utilizados en los procesos de reformación y desintegración catalítica.



- La presencia de azufre en el combustible, reduce la eficiencia del convertidor catalítico y el sensor de oxígeno, instalados en los automotores, para controlar la cantidad de emisiones contaminantes.
- Las normas ambientales restringen el contenido de azufre en las emisiones a la atmósfera y en los combustibles que se elaboran en las refinerías.

El proceso mediante el cual se eliminan los compuestos de azufre y metales de los hidrocarburos utilizando hidrógeno, se llama en forma genérica Hidrotratamiento o Hidrodesulfurización, tal como se representa en la figura 1.5.

En muchas refinerías, este proceso se realiza para desulfurar la nafta, la turbosina, la kerosina y el gasóleo ligero (diesel), antes de enviarlos a almacenamiento como producto final. En algunas otras, se hidrotratan los residuos de vacío para desulfurarlos o desintegrarlos. Para lograrlo, las diferentes fracciones de crudo obtenidas por la destilación atmosférica y al vacío, se envían a un reactor químico con catalizador sólido constituido por alúmina soportada en molibdeno, níquel y cobalto. Allí se hace reaccionar con hidrógeno al azufre presente en los hidrocarburos para formar ácido sulfhídrico. Este proceso requiere de altas presiones y temperaturas y genera reacciones paralelas que eliminan compuestos nitrogenados, convierten las olefinas en compuestos saturados y reducen el contenido de aromáticos (ver figura 1.5).

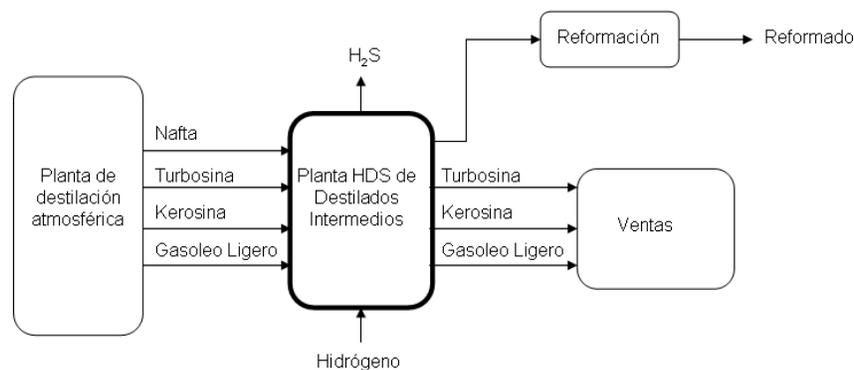


Figura 1.5. Hidrodesulfurización de Naftas y Destilados Intermedios.

1.1.2.2 Reformado Catalítico

El número de octano o calidad antidetonante de una gasolina, representa la capacidad del combustible para no alcanzar su temperatura de auto-ignición cuando se comprime en los cilindros de un motor. Una gasolina de bajo octano inicia por sí sola su combustión al comprimirse, antes de que el pistón termine su carrera, originando con esto golpeteos sobre el mismo pistón que se transmite al cigüeñal. La gasolina de alto octano, se quema con la chispa de la bujía, evitando los efectos de una gasolina pobre en octano.

La nafta que se obtiene en la planta de destilación atmosférica es de bajo octano (53), ya que en su composición predominan los hidrocarburos parafínicos y nafténicos. Por lo tanto, no es conveniente que sea utilizada directamente como componente de la mezcla para elaborar las gasolinas. Esto hace necesario someterla a un proceso de reformación catalítica para incrementar su octanaje.



La reformación catalítica de la nafta es un proceso químico de rearrreglo molecular, donde los hidrocarburos parafínicos se convierten a isoparafínicos, nafténicos y aromáticos; los cuales presentan mayor octanaje. Esto se logra, por medio de catalizadores basados en alúmina soportada en metales activos (platino-renio o platino-estaño), a condiciones de presión moderada y alta temperatura. Adicionalmente, se produce hidrógeno que se utiliza en los procesos de hidrotratamiento. En la figura 1.6, se puede observar la secuencia de procesos que se llevan a cabo para obtener un producto de aproximadamente 90 octanos.



Figura 1.6. Reformado Catalítico

1.1.2.3 Isomerización

La isomerización es un proceso catalítico donde los hidrocarburos parafínicos de 5 y 6 átomos de carbono, sufren un rearrreglo molecular sin cambiar el número de carbonos. Consiste en la reubicación de un radical de la molécula original a una posición “iso” de la molécula resultante, lo cual proporciona características diferentes a las de molécula original. En particular, la isomerización incrementa la presión de vapor y el número de octano de las moléculas originales, gracias a un catalizador de platino soportado en alúmina.

De acuerdo con la figura 1.7, la isomerización se realiza en forma paralela con la reformación, cuyos productos son unos de los más empleados en la formulación de gasolinas.

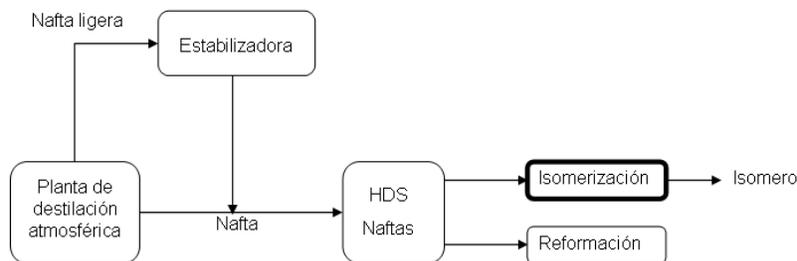


Figura 1.7. Proceso de isomerización en la refinería.

1.1.2.4 Desintegración Catalítica Fluidizada (FCC)

El proceso de desintegración catalítica fluidizada, también conocido como cracking catalítico fluido (FCC), consiste en el rompimiento de las moléculas de los gasóleos, exponiéndolas al calor, bajo la acción de un catalizador para promover las reacciones de desintegración.



La alimentación a las plantas, normalmente es una mezcla de gasóleos de vacío y gasóleo pesado de la destilación atmosférica, y se compone principalmente de hidrocarburos parafínicos, constituidos por 18 a 32 átomos de carbono.

La reacción que ocurre en este proceso, se promueve por un catalizador sólido con base en zeolitas pulverizadas, que se incorpora a los hidrocarburos en un reactor tipo tubular con flujo ascendente. A la salida del reactor, el catalizador se separa de los productos de reacción a través de ciclones. En este proceso se generan nafta reformada, gas seco (metano y etano) y fracciones de 3 a 5 átomos de carbono, de carácter olefínico, que se utilizan como materia prima en la producción de éteres y alquilado. También se genera un producto pesado rico en aromáticos, conocido como aceite cíclico ligero, que se procesa en las hidrotratadoras de diesel, y otro denominado aceite decantado que se incorpora al combustóleo, como se ilustra en la figura 1.8.

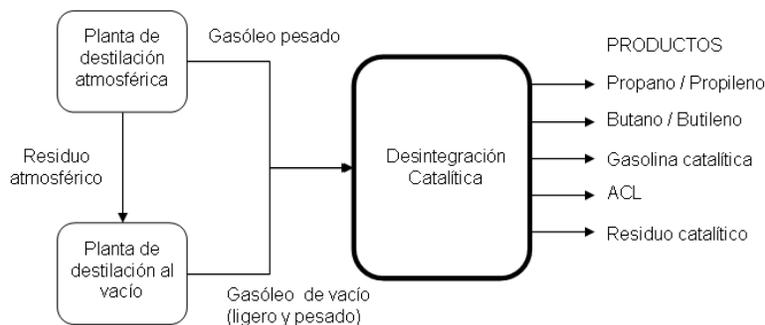


Figura 1.8. Proceso FCC en la refinería.

1.1.2.5 Producción de Oxigenantes

La planta catalítica (FCC) de las refinerías, es la mayor generadora de olefinas. Las corrientes de butanos y gasolina ligera que se obtienen en esta planta, contienen alto porcentaje de olefinas de cuatro y cinco carbonos, respectivamente. Estos compuestos se caracterizan por tener alta presión de vapor y ser muy reactivos, lo que los hace precursores del ozono cuando escapan a la atmósfera. El problema consiste en que cuando el ozono se forma cerca de la superficie de la tierra, se convierte en una capa que absorbe la radiación infrarroja que emite el planeta, contribuyendo al calentamiento global. Por esta razón, se controla la cantidad de olefinas permitida en la formulación de gasolinas.

Con el fin de disminuir la concentración de olefinas y otros contaminantes, las gasolinas se formulan con éteres de bajo peso molecular, cuya función es incrementar su octanaje y actuar como fuente de oxígeno que promueva la combustión total de los hidrocarburos. Entre los más usados se encuentran el Metil Ter-Butil Éter (MTBE) y el Ter-Amil Metil Éter (TAME), que se obtienen por reacción de metanol con isobutileno e isoamileno, respectivamente. Su atractivo se debe a que las reacciones que los originan permite aprovechar las fracciones olefínicas C₄ y C₅ de las FCC de las refinerías. En la figura 1.9 se puede observar como se da lugar a este proceso en una refinería.

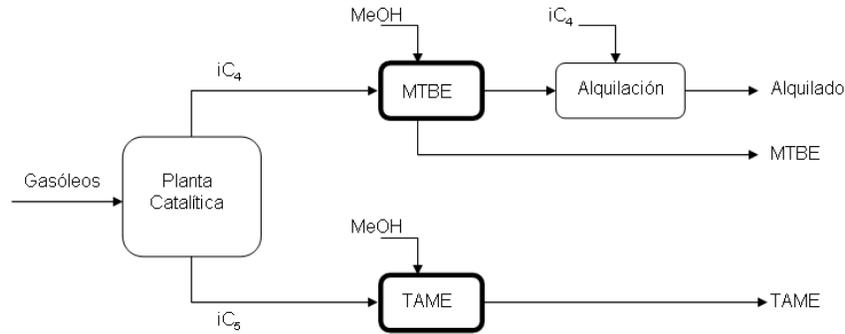


Figura 1.9. Producción de Oxigenantes en la refinería.

1.1.2.6 Alquilación

En refinación, el proceso de alquilación comprende la unión de olefinas (propileno o butileno) con isobutano, en presencia de un catalizador de naturaleza ácida fuerte como ácido fluorhídrico o ácido sulfúrico. Esta combinación forma una isoparafina a la que se le llama alquilado, producto constituido por componentes isoparafínicos cuyos puntos de ebullición se ubican dentro del intervalo de la gasolina.

La tendencia actual de las refinerías es producir la máxima cantidad posible de gasolina y disminuir su presión de vapor, así como su contenido de olefinas y aromáticos. Esto se favorece limitando la adición a la mezcla de gasolina con corrientes que contengan olefinas y sustituirlas por alquilado, mediante el proceso de alquilación.

En la figura 1.10 se puede apreciar el cambio en el número de octano y la Presión de Vapor Reid (PVR), al transformar las olefinas en alquilado.

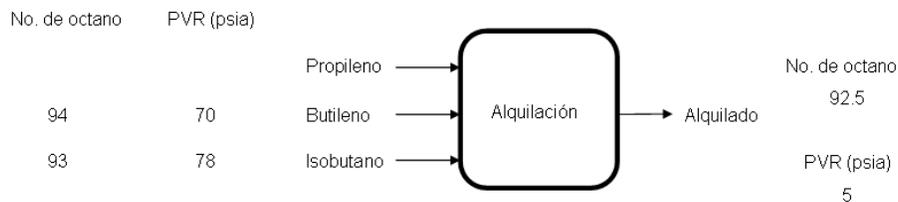


Figura 1.10. Alquilación.

1.1.3 Endulzamiento

El ácido sulfhídrico (H_2S) producido durante el Hidrotratamiento, debe separarse para evitar emisiones de azufre en la refinería. Para lograrlo, se realiza un proceso denominado endulzamiento. El endulzamiento consiste en la absorción de ácido sulfhídrico en soluciones acuosas de aminas, que luego se regeneran por agotamiento con vapor. El H_2S separado se procesa en unidades donde sufre una combustión parcial para generar una proporción adecuada de H_2S y SO_2 , que luego se hará reaccionar catalíticamente para generar azufre elemental.



1.1.4 Mezclado

Una vez se dispone de todos los componentes necesarios para la formulación de la gasolina, todos ellos se envían a un mezclador en las proporciones establecidas requeridas por el tipo de gasolina. Además, se adicionan otros tipos de compuestos como colorantes o inhibidores de corrosión, para completar las características de la gasolina final. Esta etapa en la elaboración de gasolinas, constituye la razón de esta tesis. Por este motivo, se analizará más a fondo en el capítulo 5 sobre la elaboración de gasolinas en la refinería de estudio.

1.1.5 Procesos de Fondo de Barril

La creciente oferta de crudos pesados con altos contenidos de azufre y bajos rendimientos de destilados, ha promovido la introducción de procesos de alta conversión llamados fondo de barril. Entre los procesos de fondo de barril más comunes, se destacan el hidrot ratamiento de residuos, la hidrodeseintegración profunda, la coquización y la viscorreducción, cuya función es procesar las corrientes pesadas para generar más gasolina y diesel.

Los procesos de hidrodeseintegración se diseñan para orientar las reacciones de descomposición de las moléculas para generar productos ligeros. La presencia del hidrógeno permite que estos productos no sean de carácter olefínico y sean bajas en azufre.

Por otro lado, la coquización consiste en la desintegración térmica no catalítica de los residuales, pero la ausencia de hidrógeno genera productos ricos en olefinas y azufre. Por esta razón, requiere un tratamiento ulterior en las unidades de hidrot ratamiento de destilados. Simultáneamente, se produce coque de petróleo, compuesto constituido principalmente por carbón.

Otro proceso basado en la descomposición térmica es la viscorreducción, orientado a la autogeneración de diluentes del combustóleo para reducir el uso de destilados valiosos que también se usan para este propósito.

1.2 Problemática e Impacto

Durante el proceso de combustión del motor de un automóvil, el carbono de la gasolina se combina con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono (CO_2) y el hidrógeno se une con el oxígeno para formar agua (H_2O). Estos productos se forman siempre que la proporción de aire a combustible sea la óptima (estimada en 14.7 a 1). Sin embargo, por lo general esta relación no se cumple estrictamente, lo que causa la generación de gases de efecto invernadero (GEI) como monóxido y dióxido de carbono (CO , CO_2), compuestos orgánicos volátiles (COV), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de Nitrógeno (NO_x). De acuerdo con el último reporte de gases de efecto invernadero elaborado por el Instituto Nacional de Ecología (INE), durante el 2002 las emisiones totales de GEI en millones de unidades de CO_2 equivalente del sector del transporte fueron de 114,385; de las cuales el parque automotor contribuyó con el 91% [INE, 2006].



Con el fin de reducir las emisiones de COV, NO_x y CO, a finales de los 90 la industria automotriz introdujo la tecnología de reducción por catálisis selectiva (SRC). Bajo esta tecnología, los nuevos vehículos están equipados con un dispositivo denominado convertidor catalítico, cuya función básica es transformar dichas emisiones en CO₂, vapor de agua, N₂ y O₂. No obstante, la eficiencia de este dispositivo se disminuye por la presencia de azufre, impidiéndole a la máquina alcanzar los niveles de emisiones establecidos por las entidades gubernamentales [Bazán, 2007].

Este hecho ha impactado considerablemente a la industria de la refinación mexicana, debido a que cada vez se cuenta con una mayor oferta de crudos pesados y extrapesados con muy alta cantidad de azufre. Como consecuencia, se ha requerido desarrollar modificaciones en la infraestructura actual, especialmente sobre los procesos de eliminación de azufre (hidrotratamiento, hidrodesulfuración). De la misma forma, ha sido necesario implementar nuevas medidas de reglamentación ambiental sobre la formulación de combustibles, entre las que se destacan la eliminación del tetraetilo de plomo (TEP) y el establecimiento de valores máximos más estrictos para el contenido de azufre, olefinas, aromáticos y benceno.

Con la implementación de éstas y otras medidas, ha sido posible disminuir el contenido de azufre en las gasolinas, para aumentar la calidad y mejorar la eficiencia del convertidor catalítico de los automóviles. Sin embargo, con la aparición de la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (Ver apéndice A), se requiere disminuir el contenido de azufre en un mayor porcentaje. Las modificaciones en la infraestructura actual de las refinerías para cumplir con esta norma, implican cambios primarios en los niveles de azufre, benceno, olefinas, volatilidad y el uso de compuestos oxigenados de las gasolinas.

1.3 Evolución en las Especificaciones de Gasolinas

La producción de combustibles ha sido objeto de mejoramiento continuo con el paso del tiempo, y prácticamente en todos los países se han llevado a cabo acciones tendientes a producir combustibles con menor contenido de componentes nocivos. No obstante, su producción sigue evolucionando con el fin de continuar con el desarrollo sin causar daños ambientales que menoscaben la calidad de vida de las generaciones futuras.

Para entender como ha evolucionado la producción de gasolinas en México, en que entorno se desenvuelve y cuáles son sus opciones en el futuro, es necesario dividir su trayectoria histórica en varias etapas:

- Los antecedentes históricos sobre el petróleo y el surgimiento de la industria petrolera en México.
- La evolución de la industria de refinación en México, pasando por los principales acontecimientos de las diferentes décadas del siglo XX, como la expropiación y la expansión.
- Las implicaciones ecológicas que han afectado a esta industria, provocando la reformulación de los combustibles tradicionales, y
- El futuro en el Siglo XXI, desde las actuales reconfiguraciones del Sistema Nacional de Refinación (SNR) hasta la necesidad de instalar nuevas refinerías,



no sólo para satisfacer una demanda de combustibles, sino también para asegurarse que éstos cumplan con las cada vez más estrictas especificaciones ambientales.

De acuerdo con el artículo “Evolución de las Gasolinas Automotrices en Pemex a Partir de la Expropiación Petrolera”, estas etapas pueden describirse como se presenta a continuación [Heredia, 1996].

1.3.1 Inicios

El inicio de la era del petróleo se dio en 1859, fecha en la que Edwin Drake perforó en Estados Unidos el primer pozo de petróleo, intuyéndose apenas la amplia gama de posibilidades energéticas que podía revolucionar al mundo. Sin embargo, su avance fue lento. Aún cuando en 1882 se inventó el motor de combustión interna, que dio paso a la creación del automóvil, todavía en la segunda década del siglo XX, el petróleo se utilizaba principalmente como proveedor de luz. Fue hasta 1916 cuando la producción en serie de automotores alcanzó los dos millones de unidades, que la industria del petróleo se volvió altamente rentable.

En 1886 inician las operaciones de la refinería "El Águila" construida en Veracruz por la Compañía Mexicana de Petróleo, la cual trataba cerca de 500 barriles diarios de petróleo norteamericano. Además, en el año de 1887 aparece la primera empresa petrolera extranjera que se estableció en México, la Waters Pierce Oil company, subsidiaria de Standard Oil de la familia Rockefeller, que se estableció en la zona de Tampico. Esta empresa se creó con el propósito de importar petróleo de Estados Unidos y refinarlo para satisfacer la demanda de los ferrocarriles. Fue así como en 1896 la Waters Pierce Oil Co., construye una refinería en Árbol Grande, Tamps., con capacidad para procesar dos mil barriles por día (MBPD) de crudo norteamericano.

En virtud de que la intención de las compañías extranjeras no era industrializar a México, sino obtener el máximo provecho posible, la refinación no se desarrolló al mismo ritmo que en otros países, por lo que no se contaba con una especificación en materia de combustibles. No obstante, consciente de la importancia del petróleo y de la necesidad de no depender solamente de Estados Unidos, en diciembre de 1901 se emitió la primera ley petrolera de México. Con esta ley se buscó otorgar concesiones a otras empresas para invertir en la exploración, explotación y refinación de petróleo en la zona conocida como la Faja de Oro al norte de Veracruz y sur de Tamaulipas.

Como consecuencia, se instauraron las refinerías de El Ébano (1903), Minatitlán (1906), Doña Cecilia (1914), Tampico (1915) y la planta de recuperación de líquidos de Tuxpan (1916). Luego, en la década de 1920 se instalan varias refinerías, de manera que para 1922, existían 12 refinerías con una capacidad de refinación de más de 380 MBPD, siendo la más grande de 75 MBPD. Para entonces, la demanda de gasolina ascendía a 140 millones de litros por año (MML/a) y apareció la primera especificación de gasolinas, que consistía en una Temperatura Final de Ebullición (TFE) de 225 °C y prueba Doctor negativa (Norma ASTM D 4952-02).

En 1933 se instalan las refinerías Azteca (producción 12,000 L de combustibles), y Bellavista de 1,5 MBPD de capacidad. Esta última fue la primera refinería operada por el Estado, a través de Compañía de Petróleos de México S.A. "Petromex", por esta razón se dice que en este año se inicia la refinación mexicana. Para entonces, la



demanda de gasolina ya ascendía a 350 MML/a, y se producían en México 918,000 barriles por año, con un número de octano de 52 a 56.

Posteriormente, en 1936 se instala en Poza Rica una refinería de 7.5 MBPD y en 1937 en Nuevo Laredo una experimental de sólo 10 BPD, con lo que, para ese año existían en México 4 refinerías completas, 6 refinerías primarias, 1 experimental y 11 de compresión.

1.3.2 Expropiación

Esta etapa histórica comienza el 18 de marzo de 1938, cuando en México se emite el decreto de expropiación del petróleo, y se funda Petróleos Mexicanos. En ese entonces, el país consumía un solo grado de combustible automotriz con el nombre de Gasolina, el cual cumplía con especificaciones muy modestas, de acuerdo con los requerimientos de los motores de aquella época y que se satisfacían con 57 octanos. Esta gasolina se preparaba con 3 mL/Gal máximo de tetraetilo de plomo (TEP) y tenía una estabilidad química definida por las gomas preformadas de 10 mg/100 mL máximo y un período de inducción de 180 minutos mínimo.

En 1940, apareció en el mercado la primera gasolina formulada por Pemex a la que se denominó Mexolina. La calidad del combustible se mejoró al incrementar su índice de octano a 70 mínimo con 3 mg/gal de TEP, el período de inducción a 240 mínimo y disminuir las gomas preformadas a 5 mg/100 mL máximo, y la demanda de gasolina llegaba ya a 680 MML/a (4.3 MM barriles).

En 1946 se inaugura la nueva refinería de Azcapotzalco, con lo que la capacidad de refinación llega a 144 MBPD, misma que llegó a 170 MBPD al inicio de los 50's.

En 1950 la gasolina se convirtió, por decreto, en un artículo de primera necesidad, y se inició la producción de Supermexolina, con 80 octanos y 4 mL/gal de TEP. Ese año arranca la refinería de Salamanca (la más antigua de las refinerías actuales), al año siguiente Reynosa, y cinco años después Minatitlán. Es importante señalar que en ese tiempo no se tenían los graves problemas actuales de contaminación en el medio ambiente, dado que era bajo el número de vehículos en circulación

1.3.3 Expansión

A partir de 1956, con la aparición en el mercado de autos equipados con motores de mayor relación de compresión, fue necesario elaborar una nueva gasolina con mayor octanaje: Gasolmex, de 90 octanos y 4 mL/gal de TEP. Las especificaciones de la Supermexolina, igual que la del Gasolmex, fueron revisadas en tres ocasiones: en 1965, 1966 y 1970, sin modificaciones importantes. La presión de vapor se incrementó en 1965 de 9 a 9.5 lb./pulg², favoreciendo el arranque del motor en frío.

En 1957 se amplían las refinerías de Poza Rica, Reynosa y Azcapotzalco, considerada una de las más modernas de Latinoamérica. Para esta fecha se incrementa en 2 octanos la especificación de la Mexolina y la Supermexolina.

Entre 1959 y 1961 se cierran las refinerías de Mata Redonda y Árbol Grande y se deja de producir Mexolina, de manera que la capacidad de refinación quedó en 357 MBPD.



En la década de los 60's la industria de refinación pasó prácticamente desapercibida, destacándose la salida al mercado de la gasolina PEMEX 100, con un índice de octano de 100 y los mismos 4 mg/gal de TEP. Para 1970, la capacidad nominal de refinación era de 592 MBPD.

Hasta el año de 1973 se mantuvieron en el mercado cuatro grados de gasolinas para uso en automotores, con diferentes opciones de octano para satisfacer con amplitud los requerimientos del parque vehicular en México. Estas formulaciones iban desde la Mexolina con 70 octanos RON, la Supermexolina con 80 y Gasolmex con 90, hasta la Pemex 100 con 100, todas conteniendo tetraetilo de plomo. La existencia de cuatro grados de gasolina, de las cuales la Mexolina y Pemex 100 representaban en 1972 apenas el 5 y 9.6% de la demanda respectivamente, complicaba tanto la producción como la distribución. Entonces, se realizaron estudios del mercado con los que se definió que el promedio de octano requerido en el país era del orden de 85, para los vehículos de esa fecha.

Por otra parte, el turismo proveniente de los Estados Unidos, que se internaba en México en automóviles diseñados para usar gasolinas de alto octano sin plomo, hacía necesario ofrecer otras alternativas. Fue así como se desarrollaron dos nuevas gasolinas, la Nova con 81 octanos y 3.5 mL TEP/Gal máximo, y la Extra con plomo de 94 octanos RON y 3.5 mL TEP/Gal máximo en 1973. Posteriormente, la Extra sin plomo pasó en 1974 a 92 octanos y 0.05 gr. Pb/Gal máximo, sustituyendo a las cuatro anteriores. Para entonces, las gasolinas sin plomo se empezaron a reportar en gramos de plomo por galón en lugar de mL TEP/Gal.

Las campañas publicitarias realizadas para promover estos nuevos combustibles, así como las recomendaciones contenidas en el manual del propietario de los automóviles nuevos, señalaban la utilización de mezclas con ambos grados, para satisfacer las necesidades de octano, de acuerdo al tipo de motor y a la altura sobre el nivel del mar. Sin embargo, el público prefirió utilizar la Nova de 81 octanos a pesar de no satisfacer en todos los casos sus necesidades. Por esta razón, en 1974 la gasolina Extra con 92 octanos representaba solamente el 12% de las ventas. En el año anterior, la suma de Gasolmex y Pemex 100, ambas de alto octano, lograban el 49% del mercado. Esto se debió a que la preferencia de los conductores se inclinó hacia al precio y no hacia la calidad del combustible que requerían.

1.3.4 Reformulación

En 1980 arrancaron las refinerías de Cadereyta (235 MBPD) y Salina Cruz (150 MBPD), y en los años siguientes se ampliaron las refinerías de Minatitlán, Tula, Madero y Salina Cruz, aumentando la capacidad de refinación a 1,514 MBPD a fines de los 80's.

En esta década cobran fuerza las cuestiones ambientales, y se inicia la reducción de contenido de plomo en la gasolina, lo que obliga a usar nuevos procesos (oxigenados y alquilación). A partir de 1982, sin sufrir cambios importantes en su composición básica, la gasolina Nova se reformula con el fin de reducir el uso de tetraetilo de plomo. Esto permitió disminuir el impacto ambiental por concepto de plomo en 3,240 toneladas por año en la Ciudad de México, gracias a una disminución en el contenido de tetraetilo de plomo de 2.49 mL/gal en 1981 a 0.78 mL/gal en 1987.



En 1986, como resultado de los estudios para el mejoramiento de la calidad en las gasolinas y con el fin de reducir la contaminación ambiental en las grandes urbes, se revisaron las especificaciones en ambos grados. Esto dio origen a las nuevas gasolinas Nova Plus y Extra Plus, teniendo la Nova, un rango en el contenido de tetraetilo de Pb comprendido entre 0.5 y 1.0 mL/gal para el área metropolitana y la Extra, 0.05 g Pb/gal máximo.

Otro cambio relevante fue la incorporación de un aditivo detergente (IMP DG 2A1) que, de acuerdo con extensas pruebas de flotilla realizadas, permitió una disminución en la emisión de contaminantes a la atmósfera de 38% de monóxidos de carbono y 40% de hidrocarburos no quemados.

Hacia 1989, Petróleos Mexicanos le dio mayor énfasis a la vigilancia de la contaminación causada por el uso de combustibles, por lo que realizó cambios importantes en la formulación de las gasolinas a fin de aumentar su eficiencia y cumplir con las exigencias de calidad ecológica. Esto significaba menor contenido de hidrocarburos ligeros, aromáticos (benceno y pesados), azufre y olefinas, mayor cantidad de compuestos oxigenados (MTBE y TAME) y el uso de un aditivo detergente. En consecuencia, se analizó la conveniencia de disminuir la presión de vapor de las gasolinas. Sin embargo, la meta fijada en Estados Unidos para la presión de vapor, coincidía con el valor máximo de 9.5 lb/pulg² de nuestras gasolinas y el valor típico de la producción nacional se encontraba por abajo del máximo especificado.

Se puede afirmar que para entonces, las gasolinas Nova Plus y Extra Plus contenían aproximadamente 5.6% de hidrocarburos ligeros con una presión de vapor de 8.0-8.5; mientras que las gasolinas norteamericanas, según análisis efectuados por Pemex, reportaron 10.8% de ligeros y una presión de vapor de 11.3 lb/pulg². Las muestras de gasolinas regular y sin plomo se tomaron en la época de verano y fueron muestreadas en estaciones de servicio en McAllen, Texas.

En 1991, se logró otra reducción del contenido de plomo muy significativa en la gasolina Nova, bajando de 0.73 a 0.36 mL TEP/gal, dejando de emitirse a la atmósfera 646 toneladas de plomo con respecto a 1990. En 1994, este nivel se bajó de 0.18 a 0.13 mL de TEP/gal, llegando a reducirse en otras 98 toneladas al año. Aunado a lo anterior y avanzando en el continuo esfuerzo por proteger el ambiente, apareció la gasolina Magna Sin, con un octanaje de 82 y solo 0.01 gr. Pb/gal máx.

Es importante señalar que se introdujeron dos nuevos conceptos para el octano, el octano MON con 82 mín, que corresponde a un índice RON de aproximadamente 92, y el Índice de Octano (R+M)/2 con 87 min, que es en realidad es un promedio de los octanos RON y MON y representa el comportamiento del octano en carretera.

La gasolina Magna-Sin para la Zona Metropolitana Valle de México (ZMVM), fue una gasolina sin plomo, reformulada empleando Metil-Terbutil Eter (MTBE) y Alquilaro ligero, que permitió controlar el contenido de aromáticos a 30% máximo, el de olefinas a 15% y el benceno a 2%, aún muy elevados para los estándares internacionales. El aditivo detergente fue sustituido por uno que, además de evitar la formación de depósitos en el carburador, reducía los ya presentes. Estos controles han sido los más significativos y el número de pruebas de control de calidad que cubre la especificación completa, constaba de 27 parámetros.



Al mismo tiempo que apareció la Magna Sin, se reformuló también la Nova Plus con MTBE y Alquilado Ligeró; con un contenido de TEP de 0.2 a 0.3 mL/gal para la Zona Metropolitana, se controlaron los aromáticos a 30% máx., las olefinas a 15% máx. y el benceno a 2% máx.

No contento con estas medidas y buscando mejorar la calidad ambiental de la Cd. de México, Pemex cerró en 1991 la refinería de Azcapotzalco, transfiriendo su producción a Minatitlán, Tula y Madero. Además, inició el proyecto Paquete Ecológico para satisfacer las especificaciones de los productos, según las normas de calidad técnica y ecológica entre las que se destacaban las siguientes:

- Reducción del contenido de azufre en todos los combustibles
- Eliminación de plomo
- Incremento de octano en la gasolina, con mayores limitaciones en su contenido de benceno por su efecto cancerígeno y de aromáticos y olefinas, por su mayor reactividad fotoquímica en la atmósfera.

El proyecto culminó en 1997 con la desaparición, en sólo 3 años, de la gasolina con plomo y la introducción de la gasolina Premium, de 93 octanos y 0 plomo, 500 ppm de azufre, 25% de Aromáticos, 10% de olefinas y 1% de benceno, mientras que surgió la Magna de 87 octanos y 1000 ppm de S.

En el invierno de 1993 apareció la Magna Sin ZMVM para el Período Invernal, vigente del primero de diciembre/93 al 31 de marzo/94, con una reducción de las olefinas de 15 a 12% y el benceno de 2.0 a 1.5%. Al mismo tiempo apareció la Nova Plus ZMVM para el Período Invernal, donde se bajaron los aromáticos de 30 a 25% con una reducción del 17% y las olefinas de 15 a 12% con una reducción de 20%. El benceno se redujo de 2 a 1.5%, representando un 25% de reducción y el contenido de TEP en mL/gal bajó de 0.2/0.3 a 0.1/0.2 % con una reducción del 50%.

En 1994, para satisfacer la demanda de la Zona de la Frontera Norte (ZFN) con una gasolina con características semejantes a las de los estados fronterizos de EUA, apareció la gasolina Magna Sin ZFN, cuya especificación es similar a la de la Magna-Sin, variando su volatilidad en forma estacional.

1.3.5 Perspectivas Futuras

Con la inquietud de seguir mejorando las gasolinas y reducir cada vez más sus contaminantes, se están estudiando diversas formulaciones donde haya nuevos componentes con gasolinas isomerizadas. Así mismo, mayores porcentajes de alquilados, MTBE y otros componentes oxigenantes, como el TAME. De la misma forma, se busca incorporar otros aditivos detergentes de nuevas generaciones, o aditivos mejoradores de octano como el Metilcyclopentadienil Manganeso Tricarbonilo (MMT).

Con las nuevas gasolinas reformuladas se busca reducir la evaporación de hidrocarburos ligeros, hidrocarburos no quemados, el contenido de aromáticos, de olefinas y de benceno.



Aunque se piensa en migrar hacia los combustibles renovables, el reto no es sencillo, ya que deben cumplir con requerimientos tanto ambientales, como económicos y de desempeño, tales como:

- La infraestructura existente debe poder ajustarse hacia los nuevos procedimientos de producción, que no requiera de grandes inversiones
- Bajo contenido de aromáticos, azufre y oxígeno
- Cumplir con las normas ambientales existentes y emergentes
- Sin problemas de seguridad tanto para la producción como para el usuario final.
- El costo al público no debe representar un incremento sustancial.
- Excelente desempeño en cualquier clima.

Se entiende como combustible renovable para vehículos (Definición de la *Energy Policy Act2005*, ver apéndice B), aquel que se produce a partir de granos, féculas, semillas, materiales vegetales o animales y el Gas natural producido por biogas, incluyendo rellenos, plantas de tratamiento de aguas negras o cualquier otro sitio en donde se encuentre material orgánico en descomposición.

La Energy Policy Act2005 (EPACT05), es la declaración sobre política energética de Estados Unidos firmada en agosto de 2005, con el propósito de fijar los estándares para combustibles y para asegurarse que se empleen combustibles renovables en los vehículos automotores; entre otras regulaciones. Esta especificación, es apoyada por la Cámara de Comercio de Estados Unidos (U.S. Chamber of Commerce), que es la federación comercial más grande del mundo, a lo que debe su influencia en otros países. Asociado a lo anterior, existe el mandato oficial de eliminar los compuestos oxigenados de los combustibles, lo cual influye en la configuración futura de las refinerías mexicanas.

La EPACT05 especifica también los galones que deben usarse de combustibles renovables en miles de millones de galones/año (ver apéndice B). Estas especificaciones han dado lugar a siglas como E10 (gasolinas con 10% de etanol) o B5 (diesel con 5 % de biodiesel).

1.4 Marco Regulatorio y Normativo

La normatividad de protección ambiental es un aspecto fundamental al que la industria debe apegarse para la preservación y mejoramiento del entorno. Al margen de que el incumplimiento de estas disposiciones acarrea diversas sanciones, es de gran importancia, como responsabilidad social, cumplir con la normatividad ambiental para asegurar un futuro medio ambiente adecuado.

La legislación ambiental en México no se encuentra organizada por sectores de competencia económica; su estructuración responde a componentes ambientales, recursos y medios. En consecuencia, el marco regulatorio está conformado por un conjunto de disposiciones constitucionales, legales, reglamentarias y técnicas, aplicables a distintas actividades. A continuación se relacionan los principales instrumentos reglamentarios de acuerdo a su jerarquía:



- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- Tratados internacionales
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
- Leyes Federales Sectoriales aplicables en materia ambiental
- Reglamentos de la Ley General Ambiental y de las Leyes Sectoriales
- Normas Oficiales Mexicanas Ambientales
- Acuerdos administrativos

Actualmente México cuenta con 106 normas nacionales vigentes, desarrolladas con la colaboración de diversas Secretarías del Gobierno Mexicano y la Comisión Nacional del Agua. De este conjunto, en el apéndice A se describe aquellas relacionadas con las emisiones contaminantes causadas por los vehículos de combustión interna.

1.4.1 Calidad de los Combustibles

Las especificaciones de los combustibles fósiles, tienen por objeto disminuir significativamente las emisiones a la atmósfera, y debe ser acorde con las características de los equipos y sistemas de combustión que los utilizan. Los combustibles fósiles considerados dentro de la normatividad mexicana son el gas natural, gasolinas, turbosina, diesel, combustóleo, gasóleo y LPG.

La norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 es la que actualmente define la calidad de los combustibles y fue derivada de la NOM-086-ECOL-1994, NOM-086-SEMARNAT-1994 y del Acuerdo del 23 de abril de 2003 (ver apéndice A). Este acuerdo reformó la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la SEMARNAT que estaban identificadas con las Siglas "ECOL" y "RECNAV", y que en lo sucesivo aparecen con las siglas "SEMARNAT".

En la norma mencionada se establece que a partir del 1 de octubre de 2006 en todo el país, la gasolina Premium debe tener un contenido de azufre entre 30 y 80 partes por millón (ppm). Esta especificación aplicará para la gasolina Magna a partir de octubre de 2008 en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, mientras que para el resto del país aplicará a partir de enero de 2009.

En cuanto al diesel, se establece un contenido máximo de azufre de 15 ppm. Esta reglamentación regirá en la zona fronteriza norte a partir de enero de 2007; en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey desde enero de 2009 y en el resto del país a partir de septiembre de 2009.

1.4.2 Política Energética

La Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo y su reglamento dispone que la Nación llevará a cabo la exploración y explotación del petróleo y las demás actividades relacionadas con la industria petrolera por conducto de Petróleos Mexicanos y sus organismos subsidiarios. En 1992, mediante la Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos, se dispuso una distribución de las actividades que abarca la industria petrolera, mediante la creación de organismos descentralizados. Estos organismos son: Pemex Refinación, Pemex Gas y Petroquímica Básica y Pemex Petroquímica.



El Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 tiene como objetivo garantizar una oferta suficiente y oportuna de energía, que apoye de manera sostenida al crecimiento económico del país. Por esta razón, el gobierno nacional ha propuesto una serie de líneas de acción que se centra en los siguientes objetivos:

- Promover la eficiencia y la productividad para garantizar el abasto suficiente de hidrocarburos.
- Avanzar en la reconfiguración del Sistema Nacional de Refinación y ampliar su capacidad de procesamiento.
- Fortalecer el programa de calidad de gasolinas.
- Verificar el cumplimiento de los combustibles automotores, de conformidad con las estrictas normas internacionales.
- Modernizar y ampliar el sistema nacional de ductos y la infraestructura para incrementar la capacidad de refinación.
- Introducir nuevos sistemas de alta tecnología para mejorar el control de la infraestructura de producción, almacenamiento, distribución y comercialización de combustibles.
- Adecuar el marco jurídico a los nuevos requerimientos tecnológicos y ambientales, entre otros.

1.5 Reconfiguración de las Refinerías

Con el objeto de cubrir la demanda de petrolíferos del país de manera oportuna, competitiva y con la calidad requerida, PEMEX ha iniciado un ambicioso programa de modernización y Reconfiguración de sus refinerías. Este programa contempla el procesamiento de crudos pesados y extrapesados con gran contenido de azufre, debido a que se encuentra en gran proporción en los yacimientos mexicanos.

Otros proyectos estratégicos contemplados para satisfacer la creciente demanda de combustibles del mercado interno, es la reconfiguración mediante trenes de coquización en Salamanca y Tula, la modernización de la refinería de Salina Cruz y un nuevo tren de refinación para incrementar la capacidad de destilación atmosférica a 2.155 millones de barriles diarios en 2015, es decir 40% más respecto a los niveles actuales. Las prioridades en la formulación de los proyectos se orientaron hacia aquellos que permitieran reducir los impactos ambientales derivados del manejo y proceso de los hidrocarburos. Asimismo, se consideraron las inversiones destinadas a elevar la producción de petrolíferos y satisfacer la demanda nacional con rentabilidad.

El programa de reconfiguración de refinerías fue estructurado para hacer frente a los cambios que se prevén en la composición de la demanda de productos petrolíferos. Los principales objetivos del programa son: modernizar el Sistema Nacional de Refinación (SNR) para obtener productos con mayor valor agregado, satisfacer el crecimiento de la demanda y procesar un mayor volumen de crudo Maya.

Dentro de este programa se piensa implementar un sistema de “Formulación en Línea de Gasolinas” en una de las refinerías del país. Este proyecto contribuirá a generar mayores volúmenes de combustibles para satisfacer parte de la demanda nacional. Por esta razón, este trabajo tiene por objeto el desarrollo de un modelo para encontrar el flujo óptimo de mezclado de componentes para cumplir con la reformulación de gasolinas a un mínimo costo de producción.



2. PANORAMA NACIONAL DEL SECTOR AUTOTRANSPORTE

La evolución tecnológica en el transporte ha propiciado el crecimiento económico de las comunidades y países. Sin embargo, a este desarrollo está asociado un incremento en la demanda de combustibles que conlleva mayores emisiones contaminantes. Durante el año 2006, los vehículos automotores llegaron a consumir en México más de 260 millones de barriles de gasolina [SENER, 2006]. Más aún, estas cifras siguen incrementando como consecuencia del continuo crecimiento vehicular. Este crecimiento se debe a la marcada preferencia por el uso del automóvil para transportarse, ya que este medio de transporte ofrece una nueva dimensión de libertad: la capacidad de desplazarse de forma independiente.

En México, el medio de transporte más usado es el carretero, así como el de mayor importancia económica. Por esta razón, desde las últimas tres décadas las preocupaciones sobre la eficiencia del combustible, su impacto ambiental y la eliminación de los vehículos viejos han cobrado un papel importante [ENAC, 2005]. A fin de identificar las oportunidades de reducción de la contaminación en el país, en este capítulo se presenta un análisis sobre el estado actual del sector autotransporte. Por lo anterior, se hará una descripción general sobre su desarrollo durante los últimos diez años, la problemática que enfrenta y las tendencias tecnológicas para responder eficientemente a la creciente demanda.

Este análisis ha tomado como base el informe Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015, emitido por la Secretaría de Energía (SENER) [SENER,2006], así como algunas estadísticas del sector proporcionadas por La Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) [SCT, 2006]. En algunos casos no fue posible obtener información actualizada a 2005 o 2006, debido a que ésta todavía se encontraba en proceso de elaboración en las dependencias fuente, al momento de ser requerida. No obstante, la información obtenida se considera suficiente para cumplir con el propósito de ilustrar el comportamiento y las tendencias en cuanto al parque automotor se refiere.

2.1 Desarrollo del Parque Vehicular

El crecimiento del parque vehicular ha puesto a la industria nacional de refinación frente al reto de ampliar la oferta de combustibles para satisfacer su creciente demanda. Para lograrlo, PEMEX Refinación ha emprendido un ambicioso programa de modernización y Reconfiguración de sus instalaciones. Por otra parte, durante el periodo comprendido entre 2006 y 2015, la industria automotriz iniciará un cambio tecnológico para optimizar de manera integrada la eficiencia y emisiones al medio ambiente, del motor de combustión interna.

En el caso de los vehículos a gasolina, el cambio tecnológico se dará de forma paulatina, evolucionando hacia combustibles de Ultra Bajo Azufre (UBA), que le permitan alcanzar un mayor rendimiento en su consumo. De manera que se espera que estos automotores sigan manteniendo la mayor proporción respecto a los automóviles que emplean otras fuentes de energía. En este sentido, la SENER estima que el parque a gasolina pasará de 17,030.6 miles de unidades en 2005 a 29,007.6 miles de unidades en 2015, lo que representa una tasa media de crecimiento anual de



5.5% [SENER, 2006]. Por esta razón, será necesario producir combustibles acordes con las especificaciones requeridas para una comercialización masiva.

Actualmente, el parque vehicular nacional asciende a 18 millones de vehículos, de los cuales el 43% corresponde a unidades de más de 10 años de antigüedad [SCT, 2006]. Esta porción de vehículos, no cuenta con dispositivos anticontaminantes que disponen los vehículos con tecnología de punta, concretamente sobre el convertidor catalítico y el sensor de oxígeno. Cuando un vehículo está equipado con el convertidor catalítico de tres vías, las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono se reducen en un 96% [Bazán, 2007]. Específicamente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) cerca del 60% de los vehículos no poseen este convertidor y de acuerdo con las autoridades ambientales, los automotores con estas características contaminan de 30 a 45 veces más que un automóvil equipado con esa tecnología [Bazán, 2007].

Según estudios realizados por el Programa Universitario de Energía (PUE), el impacto de intercambiar el 10% de los vehículos anteriores a 1993 por vehículos 2001-2010 traería una reducción en las emisiones totales de 8.3% en el año 2010 [Bazán, 2007]. En contraste, reducir el azufre de la gasolina a 50 ppm, pese a requerir inversiones muy elevadas, únicamente las reduciría en 4% [Bazán, 2007]. No obstante, los nuevos automotores demandan este tipo de combustibles, aunque resulta evidente que la porción de la flota vehicular con más de 10 años, no reflejará el mismo beneficio ambiental comparado con la nueva generación de vehículos al utilizar combustibles UBA.

Durante los últimos cuatro años el parque vehicular a gasolinas se ha incrementado en 3.2 millones de unidades. En particular, en el 2005 la cifra llegó a 18 millones de vehículos registrados, entre automóviles, camiones de carga, camiones de pasajeros y motocicletas. Además, el índice de motorización pasó de 143 a 169 vehículos por cada mil habitantes entre el 2002 y 2005, lo cual representa un crecimiento de 26 vehículos por millar en este periodo, pese a la baja de unidades antiguas [Bazán, 2007].

Como puede observarse en los datos de la tabla 2.1, el parque vehicular que consume gasolina representó el 94.6% del total de vehículos registrados en el 2005; mientras que el que consume Diesel fue solo del 3.5%. Además, si se observan los vehículos impulsados por Gas Licuado de Petróleo (GLP) y Gas Natural Comprimido (GNC), apenas representaron el 1.87% y el 0.011% respectivamente.

Tabla 2.1. Evolución del Parque Vehicular del Sector Autotransporte, 1995-2004 (Miles de Unidades)

AÑO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	TMCA
Gasolina	11360	11718	12524	13438	14122	15339	17075	19001	19934	20670	17030.6	6
Diesel	442	457	488	525	555	606	675	751	787	816	633.7	7
Gas LP	23	35	45	81	172	254	292	336	331	329	336	N.A.
GNC							1	1	2	2	2	N.A.
Total	11825	12210	13057	14044	14850	16199	18043	20089	21054	21818	18001	7

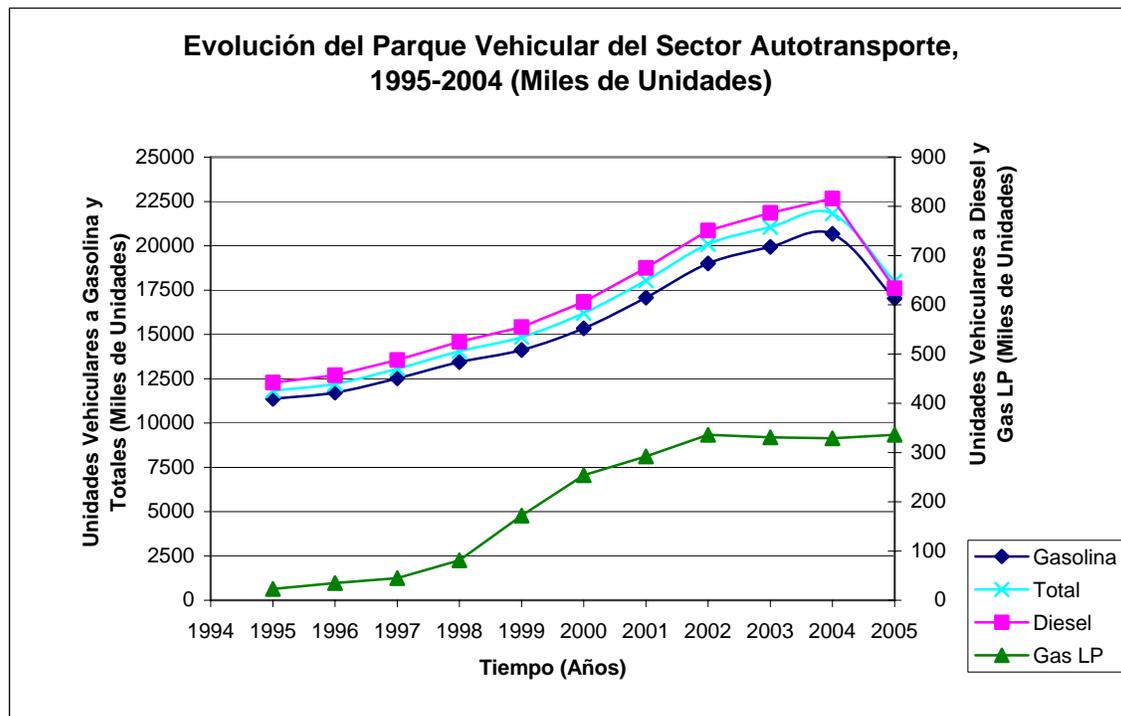
FUENTE: IMP con información de Banco Mundial, Banxico, INEGI, PEMEX, SENER, empresas privadas y SENER-Prospectiva de petrolíferos 2005-2014 y 2006-2015.



Como puede apreciarse, las cifras indicadas para el GLP y el GNC son muy desalentadoras, pese a que estos dos combustibles son sin duda los menos contaminantes. Este hecho se debe a que no ha habido una política sobre el uso de combustibles que entusiasmara a los usuarios a utilizar tales vehículos. No obstante, esta carencia puede deberse posiblemente, a la multiplicidad de usos de estos combustibles en otros sectores de la economía, principalmente para la generación de eléctrica y para el sector doméstico.

Todo esto hace reflexionar acerca de las deficiencias en términos de nuevas tecnologías en todo el sector energético mexicano.

No sucede lo mismo con el Diesel, cuya aplicación en el sector transporte ha sido ampliamente difundida por ser menos contaminante comparado con la gasolina. No obstante, los vehículos particulares que utilizan este combustible, son casi inexistentes en nuestro país, ya que su empleo se ha concentrado en los sistemas de transporte público. Según la SENER, la expectativa de crecimientos para estos vehículos se estima en 6.1% anual, al pasar de 633.7 miles de unidades en 2005 a 1,142.0 miles de unidades en 2015. Este crecimiento será atribuido, a los proyectos de renovación del parque vehicular para el transporte de carga y a la renovación de flotas vehiculares de empresas productoras de bienes y servicios en los próximos 10 años [SENER, 2006].



Gráfica 2.1. Evolución del Parque Vehicular del Sector Autotransporte, 1995-2004 (Miles de Unidades)



En el caso de los automotores impulsados por Gas Licuado de Petróleo (GLP) y Gas Natural Comprimido (GNC), la SENER considera que en 2015 alcanzarán una magnitud de 367.5 y 19.4 miles de unidades respectivamente. Así, durante el periodo de análisis, el total del parque vehicular pasará de 18,000.5 a 30,536.5 miles de unidades.

En este orden de idas, al concluir el periodo se espera que el 95.0% de vehículos sean impulsados por gasolinas, 3.7% por diesel y el porcentaje restante requiera fundamentalmente GLP, mientras que el GNC seguirá manteniendo una participación prácticamente nula.

En la gráfica 2.1 se puede observar el crecimiento acelerado que ha presentado el parque automotor en el país, conllevando a una creciente demanda de combustibles, con un pequeño descenso presentado del 2004 al 2005 por la salida de circulación de unidades antiguas. Este hecho se ha visto favorecido por las facilidades de crédito que han otorgado los distribuidores de vehículos para su adquisición. Al respecto, cabe mencionar que en 2005, las ventas de unidades de carga en el autotransporte se incrementaron en 6,435 unidades respecto al 2004. En ese año, la composición del parque vehicular de pasaje y carga terrestre, fue de 16,956 unidades, de las cuales 12,487 correspondieron a vehículos de pasaje y 4,469 a unidades de carga [SENER, 2006].

El aumento de las ventas internas de vehículos a gasolina, (automóviles y camiones) durante los últimos 10 años, fue de 948 mil unidades, reflejadas en un crecimiento promedio anual del 22.4%. Esta evolución de la demanda de vehículos permitió registrar un incremento del 517.2% en 2004 respecto a 1995. Para el año 2004, las ventas registradas fueron de un millón 132 mil unidades, lo cual significa un incremento del 16.0% con relación al 2003. De este total, 714 mil unidades fueron de automóviles y 418 mil de camiones [SENER, 2006].

Por otro lado, las políticas de regularización de vehículos ilegales es otro aspecto que está contribuyendo a incrementar el volumen de vehículos existentes. En este sentido, cabe mencionar que en el 2005 se regularizaron 990,867 vehículos [SENER, 2006].

Sumado a estos factores, también se encuentran aspectos de orden cultural y de seguridad que inducen a un uso excesivo del automóvil en los centros urbanos, así como la preferencia de los pasajeros a utilizar el autotransporte en lugar del transporte aéreo.

En este contexto, puede afirmarse que el crecimiento del parque automotor ha conllevado a un incremento significativo en el consumo de gasolinas durante la última década. En efecto, la demanda de gasolinas ha registrado un crecimiento promedio anual de 3.4% durante este periodo, como se describirá en el capítulo 3. En el 2005 la demanda de este combustible fue de 671.5 MBD; 35.4 MBD más respecto al 2004, lo cual demuestra la relación directa entre la venta de vehículos y el volumen de combustible consumido [SENER, 2006].

Además, se estima que las gasolinas continuarán siendo el combustible que presente un mayor consumo en el autotransporte con 60.8%, durante los próximos 10 años. Esta dependencia se atribuye a una limitada oferta de otros combustibles tales como el gas natural comprimido (GNC), el GLP carburante y el diesel. Además, han influido otros



factores de orden tecnológico que no han logrado ser superados. Por ejemplo, el escaso consumo del GNC se debe a la limitada infraestructura disponible para su adquisición, mientras que el incremento en el precio del GLP carburante, aunado a los problemas de inseguridad por conversiones no reguladas, son los factores que han limitado la utilización de este combustible [SENER, 2006].

Frente a estas situaciones, las gasolinas siguen manteniendo su posición predominante como combustible para automotores. Por esta razón, los programas de mejoramiento de la calidad de combustibles programados por Pemex Refinación, serán fundamentales para poder impulsar la entrada de futuras tecnologías vehiculares, tanto en motores que requieran de gasolinas de bajo contenido de azufre, como en los vehículos híbridos que también requieran gasolinas.

Sin embargo, de acuerdo a las perspectivas antes mencionadas, nuevamente se hace evidente la falta de una política energética no solo congruente, sino más inclinada hacia fuentes renovables de energía, pues tal como ha sido concebida los lineamientos hacia una política más ecológica y eficiente son prácticamente inexistentes. En el apartado que sigue, se realiza un resumen de nuevas tecnologías para el transporte que, de implementarse, incrementarían de manera real, una oferta más sustentable para el sector autotransporte.

2.2 Tendencias Tecnológicas del Autotransporte

Los principales problemas ambientales generados en las grandes ciudades, han sido ocasionados por el sector transporte, íntimamente ligado al consumo de combustibles fósiles. Gran parte de los estudios sobre la contaminación por vehículos se inició en California, EUA, a principios de los años 40. La combinación de un rápido incremento en la población y por consiguiente en el número de automóviles en la zona geográfica enfocó la atención de los políticos y de los científicos para conocer qué reacciones se llevan a cabo en la atmósfera entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno.

En México, desde 1975 se inició el monitoreo de la calidad del aire como consecuencia de los datos obtenidos de los estudios realizados sobre el impacto de la contaminación sobre la salud de la población. Estos estudios, se realizaron debido a los frecuentes cuadros patológicos en el sistema respiratorio, principalmente bronquitis crónica, presentados por la población urbana [SERMARNAT, 2006].

La Agencia de Protección Ambiental de EUA (EPA) enlistó las 20 sustancias más peligrosas y prioritarias en su abatimiento en orden decreciente de amenaza. De los primeros cinco, dos están asociados con los carburantes: 1) plomo, 2) arsénico, 3) mercurio, 4) cloruro de vinilo, 5) benceno. La gasolina genera dos contaminantes: 1) sus vapores, y 2) los productos gaseosos de su combustión (NO_x, CO, CO₂ y partículas nocivas) [SERMARNAT, 2006].

La industria automotriz ha logrado importantes avances en materia de reducción de emisiones a través de la introducción de mejoras tecnológicas del motor de combustión interna. Entre las principales mejoras cabe mencionar la inyección directa de gasolina (GDI), transmisiones de 6 velocidades y cajas de cambio automáticas, trenes de válvulas completamente variables (VVT), dirección con alimentación eléctrica (EPS),



sistemas start-and-stop, turbo-alimentación y disminución del tamaño del motor, entre otras [ANFAC, 2004].

Las nuevas tendencias tecnológicas de la industria automotriz requieren de la disponibilidad de un combustible cuyas características le permitan al motor un desempeño óptimo, generando un mínimo de emisiones contaminantes. En este sentido, los motores de diesel son actualmente los más eficientes, ya que producen un 25% menos de emisiones y proporcionan un 30% más de eficiencia del combustible que el motor de gasolina [SENER, 2006].

También se pueden mencionar los Biocombustibles, lo cuales usan la biomasa vegetal sirviendo de fuente de energía renovable para los motores empleados y pueden ser usados puros o mezclados con otro tipo de combustibles. No obstante, la introducción de estos vehículos al país debe hacerse necesariamente de manera gradual, ya que dejaría obsoleta a la actual tecnología de automóviles con motor de gasolina. En este sentido, una opción podría ser implementar una política de introducción de los biocombustibles en la formulación de combustibles tradicionales, similar a la empleada por Estados Unidos en la EPact2005 (ver apéndice B).

Como se mencionó en el apartado anterior, esta política plantea introducir 4.0 miles de millones de galones de biocombustibles (MMGB) para reformular las gasolinas convencionales en ir incrementando esta cantidad en por lo menos 0.7 MMGB por año, hasta alcanzar una meta de 7.5 MMGB en el 2012.

Teniendo en cuenta el alto nivel de calidad del combustible exigido por los vehículos modernos, la compatibilidad con la flota actual y la obligada coexistencia con los combustibles convencionales, la solución más prometedora a corto plazo es desarrollar una mezcla de bio-combustible con combustible tradicional. De esta forma, se garantizaría un suministro de energía menos contaminante al parque automotor, mientras se realiza una transición gradual a otras tecnologías de transporte. Sin embargo, estas acciones no serán suficientes si no se promueve un cambio en los hábitos de conducción y se implementan mejoras en la infraestructura de las carreteras así como en las medidas de gestión del tráfico.

Con el fin de ilustrar más ampliamente la forma de operación de las tecnologías emergentes en materia del transporte, a continuación se presentan algunas de las más destacadas.

2.2.1 Tecnología Diesel

El motor diesel fue inventado por Rudolf Diesel en 1892, es un motor térmico de combustión interna en el cual el encendido se logra por la temperatura elevada producto de la compresión del aire en el interior del cilindro. La principal diferencia entre el motor a gasolina y a diesel es que el motor a gasolina introduce una mezcla de gas y aire, lo comprime y lo enciende mediante una chispa, mientras que el motor de diesel introduce únicamente aire, lo comprime y, posteriormente, inyecta el combustible en el aire comprimido, como se presenta en la figura 2.1. El calor del aire comprimido produce una combustión espontánea del combustible, por lo que su compresión puede ser mucho más alta y por lo tanto generar más potencia que el motor a gasolina y con

menor consumo de combustible. Por esta razón, el motor diesel genera emisiones de dióxido de carbono entre 15% y 20% inferiores a las de la gasolina [SENER, 2006].

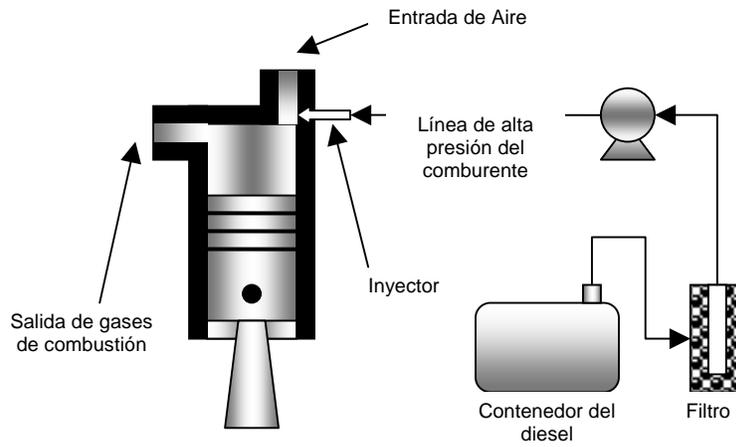


Figura 2.1 Esquema General del Motor Diesel

2.2.2 Tecnología Eléctrica

Estudios realizados en varios países han mostrado que los vehículos eléctricos presentan emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono que los vehículos de combustión interna. Esto significa menos ozono a nivel del suelo que contribuye a reducir la contaminación. Además, estos automotores son más eficientes que los de combustión interna bajo condiciones normales de manejo, ya que no sufren pérdida de eficiencia por las condiciones de arranque y paro que típicamente caracteriza a las áreas congestionadas. El primer vehículo eléctrico fue desarrollado en Inglaterra en 1873 por la R. Davison y surgió como alternativa viable para el transporte sin afectar al medio ambiente [CONAE, 2006].

Los automóviles con motor eléctrico no producen contaminación por sí mismo, al carecer de gases de combustión; además son muy silenciosos, y su rendimiento energético duplica, al menos, el de los motores de combustión interna. Estos vehículos consisten básicamente en un tren motriz, una fuente de energía y un sistema de recarga.

La fuente de poder más común son las baterías, las cuales deben tener las siguientes características: Alta potencia específica, prolongado ciclo de vida, bajo costo, seguras, mantenimiento simple, disposición para ser reciclada sin riesgo de causar contaminación ambiental, proporcionar una correcta estimación de la energía remanente, baja autodescarga y capacidad para ser recargada rápidamente. Las baterías más utilizadas son las de plomo-ácido, aunque también se utilizan las de níquel-cadmio, sodio-azufre, hierro-níquel y las de nitratos metálicos. A continuación se describen en forma general las principales características de algunas de estas baterías.



Batería de plomo ácido

La mayor parte de los vehículos eléctricos, emplean baterías de plomo ácido, cuya energía específica oscila entre 30 Wh/Kg y 40 Wh/Kg. Con esta energía logran alcanzar niveles satisfactorios de densidad de potencia, requiriendo poco mantenimiento. Además su bajo costo las hacen más populares que cualquier otro tipo de batería [CONAE, 2006].

Batería de Níquel-Cadmio

Estas baterías fueron lanzadas comercialmente en Francia en 1988 y diseñadas para recarga rápida (minutos en comparación con otros tipos de baterías). A su vez, presentan amplias ventajas en la densidad de potencia y energía; por ejemplo, poseen 30% más energía específica y dos o tres veces más vida útil con respecto a las de plomo-ácido. Por su baja eficiencia de carga a altas temperaturas, deben ser enfriadas antes de recargarse, por lo menos a temperaturas de 30°C o inferiores [CONAE, 2006].

No obstante, presentan problemas de "memoria"; es decir, que su capacidad tiende a declinar temporalmente si son cargadas parcialmente y descargadas en repetidas ocasiones. Por lo tanto, tienen que descargarse completamente y cargarse a intervalos regulares.

En 1991 se desarrolló una batería de Ni/Cd que puede ser cargada al 40% de su capacidad en sólo 6 minutos. Sin embargo, el alto costo del níquel y del cadmio ha sido un gran obstáculo para su uso [CONAE, 2006]. En la actualidad se espera que en competencia con las gasolinas el costo sea competitivo y disminuya incluso por los nuevos avances tecnológicos.

Aunque estos vehículos son una buena opción para el transporte, su implementación no ha sido ampliamente difundida debido a diferentes razones. Para ilustrar mejor esta discusión, se presentan las principales ventajas y desventajas que han experimentado países como Inglaterra, Alemania, Japón y Estados Unidos; en los cuales se han introducido este tipo de tecnología.

VENTAJAS

1. Utilizan una energía alternativa
2. Son más eficientes que los motores de combustión interna
3. No producen emisiones contaminantes en el lugar de operación
4. Tienen costos de mantenimiento menores
5. Son más confiables que los motores de combustión interna
6. Son más fáciles de manejar
7. Tienen menos complejidad que los de combustión interna

DESVENTAJAS

1. El costo inicial es alto comparado con los de combustión interna
2. El costo de las baterías es alto
3. Generalmente son de baja autonomía
4. Son lentos con respecto a los de combustión interna
5. Es una tecnología poco conocida por la mayoría de las personas
6. Se requieren instalaciones para la recarga de baterías
7. Se requiere capacitación de mecánicos para su mantenimiento
8. El motor y los controles son de importación



9. Se requiere de una disposición adecuada para la eliminación de las baterías usadas sin contaminar al medio ambiente.

La limitada autonomía a que se refiere el punto 3 de las desventajas, se refiere a que las sucesivas recargas, normalmente entre los 80 y los 150 Km, lo cual imposibilita su uso durante viajes largos [CONAE, 2006].

Por otro lado, las limitaciones científico-tecnológicas para su producción en masa, radican en el hecho de que las actuales baterías recargables comerciales tienen una baja capacidad de almacenado energético y una limitada vida media. Comparativamente, un depósito de gasolina almacena 100 veces más energía que un volumen equivalente de baterías convencionales de plomo-ácido sulfúrico, cuyo almacenamiento energético apenas supera los 40 Wh/Kg. Ello obligaría a tener que utilizar, para un vehículo, un peso adicional de baterías de más de 500 Kg [CONAE, 2006].

2.2.3 Tecnología Híbrida

Los motores con tecnología híbrida se caracterizan por contar con un motor de asistencia integrada (eléctrico) y uno de combustión interna (gasolina). Su fortaleza se sustenta, principalmente, en un ahorro sustancial en el consumo de gasolina comparados con los vehículos tradicionales. Asimismo, maximizan su eficiencia en el consumo de combustible y representan una opción de transporte de bajo impacto ambiental al minimizar la generación de contaminantes en relación con vehículos a gasolina y diesel.

El desarrollo tecnológico de este auto permite a los dos motores interactuar de manera separada o conjuntamente, según las condiciones del manejo. El motor de combustión interna de alto rendimiento genera la potencia para mantener una velocidad constante, mientras el motor eléctrico la incrementa en el arranque y la aceleración, maniobras que consumen más combustible. Durante la conducción normal, el frenado regenerativo recupera la energía que normalmente se pierde al aplicar los frenos.

Una de las características más relevantes del vehículo híbrido, es el notable ahorro de combustible que se logra al operar de forma alterna, los motores de propulsión. La eficiencia general (tanque a rueda) que tiene un vehículo de gasolina es de 13% aproximadamente, en tanto que la registrada en un vehículo híbrido es de 27% en promedio.

Un vehículo híbrido presenta una disminución de emisiones contaminantes del 74.5% de CO, 98.6% de hidrocarburos y 15.6% de óxidos de nitrógeno, en comparación con los motores de autos convencionales. Esto, en datos numéricos, significa que el límite actual de emisiones de CO es de 3.4 g/Km para los autos convencionales, mientras que los vehículos híbridos emiten 1 g/Km.

Es importante mencionar que este tipo de vehículos tienen en el mercado precios superiores en relación a los automóviles convencionales, pero conllevan, a su vez, un importante ahorro de combustible. En este sentido, el tiempo de maduración para lograr economías de escala crecientes por parte de los fabricantes, será un factor decisivo



para que los precios de venta de estos vehículos permitan, en el futuro, un mayor uso de los mismos.

2.2.4 Biocombustibles

Los biocombustibles son carburantes de origen biológico, que generalmente se obtienen a partir de maíz, celulosa, azúcar, aceites vegetales, grasas animales, biogas, gasificación de biomasa, entre otras fuentes naturales. Debido a que proceden de las plantas, al ser quemados (oxidados) devuelven a la atmósfera el CO₂ que la planta había tomado del aire. Por lo tanto, desde el punto de vista ecológico se respeta el medio ambiente, pues no hay un aumento neto de gases de efecto invernadero.

De acuerdo con la definición de la EPact05 (ver apéndice B), se entiende como combustible renovable o “biocombustible” para vehículos: aquel que se produce a partir de granos, féculas, semillas, materiales vegetales o animales. De la misma forma se considera al Gas Natural producido por biogas, incluyendo rellenos, plantas de tratamiento de aguas negras o cualquier otro sitio en donde se encuentre material en descomposición. Estos combustibles se pueden implementar en los motores convencionales, aplicando algunas modificaciones para alimentar la mezcla adecuada, dependiendo del esfuerzo que solicite la máquina.

Los motores convencionales actuales son de dos tipos: de ciclo de Otto o de ciclo Diesel. El primero normalmente funciona con gasolina aunque puede emplearse alcohol como combustible sustituto. Por su parte el sistema Diesel funciona con gasoil pero también puede funcionar con ésteres grasos o incluso aceites vegetales obtenidos directamente de ciertas plantas como coco, soya, girasol, palma africana, etc., o aún derivados de aceites de fritura usados en la elaboración de comida rápida.

Tabla 2.2 Características del Biodiesel y el Diesel

Datos Físico-Químicos	Biodiesel	Diesel
Composición del Combustible	Ester Metílico de Ácidos Grasos C ₁₂ - C ₂₂	Hidrocarburo C ₁₀ - C ₂₁
Poder Calorífico Inferior, Kcal/Kg (aprox.)	9500.0	10800.0
Viscosidad Cinemática, cst (a 40°C)	3.5 – 5.0	3.0 - 4.5
Peso Específico, g/cm ³	0.875 - 0.900	0.850
Azufre, %P	0.0	0.2
Punto de Ebullición, °C	190 - 340	180 – 335
Punto de Inflamación, °C	120 - 170	60 - 80
Punto de Escurrimiento, °C	-15 / 16	-35 / -15
Número de Cetanos	48 – 60	46
Relación Estequiométrica Aire/Combustible. p/p	13.8	15.0

FUENTE: United States Environmental Protection Agency. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions, Draft Technical Report. EPA402-P-02-001, octubre 2002.

La razón por la que se ha generalizado el empleo de la gasolina y el diesel en motores de combustión interna, en lugar de utilizar alcohol y ésteres grasos, se debe a que con

gasolina y diesel, se logra alcanzar una mayor relación de compresión en la cámara de combustión, lo cual conduce a un alto rendimiento del combustible; aunque esto implique generar mayor cantidad de emisiones contaminantes.

Debido a ello, actualmente se formulan mezclas de biocombustibles con la gasolina o diesel convencionales. De hecho, en los EEUU se añade regularmente alcohol de maíz como aditivo a las gasolinas corrientes para incrementar su octanaje reduciendo, al mismo tiempo, la contaminación producida durante su combustión. En la tabla 2.2 se presentan algunas características comparativas entre el Biodiesel y el Diesel convencional, en la que se destaca la alta relación estequiométrica que se puede lograr con los hidrocarburos tradicionales.

2.2.5 Celdas de Combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos. Esto significa que produce electricidad a partir una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería. Además, los electrodos son catalíticos y relativamente estables; generalmente formados por hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno en el cátodo (si se trata de una celda de hidrógeno) [Fuelcells,2007].

Una celda de este tipo está constituida por una membrana polimérica conductora de protones (el electrolito), que separa el ánodo del cátodo. Como se describe en la figura 2.2, en el lado del ánodo, el hidrógeno se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos al cátodo a través de la membrana, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar agua, la cual sería el único residuo [Fuelcells,2007].

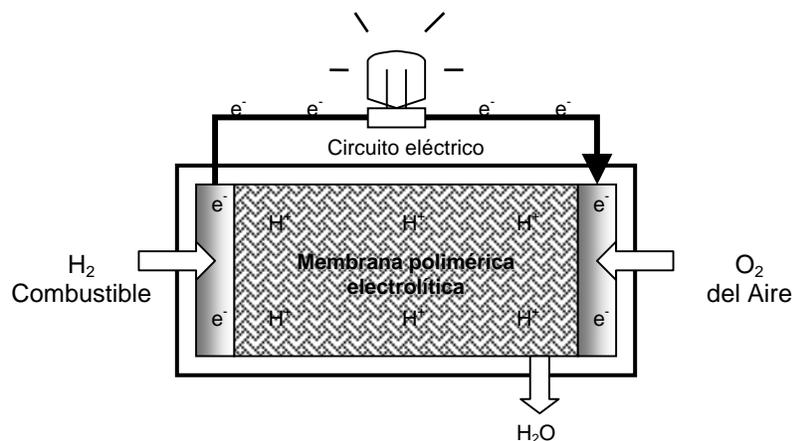


Figura 2.2 Esquema General de Celda de Combustible



Las células de combustible son del orden de dos veces más eficientes que otros sistemas de propulsión. Desde el punto de vista de la industria del automóvil, esta tecnología demuestra un potencial sobresaliente en la reducción o eliminación de las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoran la eficiencia energética global, incluso teniendo en cuenta las tecnologías de producción de hidrógeno actuales [Fuelcells,2007].

Para que se materialicen las oportunidades que ofrecen el hidrógeno y, concretamente, las células de combustible, será necesario que los nuevos vehículos ofrezcan prestaciones mejores o equivalentes a los vehículos "convencionales", se garantice la disponibilidad de combustible y que los constructores de automóviles y las compañías del sector de la energía confíen en que su producción será rentable.

2.2.6 Tecnología de Gas

Se designan como motores de gas a los motores de combustión interna en los que el combustible es un gas, aunque su estructura es similar a la de los motores de gasolina.

A nivel mundial, el Gas Natural Comprimido (GNC) es considerado como uno de los combustibles alternativos más limpios y con gran potencial de desarrollo en el sector transporte, ya que presenta las siguientes ventajas [Escobar, 1992]:

- Menor precio que el resto de los combustibles (excepto propano) para el transporte.
- Baja toxicidad
- Puede alcanzar una combustión más completa, mejorando la relación aire/combustibles en las cámaras de combustión y, por consiguiente, menos emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono. Esto se traduce en una reducción de la formación de ozono.
- Alto octanaje, lo cual permite su uso en motores de alta relación de compresión como los motores diesel.
- No presenta problemas de ignición, aún en climas fríos.
- Los vehículos actuales pueden ser convertidos a vehículos de combustible dual.
- No se requieren condiciones especiales para su manejo y transporte (tiene aceptables índices de seguridad).
- Se pueden desarrollar sistemas de abastecimiento de combustible doméstico.
- No incrementa los costos de mantenimiento ocasionados por problemas en los sistemas de ignición.

Sin embargo, las perspectivas de una mayor penetración de este combustible en el mercado mundial parecen estar limitadas por muy diversas razones, entre las que se pueden mencionar [Escobar, 1992]:

- La carencia de infraestructura para el almacenamiento y transporte (estaciones, sistemas de distribución, etc.).
- Bajo rango de maniobrabilidad.
- Bajo contenido energético, lo que combinado con el peso extra de los sistemas de almacenamiento, se traducen en una baja eficiencia.
- Altos costos de conversión de vehículos.
- Disponibilidad.



Por todo lo anterior, se estima que el uso de Gas Natural como combustible para el transporte, dependerá en gran parte de los futuros desarrollos tecnológicos y de los nuevos diseños de vehículos que permitan reducir los costos de conversión y la implementación de políticas de fomento al desarrollo de infraestructura de distribución y comercialización.

Los últimos años han sido testigos de notables logros en el área de la calidad del aire y la reducción de emisiones. Los indicadores de la calidad del aire muestran que el medioambiente se ha beneficiado del progreso tecnológico que la industria ha conseguido. Este progreso continúa, aunque siguen existiendo retos en las áreas de los óxidos de nitrógeno (NOx), el ozono y las partículas.

La emisión de partículas, que proceden fundamentalmente de los motores diesel, se ha reducido en un 90% desde 1990 y nuevas tecnologías que combinan filtros con dispositivos de filtrado regenerativos ofrecen potencial para mayores reducciones. Además, los fabricantes de automotores continúan trabajando en el Programa Aire Limpio acerca de mejoras tecnológicas en sus dispositivos para mitigar el impacto negativo sobre el medio ambiente, entre los cuales a continuación se indican algunos de los más relevantes [ANFAC, 2004].

2.3 Panorama Mundial del Desarrollo Automotriz

ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ.

Los "tres grandes" fabricantes de autos junto con otras pequeñas compañías independientes están trabajando en Celdas de Combustible.

Chrysler

Chrysler ha contratado a Delphi Automotive Systems para desarrollar un sistema para automóviles a base de celda de combustible. Delphi ha puesto una orden de compra por \$4 millones de USA dólares con Ballard Power Systems para las celdas de combustible que se usarán en el sistema.

A principios de 1997, Chrysler reveló un modelo a escala real de un vehículo movido a base de un sistema de celdas de combustible que podría emplear gasolina. El sistema de las celdas de combustible emplea un reformador del combustible, desarrollado por Arthur D. Little Inc., el cual convierte gasolina y otros combustibles líquidos en hidrógeno "a bordo". Chrysler está también trabajando con la industria del petróleo.

Chrysler expresó, en ese entonces, la intención de tener un auto trabajando para 1999 y realizar su comercialización en autos medianos para 2015.

Ford Motor Corporation.

Ford ha establecido su programa P2000 para producir un sedán familiar ligero altamente avanzado. El concepto del automóvil P2000 actuará como plataforma para varios sistemas motores avanzados incluyendo celdas de combustible. Ford ha trabajado con Ballard, International Cells y con Mechanical Technology Incorporated en este proyecto. Este fabricante de autos está tratando de llegar a un auto completamente integrado para investigación.



En diciembre de 1997, Ford anunció que traerá su tecnología de autos eléctricos junto con \$420 millones de USA dólares, a una nueva alianza internacional de vehículos provistos con celdas de combustible junto con Ballard y Daimler-Benz. Cuando todos los arreglos de efectivo y valores hayan sido completados, tres compañías habrán de surgir. Ballard será el propietario mayoritario de la compañía que suministre las celdas de combustible. Daimler-Benz será dueño mayoritario de la compañía que desarrolle los sistemas de motores empleando celdas de combustible y Ford será el principal propietario de una compañía que desarrolle los sistemas de transporte eléctrico.

General Motors

GM está trabajando con Delphi y Ballard para desarrollar motores a celdas de combustible. En enero de 1998, GM reveló un modelo avanzado de un sistema de tren de avance a celda de combustible.

Actualmente GM se encuentra probando la posibilidad de integrar un procesador de combustible – el cual extraería hidrógeno de metano – con un motor a celda de combustible y espera terminar pronto las pruebas de un vehículo que compruebe el concepto.

Ballard Power Systems

Ballard es el proveedor líder de celdas de combustible de membrana intercambio protónico (PEM) para aplicaciones de transporte. Esta compañía ha recibido pedidos de fabricantes de autos de todo el mundo y se encuentra desarrollando motores a celdas de combustible comerciales junto con Ford y Daimler-Benz.

El primer vehículo de demostración "real" que empleó tecnología moderna de celdas de combustible fue un autobús de 32 pies lanzado en 1933 por Ballard. Un autobús de segunda generación Ballard se encuentra bajo pruebas ya en las calles en Canadá y los Estados Unidos. La ciudad de Chicago en Illinois se encuentra operando 3 de estos vehículos en campo.

Energy Partners

Energy Partners ha anunciado el primer auto para pasajeros movido por celdas de combustible, un auto deportivo llamado "el auto verde".

Energy Partners se ha unido a John Deere Corporation en un proyecto para desarrollar vehículos a celda de combustible de usos múltiples basado en el vehículo de Deere llamado "Gator". En octubre de 1997 los vehículos comenzaron a hacer demostraciones en el aeropuerto Regional de Palm Springs transportando primordialmente personal, equipo de mantenimiento y cargas pequeñas dentro de las instalaciones del aeropuerto.

Universidad de Georgetown

La Universidad de Georgetown está trabajando con Ballard, International Fuel Cells, con los fabricantes de autobuses NOVABUS y otros bajo contrato con el Departamento de Transporte de USA para desarrollar autobuses tamaño "natural" energizados con celdas de combustible tipo PEM y PAFCs. Georgetown ha conseguido realizar la primera demostración en USA. Entregó 3 autobuses al comienzo de 1991 impulsados por celdas de combustible de ácido fosfórico bajo contrato con el Departamento de Energía de los USA.



H-Power

H-Power fue el integrador del sistema usado en el programa original de Georgetown y el Departamento de Energía y ahora hace celdas de combustible tipo PEM para una variedad de aplicaciones en automóviles especiales.

International Fuel Cells

International Fuel Cells (IFC) ha hecho demostraciones de manera muy exitosa con un sistema a base de celdas de combustible tipo PEM de 50kW usando hidrógeno más aire del ambiente. El sistema es altamente compacto, unos 9 pies cúbicos de espacio, y será muy apropiado para automóviles.

IFC está también trabajando para desarrollar una celda de combustible PAFC de 100kW para un autobús.

Plug Power, L.L.C.

Plug Power, L.L.C. es una inversión conjunta entre un subsidiario de DTE Energy Co., y el Mechanical Technology Inc. de Latham, Nueva York. Junto con Arthur D. Little Inc., y Los Alamos National Laboratory, Plug Power ha demostrado exitosamente una celda de combustible en operación empleando un producto reformado de gasolina.

Este grupo se encuentra ahora concentrado en integrar este sistema a un vehículo. Dicho sistema se espera sea el doble de eficiente que un motor a gasolina de combustión interna con alrededor de 90% menos emisiones.

EUROPA

Daimler-Benz

Daimler-Benz ha estado probando en campo una celda de combustible desde 1993 declarando que las barreras fundamentales para su comercialización han sido superadas. Daimler dio a conocer, en mayo de 1996, su vehículo a base de celdas de combustible de segunda generación, un vehículo tipo van llamado NECAR II.

En octubre de 1997, Daimler dio a conocer NECAR III, un vehículo alimentado con metano para su celda de combustible.

Daimler-Benz y Ballard anunciaron su asociación en abril 1997. Las dos compañías han comprometido más de \$450 millones de dólares canadienses en el trato. Una nueva compañía de motores, financiada por este acuerdo, pondrá al mercado celdas de combustible y motores a celda de combustible.

Daimler-Benz dio a conocer un autobús en mayo de 1997 movido por celdas de combustible que opera con hidrógeno almacenado y tiene un rango de 250 km. (unas 155 mi). Este autobús se encuentra probándose en campo en Stuttgart, Alemania. Daimler ha comprometido \$725 millones de USA dólares en su participación junto con Ballard para investigación en celdas de combustibles que usan metano como combustible. Estas compañías esperan tener un vehículo a base de celdas de combustible comercialmente viable y planean producir unos 100,000 motores al año.



De Nora S.P.A.

El grupo italiano de investigación De Nora S.P.A. se encuentra trabajando con celdas de combustible PEM para autobuses y aplicaciones marinas. Esta compañía se encuentra en la etapa de completar un diseño avanzado de celda de combustible PEM para el programa de autobuses de la Comunidad Europea y está cooperando con Renault en un proyecto de un automóvil a celda de combustible.

Peugeot/Citroën

Peugeot/Citroën está involucrado en un programa de investigación conjunto europeo de celdas de combustible tipo PEM para reducir tanto el peso de este sistema como sus costos.

Renault

Una co-inversión franco-sueco-italiana ha dado como resultado un concepto de vehículo a celda de combustible basado en un vagón tipo Renault. El vehículo FEVER (llamado así por sus siglas en inglés "Fuel Cell Electric Vehicle for Efficiency and Range") es alimentado por un sistema de celda de combustible tipo PEM que utiliza hidrógeno líquido almacenado, y una batería níquel-hidruro metálico como almacén de energía de respaldo. Su rango será de 500 Km (310 Mi).

Volkswagen/Volvo

En un proyecto conjunto, Volkswagen y Volvo han anunciado sus planes para tener en funcionamiento en 1999 un auto tipo "Golf" híbrido a base de una celda de combustible PEM alimentada con metano.

ASIA

Honda

En febrero de 1997, el subsidiario de Honda para investigación y desarrollo firmó un contrato por \$2 millones de dólares canadienses con Ballard para que éste le provea celdas de combustible y equipo de medición relacionado con éstas.

Mazda

En diciembre de 1997, Mazda anunció que había desarrollado un auto a base de celdas de combustible basado en su auto compacto Demio. El auto desarrollado estará diseñado para alcanzar una velocidad máxima de 90 km./h (54 mph) y un rango de 170 km. (102 millas) con un tanque de hidrógeno lleno.

Nissan

Nissan comenzó a probar autos con celdas de combustible a principio de los 90's. En 1991 la compañía compró a Ballard una celda de combustible para pruebas. En marzo del mismo año Nissan arregló un contrato por \$2.2 millones de dólares canadienses con Ballard para que lo abasteciera de celdas de combustible para investigación y prueba en automóviles.



Toyota

En octubre de 1996, Toyota reveló la conclusión de un vehículo a celda de combustible de pre-producción basado en su vehículo deportivo RAV4L. El auto corrió abastecido de hidrógeno almacenado a bordo en forma de hidrógeno sólido, en un "tanque" de una aleación capaz de absorber hidrógeno desarrollada por Toyota. Para la aceleración Toyota usa un sistema híbrido basado en baterías.

Un año más tarde, Toyota reveló una nueva versión de su FCEV alimentado con metano. Este auto es operado con una celda de combustible tipo PEM empleando un reformador de combustible y tiene un rango con tanque lleno de 500 km. (310 mi).

Por otro lado, se afirma que el enfoque de la compañía sería sobre hidrógeno ó metano como combustibles para sus vehículos, siendo metano la opción preferida ya que la infraestructura existente para gasolina podría ser fácilmente modificada para la distribución de metano.

Cabe señalar que opciones tecnológicas limpias como las descritas anteriormente, representan una opción atractiva en términos de ahorro de combustible, desempeño del motor (eficiencia y rendimiento) e impacto ambiental. No obstante, es necesario contar con la infraestructura necesaria y disponer de combustibles con las especificaciones requeridas para una comercialización masiva.

En este sentido, el uso de los vehículos a gasolina seguirá predominando, al menos los próximos 10 años, cuando la Tecnología TIER II de la Environmental Protection Agency (EPA) empiece a introducirse en forma paulatina. En este contexto, la disponibilidad de gasolinas de Ultra Bajo Azufre (UBA) tendrá un papel relevante para la entrada de esta tecnología, en cuyo caso, las inversiones oportunas programadas por PEMEX Refinación para incrementar la calidad y cantidad de las gasolinas, mantendrán un carácter decisivo para el logro de estos alcances tecnológicos.



3. MERCADO NACIONAL DE GASOLINAS

Los productos de la refinación del petróleo se consideran como una de las fuentes de energía primaria más importantes del mundo, ya que son compuestos de alto poder energético obtenidos en grandes volúmenes, cuyo costo depende del precio de su materia prima: el petróleo crudo. Las características de estos productos, han producido un impacto significativo sobre varios sectores del mercado, resultando en un incremento sostenido de su demanda; especialmente sobre las denominadas gasolinas. Estos compuestos son en su mayoría utilizados por los motores de combustión interna para proporcionar la energía necesaria para transportarnos. En efecto, el sector de mayor consumo a nivel mundial, ha sido el del parque automotor, por su alta dependencia de las gasolinas para su funcionamiento.

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, esta dependencia se atribuye a una limitada oferta de otros tipos de combustibles y a otros factores de orden tecnológico que aún no han logrado ser superados. Como resultado, actualmente no existe un combustible alternativo que represente una fuerte competencia en este segmento del mercado, es decir, para los motores de combustión interna. Por esta razón, la industria de la refinación ha tenido que evolucionar para responder a las crecientes exigencias en materia de normatividad ambiental y a los avances tecnológicos. Con el fin de sustentar la necesidad de continuar con la producción de gasolinas, en este capítulo se estudiará el comportamiento del mercado durante los últimos 10 años y sus perspectivas futuras.

3.1 Evolución del Mercado de 1995 a 2006

El mercado de las gasolinas en México se encuentra enmarcado dentro de una política proteccionista, dado que PEMEX Refinación (PR) posee el control exclusivo sobre su elaboración. De acuerdo con lo reportado en el informe "Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015" emitido por la Secretaría de Energía, PR cuenta con seis refinerías: Cadereyta, Madero, Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz y Tula. Estas refinerías poseen una capacidad total instalada de 1,540 MBPD de procesamiento de crudo, con los cuales produce 466 MBDP (74,125 LTPD) de diferentes grados de gasolinas.

No obstante, el informe mencionado afirma que el consumo de gasolinas para el parque automotor asciende a 717.9 MBPD (113,973.8 LTPD). En otras palabras, esto significa que en México solo se producen 65 de cada 100 litros consumidos en el territorio nacional. En consecuencia, ha sido necesario importar los 35 litros adicionales, dejando vulnerable al país a presiones económicas externas, derivadas de las alzas unilaterales de los precios internacionales de las gasolinas [SENER, 2006].

México perdió su autosuficiencia en gasolinas en 1991, básicamente a partir del cierre de la refinería de Azcapotzalco, motivado por razones ambientales. A partir de ese año, los volúmenes de importación de gasolinas empezaron a crecer de manera consistente, para suplir la creciente demanda del parque automotor. Aún con a los proyectos estratégicos planeados, se prevé que se requerirá de nuevas inversiones que permitan mejorar la balanza comercial para cubrir las necesidades internas de este combustible.

Con el fin de visualizar más claramente el panorama para actual de este producto, se analizarán los principales aspectos relacionados con la evolución histórica de la oferta y



la demanda de las gasolinas en México de 1995 a 2006. Para ello, se incluirá un análisis de la producción observada en cada una de las refinerías por tipo de combustible y las importaciones y exportaciones presentadas durante el mismo periodo. De esta manera, se busca reflejar claramente la situación energética del sector de combustibles y los elementos que intervienen o modifican sus patrones de consumo. Este estudio tendrá como base el informe “Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015” emitido por la Secretaría de Energía y el “Anuario Estadístico 2006” de PEMEX.

3.1.1 Producción

De acuerdo con el informe “Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015” emitido por la Secretaría de Energía [SENER, 2006], durante el periodo de estudio (1995-2006), el procesamiento de crudo en el SNR se incrementó 0.4% en promedio anual, equivalente a 17.6 MBPD, lo que se refleja en una mayor elaboración de productos. Asimismo, la conclusión de las reconfiguraciones en las refinerías de Cadereyta, Madero, Tula y Salamanca (2002) permitió incrementar la producción de gasolinas en 47.1 MBPD durante el 2003.

En la tabla 3.1 se han incluido los registros históricos de la producción de gasolinas desde 1995 hasta 2006, por tipo de combustible. Como puede observarse, la Tasa Media de Crecimiento Anual (TMCA) del total de gasolinas ha sido de 0.89 durante el periodo de estudio. De la misma forma, se observa que la gasolina Magna ha mantenido una TMCA de 7.6, 114.9 para la Premium y -23.3 para la Nova, como se ilustra en la gráfica 3.3. Este comportamiento se debe a la desaparición de la formulación de gasolina Nova y el surgimiento de la gasolina Premium en 1996, debido a las nuevas disposiciones legales en materia de calidad de los combustibles para la conservación del medio ambiente.

Tabla 3.1. Producción total por tipo de gasolina de 1995-2006 en MBPD

AÑO	TOTAL	NOVA ^a	MAGNA ^b	PREMIUM ^c	OTRAS ^d
1995	422.5	227.7	193.1		1.7
1996	416.9	199.4	215.1	0.4	2.0
1997	388.3	102.8	282.5	1.1	1.9
1998	411.9	52.5	347.9	9.7	1.8
1999	405.9	46.5	346.6	11.2	1.6
2000	393.1	27.9	346.0	17.9	1.3
2001	390.4	22.4	349.4	17.3	1.3
2002	398.6	16.4	359.4	21.8	1.0
2003	445.7	10.5	396.5	37.6	1.1
2004	467.6	3.9	418.5	43.8	1.4
2005	455.8	4.8	412.0	38.2	0.8
2006	466.9	6.1	414.2	45.0	1.6

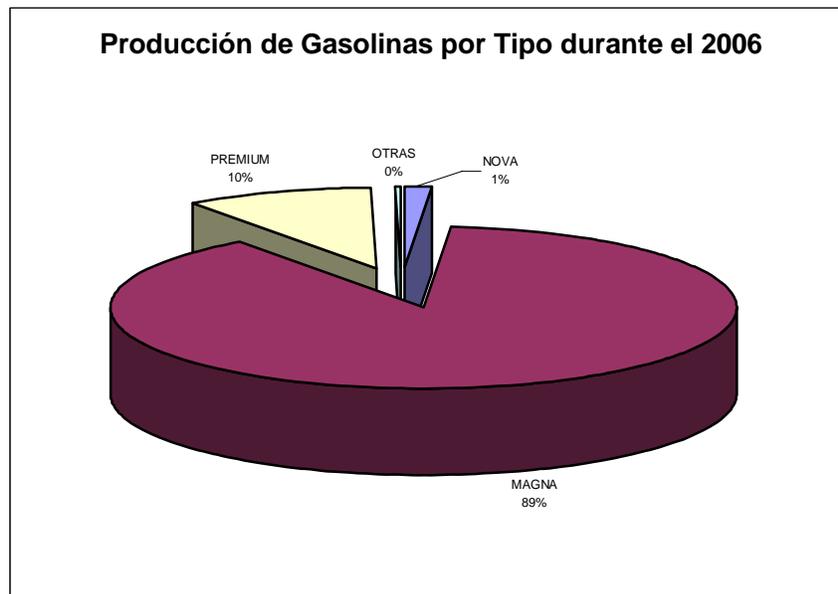
a. Hasta 1999 gasolina Nova y base, a partir de 2000, gasolina base.
b. Incluyen transferencias de gasolinas de Cangrejera a Minatitlán. A partir de 1990 la gasolina Pemex Magna In, substituyó a la gasolina Extra.
c. Se reportan datos a partir del año en que inició su registro.
d. Se refiere a gasavión, gasnafta, gasolina incolora y gasolvente.

FUENTE: PEMEX, Anuario Estadístico 2006.



De acuerdo con los datos reportados en esta tabla, la oferta interna de gasolinas en el 2006, se conformó principalmente por Pemex Magna en un 88.7%, y la Premium participó con un 9.6%. El porcentaje restante lo integraron la gasolina base y otras corrientes, como se ilustra en la gráfica 3.1. Esto se debe a que la mayor parte del parque vehicular corresponde a motores convencionales, donde la gasolina Magna mantiene buena aceptación; mientras que la Premium es requerida sólo para vehículos con altas relaciones de compresión, es decir, para automóviles con motores de alto rendimiento.

No obstante, en el 2005 se presentó una reducción de 11.8 MBPD en la producción de gasolinas con respecto al año anterior, como consecuencia de la reducción en el procesamiento de crudo en las refinerías de Cadereyta, Madero, Minatitlán y Salamanca. Esta reducción se debió a diversas causas, entre las que destacan la salida no programada de la Planta FCC-1 en la refinería de Cadereyta y los paros no programados en la refinería de Madero, a causa de la energía eléctrica y a problemas detectados en las unidades de coquización y de desintegración catalítica.



Gráfica 3.1. Producción de gasolinas por tipo durante el 2006

A nivel de refinerías, durante el 2006 la mayor producción de gasolinas provino de las refinerías de Salina Cruz y Tula, las cuales, a diferencia de las otras cuatro, no redujeron su procesamiento de crudo, sino por el contrario, incrementaron su volumen. Estas refinerías elaboraron conjuntamente el 37.5% del total producido en 2006, según la información reportada en la tabla 3.2 e ilustrada en la gráfica 3.2. De la misma forma se observa que en ese año, la mayor fuente de gasolina Magna se obtuvo de Tula y Salina Cruz, las cuales produjeron 86.5 y 74.4 MBPD. Por otra parte, las refinerías que elaboraron más cantidad de Premium fueron Salina Cruz y Madero, cuya producción fue de 13.7 y 9.8 MBPD respectivamente.



Tabla 3.2. Producción de gasolinas por refinería de 1995 a 2006.

REFINERÍAS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
PRODUCCIÓN TOTAL (a)	422.5	416.9	388.3	411.9	405.9	393.1	390.4	398.6	445.7	467.6	455.8	466.9
Cadereyta												
Gasolinas	50.4	46.5	48.7	49.7	41.0	34.7	64.0	74.6	84.8	81.6	73.8	74.4
Extra/Pemex Magna (b)	34.4	37.2	46.3	48.9	40.2	34.5	61.9	70.2	74.5	70.5	67.1	63.2
Nova/Base (c)	15.9	8.8	2.1	0.7	0.6	0.3	0.3	0.1	0.0	N/D	0.7	5.5
Pemex Premium	N/D	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	1.8	4.3	10.2	11.1	6.0	5.6
Otras gasolinas	0.1	0.1	0.3	0.1	0.0	N/D						
Madero												
Gasolinas	42.8	38.0	40.1	40.6	42.6	40.1	23.4	22.5	53.1	53.8	57.4	55.3
Extra/Pemex Magna (b)	19.7	21.7	33.1	31.9	35.7	33.7	20.2	11.3	38.0	41.9	42.7	44.2
Nova/Base (c)	22.7	15.6	5.6	7.1	5.0	5.1	2.6	10.0	9.2	2.1	2.4	1.2
Pemex Premium	N/D	0.1	0.8	1.1	1.2	0.9	0.2	1.0	5.7	9.7	12.2	9.8
Otras gasolinas	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0
Tula												
Gasolinas	88.8	107.3	89.2	95.9	102.2	106.0	102.2	94.8	91.7	111.8	103.8	86.8
Extra/Pemex Magna (b)	31.0	39.0	67.1	94.3	99.9	102.8	97.8	92.4	90.9	107.6	100.8	86.5
Nova/Base (c)	57.4	68.1	21.9	N/D	N/D	0.3	0.3	1.2	0.4	N/D	N/D	N/D
Pemex Premium	N/D	N/D	N/D	1.4	2.1	2.7	4.0	1.0	0.3	4.1	2.9	0.3
Otras gasolinas	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
Salamanca												
Gasolinas	61.6	60.9	63.0	56.2	59.1	55.5	55.0	60.5	64.1	65.5	63.6	60.3
Extra/Pemex Magna (b)	23.0	23.1	33.5	41.1	49.4	53.4	54.5	57.2	59.4	60.9	60.7	57.8
Nova/Base (c)	38.6	37.8	29.4	15.1	9.6	2.2	0.4	0.4	N/D	N/D	N/D	N/D
Pemex Premium	N/D	N/D	0.0	N/D	N/D	0.0	N/D	2.9	4.7	4.6	2.9	2.6
Minatitlán												
Gasolinas	79.1	63.8	53.0	64.0	59.4	55.3	55.9	55.1	50.6	57.2	60.5	49.7
Extra/Pemex Magna (b)	18.4	26.4	27.0	40.3	34.5	37.9	41.9	43.7	41.8	41.5	44.8	37.5
Nova/Base (c)	60.0	36.4	25.2	22.8	24.0	16.5	13.2	10.9	8.6	15.4	15.7	12.2
Pemex Premium	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Otras gasolinas	0.8	1.0	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7	0.4	0.2	0.2	N/D	N/D
Salina Cruz												
Gasolinas	99.7	100.0	94.4	105.4	101.6	101.4	89.8	90.9	100.8	96.8	96.0	88.3
Extra/Pemex Magna (b)	66.5	67.3	75.5	91.5	86.8	83.6	73.1	75.0	83.4	80.7	80.2	74.4
Nova/Base (c)	33.2	32.8	18.6	6.9	7.1	3.7	5.5	3.3	0.7	1.8	1.7	0.2
Pemex Premium	N/D	N/D	0.2	7.1	7.7	14.0	11.3	12.6	16.6	14.3	14.2	13.7

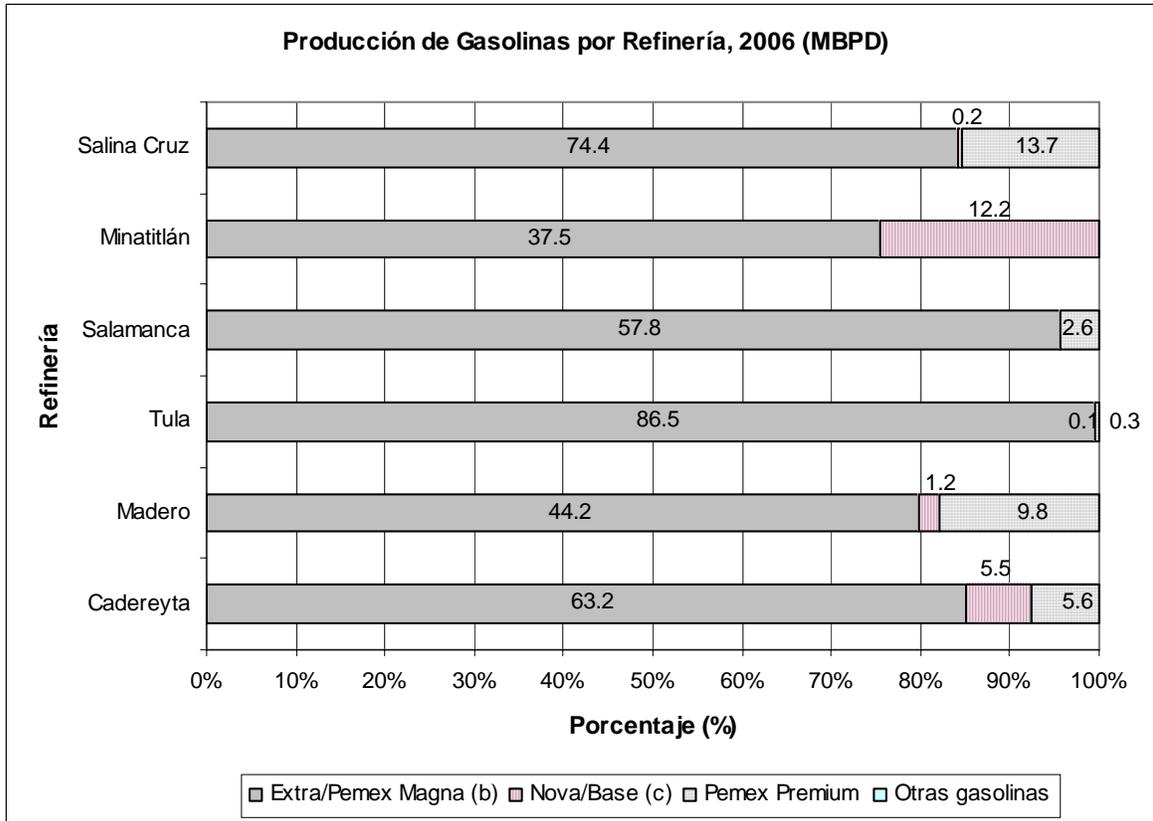
a. Miles de barriles por día (MBPD).

b. A partir de 1998 se refiere a gasolina base.

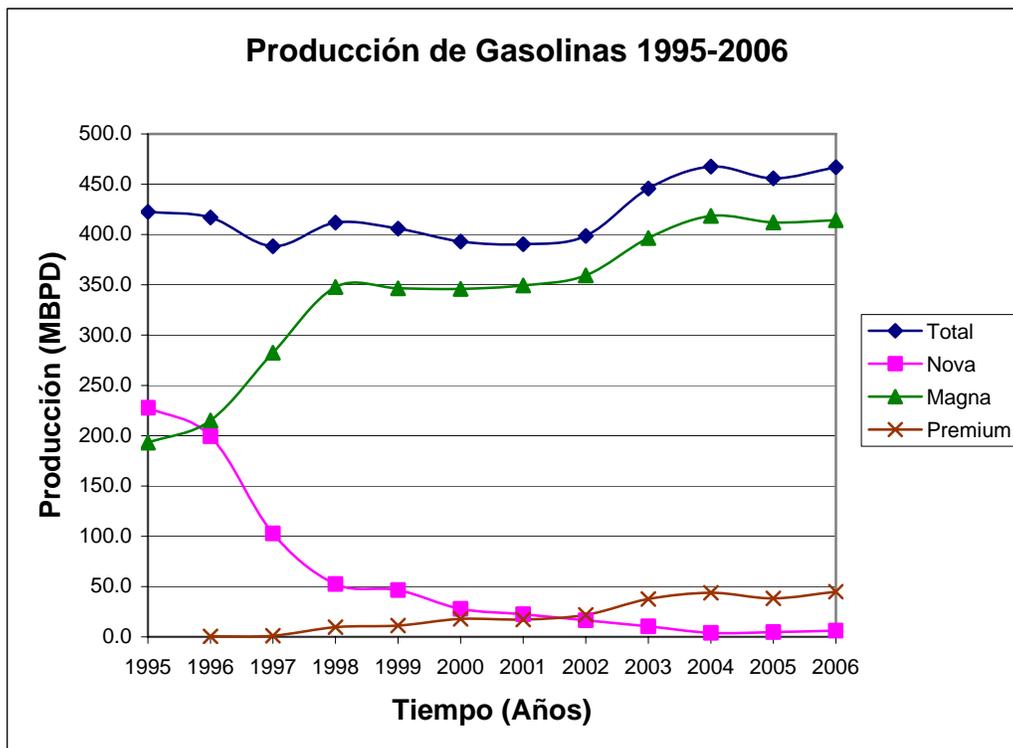
A partir de septiembre de 1990 la gasolina Pemex Magna sustituyó a la gasolina Extra.

c. Incluye la transferencia de gasolina de La Cangrejera a Minatitlán.

Fuente: Sistema de Información Energética con información de Petróleos Mexicanos.



Gráfica 3.2. Producción de Gasolinas por Refinería en 2006



Gráfica 3.3. Producción de Gasolinas 1995-2006



En conclusión, en la producción de gasolinas continúa predominando la elaboración de gasolina Magna, debido a su costo y compatibilidad con las características de la flota vehicular actual. Sin embargo, con el paso del tiempo sigue incrementando la producción de gasolina Premium, como consecuencia de la exigente normatividad ambiental.

3.1.2 Importación y Exportación

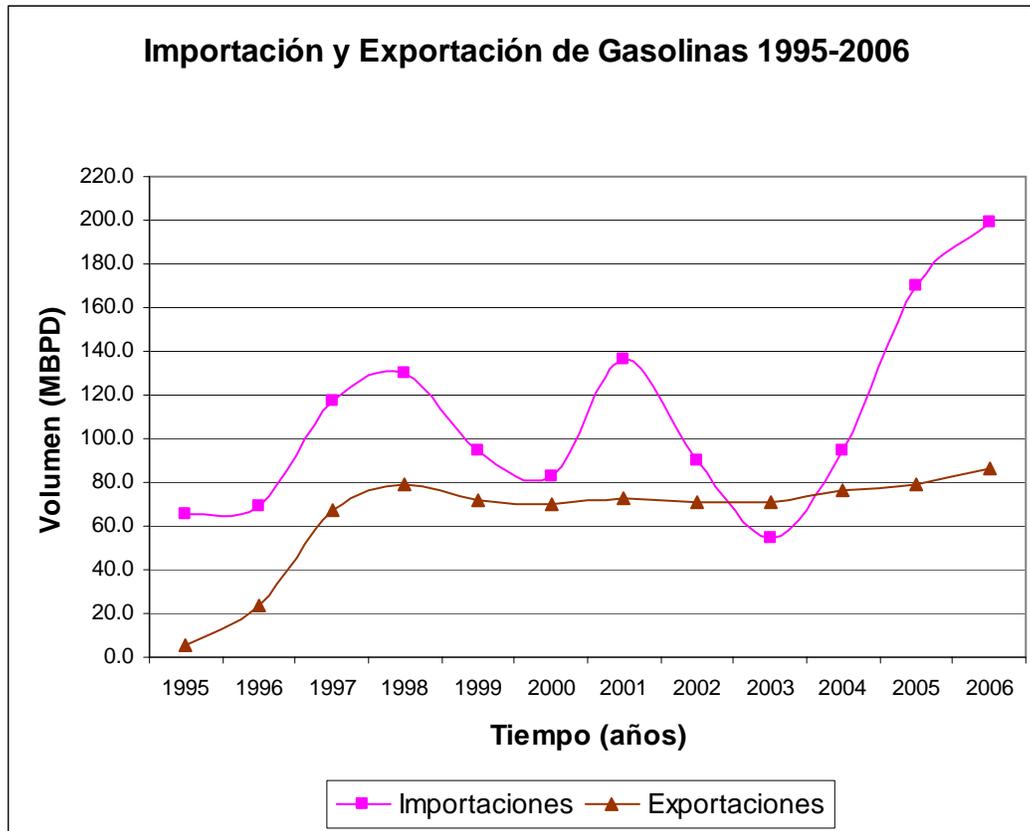
Para cubrir la demanda nacional de combustibles, México ha tenido que importar cerca de 107 MBPD de gasolinas. Los principales proveedores de gasolinas a México han sido Alemania, Argentina, Antillas Holandesas, Brasil, Canadá, Curazao, Estados Unidos, Italia, China, Rumania, Trinidad y Tobago y Venezuela. En la tabla 3.3 se reporta el registro histórico de las importaciones y exportaciones de gasolinas durante el periodo de estudio, el cual muestra una TMCA de 3.2 para las importaciones y 4.6 para las exportaciones. De la misma forma, también se observa que durante el 2006, las importaciones de gasolinas se incrementaron 17.1% respecto a 2005, para ubicarse en 198.8 MBPD, como resultado de un déficit en la oferta nacional.

Tabla 3.3. Importación y Exportación de gasolinas 1995-2006 (MBPD).

AÑO	IMPORTACIÓN ^b	EXPORTACIÓN ^a
1995	65.4	5.1
1996	69.5	23.4
1997	117.6	67.0
1998	129.9	79.2
1999	94.1	71.7
2000	82.9	69.7
2001	136.0	73.0
2002	89.7	70.7
2003	54.5	70.7
2004	94.9	76.2
2005	169.8	79.0
2006	198.8	86.6

a. Hasta 1990, la producción incluye los pentanos de exportación y las exportaciones incluyen naftas.
b. Cifras revisadas y actualizadas con Pemex.
FUENTE: Sexto Informe de Gobierno 2006
y PEMEX, Informe Estadístico de Labores 2006.

Durante los últimos cinco años, sólo en el 2003 se logró alcanzar una reducción significativa en el volumen de las importaciones, pese a los logros alcanzados en materia de producción de gasolinas (ver gráfica 3.4). Desde 1995 las importaciones han aumentado en aproximadamente 133.4 MBPD, mientras que las exportaciones han mostrado un comportamiento aproximadamente constante desde 1999, como se presenta en la gráfica 3.4. Esto implica un déficit en la balanza comercial de 60.3 MBPD en 1995 y de 112.2 MBPD al final del periodo.



Gráfica 3.4. Importación y Exportación de Gasolinas de 1995 a 2006
Fuente: Informe Estadístico de Labores, 2006. PEMEX Refinación.

Cabe mencionar que el impacto propiciado por los huracanes que azotaron al sureste de México entre finales del 2005 y principios del 2006, fue la principal razón para el incremento acelerado en las importaciones de gasolinas durante estos años. Este fenómeno llevó al cierre de plataformas de extracción localizadas en el Golfo de México, en particular en la Sonda de Campeche, de donde se extrae la mayor parte del crudo del país y que afectó la producción de combustibles.

En conclusión, el volumen de las importaciones de gasolinas sigue creciendo a un ritmo acelerado y cualquier perturbación en el procesamiento de crudo agudiza esta situación. Estos resultados demuestran la necesidad de aumentar los recursos económicos a PR para incrementar la autosuficiencia energética de México y reducir su dependencia del mercado externo.

3.1.3 Demanda

La demanda de gasolinas en México, medida en términos del consumo aparente (Producción + Importaciones – Exportaciones) según los datos registrados por la Secretaría de Energía, ha incrementado considerablemente durante los últimos años, a una TMCA de 0.7 según la gráfica 3.5, la cual fue elaborada de acuerdo con los datos de la tabla 3.4.

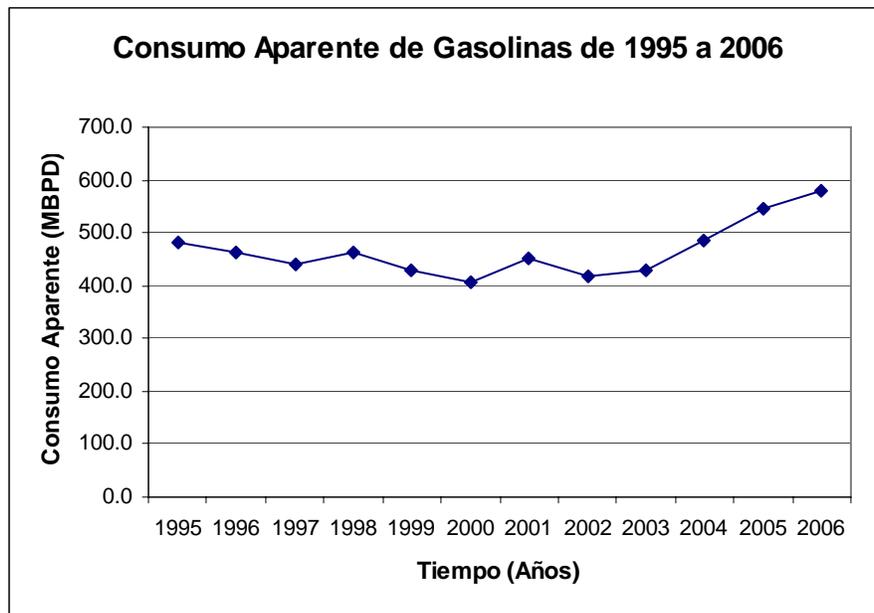


Tabla 3.4. Producción, Importación, Exportación y Consumo Aparente de Gasolinas de 1995 a 2006

AÑO	PRODUCCIÓN ^a	IMPORTACIÓN ^b	EXPORTACIÓN ^b	Consumo Aparente ^c
1995	422.5	65.4	5.1	482.8
1996	416.9	69.5	23.4	463.0
1997	388.3	117.6	67.0	438.9
1998	411.9	129.9	79.2	462.6
1999	405.9	94.1	71.7	428.3
2000	393.1	82.9	69.7	406.3
2001	390.4	136.0	73.0	453.4
2002	398.6	89.7	70.7	417.6
2003	445.7	54.5	70.7	429.5
2004	467.6	94.9	76.2	486.3
2005	455.8	169.8	79.0	546.6
2006	466.9	198.8	86.6	579.1

a. De acuerdo con los datos reportados en la tabla 3.1.
b. De acuerdo con los datos reportados en la tabla 3.3.
c. Calculado como el resultado de Producción + Importación - Exportación.

Como se mencionó anteriormente, la reducción en el procesamiento de crudo en las refinerías de Cadereyta, Madero, Minatitlán y Salamanca durante el 2005 y el impacto ocasionado por los huracanes en la sonda de campeche, redujeron considerablemente la producción nacional de gasolinas, lo cual disparó su importación. Estos hechos, aunados al crecimiento acelerado del parque automotor de 2005 a 2006, se ven reflejados en un crecimiento acelerado del consumo durante este periodo, tal como se muestra en la gráfica 3.5.



Gráfica 3.5. Consumo Aparente de Gasolinas de 1995 a 2006

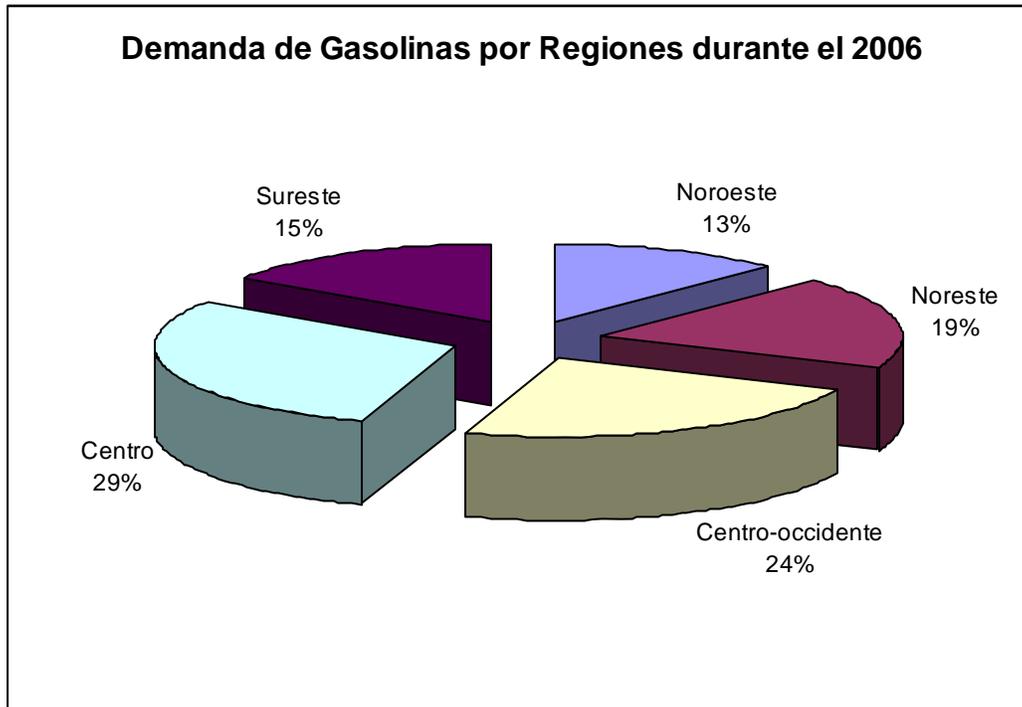


En vista del desarrollo del parque vehicular descrito en el capítulo 2, otra forma de determinar la demanda de gasolinas durante el periodo de estudio, es mediante el consumo de este combustible por el parque automotor a gasolinas. En este sentido, la Secretaría de energía reporta que los consumos de gasolinas registrados en el periodo 1995-2006, se incrementaron a una TMCA de 0.7, según la tabla 3.5. Estos datos, ilustrados en la gráfica 3.6, muestran que durante el último año del periodo, la región Centro presentó la mayor demanda, estimada en 29% de total, seguida por la región Centro-occidente con 24% y Noreste con 19 % del total.

Tabla 3.5. Demanda regional de gasolinas de 1995 a 2006 en MBPD

AÑO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
TOTAL	478.9	480.6	497.8	511.6	511.1	531.4	550.6	565.2	600.5	636.1	671.5	717.9
Noroeste	59.9	61.8	63.8	65.2	64.6	66.8	68.7	67.3	72.8	78.9	84.8	90.7
Noreste	87.5	88.3	92.3	96.0	93.5	98.2	101.9	103.8	115.4	121.8	125.5	134.2
Centro-occidente	104.0	104.9	108.7	111.9	113.6	119.0	125.1	130.9	137.8	147.1	158.8	169.7
Centro	162.6	160.0	164.3	168.8	170.4	175.0	179.2	183.3	188.4	194.3	200.6	214.4
Sureste	64.9	65.6	68.7	69.7	69.0	72.4	75.7	79.9	86.1	94.0	101.8	108.9

FUENTE: IMP con información de ASA, CFE, CRE, DGAC, PEMEX y SENER



Gráfica 3.6. Demanda de gasolinas por regiones durante el 2006

En la tabla 3.6 se registró la demanda del parque automotor a gasolinas por tipo de combustible. De acuerdo con estos datos se elaboró la gráfica 3.7, en donde se puede observar que ha predominando el consumo de gasolina Magna, cuya demanda ha

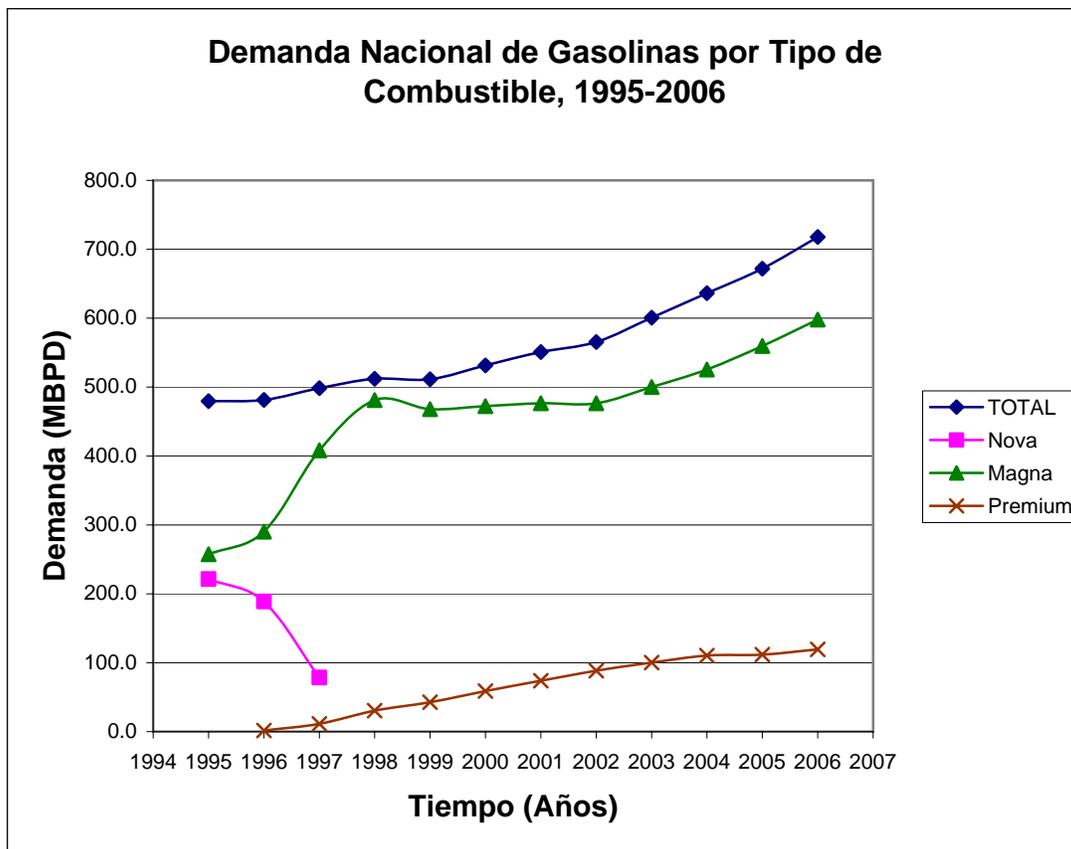


incrementado a una TMCA de 3.7%. Por su parte, aunque la TMCA de la Premium ha sido de 69.7%, su demanda aún se sitúa 478.6 MBPD por debajo de la Magna. Cabe aclarar que la gasolina Nova se dejó de producir a partir de 1990 y esto se refleja en la evolución mostrada en la gráfica 3.7, en la que se observa que esta formulación dejó de consumirse en 1997.

Tabla 3.6. Demanda nacional de gasolinas por tipo de combustible de 1995 a 2006 en MBPD

AÑO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
TOTAL	479.5	481.3	498.4	512.2	511.3	531.6	550.8	565.4	600.7	636.3	671.8	717.9
Nova	221.3	188.8	78.4									
Magna	257.5	290.3	408.2	481.2	468.0	472.3	476.5	476.5	500.2	525.5	559.6	598.0
Premium		1.6	11.2	30.5	42.8	58.9	73.9	88.5	100.1	110.4	111.7	119.4
Otras	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5

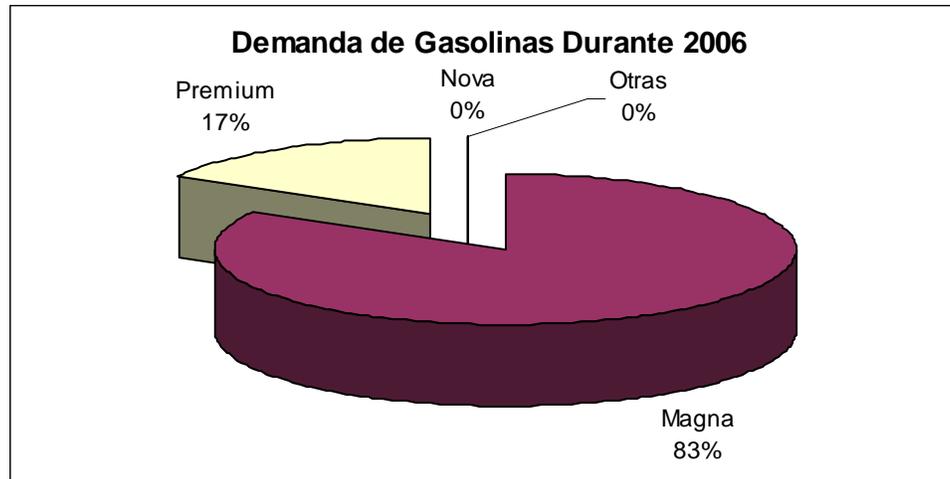
FUENTE: Anuario Estadístico PEMEX 2006 con información de la SENER.



Gráfica 3.7. Demanda nacional de gasolinas por tipo de combustible de 1995-2006 (MBPD)



Durante el 2006 la demanda de gasolina Magna alcanzó los 598 MBPD, lo cual representa el 83% del total de la demanda de gasolinas para ese año, como se muestra en la gráfica 3.8, elaborada de acuerdo a los datos de la tabla 3.6.



Gráfica 3.8. Demanda de Gasolinas Durante 2006

En conclusión, durante el periodo comprendido entre 1995 y 2006, el consumo de gasolinas ha ido incrementando con una TMCA de 0.7%, predominando el de gasolina Magna. Este hecho explica porque este tipo de gasolina se ha producido en mayor cantidad durante el periodo analizado. No obstante, el consumo de gasolina Premium ha presentado un importante aumento, derivado de las exigencias de los nuevos modelos de vehículos con motor a gasolinas.

3.1.4 Precios

En la tabla 3.7 se reportan los precios promedio ofrecidos al público para las gasolinas Magna, Premium y Nova en el país, excepto para la región de la frontera norte, puesto que allí, los precios obedecen a otras políticas de ajuste, derivadas de su interacción con la oferta de Estados Unidos. Como puede observarse, en los últimos 10 años la gasolina Magna ha subido más del 300%, mientras que la gasolina Premium ha incrementado en más de 260%, sin que se haya realizado ningún ajuste por la baja del precio del crudo durante este periodo.

La gráfica 3.9 describe el comportamiento de la evolución del precio de las gasolinas desde 1995 hasta el 2006, en donde puede apreciarse su incremento sostenido durante el periodo de estudio. En efecto, el precio de venta de las gasolinas en México ha subido en promedio 10.86% anual para la Magna y 10.3% anual para la Premium. Esto se debe al hecho de que Petróleos Mexicanos (PEMEX) sea el único proveedor de gasolinas en México. Por lo tanto, las tarifas de venta buscan cubrir el costo de oportunidad que tendría PEMEX por vender crudo en el mercado internacional, en lugar de producir combustibles, sin la presión de realizar ajustes para ser competitivo en el mercado interno.



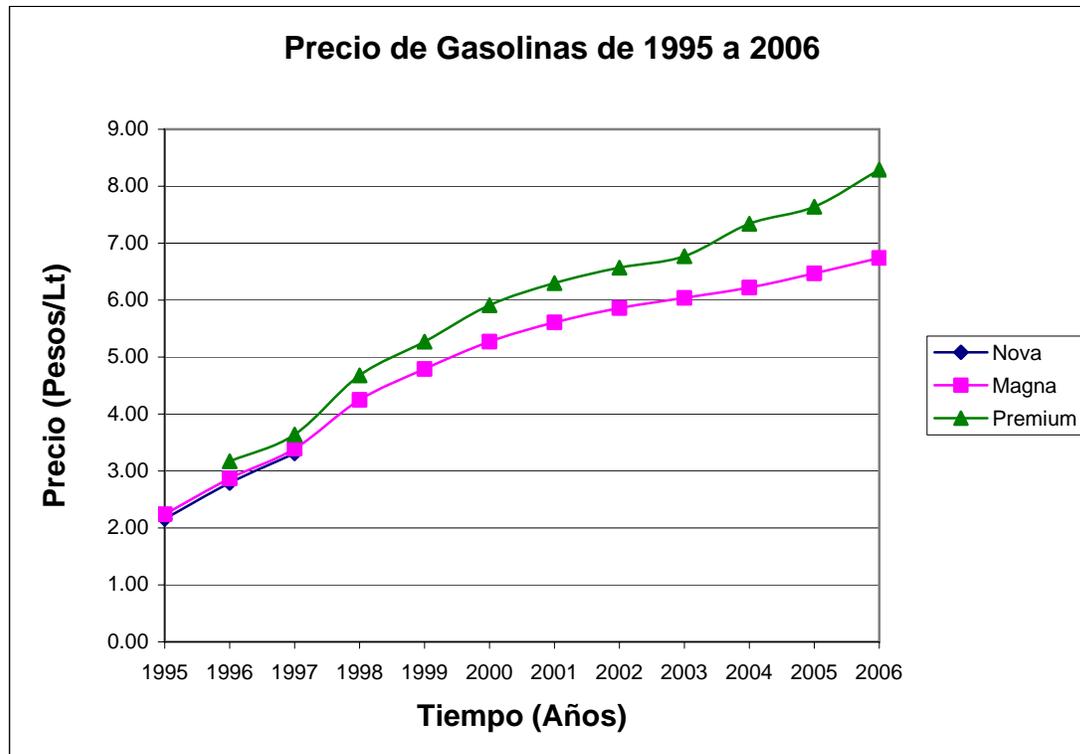
Tabla 3.7. Precio de gasolinas de 1995 a 2006

AÑO	NOVA ^{a, d}	MAGNA ^{b, d}	PREMIUM ^{c, d}
1995	2.16		2.24
1996	2.79		2.87
1997	3.31		3.39
1998			4.25
1999			4.79
2000			5.27
2001			5.61
2002			5.86
2003			6.04
2004			6.22
2005			6.47
2006			6.74

- a. Desde enero de 1998 se dejó de comercializar.
- b. A partir de Sep./90 sustituyó a la gasolina extra.
- c. Se reportan datos a partir del año en que inició su registro.
- d. Se excluye el precio en la Frontera Norte.

Promedio de precios en pesos/Lt. Incluye IVA

FUENTE: Anuario Estadístico de PEMEX (Varios años).



Gráfica 3.9. Precio de gasolinas de 1995 a 2006



En vista de que PEMEX posee el dominio del mercado y la libertad para fijar los precios, se puede apreciar que ampliar la producción de gasolinas en México representa no solo una necesidad para cubrir la demanda nacional, sino también una oportunidad de incrementar los márgenes de utilidad de esta industria.

3.2 Pronóstico de la Oferta y la Demanda de Gasolinas

Cubrir la demanda nacional de gasolinas de manera oportuna, competitiva y con la calidad requerida, representa un gran reto para el sector energético mexicano. En la industria de la refinación nacional se han realizado grandes esfuerzos desde principios de los años noventa, iniciándose un ambicioso programa de modernización y reconfiguración de instalaciones, para un mejor aprovechamiento del crudo pesado. Durante el 2005 se normalizaron las operaciones de las refinerías reconfiguradas y se iniciaron trabajos de modernización de las refinerías restantes para mejorar su eficiencia operativa.

En esta sección se muestra la evolución esperada de la oferta y la demanda nacional de gasolinas para el período 2007-2015, bajo un escenario que considera una cartera de proyectos estratégicos programados por PEMEX Refinación (PR). Entre estos proyectos se destacan la conclusión de la reconfiguración de sus refinerías, la incorporación de un nuevo tren de refinación, el proyecto de cogeneración en Tula y el proyecto de mejoramiento de la calidad de combustibles. Estos planes tendrán un gran impacto en infraestructura, desarrollo tecnológico, procesamiento de crudo y rendimientos de producción, que permitirán ampliar la oferta de combustibles con una mayor calidad.

3.2.1 Perspectivas del Sistema Nacional de Refinación

Las tendencias mundiales de la industria de la refinación, la actividad económica nacional, las regulaciones ambientales y la disponibilidad de crudos pesados y amargos, han inducido al SNR a desarrollar diversos proyectos estratégicos. Con la ejecución de estos proyectos PR pretende cubrir los requerimientos de demanda y calidad de combustibles en el país. Para tal propósito, durante el periodo de 2007 a 2015, PR incrementará su capacidad nominal de procesamiento, especialmente para los procesos de destilación atmosférica e Hidrotratamiento. No obstante, debido a que la producción estará orientada hacia la obtención de combustibles de alto valor, también se requerirá una expansión en la capacidad de otros procesos. Los principales procesos considerados para expandir su capacidad serán desintegración catalítica, coquización, alquilación e isomerización, entre otros, cuya magnitud se reporta en la tabla 3.8.



Tabla 3.8. Capacidad Instalada de los Procesos por Refinería 2006-2015, (MBPD)

PROCESO	AÑO	Cadereyta	Madero	Minatitlán	Salamanca	Salina Cruz	Tula	Nuevo Tren	SNR
Destilación Atm.	2006	275.0	190.0	185.0	245.0	330.0	315.0	0.0	1540.0
	2015	275.0	190.0	335.0	245.0	495.0	315.0	300.0	2155.0
Desintegración Cat.	2006	90.0	60.5	24.0	40.0	80.0	80.0	0.0	374.5
	2015	90.0	60.5	66.0	68.0	110.0	123.0	117.0	517.5
Viscorreducción	2006	50.0	0.0	0.0	0.0	50.0	41.0	0.0	141.0
	2015	50.0	0.0	0.0	0.0	50.0	41.0	0.0	141.0
Reformación Cat.	2006	44.0	0.0	37.0	39.3	50.0	65.0	0.0	235.3
	2015	46.0	30.0	37.0	53.3	60.0	74.0	32.0	300.3
Alquilación e Isom. ¹	2006	23.0	11.8	14.2	14.0	28.0	24.0	0.0	115.1
	2015	23.0	11.8	40.2	39.0	51.0	46.0	65.0	211.1
Hidrodesulfurización	2006	186.5	141.7	100.0	125.0	165.0	269.0	0.0	987.6
	2015	186.5	141.7	201.0	197.0	255.0	340.0	313.0	1321.6
Coquización	2006	50.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
	2015	50.0	50.0	56.0	45.0	92.0	57.0	140.0	350.0

(1) Capacidad de producción.

FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.

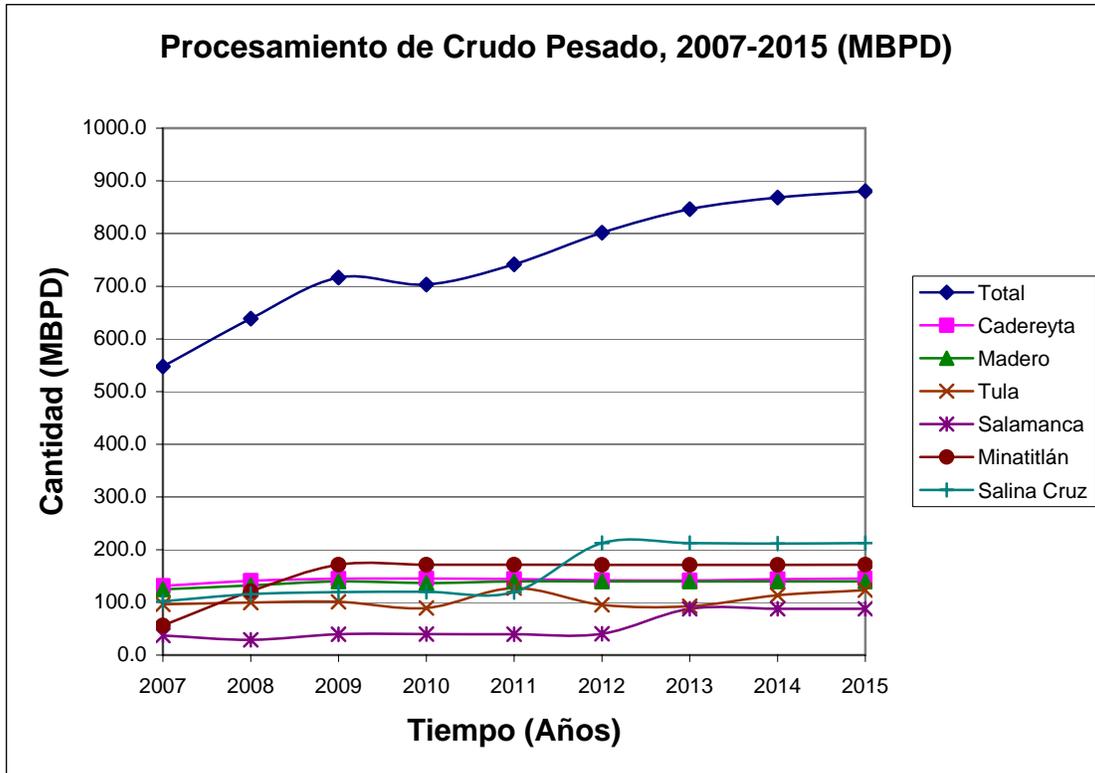
Según las proyecciones realizadas por la Secretaría de Energía en su informe “Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015”, los nuevos esquemas de reconfiguración permitirán elevar el procesamiento de crudo pesado a una TMCA de 5.2%. Esta tasa representa un aumento de 348.7 MBPD, tal como se puede observar en la tabla 3.9, cuyos datos se representan en la gráfica 3.10.

Tabla 3.9. Procesamiento de Crudo Pesado 2007-2015 (MBPD)

AÑO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TMCA
TOTAL	547.8	638.7	716.4	703.2	741.6	801.6	846.3	868.4	880.3	5.2
Cadereyta	131.2	141.1	144.8	145.2	144.2	142.0	141.6	144.0	145.1	3.6
Madero	124.8	132.3	139.8	136.9	139.8	139.8	139.8	139.8	139.8	1.4
Tula	96.4	99.7	101.0	89.5	127.0	95.3	92.8	113.6	123.2	2.2
Salamanca	37.1	28.9	39.7	39.9	39.5	40.5	88.0	88.0	88.0	5.8
Minatitlán	56.1	121.1	171.6	171.5	171.6	171.3	171.3	171.3	171.4	12.3
Salina Cruz	102.2	115.6	119.5	120.1	119.5	212.7	212.7	211.7	212.7	7.3

FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.

En este periodo, la refinería que procesará la mayor cantidad de crudo pesado será Salina Cruz con un aumento de 110.5 MBPD, seguida por Minatitlán con un aumento de 115.3 MBPD y Cadereyta, que incrementará su procesamiento en sólo 13.9 MBPD. En el caso del nuevo tren de refinación, el crudo que procesará será del tipo extrapesado. Este crudo consiste en una mezcla de fracciones relativamente altas de componentes pesados, de baja densidad API (10 grados) y alta viscosidad, proveniente de los yacimientos Ku-Maloob-Zaap.



Gráfica 3.10. Procesamiento de Crudo Pesado 2007-2015 (MBPD)

En cuanto al crudo ligero, se observará una disminución a lo largo del periodo de 118.1 MBPD, como consecuencia de una menor demanda por parte de Salina Cruz, Minatitlán y Tula. No obstante, Cadereyta y Madero mostrarán un mayor consumo, tal como se presenta en la tabla 3.10 y en la gráfica 3.11.

Tabla 3.10. Procesamiento de Crudo Ligero 2007-2015 (MBPD)

AÑO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TMCA
TOTAL	777.2	780.8	754.6	768.0	729.1	662.7	637.1	619.7	610.4	-1.8
Cadereyta	88.8	98.9	103.7	103.7	104.0	100.5	100.1	102.4	103.6	1.4
Madero	30.2	32.7	35.2	38.1	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2	8.3
Tula	193.6	200.3	203.0	214.5	177.0	208.7	211.2	190.4	180.8	-0.8
Salamanca	162.9	171.1	160.3	160.1	160.5	159.5	132.0	132.0	132.0	0.0
Minatitlán	113.9	93.4	67.9	67.8	67.9	67.4	67.4	67.4	67.6	-4.6
Salina Cruz	187.8	184.4	184.5	183.9	184.5	91.3	91.3	92.3	91.3	-6.9

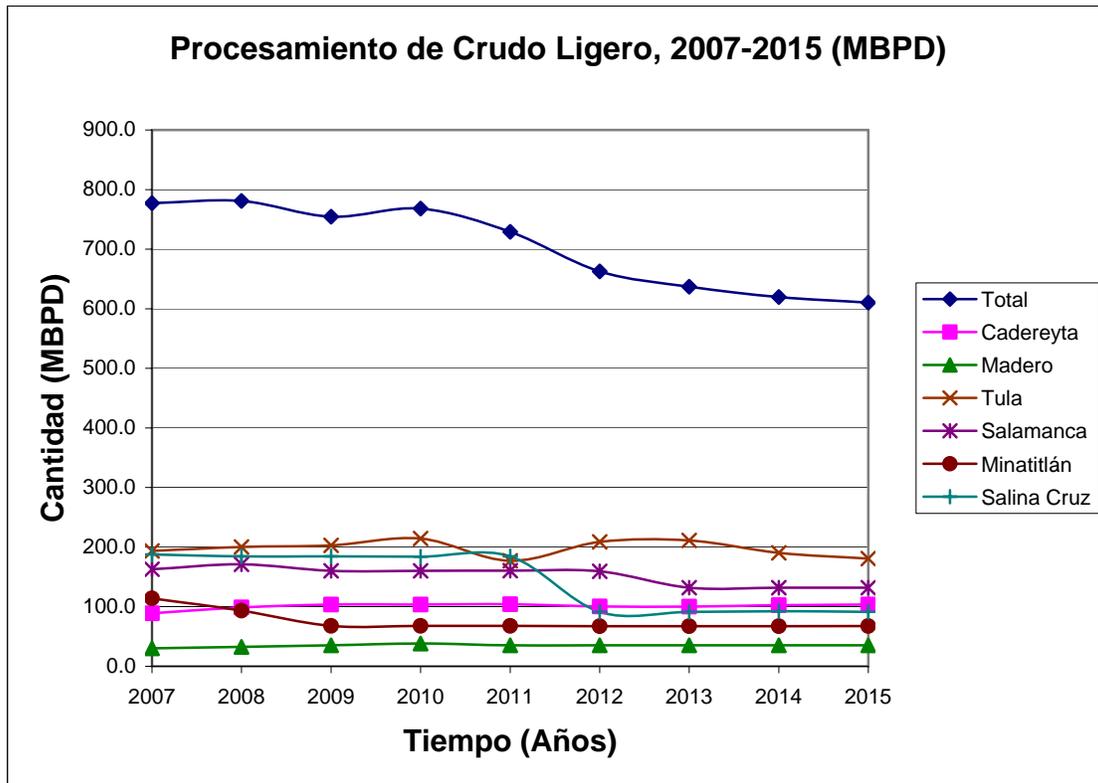
FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.

Hacia el 2015, se logrará aumentar los rendimientos en la producción de combustibles respecto a los obtenidos en el 2006, esto como consecuencia del volumen y tipo de crudo procesado y de la configuración de cada refinería. En materia de gasolinas, el



rendimiento se destacará por un porcentaje mayor al 40% en la mayoría de los centros de producción, tal como se presenta en la tabla 3.11.

En este orden de ideas, hacia el 2015 todas las refinerías contarán con esquemas de coquización que permitirá aumentar el rendimiento de los productos ligeros y hacer más redituable su operación. La incorporación de coquizadoras en la reconfiguración de las refinerías, permitirá no solo aumentar el procesamiento de crudos pesados, sino también minimizar la generación de productos residuales, elevar el rendimiento de productos ligeros, reducir las importaciones de combustibles y mejorar el margen de utilidad de PR. Además, con estos proyectos de conversión de residuales se logrará satisfacer en mayor medida la creciente demanda de combustibles en el país.



Gráfica 3.11. Procesamiento de Crudo Ligero 2007-2015 (MBPD)

Tabla 3.11. Rendimientos en la Producción de Gasolinás en 2015 (%)

Refinería	%
Cadereyta	42.6
Madero	42.0
Tula	49.9
Salamanca	41.2
Minatitlán	37.3
Salina Cruz	40.1
Nuevo Tren	38.7

FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.



Por otro lado, el programa de reducción del contenido de azufre en los combustibles automotores, no solo permitirá reducir las emisiones contaminantes sino que también será un requisito indispensable para la introducción de nuevas tecnologías vehiculares. Como consecuencia, es imprescindible realizar las inversiones necesarias de tal forma que las tecnologías automotriz y petrolera coincidan para cumplir con los compromisos ambientales.

En este sentido, la norma oficial mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, establece que la gasolina Premium debe reducir su contenido de azufre a 30 ppm para octubre de 2006, mientras que la Magna deberá alcanzar este nivel de concentración en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para octubre de 2008. Para el resto del país, se prevé introducir estas dos formulaciones en enero de 2009. Con estas acciones se pretende ubicar la calidad de las gasolinas nacionales, dentro de los mismos parámetros que se manejan internacionalmente.

3.2.2 Prospectiva de la Producción de Gasolinas 2007-2015

El incremento esperado en la producción de petrolíferos para el periodo 2007-2015, estará orientado a cubrir el crecimiento de la demanda interna, en especial para las gasolinas. Por esta razón, se espera que el volumen de la producción de este combustible crezca con una TMCA de 6.1% en total para este periodo, de acuerdo con la tabla 3.12. Con base en esto, cada refinería tendrá una configuración específica acorde al tipo y volumen de crudo a procesar y a la demanda de gasolinas de su zona de influencia.

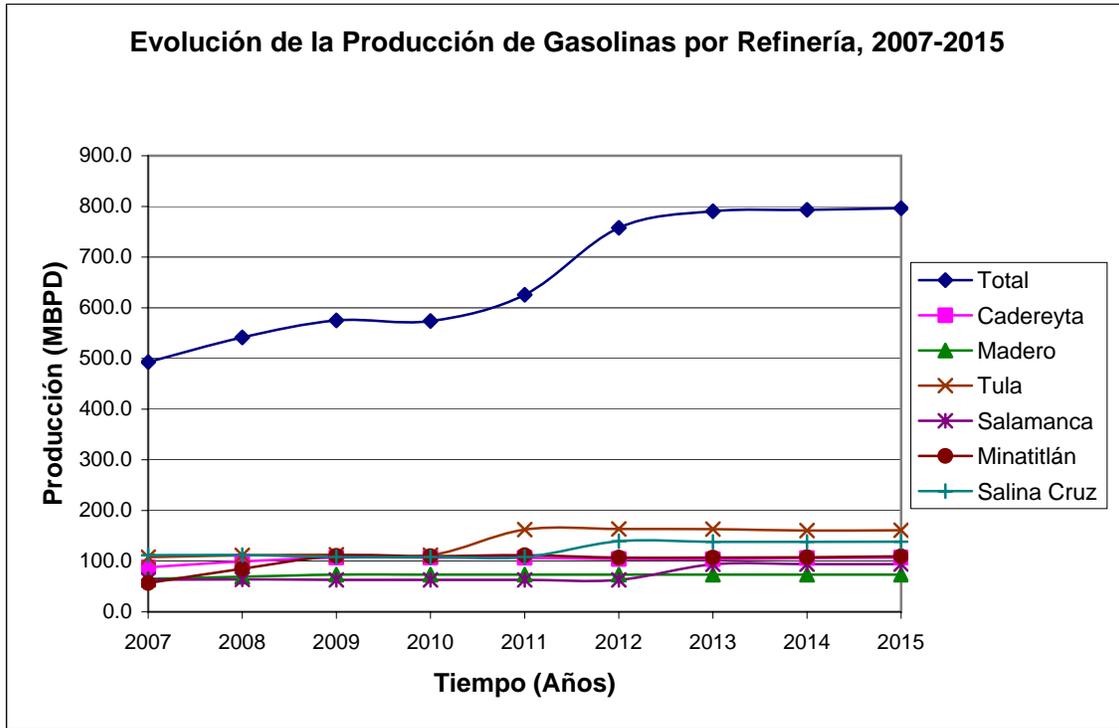
En la gráfica 3.12 se puede apreciar la tendencia de crecimiento que se prevé que tendrá la producción de gasolinas para el periodo de estudio. Al finalizar el periodo, la producción de gasolinas incrementará en 329.6 MBPD respecto del 2006. Las refinerías de Tula, Salina Cruz y Minatitlán serán las que encabezarán la producción, ofreciendo el 21%, 17% y 14% del total respectivamente.

De la misma forma, se espera que el nuevo tren de refinación participe con un 14% del total de la oferta nacional para ese mismo año, tal como se presenta en la gráfica 3.13. De esta manera, se prevé que el incremento en la oferta de gasolinas reduzca las importaciones por lo menos en un 17.5%.

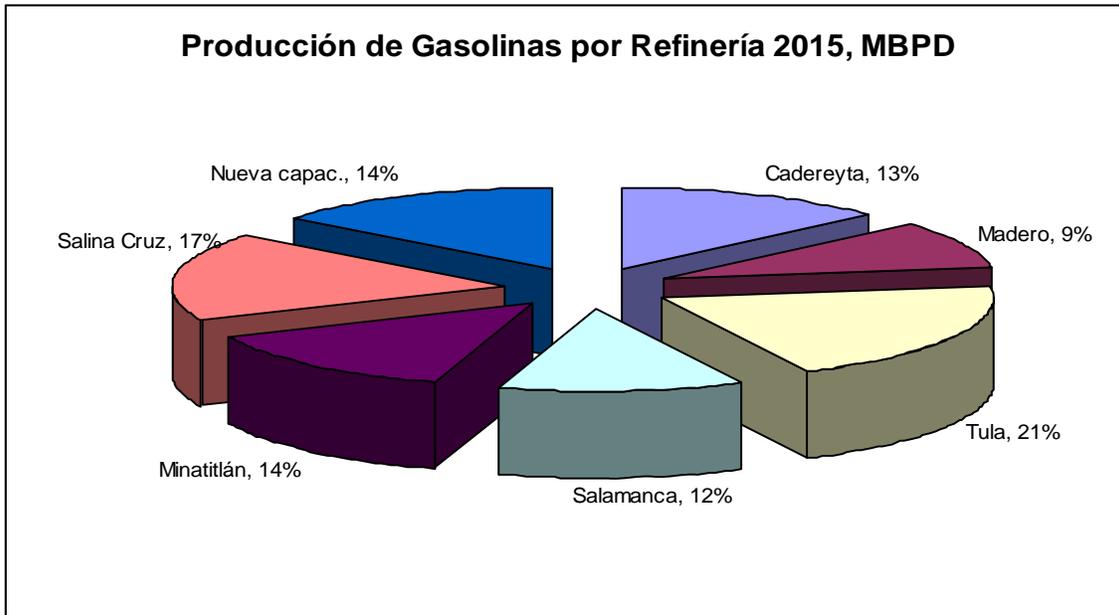
Tabla 3.12. Evolución de la Producción de Gasolinas 2007-2015

AÑO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TMCA
PRODUCCIÓN	492.8	541.6	575.1	573.8	625.7	757.7	790.5	793.2	796.5	6.1
Cadereyta	88.0	99.6	106.9	107.0	106.7	104.3	103.9	106.0	106.9	3.9
Madero	65.1	69.3	73.5	73.5	73.5	73.5	73.5	73.5	73.5	2.5
Tula	107.9	111.5	112.8	111.9	162.3	163.6	163.2	160.5	161.1	4.5
Salamanca	63.3	63.9	63.1	63.1	63.2	63.1	93.8	94.1	94.1	4.0
Minatitlán	56.9	85.1	110.4	109.8	111.6	107.0	107.2	107.6	109.6	9.2
Salina Cruz	111.6	112.2	108.4	108.4	108.4	139.5	138.2	138.1	138.3	3.7
Nueva capac.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	106.7	110.7	113.5	112.9	0.0

FUENTE:SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.



Gráfica 3.12. Evolución de la Producción de Gasolinas por Refinería. 2007-2015 en MBPD



Gráfica 3.13. Producción de Gasolinas por Refinería 2015, MBPD



3.2.3 Perspectivas en la Importación y Exportación de Gasolinas 2007-2015

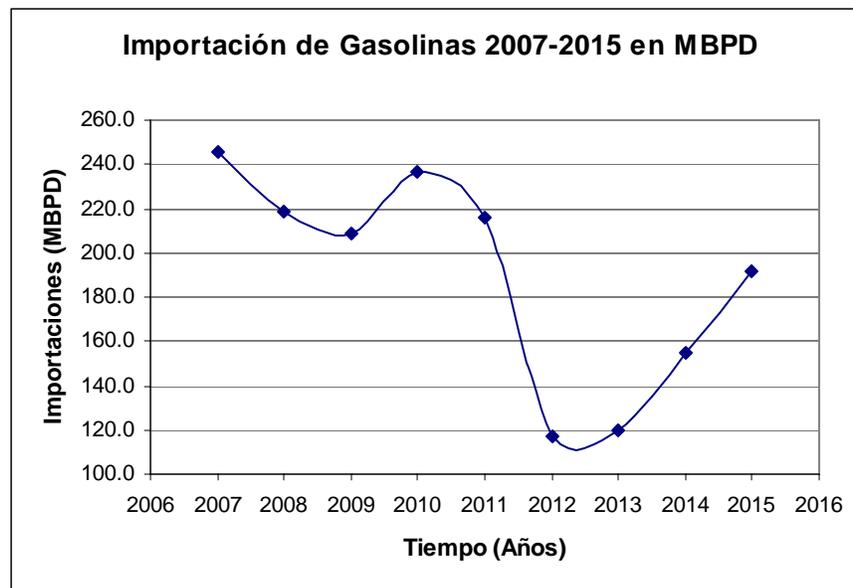
De acuerdo con lo reportado en el informe “Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015” emitido por la Secretaría de Energía, se prevé que se mantendrán las importaciones de gasolinas, pese al incremento proyectado en su capacidad de producción. Esto se debe a que el parque automotor a gasolinas presentará un incremento acelerado, favorecido por las facilidades de crédito para su adquisición y la introducción de vehículos importados, entre otros factores descritos en el capítulo 2. En promedio, se espera que la TMCA de la importación de gasolinas sea de -1.9 entre el 2007 y el 2015, llegando a ser de sólo 191.3 MBPD al finalizar el periodo, de acuerdo con lo reportado en la tabla 3.13.

No obstante, el déficit de suministro de este combustible dejará un margen muy limitado para las exportaciones, de manera que se espera que sean casi nulas. Por esta razón, no se considerarán exportaciones de gasolinas para el análisis en cuestión, durante el periodo 2007-2015.

Tabla 3.13. Importación de Gasolinas 2007-2015 en MBPD

AÑO	IMPORTACIÓN
2007	246.0
2008	218.9
2009	209.2
2010	236.9
2011	216.0
2012	117.2
2013	119.5
2014	154.4
2015	191.3

FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.



Gráfica 3.14. Importación de Gasolinas 2007-2015 en MBPD



El decremento en la importación de gasolinas entre el 2010 y el 2103 indicado en la gráfica 3.14, se debe a la entrada en operación del nuevo tren de refinación. Este tren tendrá una capacidad de 300 MBPD y procesará un volumen de crudo extrapesado de 276 MBPD. Su configuración será del tipo de alta conversión, lo que explica el alto rendimiento en cuanto a la elaboración de gasolinas. En este sentido, en el 2012 la oferta de gasolinas incrementará en 16.4%, por lo que se ubicará, en dicho año, como el tercer centro de refinación de mayor producción de gasolinas y el primero en procesar crudo extrapesado en el país.

3.2.4 Evolución de la Demanda de Gasolinas 2007-2015

La producción nacional de petrolíferos para los próximos 10 años, seguirá destinándose en su mayor parte a satisfacer la demanda de combustibles del sector transporte. Según la SENER, las gasolinas continuarán siendo el combustible que presente una mayor demanda, hasta el punto que se espera que su consumo aparente ascienda a 986.5 MBPD para el 2015. En este sentido, para los próximos diez años la demanda interna de gasolinas aumentará a un ritmo de 3.9% en promedio anual, de acuerdo con los datos de la tabla 3.14.

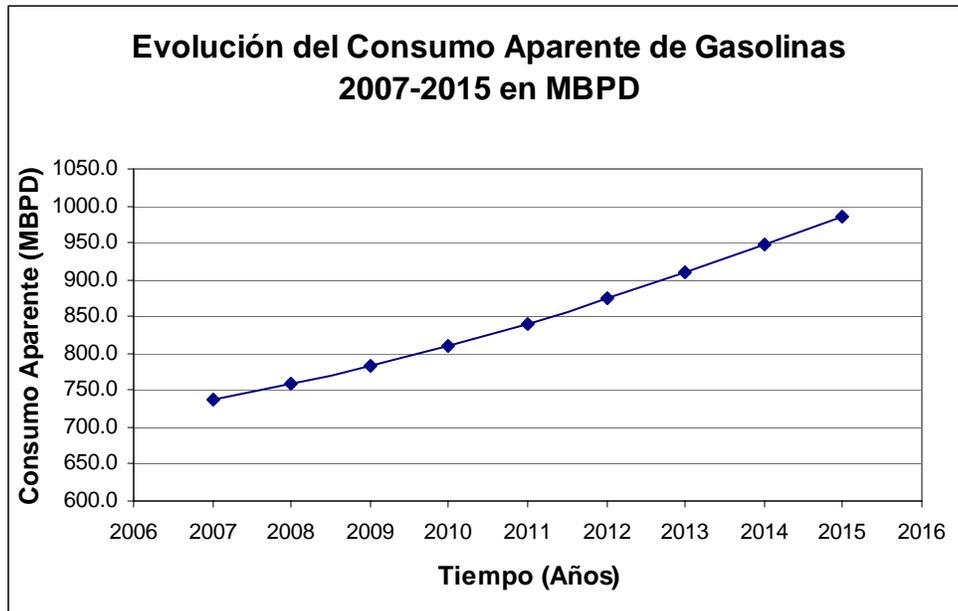
Tabla 3.14. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2025 en MBPD

AÑO	Consumo Aparente
2007	737.5
2008	759.2
2009	783.1
2010	809.4
2011	840.5
2012	873.6
2013	908.8
2014	946.4
2015	986.5

FUENTE: SENER-Prospectiva de petrolíferos 2006-2015.

Los principales factores que influirán en el comportamiento de este sector son los siguientes:

- Facilidades de crédito para la adquisición de vehículos.
- La introducción de vehículos importados.
- Incremento en la actividad de transporte de carga y pasajeros.
- Producción de combustibles con bajo contenido de azufre.
- Uso intensivo del vehículo.
- Preferencia por el transporte terrestre frente al transporte aéreo.



Gráfica 3.15. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015 en MBPD

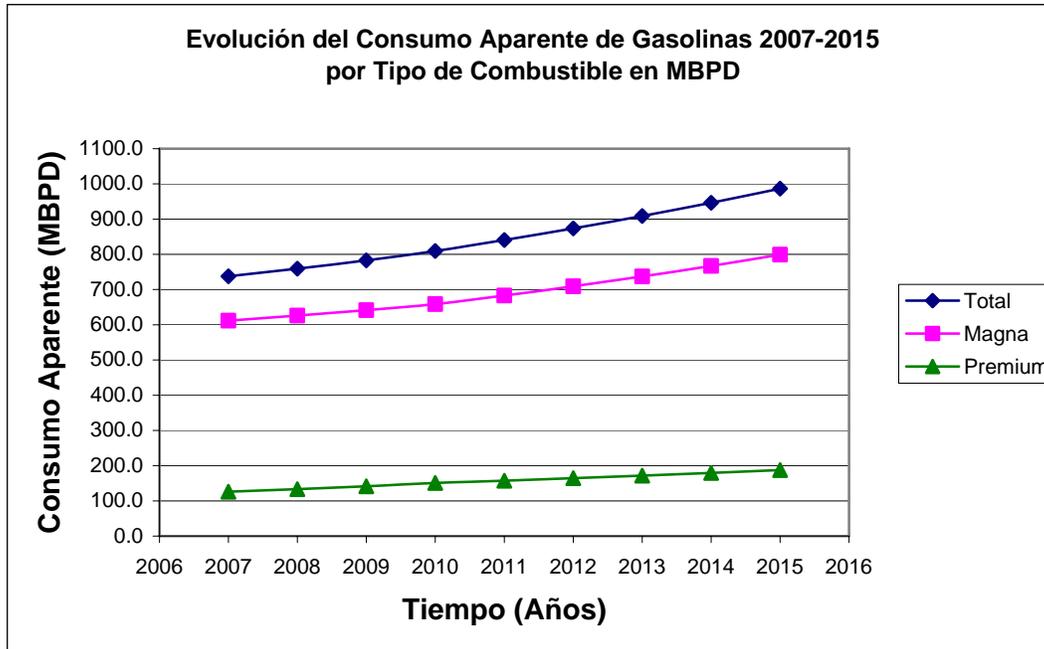
Por tipo de producto, las necesidades de gasolina Magna presentarán un mayor consumo respecto de la Premium. Sin embargo, la demanda de gasolina Magna crecerá a una TMCA de 3.6%, mientras que la de la gasolina Premium lo hará con una tasa de 5.3%, según se muestra en la tabla 3.15.

De acuerdo con la gráfica 3.16, la cual fue elaborada con los datos de la tabla 3.15, la diferencia entre el consumo aparente de las gasolinas Magna y Premium será muy notable, llegando a ser de 611.5 MBPD en el 2015. Este comportamiento se debe a que el proyecto de calidad de gasolinas contempla la elaboración de gasolinas de Ultra Bajo Azufre (UBA). Esto hará que las nuevas especificaciones de la gasolina Magna continúen siendo aceptables para la mayor parte del parque vehicular a gasolinas.

Tabla 3.15. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015 Por Tipo de Combustible en MBPD

AÑO	TOTAL	MAGNA	PREMIUM
2007	737.5	611.6	125.9
2008	759.2	625.9	133.3
2009	783.1	641.5	141.6
2010	809.4	658.5	150.9
2011	840.5	683.1	157.4
2012	873.6	709.2	164.3
2013	908.8	737.2	171.6
2014	946.4	767.0	179.4
2015	986.5	799.0	187.5

FUENTE: PEMEX, Anuario Estadístico 2006.



Gráfica 3.16. Evolución del Consumo Aparente de Gasolinas 2007-2015
Por Tipo de Combustible en MBPD

En conclusión, durante los próximos diez años seguirá predominando el uso de gasolinas como combustible automotriz. Además, se considera que la gasolina Magna continuará siendo la de mayor demanda, debido a su alta compatibilidad con los motores de combustión interna y su bajo costo en comparación con la gasolina Premium. Sumado a esto, su preferencia como combustible se verá favorecida por el bajo contenido de azufre con el que será formulada, de acuerdo con el plan de calidad de combustibles.

Por otro lado, pese al incremento en la producción de gasolinas planteado por PEMEX Refinación, se continuará importando gasolinas para cubrir la demanda nacional de combustibles. Por esta razón y considerando el incremento estimado del parque automotor a gasolinas y la falta de competencia en este sector del mercado, se considera necesario incrementar la capacidad de producción de gasolinas en México.



4. MODELOS DE PROPIEDADES PARA LA FORMULACIÓN DE GASOLINAS

Existen muchas propiedades que son importantes en la caracterización de gasolinas automotrices como son el número de octano (ON), la presión de vapor Reid (RVP), puntos de destilación ASTM, viscosidad, punto de flash e índice de anilina. Una mezcla ideal dentro del contexto de la formulación de gasolinas, se refiere al promedio volumétrico [Barow, 1961]. Sin embargo, la mayoría de las propiedades de la gasolina durante el proceso de mezclado son no ideales y tienen un comportamiento no lineal, por lo tanto es necesario emplear modelos de mezclado más complejos para predecirlas [Rusin, 1975].

Este capítulo se ha basado en el trabajo desarrollado por Singh Aseema [1997] en su tesis titulada “Modeling and Model Updating in the Real-Time Optimization of Gasoline Blending” [Aseema, 1997]. Aquí se presentan los modelos más importantes desarrollados para definir el comportamiento del índice de octano, RVP y puntos de destilación ASTM. No obstante, se pueden encontrar otros modelos desarrollados por Gary y Handwerk [1994], McLellan [1981], entre otros.

4.1 Número de Octano

El Número de Octano es una propiedad que indica la resistencia del combustible a sufrir una detonación prematura cuando se comprime dentro del cilindro del motor. Dicha resistencia se mide de acuerdo al índice de octano medido en un laboratorio (RON) o probado en un motor estático (MON). Estos índices corresponden a la medida del golpeteo que produce la gasolina con respecto al que produce una sustancia patrón, formada por una mezcla de iso-octano (2,2,4-trimetilpentano) y n-heptano. Entonces, el número de octanos del combustible es equivalente al porcentaje de iso-octano en la mezcla patrón con la que se comparó. De esta forma, si el motor funciona con gasolina de alto octanaje es porque está diseñado para una alta relación de compresión aire/combustible, lo cual mejora su rendimiento.

Los índices más comunes para medir el Octanaje son: el Número de Octano de Investigación (RON) y Número de Octano del Motor (MON). El RON fue definido por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, bajo la designación ASTM D-908 y representa el desempeño de la máquina de acuerdo a la forma como se conduce en la ciudad (aceleración frecuente); mientras que el MON (ASTM D-357) representa el desempeño de la máquina en las autopistas [Gary y Handwerk, 1994]. Debido a que el comportamiento de estos índices es no lineal, es necesario emplear modelos de mezclado complejos para asegurar que se alcance un grado satisfactorio de precisión en la predicción del Octanaje del mezclado [Rusin, 1975]. Por lo tanto, a continuación se exponen los modelos más conocidos.

4.1.1 Método del Número de Octano del Mezclado

En este método se utilizan números de Octano ficticios para definir el RON y el MON de la mezcla (BON's). Los índices BON's se determinan linealmente con base en volumen para proporcionar el número de Octano de la mezcla, de acuerdo a la siguiente ecuación [Gary y Handwerk, 1994]:



$$(ON)_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n u_i (BON)_i \quad \text{[Ecuación 4.1.1]}$$

Donde u_i es la fracción de volumen del componente i , $(ON)_{Mezcla}$ es el número de Octano (RON o MON) de la mezcla, $(BON)_i$ es el número de Octano (RON o MON) de la mezcla de componentes y n , es el número de componentes en la mezcla.

Los números de Octano del mezclado usualmente se obtienen por medio de análisis de regresión de pequeños conjuntos de datos y su aplicación a menudo depende de la experiencia y juicio del usuario [Rusin, et al., 1981]. Los índices BON's típicos para algunos componentes han sido reportados por Gary y Handwerk [1994]. Las limitaciones para emplear índices BON's han sido ampliamente reconocidas, lo que ha conllevado al desarrollo de métodos más confiables que no dependan tanto del juicio del usuario [Rusin, et al., 1981].

4.1.2 Método Etil RT-70

El método Etil es uno de los modelos más antiguos y ha sido usado como un método de referencia para comparar los modelos desarrollados más recientemente. En este modelo la no linealidad del mezclado es representada explícitamente como una función de la sensibilidad de los componentes (RON – MON), contenido de olefinas y contenido de aromáticos de los componentes de acuerdo a las siguientes ecuaciones [Healy et al., 1959]:

$$RON_{Mezcla} = \bar{r} + a_1(\bar{rs} - \bar{r}\bar{s}) + a_2(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_3(\bar{A}^2 - \bar{A}^2) \quad \text{[Ecuación 4.1.2a]}$$

$$MON_{Mezcla} = \bar{m} + a_4(\bar{ms} - \bar{m}\bar{s}) + a_5(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_6 \left[\frac{(\bar{A}^2 - \bar{A}^2)}{100} \right]^2 \quad \text{[Ecuación 4.1.2b]}$$

Donde, r es el RON, m es el MON, s es la sensibilidad (RON- MON), O es el contenido de olefinas en porcentaje de volumen, a es el contenido de aromáticos en porcentaje de volumen y $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$, son los coeficientes de correlación y las cantidades acentuadas con una barra superpuesta representan promedios en volumen.

Las ecuaciones 4.1.2 a y b contienen un total de 6 parámetros ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$) para el RON y el MON del mezclado. Con el fin de estimar esos parámetros es necesario disponer de los siguientes datos:

- RON, MON, contenido de olefinas y contenido de aromáticos de cada componente.
- RON y MON de cada mezcla

Una de las ventajas de usar el método Etil RT-70 es que puede ser expandido para incluir los efectos de otros factores (por ejemplo, contenido de azufre) sobre el Octano de la mezcla. Esos factores pueden ser incluidos en el modelo de manera similar al contenido de olefinas y aromáticos usando términos no lineales adicionales [Morris, 1975]. Las características del mezclado pueden variar considerablemente con los cambios en el nivel de Octano y otros en la calidad de las mezclas. Por lo que, tanto las propiedades de las



materias primas como los parámetros del mezclado pueden variar con el tiempo, si ocurren cambios en las operaciones de los procesos corriente arriba [Morris, 1986]. En los modelos de Etil, los parámetros pueden ser estimados durante la ejecución del proceso, usando datos históricos del mezclado. Además, el modelo puede adaptarse si la precisión no decrece respecto al tiempo. Sin embargo, se requiere del conocimiento del contenido de olefinas y aromáticos, lo cual no siempre está disponible.

Algunas indicaciones acerca de la precisión de la predicción de los modelos han sido desarrolladas por Healy et al., [1959]. Las desviaciones estándar de los errores en la predicción de mezclas sin plomo, similares a aquellas en que los coeficientes fueron determinados por Healy, resultaron ser de 0.66 y 0.85 para RON y MON respectivamente. Para mezclas independientes Healy encontró que las desviaciones estándar en los errores de predicción fueron de 0.92 para el RON y 0.61 para el MON.

4.1.3 Método de Stewart

Este método fue propuesto por Stewart en 1959, casi al mismo tiempo que fue publicado el método Etil y es similar a este en que la no linealidad del mezclado se atribuye al contenido de olefinas de los componentes. El modelo corresponde a la siguiente ecuación:

$$RON_{Mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i D_i [RON_i + \bar{c}(O_i - O_{Mezcla})]}{\sum_{i=1}^n V_i D_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.3a]}$$

$$MON_{Mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i D_i [MON_i + \bar{c}(O_i - O_{Mezcla})]}{\sum_{i=1}^n V_i D_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.3b]}$$

donde, V_i es el volumen del componente i en la mezcla, $D_i = \frac{\bar{a}(O_i - O_{Mezcla})}{1 - \exp[\bar{a}(O_i - O_{Mezcla})]}$,

O_{Mezcla} es el porcentaje del contenido de olefinas de la mezcla y es el promedio volumétrico del contenido de olefinas en los componentes, y \bar{c} y \bar{a} son constantes.

Stewart [1959] ha determinado las constantes \bar{c} y \bar{a} usando análisis de mínimos cuadrados en 102 mezclas: el valor de \bar{a} fue determinado en 0.130 para el RON y 0.097 para el MON. Sin embargo, solo 10 de las mezclas usadas fueron multicomponentes, el resto fueron mezclas binarias.

La desviación estándar de los errores de predicción reportados por Stewart [1959] es de 0.77 en el número de Octano para el RON y 0.64 para el MON. No obstante, este error reportado, aplica para la precisión dentro del conjunto de datos usados para la evaluación de las constantes de correlación. No se indica ninguna precisión fuera del intervalo



mencionado. Además, tampoco se ha encontrado reportado el nivel de aceptabilidad industrial de este método.

4.1.4 Método de Interacción

Este método se basa en un modelo de dos factores donde el efecto total se atribuye al efecto principal de cada uno de los dos factores y la no linealidad es capturada por un término de interacción. El término de interacción toma en cuenta el efecto de un factor sobre el otro y puede ser determinado usando diseño de experimentos [Montgomery, 1991]. De forma similar, en el método de interacción, la no linealidad del Octano de la mezcla es atribuida a los dos factores de interacción entre sus componentes y se contabiliza adicionando un término de interacción para el promedio volumétrico del número de Octano. Solo se consideran las interacciones entre pares de componentes; los términos de interacción entre tríos e interacciones de orden superior son por lo general omitidos [Morris, 1975], [Morris, 1986]. [Morris et al., 1994]. Para un sistema de n componentes el número de Octano (RON o MON) de la mezcla se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$(ON)_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n [u_i (ON)_i] + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n (u_i u_k I_{i,k}) \quad \text{[Ecuación 4.1.4a]}$$

Donde, I_{ik} es el coeficiente de interacción entre los componentes i y k. Los coeficientes de interacción, I_{ik} , entre un par de componentes se obtiene usando los números de Octano de los componentes puros y el de una mezcla 50:50 de los dos componentes como se presenta en la siguiente ecuación [Morris et al., 1994]:

$$I_{i,k} = 4(ON)_{i,k} - 2[(ON)_i + (ON)_k] \quad \text{[Ecuación 4.1.4b]}$$

Donde $(ON)_{i,k}$ es el número de Octano de una mezcla 50:50 de i y k.

Para un sistema de n componentes, el número de coeficientes de interacción binaria es $n(n-1)/2$ para el RON y el MON, por lo tanto será necesario determinar un total de $n(n-1)$ parámetros. Los datos experimentales requeridos para estimar esos parámetros son:

- RON y MON de cada componente
- RON y MON para mezclas 50:50 de todas las combinaciones de componentes

Por otro lado, para cualquier RON y MON en un sistema de n componentes, el número total de combustibles a ser probados son n componentes puros más $n(n-1)/2$ mezclas 50:50, lo cual da un total de $n(n+1)/2$. Así mismo, el número total de pruebas requeridas para el RON y el MON será entonces de $n(n+1)$.

Debido a que las características del Octano de la mezcla pueden variar al cambiar el nivel de Octano en las materias primas, los coeficientes de interacción pueden llegar a desactualizarse si llegan a ocurrir cambios significativos en el Octano del Pool [Morris, 1986]. Además, la precisión del modelo de interacción puede decrecer respecto al tiempo, tanto como cambie la calidad de las materias primas por cambios en las operaciones corriente arriba o en las fracciones de crudo. Sin embargo, a diferencia del método Etil



RT-70, el modelo de interacción no puede adaptarse fácilmente debido a que los coeficientes de interacción (I_{ik}) no son coeficientes de correlación, pero son determinados experimentalmente.

En lugar de determinar los coeficientes de interacción de mezclas binarias, los coeficientes de interacción pueden obtenerse usando análisis de regresión de datos de la mezcla (tanto datos de la calidad de las materias primas como de la calidad de las mezclas). Los coeficientes de interacción pueden entonces actualizarse usando datos históricos del mezclado, lo cual los hace adaptativos. No obstante, el modelo de interacción requiere de un gran número de parámetros a ser determinados. Por ejemplo, una mezcla de 7 componentes podría requerir que se determinen 42 coeficientes de interacción mientras que el método Etil RT-70 requerirá estimar solamente 6 parámetros. Por lo tanto, un gran número de datos de mezclado podría requerirse para actualizar los coeficientes de interacción. Así mismo, todos los parámetros del modelo tendrían que ser reevaluados al adicionar nuevas materias primas a la mezcla.

Algunas indicaciones acerca de la precisión del modelo del mezclado han sido proporcionadas en la literatura. Morris [1975] ha estudiado la precisión de este modelo y lo ha comparado con la aproximación del método Etil RT-70. Con base en esta comparación se ha concluido que los datos del modelo de interacción se ajustan mucho mejor que los datos del modelo Etil RT-70, ya que el primer modelo tiene muchos más parámetros. Además, la precisión para una serie de datos no probados, usando los parámetros predeterminados es casi la misma para los dos métodos. De la misma forma, la desviación estándar del error para los dos métodos fue de 0.6 y 1.0 en los números de Octanos, según Morris [1975].

Aunque el modelo de interacción tiene cierta aceptación industrial no ha sido muy usado, debido al gran número de parámetros para ser determinado.

4.1.5 Método de Transformación

Este método involucra la transformación del número de Octano, el cual se mezcla de manera no lineal, a una calidad que se comporta de manera lineal e ideal en la mezcla. Esta nueva cantidad es entonces mezclada idealmente y el resultado es transformado de nuevo al número de Octano [Rusin et al., 1981]. El método de transformación es similar al método del número de Octano del mezclado (BON) en que las calidades transformadas son mezcladas idealmente; sin embargo, se requieren métodos sistemáticos de transformación de números de Octanos a calidades y viceversa. Mientras que el método de transformación es aplicable a mezclas con y sin plomo, aquí solo se describirá la aplicación de este modelo a mezclas sin plomo.

Para gasolinas sin plomo este método toma en cuenta la interacción de las clases mayores de hidrocarburos y el cambio en las condiciones (niveles de severidad) dentro de la máquina cuando se prueban diferentes combustibles. El efecto de los niveles de severidad se contabiliza por medio de la relación del Octanaje de los componentes y la sensibilidad a los niveles de referencia. A continuación se describen los pasos requeridos para las gasolinas sin plomo:

Paso I. Transformación de propiedades para cada componente:

- a) Evaluación de la sensibilidad a un nivel de severidad de referencia de la máquina



$$s_i = \frac{RON_i - MON_i}{1 - c_1(RON_i - RON_{ref}) + c_2(MON_i - MON_{ref})} \quad \text{[Ecuación 4.1.5a]}$$

b) Ajuste de Octanaje al nivel de referencia

$$RON_{calc_i} = RON_i + (c_1)(s_i)(RON_i - RON_{ref}) \quad \text{[Ecuación 4.1.5b]}$$

$$MON_{calc_i} = MON_i + (c_1)(s_i)(MON_i - MON_{ref}) \quad \text{[Ecuación 4.1.5c]}$$

c) Determinación del tipo de ajuste de hidrocarburo

$$H_{RON_i} = \frac{c_3 O_i P_i}{1 + k_1 O_i} + \frac{c_5 A_i P_i}{1 + k_2 A_i} + c_7 A_i O_i \quad \text{[Ecuación 4.1.5d]}$$

$$H_{MON_i} = \frac{c_4 O_i P_i}{1 + k_1 O_i} + \frac{c_6 A_i P_i}{1 + k_2 A_i} + c_8 A_i O_i \quad \text{[Ecuación 4.1.5e]}$$

d) Ajuste de Octanaje para “remover” los efectos de interacción entre tipos de hidrocarburos

$$RON_{transf_i} = RON_{calc_i} - H_{RON_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.5f]}$$

$$MON_{transf_i} = MON_{calc_i} - H_{MON_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.5g]}$$

Paso II. Cálculo de propiedades lineales transformadas de las mezclas:

$$RON_{transf_i} = RON_{calc_i} - H_{RON_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.5h]}$$

$$MON_{transf_i} = MON_{calc_i} - H_{MON_i} \quad \text{[Ecuación 4.1.5 i]}$$

$$O_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n (u_i O_i) \quad \text{[Ecuación 4.1.5 j]}$$

$$A_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n (u_i A_i) \quad \text{[Ecuación 4.1.5 k]}$$

$$P_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n (u_i P_i) \quad \text{[Ecuación 4.1.5 l]}$$

Paso III. Transformación de las propiedades del mezclado a números de Octano del mezclado:



a) Ajuste de hidrocarburos

$$H_{RON_{Mezcla}} = \frac{c_3 O_{Mezcla} P_{Mezcla}}{1 + k_1 O_{Mezcla}} + \frac{c_5 A_{Mezcla} P_{Mezcla}}{1 + k_2 A_{Mezcla}} + c_7 A_{Mezcla} O_{Mezcla} \quad [\text{Ecuación 4.1.5 m}]$$

$$H_{MON_{Mezcla}} = \frac{c_4 O_{Mezcla} P_{Mezcla}}{1 + k_1 O_{Mezcla}} + \frac{c_6 A_{Mezcla} P_{Mezcla}}{1 + k_2 A_{Mezcla}} + c_8 A_{Mezcla} O_{Mezcla} \quad [\text{Ecuación 4.1.5 n}]$$

b) Ajuste de Octanaje transformado para incluir los efectos de las interacciones entre tipos de hidrocarburos

$$RON_{Calc_{Mezcla}} = RON_{transf_{Mezcla}} - H_{RON_{Mezcla}} \quad [\text{Ecuación 4.1.5o}]$$

$$MON_{Calc_{Mezcla}} = MON_{transf_{Mezcla}} - H_{MON_{Mezcla}} \quad [\text{Ecuación 4.1.5p}]$$

c) Cálculo de la sensibilidad a un nivel de severidad del Octanaje de referencia

$$S_{Mezcla_{ref}} = RON_{calc_{Mezcla}} - MON_{calc_{Mezcla}} \quad [\text{Ecuación 4.1.5q}]$$

d) Ajuste del nivel de referencia al nivel de severidad actual

$$RON_{Mezcla} = RON_{calc_{Mezcla}} - \frac{c_1 S_{Mezcla_{ref}} (RON_{calc_{Mezcla}} - RON_{Mezcla})}{1 + c_1 S_{Mezcla_{ref}}} \quad [\text{Ecuación 4.1.5 r}]$$

$$MON_{Mezcla} = MON_{calc_{Mezcla}} - \frac{c_2 S_{Mezcla_{ref}} (MON_{calc_{Mezcla}} - MON_{Mezcla})}{1 + c_2 S_{Mezcla_{ref}}} \quad [\text{Ecuación 4.1.5 s}]$$

Donde, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 , c_7 , c_8 , k_1 y k_2 , son constantes que deben ser determinadas, s es la sensibilidad ($RON - MON$), RON_{ref} y MON_{ref} son el MON y el RON de referencia que arbitrariamente se han ajustado a 90 [Rusin et al., 1981], H es el efecto de la interacción entre tipos de hidrocarburos, A_i , P_i , O_i son las fracciones de volumen de los aromáticos, parafinas y olefinas para el componente i , respectivamente.

Estos modelos de mezclado para el RON y el MON contienen por lo menos 10 parámetros (RON_{ref} , MON_{ref} , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 , c_7 , c_8 , k_1 y k_2) los cuales pueden ser determinados a partir de los siguientes datos experimentales del mezclado:

- RON , MON , contenido de aromáticos, parafinas y olefinas de cada componente
- RON y MON de cada mezcla

La precisión de los modelos de transformación fue probada por Rusin et al., [1981], quien usó datos de 564 gasolinas de composición variable de muchos estudios independientes de mezclas. Rusin y sus colaboradores dividieron los datos de cada fuente en mitades y usaron la primera mitad, para determinar los parámetros del modelo. La segunda mitad de la serie de datos junto con los datos de dos estudios adicionales fueron usados para



probar la precisión de los modelos. La desviación estándar del error fue de aproximadamente 0.4 y 0.5 de un número de Octano para el RON y MON del mezclado.

Así como el método Etil RT-70, el método de transformación requiere del RON, MON, contenido de olefinas y aromáticos, pero también requiere del contenido de parafinas. Adicionalmente, el método de transformación necesita de la determinación de 10 coeficientes de regresión, mientras que el modelo Etil RT-70 solo requiere de 6 (3 para el RON y 3 para el MON). Además, la aproximación de Etil RT-70 es superior a la del método de transformación en términos de simplicidad y facilidad de uso del modelo.

4.1.6 Método de Exceso

Este método compensa las desviaciones del comportamiento ideal adicionando un término de “exceso”. Los valores de dicho exceso son adicionados al promedio volumétrico del número de Octano de del componente para predecir el número de Octano del mezclado (RON o MON) [Muller, 1992], de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(ON)_j = \sum_{i=1}^n u_{ij} (ON)_i + \sum_{i=1}^n u_{ij} (ON)_{ij}^E \quad \text{[Ecuación 4.1.6]}$$

Donde $(ON)_j$ es el número de Octano de la mezcla j , $(ON)_{ij}^E$ es el término de exceso asociado al componente i en la mezcla j , y u_{ij} es la fracción de volumen del componente i en la mezcla j .

En este modelo lineal, el exceso del número de Octano, $(ON)_{ij}^E$, proporciona la contribución del componente i a la no idealidad en la mezcla j . Estos parámetros para cada mezcla son determinados preparando una serie de “mezclas exceso”. Dichas mezclas son obtenidas mezclando tantas muestras de combustibles como componentes presentes en ellas, aunque omitiendo un componente y luego otro. Es preciso observar que en la preparación de las “mezclas exceso” el volumen de cada componente (excepto el omitido) permanece igual mientras que el volumen total y la composición volumétrica varían. Los detalles acerca de cómo determinar el número de exceso pueden consultarse en Muller [1992].

Los valores del número $(ON)_{ij}^E$ que deben determinarse para cada grado de combustible (mezcla) es n y los datos experimentales necesarios para estimar dichos parámetros son:

- Número de Octano (RON y MON) de cada componente,
- Número de Octano (RON y MON) de la mezcla,
- Número de Octano (RON y MON) de las n “mezclas exceso”.

El número de combustibles que necesitan ser probados es de $(n+d(n+1))$. De esta forma, un total de $2(n+d(n+1))$ pruebas deben ser necesarias para determinar el MON y RON combinado, donde d es el número de grados de gasolina.

El método de exceso es el número uno de los modelos lineales de mezclado, ya que tiene la ventaja de permitir el uso de la programación lineal, la cual ha sido ampliamente utilizada en la industria [Magoulas et al., 1988], para determinar la receta óptima del mezclado. Sin embargo, los valores de “exceso” son calculados para una mezcla



proporcionada con una composición nominal. Por lo tanto, la precisión de este método decrecerá tanto como la composición real se desvíe de su valor nominal, de manera que sería necesario realizar periódicamente nuevos estudios sobre el mezclado para recalcular los “números de exceso”. Además, los parámetros determinados son específicos para cada mezcla, por lo que deberían determinarse los “números de exceso” para diferentes grados de gasolina (por ejemplo, Regular, Premium, etc.), mientras que en otros modelos el mismo conjunto de parámetros es aplicable a todos los grados de gasolinas.

Por otro lado, no se encontró ninguna indicación acerca de la aceptabilidad industrial de este método.

4.1.7 Método de Zahed

Este método correlaciona los números de Octano de las materias primas para predecir el número de Octano del mezclado. Los parámetros de la ecuación son estimados usando análisis de regresión sobre datos experimentales [Zahed et al., 1993]. El modelo de mezclado para el RON, responde a la siguiente ecuación.

$$(RON)_{Mezcla} = M_0 + \sum_{i=1}^n M_i [u_i (RON)_i]^{k_3} \quad \text{[Ecuación 4.1.7a]}$$

De manera análoga este método se puede usar para estimar el MON, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$(MON)_{Mezcla} = Q_0 + \sum_{i=1}^n Q_i [u_i (MON)_i]^{k_4} \quad \text{[Ecuación 4.1.7b]}$$

Donde M_0 , Q_0 , M_i , Q_i , k_3 y k_4 son constantes, y n es el número de componentes en la mezcla.

De esta forma, los parámetros que necesitan ser determinados son M_0 , M_1 , ..., M_n , y k_3 para el RON, y Q_0 , Q_1 , ..., Q_n , y k_4 para el MON. Los datos necesarios para estimar esos parámetros son RON y MON de cada mezcla y de los n componentes.

Al igual que otros modelos, la precisión de este método está limitada al conjunto de datos que se empleen para estimar los parámetros debidos a las características del mezclado y por lo tanto, los parámetros del modelo pueden cambiar tanto como varíen la calidad de los componentes respecto al tiempo. Los parámetros del modelo pueden ser actualizados durante la ejecución, empleando los datos históricos del mezclado. Zahed et. al. [1993] comparó la precisión de las ecuaciones (4.9) y (4.10) con las del método de Stewart y encontró que es mucho mejor en la predicción del RON del mezclado para un conjunto de datos experimentales. No obstante, no se encontró reportada la desviación estándar del error de este método.



4.1.8 Comparación entre Métodos

La tabla 4.1 resume la discusión presentada anteriormente acerca de los modelos de mezclado, mientras que la tabla 4.2 compara la precisión de los diferentes modelos. También se proporciona la precisión de los modelos para hacer interpolaciones y extrapolaciones, para las cuales el método de transformación [Rusin et al., 1981], ha sido el más destacado.

Cabe mencionar que el método de exceso, siendo lineal, es válido solamente dentro de la vecindad de la mezcla nominal. Además, existe muy poca información disponible con suficientes datos acerca de la precisión de los modelos de Exceso, Stewart o Zahed. El método de interacción no ha demostrado mayor precisión que el método de Etil RT-70 en la predicción de números de Octano de mezclas sobre conjuntos de datos no probados, aún cuando se piense que debería serlo puesto que posee muchos más parámetros. Aunque el método de transformación parece proporcionar ligeramente mayor precisión que el modelo de Etil RT-70, requiere de más datos sobre la calidad de los componentes y contiene más parámetros. Más aún, el modelo de Etil RT-70 es mucho más simple y fácil de usar que el modelo de transformación.

Tabla 4.1 Comparación entre modelos de octano del mezclado

Modelo	Parámetros	No. Parámetros
Etil RT-70	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$	6
Stewart	a, c	2
Interacción	$I_{i,k}$	$n(n-1)/2$ para RON, $n(n-1)/2$ para MON, $n(n-1)$ total.
Transformación	$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, K_1$ y K_2	10
Exceso	$(ON)_{ij}^E$	n para RON, n para MON, $2n$ total para cada grado
Zahed	M_0, Q_0, M_i, Q_i, K_3 y K_4	$n+2$ para RON, $n+2$ para MON, $2(n+2)$ total.

FUENTE: Sing, Aseema. Modeling and Model Updating in the Real-Time Optimization of Gasoline Blending. Tesis del Departamento de Ingeniería Química y Química Aplicada de la Universidad de Toronto, 1997, p. 26-27.

Tabla 4.2 Precisión de los modelos de Octano mezclado

Modelo	RON		MON	
	Interpolación	Extrapolación	Interpolación	Extrapolación
Etil RT-70	0.82	0.92	0.79	0.61
Stewart	0.77	N/A	0.64	N/A
Interacción	0.28	0.8	0.33	0.64
Transformación	0.51	0.43	0.60	0.54
Exceso	N/A	N/A	N/A	N/A
Zahed	N/A	N/A	N/A	N/A

FUENTE: Sing, Aseema. Modeling and Model Updating in the Real-Time Optimization of Gasoline Blending. Tesis del Departamento de Ingeniería Química y Química Aplicada de la Universidad de Toronto, 1997, p. 26-27.

4.2 Presión de Vapor Reid

La volatilidad es una propiedad de las sustancias que mide la tendencia de un líquido a pasar a su fase de vapor. En la industria de refinación del petróleo, esta propiedad es muy importante debido a que las gasolinas contienen componentes orgánicos que se evaporan con facilidad (COV). Estos compuestos son de diferente tipo, algunos



inofensivos y otros clasificados como cancerígenos. No obstante, los COV al aire libre, junto con los óxidos de nitrógeno (NOx), son los responsables de la formación de nubes de gases conocidas como “Smog” y bajo la radiación solar forman ozono (O₃), cuya generación en la cercanía de la superficie del planeta favorece el “Efecto Invernadero”.

La presión de vapor Reid (RVP), fue definida por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, bajo la designación ASTM D-323-56, para proporcionar una indicación acerca de la volatilidad de las mezclas de gasolinas y equivale aproximadamente a la presión de vapor de la gasolina a 100°F (38°C). La RVP de una mezcla de gasolina afecta el desempeño de la gasolina en términos de la facilidad de encendido y arranque en frío de la máquina [Gary y Handwerk, 1994]. La RVP también es importante porque sus especificaciones máximas limitan la cantidad de n-butano, una fuente relativamente económica de Octano, que puede adicionarse a la mezcla.

4.2.1 Método de Aproximaciones Teóricas

Una de las primeras aproximaciones teóricas disponibles es la realizada por Stewart [1959], quien presentó un método para predecir la RVP del mezclado, mediante simulaciones matemáticas del proceso, que ocurren durante la prueba de Reid (prueba que mide la presión de equilibrio para una vaporización parcial a volumen constante del combustible en el aire). La aproximación de Stewart emplea datos de componentes como composición y volatilidad, así como relaciones termodinámicas. Para realizar esta aproximación, Stewart hizo muchas suposiciones con el objeto de simplificar los cálculos, como son: ignoró la presencia de aire y vapor de agua en la cámara de prueba, tomó la presión absoluta como la RVP, asumió la volatilidad de los componentes para obtener la densidad de los butanos, y asumió la no volatilidad de los componentes para obtener las características de expansión térmica del n-octano [Stewart, 1959].

Las ecuaciones para estimar la RVP de la mezcla propuestas por Stewart, son las siguientes:

$$(RVP)_{Mezcla} = \frac{\sum_{i=1}^k v_i \lambda_i (RVP)_i e^{0.0021(RVP)_i} e^{0.0021(RVP)_{Mezcla}}}{\sum_{i=1}^k v_i} \quad \text{[Ecuación 4.2.1a]}$$

$$v_i = \frac{u_i \rho_{Mi}}{\rho_{Mezcla} + \frac{0.003652}{1 - 0.0021(RVP)_{Mezcla}} e^{0.0021(RVP)_{Mezcla}} \lambda_i e^{0.0021(RVP)_i}} \quad \text{[Ecuación 4.2.1b]}$$

Donde: v_i es la fracción mol del componente i en la fase líquida, λ_i es el coeficiente de actividad del componente i , u_i es la fracción de volumen del componente i en la mezcla a 1 atm y 60°F, ρ_{Mi} es la densidad molar del componente i en libras-mol por barril de líquido a 1 atm y 60°F. ρ_{mezcla} es la densidad de la mezcla como líquido saturado a 60°F en libras-mol por barril, y k es el número de componentes en la mezcla.



El modelo representado por la ecuación (4.2.1) no proporciona la $(RVP)_{mezcla}$ explícitamente como una función de los datos del componente; por lo tanto, debe realizarse una aproximación iterativa para calcularla. Los datos requeridos por el método de Stewart son la RVP, las fracciones de volumen, las densidades molares y los coeficientes de actividad estimados para todos los componentes.

Vazques et al. [1992] presentó un algoritmo para calcular la RVP del mezclado, con base en el trabajo de Stewart [1959]. El modelo asume que los volúmenes de líquido y gas son aditivos y al igual que en el caso de Stewart, el algoritmo toma como base un modelo libre de aire y agua. Esta aproximación difiere del método de Stewart en la ecuación de estado que emplea y en que requiere que la composición molar de los componentes sea conocida. Además, proporciona un procedimiento iterativo para calcular el equilibrio líquido-vapor para el flasheo de la gasolina. Los pasos requeridos por este método se describen a continuación.

Paso 1: Calcular el peso molecular de la mezcla:

$$(MW)_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n g_i (MW)_i \quad \text{[Ecuación 4.2.1c]}$$

Paso 2: Evaluar la densidad de la mezcla a 35°F, 60°F y 100°F y calcular la expansión líquida de la mezcla:

$$v_0 = \rho_{60} \left[\frac{5}{\rho_{35}} - \frac{1}{\rho_{100}} \right] \quad \text{[Ecuación 4.2.1d]}$$

Paso 3: Ejecutar el “cálculo del flasheo” a 100°F usando las reglas de la Asociación de Gases de Proceso y la ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong [Vazques et al., 1992]. Se sugiere emplear una relación inicial de $L/F = 0.97$.

Paso 4: Calcular la nueva relación L/F usando la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{L}}{F} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\rho_V (MW)_L (MW)_V \frac{v_o}{1 - \frac{\rho_V}{\rho_{LF}}}}{\rho_L} \right]} \quad \text{[Ecuación 4.2.1e]}$$

Paso 5: Usar la relación L/F calculada en el paso 4 para repetir el “cálculo del flasheo” en el paso 3 y seguir iterando hasta que la relación L/F converja a un grado aceptable.

Paso 6: La presión obtenida de la ecuación de estado utilizada en el paso 3 mediante la relación L/F de convergencia será la RVP de la mezcla.

Donde F es la masa suministrada para la realizar la prueba de Reid, \bar{v} es la masa de la fase vapor obtenida por el flasheo de F, y \bar{L} es la masa de la fase líquida; $(MW)_L$, $(MW)_V$,



$(MW)_i$ y $(MW)_{mezcla}$ son los pesos moleculares de la fase líquida, fase vapor, componente i y de la mezcla, respectivamente; ρ_v , ρ_L y ρ_{LF} son las densidades de la fase líquida, fase vapor y líquido suministrado (a 100°F); ρ_{35} , ρ_{60} y ρ_{100} son las densidades de la mezcla líquida a 35°F, 60°F y 100°F, respectivamente; \mathcal{G}_i es la fracción molar del componente i y v_0 es el volumen de líquido expandido.

Los detalles acerca de cómo las densidades de las mezclas a diferentes temperaturas y las densidades de las fases líquida y vapor pueden obtenerse, aunque no han sido descritas. Además, no es claro como los valores necesarios en el paso 4 pueden obtenerse de la ecuación de estado en el paso 3. La ecuación de estado usada es la Soave-Redlich-Kwong [Vazques et al., 1992]:

$$\bar{P} = \frac{\bar{R}T}{v-b} \frac{\bar{a}T}{v} (v + \bar{b}) \quad \text{[Ecuación 4.2.1f]}$$

Donde: \bar{P} es la presión, \bar{R} es la constante de los gases, v es el volumen de gas y \bar{a} y \bar{b} son constantes. Los parámetros \bar{a} y \bar{b} son determinados de acuerdo a las reglas de la Asociación de Gases de Proceso [Vazques et al., 1992], como se describe a continuación:

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \mathcal{G}_i \mathcal{G}_j \bar{a}_{ij} \quad \text{[Ecuación 4.2.1g]}$$

$$\bar{b} = \sum_{i=1}^m \bar{b}_i \quad \text{[Ecuación 4.2.1h]}$$

$$\bar{a}_{ij} = [\bar{a}_i \bar{a}_j]^{0.5} \left[1 - K_{0,\bar{a}_{ij}} - K_{1,\bar{a}_{ij}} \frac{T}{100} \right] \quad \text{[Ecuación 4.2.1 i]}$$

Donde m es el número de componentes de todo el suministro, \bar{a}_i y \bar{a}_j son las constantes de la ecuación Soave-Redlich-Kwong para los componentes puros i y j , \bar{b}_i es la constante para el componente i en dicha ecuación de estado, y K_0 y K_1 son los parámetros de interacción binaria usados para representar el equilibrio líquido-vapor de mezclas binarias.

Este método requiere que la composición molar de todas las materias primas sea conocida, pero no siempre se puede disponer de ella. También, requiere de las correlaciones para estimar las densidades y de datos experimentales para determinar los parámetros de la ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong.

La mayor desventaja de las aproximaciones teóricas es que no son fáciles de emplear durante la ejecución del proceso, por requerir cálculos complejos y soluciones iterativas. Además, requieren de datos tales como la composición molar de las materias primas y de los coeficientes de actividad, lo cual no siempre está disponible.

4.2.2 Método de Interacción

La aproximación por interacción ha sido aplicada para calcular la RVP del mezclado por Morris [1975]. El modelo de mezclado es el mismo que el presentado en las ecuaciones (4.6) y (4.7) excepto que la RVP es la propiedad de la mezcla calculada, en lugar del



número de Octano (ON). De igual forma, solo se consideran las interacciones entre pares de componentes, por lo que se omiten las interacciones que se presenten entre conjuntos de 3 o más componentes. La ecuación que describe este modelo es la siguiente:

$$(RVP)_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n [u_i (RVP)_i] + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n (u_i u_k \bar{I}_{i,k}) \quad \text{[Ecuación 4.2.2a]}$$

$$\bar{I}_{i,k} = 4(RVP)_{i,k} - 2[(RVP)_i + (RVP)_k] \quad \text{[Ecuación 4.2.2b]}$$

Donde n es el número de componentes, \bar{I}_{ik} es el coeficiente de interacción entre los componentes i y k, $(RVP)_{i,k}$ es la RVP de una mezcla 50:50 de i y k.

El número de coeficientes de interacción requerido sería de $n(n-1)/2$. Algunas indicaciones acerca de la precisión de este método fueron reportadas por Morris [1975], quien encontró que la desviación estándar del error de predicción sobre 8 componentes, con los cuales estudió 42 mezclas posibles es de 0.18 psi.

4.2.3 Método del Índice de Mezclado

El instituto de investigación de la compañía Chevron desarrolló un método empírico muy fácil de usar, al cual llamaron método del índice de mezclado. En este método, la RVP del mezclado es calculada usando los índices de mezclado de la presión de vapor Reid (RVP BI), cuyo comportamiento es lineal. Los RVP BI son proporcionados por Gary y Handwerk [1994] y se calculan de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$RVPBI = (RVP)^{1.25} \quad \text{[Ecuación 4.2.3a]}$$

$$(RVPBI)_{Mezcla} = \sum_{i=1}^n (RVPBI)_i \quad \text{[Ecuación 4.2.3b]}$$

4.2.4 Otros Métodos

Haskell y Beavon [1942] presentaron un método que involucra el promedio volumétrico de las RVP de los componentes, excepto las de los butanos, las cuales recibirán un tratamiento diferente; los butanos son variables asignadas, denominadas “Valores de Presión del Mezclado” las cuales fueron calculadas con base en la RVP del butano y de la mezcla debutanizada (con todos los componentes excepto el butano). Otra aproximación que ha sido usada, es aquella que involucra un promedio molar de las RVP de los componentes con base en la composición de la mezcla [Stewart, 1959]. Sin embargo, no siempre se dispone de la composición molar de los componentes.

4.2.5 Comparación entre Métodos

En el trabajo de Stewart [1959] se pueden encontrar algunas comparaciones entre las precisiones alcanzadas por los métodos de cálculo de las RVP. Stewart observó la desviación estándar del error para 67 mezclas usando diferentes modelos, la cual se presenta en la tabla 4.3. Cabe mencionar que los métodos teóricos desarrollados por Stewart [1959] y Vazques et al. [1992] no son convenientes para ser instalados en sistemas de control on-line, debido a sus requerimientos computacionales. De igual



forma, tampoco es conveniente implementar el método de interacción en estos sistemas de control, ya que requiere actualizar una gran cantidad de parámetros durante la ejecución del control, tal y como se describió en el caso del Octano del mezclado. Por otra parte, aunque no es tan preciso como los métodos teóricos, los métodos más simples tales como el del índice de mezclado, pueden implementarse fácilmente a los controladores on-line.

Tabla 4.3 Precisión de los modelos de RVP del mezclado

Método	Desviación Estándar (psi)
Stewart	0.76
Mezclado Ideal	1.30
Haskel y Beavon [1942]	1.01
Promedio Molar	1.17

FUENTE: Sing, Aseema. Modeling and Model Updating in the Real-Time Optimization of Gasoline Blending. Tesis del Departamento de Ingeniería Química y Química Aplicada de la Universidad de Toronto, 1997, p. 31.

4.3 Puntos de Destilación

El proceso de destilación se utiliza en el laboratorio para determinar los rangos de evaporación de productos que se vaporizan con el uso como el caso de las gasolinas. Las curvas de destilación definen la volatilidad de productos petrolíferos e indican sus rendimientos a determinadas temperaturas.

El conocimiento de los puntos de destilación es entonces esencial para estimar el comportamiento de diferentes combustibles bajo diversas condiciones, como el arranque en frío del motor, o posibles pérdidas excesivas de combustible por su vaporización prematura en los carburadores, dando como resultado sellos de vapor. Por esta razón, a continuación se ilustran algunos de los métodos para predecir los puntos de destilación del mezclado.

4.3.1 Destilación ASTM

Debido a que las gasolinas son mezclas de hidrocarburos con diferentes puntos de ebullición, vaporizan a diferentes rangos. Por ejemplo, la nafta ligera virgen vaporiza en un intervalo comprendido entre 30°C y 90°C. La característica de volatilidad de la gasolina es medida por medio de la destilación ASTM D-86, la cual es una destilación batch estandarizada en laboratorio, que se lleva a cabo a presión atmosférica sin fraccionamiento. Esta medida proporciona la cantidad, en porcentaje de volumen, de destilado a una temperatura dada. Muchas temperaturas a lo largo de una curva de destilación son usadas como puntos de referencia en comparación con las propiedades de volatilidad de las gasolinas. De forma equivalente, las propiedades de destilación pueden ser especificadas como temperaturas a un porcentaje de evaporación dado. Este método se encuentra detallado en la norma ASTM D-86.

4.3.2 Método de Interacción

El método de interacción, tal como se describió para el Octano del mezclado, puede ser usado para predecir los puntos de destilación ASTM como porcentajes de evaporación a



una temperatura dada [Morris, 1983], [Morris, 1975]. De nuevo, solo se considerarán las interacciones binarias y deben determinarse los coeficientes de interacción entre todos los pares de componentes para cada temperatura sobre la curva de destilación. Al igual que en los casos del Octano y la RVP del mezclado, la determinación de los componentes de interacción requiere de la calidad (porcentaje de evaporación a esa temperatura) de los componentes individuales, así como aquellos coeficientes de las mezclas 50:50 y éstos se calculan como se describió en el caso del Octano del mezclado. Este método solo es aplicable en los puntos intermedios, mas no en los puntos finales de las mezclas de gasolinas.

La mayor desventaja de emplear este método es el gran número de parámetros que deben ser calculados. Para cada temperatura en la curva de destilación, se necesita calcular $n(n-1)/2$ parámetros, donde n es el número de componentes. Por ejemplo, para una mezcla de 7 componentes con 5 puntos sobre la curva de destilación, se requiere calcular 105 coeficientes de interacción.

4.3.3 Modelos Empíricos

Los modelos empíricos son muy usados para predecir los puntos de destilación ASTM de las mezclas y su popularidad se debe a su facilidad de uso. Stanley y Pingrey [1954] han desarrollado correlaciones para predecir los puntos finales de las curvas de destilación cuando solamente se conocen la composición de la mezcla y los puntos de destilación ASTM de los componentes. Se han realizado análisis de correlación sobre datos experimentales para producir tablas de valores que pueden ser usadas para estimar los puntos de destilación. Este método no proporciona estimaciones sobre puntos intermedios en la curva de destilación.

Dhulesia [1984] ha reportado los modelos usados de la siguiente forma:

$$\bar{v} = \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{r}{a_1}\right)^{a_2}} \right\} 100 \quad \text{[Ecuación 4.3.3a]}$$

$$T = \frac{T - T_i}{T_f - T_i} \quad \text{[Ecuación 4.3.3b]}$$

Donde α_1 y α_2 son constantes, \bar{v} es el porcentaje de volumen evaporado, T_f y T_i son los puntos de destilación final e inicial del mezclado, respectivamente.

Otro modelo empírico reportado es el siguiente [DeWitt et al., 1989]:

$$\bar{v}_k = a_3 + a_4 \ln \left[\sum_{i=1}^n (u_i \bar{v}_{i,k}) \right] \quad \text{[Ecuación 4.3.3c]}$$

Donde α_3 y α_4 son constantes, \bar{v}_k es el porcentaje evaporado a una temperatura k para la mezcla, y $\bar{v}_{i,k}$ es el porcentaje evaporado a una temperatura k para el componente i en la mezcla.



No obstante, no se ha podido realizar comparaciones entre los diferentes métodos debido a que no se ha encontrado suficiente información acerca de su precisión.

4.3.4 Curvas de Destilación en Forma de “S”

Todos los componentes de puntos de ebullición cercanos siguen la misma trayectoria de comportamiento; estos tienden a mezclar porcentajes evaporados negativos a ciertas temperaturas y mostrar un efecto de arrastre como si se evaporaran al 100% a otras temperaturas. Las temperaturas de volatilidad menor y mayor son, por lo tanto, inconsistentes. Generalmente este fenómeno ocurre 100°F por debajo y por encima del promedio volumétrico del punto de ebullición de cada componente. Por esta razón, cuando se grafican como una función de la diferencia entre el promedio volumétrico del punto de ebullición de cada componente y la temperatura de destilación de interés, los valores de mezclado de los componentes de puntos de ebullición cercanos toman forma de “S” [García Pedro, 1996].

Las curvas para componentes de punto de ebullición completa no forman picos sobre el 100% evaporado, ni valles por debajo del 0% evaporado, sino que toman un comportamiento asintótico en estos extremos. Además, la media porción de la curva tiene muy poca pendiente comparada con la curva para componentes de puntos de ebullición cercanos. Estos patrones de comportamiento sirvieron de base para el sistema de mezclado propuestos por Decaer, Jackman y Schneider, que obedecen a la siguiente ecuación [Morris, 1975]:

$$DBV = a + bD + cD^2 + dD^3 + eD^4 + fD^5 + gD^6 \quad \text{[Ecuación 4.3.4]}$$

Donde DBV es la destilación del mezclado, $D = (T - VABP)/100$, T es la temperatura de destilación en °F y VABP es el promedio volumétrico del punto de ebullición en °F.

En la tabla 4.4 se presentan los coeficientes de la ecuación 4.3.4.

Tabla 4.4 Coeficientes de la Ecuación 4.3.4

Coeficiente	Pto. Ebullición completa	Pto. Ebullición cercanos
a	53.54242	51.040840
b	44.0880	111.104000
c	7.08146	-14.127000
d	-5.54087	-51.598300
e	1.93594	9.309133
f	0.00000	8.230449
g	0.00000	-1.805810

4.4 Cambios de Volumen

Las mezclas de hidrocarburos no forman soluciones ideales y esto se refleja en los cambios en el volumen durante el mezclado. Dicho cambio puede presentarse como un incremento o una pérdida de volumen, aunque esta última ocurre con mayor frecuencia. Para componentes pesados los cambios en volumen son prácticamente despreciables (del orden de 0.1 a 0.2% en volumen). Sin embargo, para mezclas de componentes de bajo punto de ebullición con fracciones de hidrocarburos pesados, las pérdidas llegan a ser muy significativas.



En el caso de las mezclas de gasolinas, la disminución de volumen llega a ser de hasta el 1% del total de la mezcla. Pese a que este fenómeno no ocurren en grandes proporciones, puede tener un efecto significativo sobre el costo de la gasolina debido al volumen de producción. Por esta razón, es importante definir la ecuación que gobierne el volumen de mezclado.

4.4.1 Método de Reeves

Reeves [1952], desarrolló una expresión empírica para calcular las pérdidas de volumen en mezclas binarias, en función de los pesos moleculares y su concentración en la mezcla, definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Log}(c) = 0.6107\text{Log}(100 - W) + B\text{Log}(M_1) + 0.537\text{Log}(M_2 - M_1) + 4418 \quad [\text{Ecuación 4.4.1}]$$

Donde c es el porcentaje en volumen de la concentración, w es el porcentaje en peso de la fracción pesada de la mezcla, M_1 es el peso molecular del componente ligero, M_2 es el peso molecular del componente pesado y B es una constante del mezclado que depende del peso molecular de los componentes ligeros y varía entre -3.5 y -3.83 aproximadamente [García, 1996].

Las diferencias encontradas entre las pérdidas calculadas con esta ecuación y las observadas experimentalmente para varios esquemas de mezclado, han sido de aproximadamente 20% del cambio de volumen total [García, 1996].

4.4.2 Correlación API

El Instituto Americano del Petróleo (API) propuso la siguiente correlación para estimar la contracción volumétrica que resulta de la mezcla de hidrocarburos de bajo peso molecular con fracciones de petróleo crudo.

$$S = 2.14 \times 10^{-3} C^{-0.0704} G^{1.76} \quad [\text{Ecuación 4.4.2}]$$

Donde S es el factor de contracción expresado como porcentaje en volumen del componente ligero, C es la concentración del componente ligero en porcentaje en volumen y G es la diferencia de gravedad específica entre el componente ligero y el más pesado expresada en °API.

Esta ecuación ha sido empleada con un alto grado de confiabilidad para calcular la concentración de volumen de mezclas de más del 21% de componentes ligeros, pero no es apropiada cuando dicha concentración supera el 50% [API, 1967]. En el estudio denominado Volumetric Shrinkage Resulting from Blending Volatile Hydrocarbons with Crude Oils del API [1967], se encuentran reportados los factores de contracción para varias concentraciones de componentes ligeros y diferencias de gravedad específica utilizando la ecuación 4.4.2.

4.5 Concentración de PIONA, Oxigenantes y Azufre

El análisis PIONA es una medida de la cantidad de Parafinas, Isoparafinas, Olefinas, Naftenos y Aromáticos, presentes en la mezcla combustible. Estos compuestos influyen



notablemente en la composición y efecto de la gasolina, a partir de alimentaciones de crudo con porcentajes muy altos de ellos. Por lo general, este análisis sirven para reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera sin provocar daños al ecosistema y a la salud, al mismo tiempo que contribuyen a obtener un máximo aprovechamiento de la energía.

El tema del nivel de azufre en la gasolina tiene que ver con el efecto en los dispositivos anticontaminantes que disponen los vehículos con tecnología de punta, concretamente sobre la eficiencia del convertidor catalítico, el sensor de oxígeno y la computadora a bordo. Se argumenta que el daño ocasionado por este contaminante sobre estos dispositivos le impide a la industria automotriz alcanzar las normas de emisiones establecidas por las entidades gubernamentales.

Otra característica importante de los componentes de la gasolina es la cantidad de oxigenantes. Estos son éteres como el Metil-Ter-Butil Eter (MTBE) el Etil-Ter-Butil Eter (ETBE) y el Ter-Amil-Metil Eter (TAME), resultantes de la reacción de los hidrocarburos correspondientes con metanol. Su propósito es incrementar el octanaje (RON) de las gasolinas, en un rango comprendido entre 112 y 120.

Estas propiedades pueden considerarse aditivas, puesto que la concentración de PIONA, oxigenantes o azufre en una mezcla, puede determinarse como el promedio de ellos en la mezcla, medidos en base peso, volumen o fracción mol [García Pedro, 1996]. En otras palabras, estas propiedades pueden calcularse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$P_b = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad \text{[Ecuación 4.5.1]}$$

$$P_b = \sum_{i=1}^n V_i P_i \quad \text{[Ecuación 4.5.2]}$$

$$P_b = \sum_{i=1}^n X_i P_i \quad \text{[Ecuación 4.5.3]}$$

Donde, P_b es la propiedad de la mezcla total, P_i es la propiedad del componente i , W_i es la fracción en peso del componente i , V_i es la fracción en volumen del componente i , X_i es la fracción mol del componente i y n es el número de componentes presentes en la mezcla.

4.6 Simulación del Mezclado

Para estudiar el control del mezclado mediante una simulación, se requieren modelos que representen cercanamente el proceso y que sean aplicables tanto a la optimización off-line como on-line. Para los propósitos de este trabajo, solamente serán simulados los números de Octano MON y RON y la RVP del mezclado. De esta forma, la simulación será restringida a las tres propiedades más importantes de la gasolina para obtener resultados significativos sin mayores complicaciones.

Un buen modelo de mezclado debe proporcionar una precisión aceptable, ser de fácil uso y no debe requerir una gran cantidad de datos para realizar los cálculos. Además, para poder realizar una optimización durante la ejecución del control (on-line), el modelo debe poderse actualizar fácilmente. Esto se debe a que su precisión se deteriora respecto al tiempo, ya que las propiedades de las materias primas y por consiguiente las



características del mezclado varían constantemente, a menos que los datos sean actualizados de manera periódica.

Entre los modelos de Octano del mezclado que han sido discutidos y comparados, el modelo de Etil RT-70 [Healy et al., 1959] ha mostrado la mejor precisión y adaptabilidad para ser actualizado periódicamente. Healy et al. [1959] ha usado datos de 135 mezclas para determinar los coeficientes de correlación del mezclado. Estos coeficientes, junto con las correlaciones de Etil RT-70 fueron los seleccionados sobre los otros modelos de Octano del mezclado, por las razones anteriormente expuestas.

Aunque existe muy poca información disponible acerca de algunos de los modelos de RVP del mezclado, con base en la facilidad de uso y el alto grado de aceptabilidad industrial, se seleccionó al método del índice de mezclado como el más apropiado para predecir el comportamiento de esta propiedad. A continuación se presentan los modelos seleccionados para simular el RON, MON y RVP del proceso de mezclado de gasolinas:

$$RON_{Mezcla} = \bar{r} + a_1(\overline{rs} - \bar{r}\bar{s}) + a_2(\overline{O^2} - \bar{O}^2) + a_3(\overline{A^2} - \bar{A}^2) \quad \text{[Ecuación 4.5.1]}$$

$$MON_{Mezcla} = \bar{m} + a_4(\overline{ms} - \bar{m}\bar{s}) + a_5(\overline{O^2} - \bar{O}^2) + a_6 \left[\frac{(\overline{A^2} - \bar{A}^2)}{100} \right]^2 \quad \text{[Ecuación 4.5.2]}$$

$$(RVPBI)_{Mezcla} = \overline{RVPBI}_i = \sum_{i=1}^n u_i (RVP)_i^{1.25} \quad \text{[Ecuación 4.5.3]}$$

Los parámetros usados para el número de Octano del mezclado son: $a_1=0.03224$, $a_2=0.00101$, $a_3=0$, $a_4=0.04450$, $a_5=0.00081$ y $a_6=-0.00645$ [Healy et al., 1959].

En cuanto a los puntos de destilación, éstos serán calculados usando los valores de mezclado del método ASTM D-86 para el intervalo de ebullición completa. No obstante, para los componentes del mezclado con puntos de ebullición cercanos, se tomará en cuenta su interacción empleando las curvas en forma de "S".

Para el caso del cambio de volumen se seleccionó la correlación API por ser muy práctica a nivel industrial y por considerar que se mezclarán menos del 50% de componentes ligeros.

Las demás propiedades serán estimadas en la mezcla por promedio en volumen o peso.

En el capítulo 6 se presentarán, explícitamente, las ecuaciones y parámetros serán considerados para representar adecuadamente el proceso de mezclado según los propósitos de esta tesis.



5. REFORMULACIÓN DE GASOLINAS EN LA REFINERÍA DE ESTUDIO

Las actividades de refinación y comercialización de los productos derivados del petróleo constituyen la cadena de valor de la industria petrolera, ya que toman en consideración el óptimo desempeño económico de esta industria. Esto se logra por medio de una operación a bajos costos, atendiendo a la disponibilidad de la materia prima, su acceso y su precio. Asimismo, mediante la integración de la cadena de suministro y distribución, así como la obtención de combustibles de alta calidad y valor, sin dejar de buscar el equilibrio entre la oferta y la demanda. Por lo tanto, resulta evidente que ampliar el margen de refinación se traducirá en una mayor rentabilidad de las inversiones. [SENER, 2006].

En México, el Sistema Nacional de Refinación (SNR) está integrado exclusivamente por PEMEX Refinación (PR), que es la empresa encargada de elaborar, distribuir, almacenar y vender los productos petrolíferos mexicanos de primera mano. Sin embargo, comparte las actividades de distribución y comercialización con el sector privado. Para procesar el crudo, PR cuenta con seis refinerías, cuya capacidad total instalada actualmente es de 1,540.0 MBPD de crudo.

Un porcentaje importante de los productos refinados se utiliza en el sector transporte y se espera que su uso predomine, ya que no se ha encontrado un mejor sustituto. Por esta razón, cubrir la demanda de petrolíferos del país de manera oportuna, competitiva y con la calidad requerida, representa uno de los grandes retos del sector energético mexicano. Es por esto, que se han iniciado ambiciosos programas de modernización y reconfiguración de las instalaciones, para un mejor aprovechamiento del crudo procesado.

El presente capítulo tiene por objeto definir los requerimientos del proceso de formulación en línea gasolinas Magna y Premium en la refinería de estudio. Con esto, se espera crear una estrategia adecuada para asegurar el abastecimiento de combustibles a precios competitivos, respetando las restricciones de calidad y protección al medioambiente, así como la disponibilidad de materias primas.

5.1 Planteamiento del Problema

El panorama actual de la industria de la refinación en México no atraviesa por los mejores momentos de su historia. Entre los setentas y noventas, la industria contaba con una capacidad de refinación superavitaria, debido a la inversión que se tuvo en esas décadas. Pero en 1991 el país perdió su autosuficiencia en gasolinas, básicamente a partir del cierre de la refinería de Azcapotzalco, motivado por razones ambientales. Sumado a esto, durante la última década no se han realizado inversiones en nuevas refinerías, por lo que el sistema nacional de refinación permanece limitado. Esto ocasionó que los volúmenes de importación de gasolinas empezaran a crecer de manera consistente, para suplir la creciente demanda del parque automotor [SENER, 2006].

Para contrarrestar las crecientes importaciones de combustibles, se empezaron a desarrollar proyectos de transformaciones tecnológicas necesarias, con el fin de mejorar el aprovechamiento del crudo en las refinerías mexicanas. En consecuencia, durante



el 2003 se concluyeron las obras de reconfiguración de cuatro de las refinerías nacionales, permitiendo incrementar la producción de gasolinas en 41.3 MBPD y de destilados intermedios en 31.3 MBPD. Además, actualmente se adelantan proyectos para reconfigurar las plantas restantes con el fin de llegar a satisfacer la demanda nacional. La conclusión de estos proyectos contribuirá a que el SNR aumente el procesamiento de crudo pesado en un 24.7% [SENER, 2006].

De acuerdo con la información proporcionada por la refinería de estudio, dicha refinería produce actualmente 55 MBPD de gasolina Magna, por medio de un sistema de mezclado secuencial por lotes, a partir de los componentes recibidos directamente desde sus plantas de producción, siguiendo una receta pre-formulada. Esta refinería no cuenta con un sistema informático para el análisis de muestras del laboratorio (LIMS) y solamente produce gasolina Premium para ajustar el índice de octano de la gasolina Magna. Además, básicamente opera con base en la cantidad de crudo que puede procesar, mas no de acuerdo a la demanda de productos.

El objetivo del proyecto de “Formulación en Línea de Gasolinas” de esta refinería, es obtener un sistema de mezclado automático de componentes en línea, para optimizar la producción de gasolinas Magna y Premium en forma simultánea, de manera que los productos obtenidos cumplan con las restricciones ambientales y de calidad de acuerdo a la disponibilidad de componentes. Para conseguirlo, se realizará el diseño, adquisición, instalación y puesta en servicio de un sistema para el manejo automático de órdenes de mezcla. Debido a esto, el problema se centra en determinar un modelo que suministre las proporciones óptimas de los componentes de la mezcla, dentro de las múltiples opciones posibles, para asegurar que los productos cumplan con las especificaciones deseadas al mejor costo.

5.1.1 Objetivos Específicos del Proyecto

El proyecto de “Formulación en Línea de Gasolinas” que se pretende ejecutar en la Refinería de estudio, pretende alcanzar específicamente en los siguientes objetivos:

- La integración de las instalaciones existentes y la nueva infraestructura necesaria para la producción de gasolinas terminadas dentro de especificaciones, con seguridad y sin afectaciones al medio ambiente.
- Formular un máximo de 95 MBPD de gasolina Magna y 58 MBPD de Premium simultáneamente, pudiendo utilizar hasta trece de los componentes disponibles.
- Manejo de las corrientes provenientes de las plantas de componentes hacia los cabezales de mezclado de Magna y Premium, así como la flexibilidad operativa de desviar automáticamente el exceso de componentes hacia los tanques de almacenamiento, sin afectar la producción.
- Producir gasolinas al menor costo posible, mediante un Sistema de Control de Mezclado en Línea (BCPS) capaz de regular automáticamente el uso de componentes, considerando las restricciones ambientales exigidas por la SEMARNAT y calculando las mejores relaciones de componentes, que permitan alcanzar el objetivo de calidad fijado al menor costo de producción.



- Manejar automáticamente órdenes de mezcla, para iniciar y seguir el proceso de formulación a través de sus etapas, conservando la información completa (flujo, calidad, presión, temperatura, etc.), de inicio a fin de la operación, permitiendo la constante emisión de reportes de operación.

5.1.2 Beneficios Esperados del Proyecto

Con la conclusión del proyecto de “Formulación en línea de gasolinas” que se implementará en la refinería de estudio, se espera contribuir en los siguientes aspectos:

- Implementar un método que simplifique los cálculos necesarios para encontrar las proporciones óptimas de los componentes disponibles para la elaboración de gasolinas, evitando gastos ocasionados al proceder por prueba y error.
- Suministrar gasolinas que cumplan con los niveles de calidad exigidos por la flota vehicular actual a bajo costo.
- Crear una estrategia adecuada para asegurar el abastecimiento de combustibles a precios competitivos, respetando las restricciones de calidad y medio ambiente.
- Evitar la vulnerabilidad del país a presiones económicas externas, derivadas de posibles alzas unilaterales a los precios internacionales de las gasolinas importadas.
- Impulsar el desarrollo tecnológico de la industria automotriz en materia ambiental, suministrando combustibles que no afecten la eficiencia de los dispositivos anticontaminantes que disponen los vehículos modernos.

5.1.3 Filosofía del Proyecto

Actualmente la Refinería de estudio esta siendo reconfigurada, por lo que se están construyendo nueve plantas nuevas, cuya puesta en operación incrementará el volumen de procesamiento de crudo en un 79.4% respecto de la capacidad actual. Estas plantas iniciarán operaciones a finales del 2007 y contribuirán a generar mayores volúmenes de combustibles para satisfacer parte de la demanda nacional. En esas condiciones, la capacidad máxima de procesamiento nominal de crudo será de 335 MBPD y los componentes obtenidos en las nuevas plantas participarán en la formulación de gasolinas Magna y Premium, junto con los productos de alto octano importados por la refinería.

El Proyecto de “Formulación en Línea de Gasolinas” contempla la producción de gasolinas Magna y Premium bajo dos escenarios. El primer escenario considera una carga total de crudo de 304 MBPD y el otro, se planea para producir gasolinas cuando la carga total de crudo sea mayor (350 MBPD) o bien, cuando se tengan excedentes de componentes que habrá que aprovechar. En estas condiciones los directivos de la refinería estiman que podrían producir un máximo de 95 MBPD de gasolina Magna y 58 MBPD de Premium, empleado un sistema de mezclado automático en línea que regule las especificaciones de los productos.

En este aspecto, el proyecto requiere que el sistema automático de mezclado sea diseñado con una precisión consistente para obtener una desviación máxima de los parámetros relacionados con el octano no mayor de +/-2% sobre el punto de ajuste. De



la misma forma, la Presión de Vapor Reid (PVR) no deberá desviarse más de +/-2% sobre su punto de ajuste con corrección por temperatura. Para lograrlo, se instalarán dos analizadores multicorriente en línea, quienes se encargarán de determinar los siguientes parámetros típicos de combustibles:

- Octanaje, (RON y MON)
- Análisis PIONA (Parafinas, Isoparafinas, Olefinas, Naftenos y Aromáticos)
- Contenido de Azufre
- Presión de vapor Reid, PVR
- Concentración de oxigenantes
- Destilación ASTM, y
- Gravedad específica.

5.2 Descripción General del Proyecto

El proyecto que se pretende llevar a cabo en la refinería de estudio, consiste en implementar dos cabezales de mezclado, uno para Magna y otro para Premium. Estos cabezales contarán con mezcladores estáticos instalados en línea, a los cuales llegarán los diferentes componentes desde sus plantas de producción o desde tanques de almacenamiento.

El flujo de dichos componentes será controlado por un Sistema de Control (BCPS), que funcionará de acuerdo a un modelo no lineal que establecerá la receta de la formulación. Esta receta será actualizada automáticamente con base en información referente a los flujos de los componentes, su producción actual y sus características de calidad. De esta forma, establecerá las recetas más adecuadas para satisfacer las especificaciones ambientales y de calidad de las gasolinas finales al menor costo de producción, teniendo en cuenta los costos de los componentes y los precios de transferencia de cada tipo de gasolina.

Junto al área de cada mezclador se instalarán dos analizadores multicorriente, diseñados con tecnología basada en resonancia magnética nuclear (NMR). Estos analizadores contarán con un sistema de acondicionamiento y recirculación de muestras, para analizar la calidad de los componentes y de las gasolinas finales. En caso de detectar que la gasolina en producción (Magna y/o Premium) sale fuera de especificación marginalmente (<1.5%) en algún parámetro específico (octanaje, PVR, benceno, aromáticos ó en olefinas), los analizadores enviarán una señal al BCPS, quien detectará los componentes que estén causando el problema.

Una vez detectados, el BCPS podrá realizar los ajustes necesarios a la receta originalmente determinada por el modelo implementado, para asegurar que las formulaciones finales cumplan con las especificaciones deseadas. Para realizar estos ajustes, el BCPS podrá variar el flujo de componentes, empleando medidores de flujo tipo coriolis y válvulas de control de flujo instalados en los puntos en donde los componentes ingresan a cada cabezal.

Con el fin de ilustrar más claramente el proceso de mezclado, en el apéndice C se incluyen diagramas de flujo del proceso, suministrados por la refinería de estudio.



5.2.1 Disponibilidad de Componentes

Como se describió en la filosofía del proyecto, la “Formulación en Línea de Gasolinas” dispondrá de los componentes producidos por las plantas actuales, las plantas que entrarán en funcionamiento y los importados por la refinería. Bajo estas condiciones los volúmenes de los componentes disponibles y sus presiones de transferencia proporcionados por los directivos de la Refinería de estudio, se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Componentes Disponibles en la Refinería

COMPONENTE	PRECIO (USD \$ /BBL)	MAXIMO (BBL)
Nafta Catalítica FCC1	75.76	19068
Nafta Catalítica FCC2	75.76	22761
Reformado BTX	73	12566
Reformado NP1	72	5022
Reformado U-500	83.98	15520
Reformado Pesado Can.	95	12200
Isómero Can.	55.46	16500
Isómero U-200	55	12657
Pentanos Can.	52	2112
Pentanos U-600	52	540
Alquilado	90	18976
Butanos-Butilenos	50.68	12075
TAME	105.82	3124

5.2.2 Especificaciones de Componentes

Para formular las gasolinas Magna y Premium de acuerdo con las especificaciones establecidas por la norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, al tiempo que se busque maximizar la rentabilidad de la refinería, el controlador deberá mezclar los componentes en las proporciones óptimas, según su disponibilidad. De esta forma, se asegurará que la calidad de los productos no estén por debajo de la mínima requerida, manteniendo un margen de rentabilidad aceptable. Para lograrlo, el controlador procurará emplear los componentes menos costosos para obtener los productos sin afectar su calidad.

Por esta razón, es necesario definir las características de los componentes suministrados por las plantas de producción. Estas características fueron proporcionadas por un análisis de parámetros estadísticos a partir de datos históricos



de laboratorio (SICOLAB) realizado por la Refinería de estudio y se presentan en las tablas 5.2 y 5.3.

Además, se hará una breve descripción de cada uno de los componentes.

Tabla 5.2 Propiedades de los componentes

Propiedades de los Componentes	RON	MON	RVP	S _G	Azufre (Wt%)	Oxígeno (Wt%)	Aromaticos (Vol%)	Olefinas (Vol%)	Benceno (Vol%)
Nafta Catalítica FCC1	92	82.5	8.53	0.7721	0.2364	0	22	28	0.8
Nafta Catalítica FCC2	92	82.5	8.53	0.7614	0.2364	0	22	28	0.8
Reformado BTX	91	81	3.75	0.8196	0	0	37.5	0.1	3.6
Reformado NP1	90	80	3.75	0.8152	0	0	40.5	0.2	3.8
Reformado U-500	96.2	85.6	3.75	0.8221	0	0	52.9	0.5	4.1
Reformado Pesado	101.6	98	3.75	0.879	0	0	15.6	1.5	0
Isómero Importado	85	83	13.5	0.678	0	0	0	0	1.9
Isómero U-200	85	82	12	0.6818	0	0	0	0	0.5
Pentanos Importados	80	75	18.49	0.6267	0.001	0	2.8	0	2.8
Pentanos U-600	80	75	18.49	0.6267	0.001	0	2.8	0	2.8
Alquilado	94	90	5	0.6984	0.0005	0	2	1	0.1
Butanos-Butilenos	96	88.7	62.3	0.5929	0	0	0	0	0
TAME	110	98	3.13	0.7716	0	15.66	0	0	0

FUENTE: Datos proporcionados por la Refinería de Estudio

Tabla 5.3 Puntos de destilación de los componentes en °F

	Nafta Catalítica FCC1	Nafta Catalítica FCC2	Reformado BTX	Reformado NP1	Reformado U-500	Reformado Pesado	Isómero Importado	Isómero U-200	Pentanos Importados	Pentanos U-600	Alquilado	Butanos-Butilenos	TAME
PIE	100.4	107.6	170.6	158	143.6	327.2	96.8	89.6	77	77	120	23	131
5%	118.4	131	186.8	181.4	163.4	332.6	110	95	86	86	163	28.4	143.6
10%	138.2	150.8	206.6	185	174.2	336.2	120.2	100.4	87.8	87.8	167	32	158
20%	152.6	152.6	213.8	197.6	194	336.2	135	102.2	92	92	188	35.6	163.4
30%	176	176	235.4	208.4	213.8	338	142	104	96.8	96.8	198	39.2	170.6
40%	203	203	242.6	221	224.6	339.8	161	105.8	101	101	206	41	174.2
50%	248	251.6	248	230	248	341.6	165.2	107.6	107.6	107.6	233.6	42.8	177.8
60%	275	275	260.6	251.6	267.8	347	215	122	116	116	241	46.4	183.2
70%	302	302	269.6	260.6	289.4	354.2	239	131	118.4	118.4	254	50	186.8
80%	338	338	302	280.4	300.2	357.8	262	140	125	125	264	53.6	190.4
90%	392	395.6	327.2	302	345.2	361.4	302	150.8	136.4	136.4	309.2	57.2	194
95%	419	419	352.4	318.2	370.4	372.2	332.6	161.6	147.2	147.2	379	59	217.4
PFE	437	437	408.2	374	428	388.4	350.6	179.6	163.4	163.4	424.4	77	239

FUENTE: Datos proporcionados por la Refinería de Estudio



5.2.2.1 Isómeros

Los isómeros son naftas ramificadas de 5, 6 y 7 átomos de carbono que se incorporan en la formulación de gasolinas por presentar mayor octanaje con respecto a sus correspondientes isómeros parafínicos. Los principales constituyentes de la mezcla de isómeros son el 2,3-dimetilbutano y los isopentanos.

5.2.2.2 Butanos-Butilenos

La mezcla de Butanos-Butilenos consiste en moléculas de naftas ligeras obtenidas en las plantas catalíticas y en la planta de Coquización Retardada. Estos compuestos, aunque poseen bajo octanaje, se incorporarán a los cabezales de mezclado de gasolinas Magna y Premium con el fin de ajustar la PVR de las mezclas.

5.2.2.3 Pentanos-Hexanos

La mezcla de Pentanos-Hexanos que se produce en las hidrodesulfuradoras de nafta, se mezclan con un corte de naftas ligeras de la Refinería de estudio, para ser enviada a la planta Isomerizadora de hidrocarburos, con el fin de obtener Isómero que tiene mejores propiedades de octanaje que los Pentanos-Hexanos. Sin embargo, parte de esta mezcla se suministrará al sistema de mezclado de gasolinas para la ajustar la calidad de las gasolinas Magna y Premium.

5.2.2.4 Alquilado

El alquilado es un producto de la síntesis química entre olefinas ligeras como propileno y butenos con isobutano. Este componente es un producto sintético que consiste casi por completo de parafinas altamente ramificadas cuyo constituyente principal es el 2,2,4-trimetilpentano.

Inicialmente el alquilado tuvo como objetivo obtener un combustible aplicable a aviones de turbohélice, y aumentar el rendimiento de la gasolina. Pero actualmente su objetivo es producir una fracción cuyas características de calidad (alto octano) como ambientales (bajas presión de vapor y reactividad fotoquímica) la convierten en uno de los componentes más importantes de la gasolina reformulada.

5.2.2.5 Nafta Catalítica de FCC 1 y 2

La Nafta catalítica es una mezcla de hidrocarburos de mediana y corta cadena de carbonos considerada el corazón de la gasolina, pues gracias a su producción, se reduce el contenido de productos residuales del petróleo crudo. Este componente posee cantidades considerables de aromáticos y olefinas, los cuales tienen mayor número de octano, que las cadenas lineales de sus respectivos isómeros. Esta nafta suele mezclarse con el reformado para obtener en el producto final un mayor número de octanos, mayor volatilidad y una disminución en su contribución de aromáticos.



La Nafta catalítica de la Refinería de estudio proviene de las plantas de Desintegración Catalítica Fluidizada FFC 1 y 2, se enviaran a los dos cabezales de mezclado para la preparación de gasolinas Magna y Premium.

5.2.2.6 Nafta Reformada

La nafta reformada es una mezcla de compuestos aromáticos y de isoparafinas obtenidas al modificar la estructura química de los compuestos que integran las naftas. El producto reformado posee un octanaje aproximado de 90, por lo cual representa una excelente fuente de octanos para la gasolina.

La nafta reformada de la Refinería de estudio se produce en las reformadoras BTX, NP-1 y U-500, en la que los hidrocarburos parafínicos se convierten en isoparafínicos y nafténicos, que se mezclaran con los demás componentes para formar las gasolinas.

5.2.2.7 TAME

El Ter-Amil Metil Eter (TAME) es un compuesto oxigenante, que se obtiene de la reacción de las fracciones olefínicas, de 4 y 5 átomos de carbono, de la destilación del crudo con metanol. Este componente se incorpora en la formulación de gasolinas Magna y Premium, para incrementar su índice RON a un rango comprendido entre 112 y 120.

5.2.2.8 Anilina

Este compuesto es un colorante que se adiciona a la gasolina Magna para proporcionarle un color rojo, distintivo del ámbar de la gasolina Premium. Este colorante presenta las características indicadas en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Características de la Anilina

ANÁLISIS	PROMEDIO
FÓRMULA QUÍMICA	$\text{NH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{NH HCl}$
ESTADO FÍSICO	Líquido
CONCENTRACIÓN (% Vol)	90
PESO MOLECULAR	323.83
TEMP. EBULLICIÓN (°C)	184
TEMP. FUSIÓN (°C)	- 6
TEMP. INFLAMACIÓN (°C)	70
TEMP. AUTOIGNICIÓN (°C)	615
SOLUB. EN AGUA (%)	100
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.02
P. DE VAPOR A 20°C (psia)	0.0058
FUENTE: Datos proporcionados por la Refinería de Estudio	



5.2.2.9 Detergente

En la preparación de ambas gasolinas (Magna y Premium) se adiciona un aditivo detergente conocido como IMP-DG-15, cuya función es evitar la formación de depósitos en el motor.

El aditivo IMP-DG-15, se dosifica partir de una concentración de 165 ppm (en peso) dependiendo del tipo de gasolina con o sin compuestos oxigenados. Además, se realizará mediante la inyección del producto a la línea de mezclado, utilizando dosificadores proporcionales automáticos para asegurar la aplicación correcta, permitiendo así cumplir con las especificaciones de Pemex Refinación para las Gasolinas Magna y Premium. Las características más relevantes de este aditivo se presentan en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Características del aditivo detergente

ANÁLISIS	PROMEDIO
NOMBRE COMÚM	IMP-DG-15
ESTADO FÍSICO	Líquido
CONCENTRACIÓN (% Vol)	100
VISCOSIDAD CINEMÁTICA a 40 ° C (cts)	45.0 - 75.0
TEMP. INFLAMACIÓN (°C)	32 mín.
TEMP. AUTOIGNICIÓN (°C)	No disponible
SOLUB. EN AGUA (%)	100
GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.88 – 0.93
FUENTE: Datos proporcionados por la Refinería de Estudio	

5.2.3 Especificaciones de Productos

Las propiedades de la gasolina varían dependiendo de su formulación y ésta debe cumplir una serie de especificaciones requeridas para el óptimo funcionamiento del motor y el mínimo impacto sobre el medio ambiente. Estas especificaciones se encuentran reguladas por las normatividades emitidas por cada país. Como se mencionó en el capítulo 1, en México la calidad de los combustibles se regula por medio de la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (ver apéndice A). En esta norma se detallan las propiedades físicas más relevantes de las gasolinas de acuerdo a su región de consumo.

No obstante, en la tabla 5.6 solo se reportan las propiedades pertinentes para el alcance de esta tesis, el precio de venta al público, proporcionado por la Refinería de estudio.



Tabla 5.6 Especificaciones de las gasolinas Magna y Premium

PROPIEDAD	MAGNA		PREMIUM	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
(R+M)/2	87		92	
RON	92		95	
MON	82		89	
RVP	6.5	11.5	6.5	11.5
S _G (gm/mL)		0.85		0.85
S (ppm)	80	300	30	250
O ₂ (wt%)	0	2.7	0	2.7
AROMATICOS (v%)	0	35	0	35
OLEFINAS (v%)	0	15	0	15
BENCENO (v%)	0	3	0	2
%EVAPORADO	158 °F	10	10	
	171 °F		50	50
	250 °F	50		50
	374 °F	90		90
	437 °F	100		100
PRECIO (USD\$/BBL) ⁽¹⁾	97		120	

(1) El precio fue informado por la Refinería de Estudio.

Fuente: Norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (ver apéndice A)



6. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA REFORMULACIÓN DE GASOLINAS EN LA REFINERÍA DE ESTUDIO

La optimización de procesos es un tema que ha adquirido un gran interés en el entorno industrial, debido a la necesidad de mejorar las condiciones de producción para continuar compitiendo en el mercado. Esto se debe a que la operación de plantas industriales generalmente obedece a políticas de producción predeterminadas. Sin embargo, estas políticas no necesariamente son las óptimas, lo que puede conllevar a reducir las ganancias en un margen considerable. Por esta razón, durante las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos para alcanzar condiciones de producción más favorables, los cuales se pueden agrupar en dos categorías, la investigación directa y la implementación de modelos [Aseema, 1997].

Los métodos de investigación directa consisten en una serie de experimentos, variando las condiciones de operación a partir del punto de operación actual, para encontrar mejores condiciones que satisfagan los requerimientos de los productos. Uno de los métodos de investigación directa más conocidos es la Operación Evolutiva (EVOP), la cual consiste en la modificación sistemática, en pequeñas magnitudes, de las variables del proceso mientras se está operando. Los resultados de las pequeñas modificaciones anteriores se utilizan como guía para nuevas variaciones, hasta aproximarse a condiciones operativas óptimas, mediante una serie de pequeños pasos. [Forbes, 1994]. Sin embargo, estos métodos requieren de una gran experimentación que llega a hacerlos inviables, especialmente cuando se trata de problemas de grandes dimensiones. Más aún, en casos de grandes complejos o plantas integradas, el tiempo de experimentación para alcanzar una operación económicamente óptima puede llegar a ser muy prolongado y los costos que implica el proceder por prueba y error pueden ser muy altos [Aseema, 1997].

En contraste, los métodos de optimización basados en modelos, utilizan ecuaciones matemáticas que representan el proceso mismo y algoritmos de optimización para encontrar las condiciones óptimas de operación que, luego de ser verificadas, puedan ser implementadas en la planta. De esta forma, se consigue no solo reproducir el comportamiento histórico del sistema, sino también poder simular el comportamiento que el sistema tendría frente a diversas perturbaciones, sin gastar tiempo y dinero en múltiples experimentaciones [Aseema, 1997]. Por esta razón, en esta tesis se empleará un modelo para representar el proceso de mezclado de componentes para la formulación de gasolinas Magna y Premium en la Refinería de Estudio.

En el presente capítulo se exponen las ecuaciones y parámetros considerados para producir gasolinas al menor costo posible, bajo las restricciones ambientales y de calidad impuestas por la norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, tomando como referencia los modelos descritos en el capítulo 4 y las condiciones de la refinería presentadas en el capítulo 5. Una vez establecido el modelo general del sistema, se estará en condiciones de realizar un ajuste de los datos experimentales empleando métodos de regresión para determinar los parámetros y el intervalo de confianza del modelo, así como evaluar la bondad del ajuste conseguido. Posteriormente se presentará un análisis de los resultados obtenidos, con el fin de verificar la teoría subyacente que haya conducido a la expresión matemática final.



6.1 Estructuración de las Ecuaciones

Un modelo de optimización matemática consiste en una función objetivo y un conjunto de restricciones en forma de un sistema de ecuaciones o inecuaciones, que representan determinados aspectos del sistema físico. Dada la complejidad que implica formular dichas ecuaciones, es necesario tener un conocimiento detallado de cada una de las variables que afectan al sistema, para poder aproximar al modelo lo más posible a la realidad [Arshaman, 1994]. Por esta razón, en el capítulo 5 se presentó una descripción detallada de los objetivos del proyecto “Formulación en Línea de Gasolinas en la Refinería de Estudio”. Además, se presentaron las condiciones de operación de la refinería, así como las especificaciones, costo y disponibilidad de los componentes y las restricciones ambientales y de calidad de los productos. Con esta información se desarrollaron la función objetivo y las restricciones que se presentan a continuación.

6.1.1 Función Objetivo

De acuerdo con la descripción del proceso presentada en el capítulo 5, el problema consiste en encontrar las mejores relaciones, mezclando hasta 13 componentes para formular gasolinas Magna y Premium al mejor costo posible. En este orden de ideas, la función objetivo deberá ser maximizar la ganancia a obtener, calculada en función de los ingresos por la venta de gasolinas, a un precio de USD\$97.00/Barril de Magna y USD\$120.00/Barril de Premium, menos los costos ocasionados por el consumo de componentes disponibles, según la ecuación 6.1.

$$F.O.: \text{Max}(C_M X_M + C_P X_P) - \sum_{i=1}^n C_i X_i \quad [\text{Ecuación 6.1}]$$

Donde C_M , C_P representan los costos de las gasolinas Magna y Premium, X_M , X_P representan las cantidades producidas de Magna y Premium respectivamente y C_i , X_i representan el costo y la cantidad empleada de cada componente.

6.1.2 Restricciones de Calidad

La calidad de las gasolinas Magna y Premium se miden en función de sus índices de detonancia RON y MON, dado que son un indicativo del desempeño del combustible bajo condiciones de conducción a velocidad constante en carretera y con aceleración constante en la ciudad, de acuerdo con lo descrito en el capítulo 4. De la misma forma, puede considerarse a la presión de vapor Reid (RVP) y a los puntos de destilación, como otros indicativos de la calidad del combustible, ya que indican la tendencia del combustible a evaporarse y formar mezclas explosivas con el aire, lo que además va de la mano con la facilidad o dificultad de arranque en frío del motor de combustión interna.

6.1.2.1 Índices RON y MON

De acuerdo con lo descrito en la sección de la simulación del mezclado del capítulo 4, las relaciones que se emplearán para representar los índices RON y MON de las mezclas combustibles son las correlaciones de Etil RT-70 y según lo indicado en el capítulo 5, estos índices restringirán la calidad de las gasolinas Magna y Premium como se indica en las ecuaciones 6.2 a 6.7.



$$RON_M = \left[\bar{r} + a_1(\bar{rs} - \bar{r}\bar{s}) + a_2(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_3(\bar{A}^2 - \bar{A}^2) \right]_M \geq 92 \quad \text{[Ecuación 6.2]}$$

$$RON_P = \left[\bar{r} + a_1(\bar{rs} - \bar{r}\bar{s}) + a_2(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_3(\bar{A}^2 - \bar{A}^2) \right]_P \geq 95 \quad \text{[Ecuación 6.3]}$$

$$MON_M = \left\{ \bar{m} + a_4(\bar{ms} - \bar{m}\bar{s}) + a_5(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_6 \left[\frac{(\bar{A}^2 - \bar{A}^2)}{100} \right]^2 \right\}_M \geq 82 \quad \text{[Ecuación 6.4]}$$

$$MON_P = \left\{ \bar{m} + a_4(\bar{ms} - \bar{m}\bar{s}) + a_5(\bar{O}^2 - \bar{O}^2) + a_6 \left[\frac{(\bar{A}^2 - \bar{A}^2)}{100} \right]^2 \right\}_P \geq 89 \quad \text{[Ecuación 6.5]}$$

$$[(R + M)/2]_M \geq 87 \quad \text{[Ecuación 6.6]}$$

$$[(R + M)/2]_P \geq 92 \quad \text{[Ecuación 6.7]}$$

Donde, r es el RON, m es el MON, (R+M)/2 representa el promedio entre el RON y el MON, los subíndices M y P se refieren a las gasolinas Magna y Premium, s es la sensibilidad (RON- MON), O es el contenido de olefinas en porcentaje de volumen, A es el contenido de aromáticos en porcentaje de volumen, y las cantidades acentuadas con una barra superpuesta representan promedios en volumen. En cuanto a los parámetros $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$, son coeficientes de correlación y corresponden a los siguientes valores: $a_1 = 0.03224, a_2 = 0.00101, a_3 = 0.00000, a_4 = 0.04450, a_5 = 0.00081$ y $a_6 = -0.00645$ [Healy et al., 1959].

6.1.2.2 Presión de vapor Reid

Tal como se describió en el capítulo 4 la presión de vapor Reid (RVP) será modelada por medio del método del índice de mezclado, por lo que esta función quedará como se muestra en las ecuaciones 6.8 y 6.9 en unidades psia.

$$(RVP)_M = \sum_{i=1}^n (RVP)_i^{1.25} \leq 11.5 \quad \text{[Ecuación 6.8]}$$

$$(RVP)_P = \sum_{i=1}^n (RVP)_i^{1.25} \leq 11.5 \quad \text{[Ecuación 6.9]}$$



En donde RVP_i representa la Presión de Vapor Reid del componente i y los subíndices M y P las mezclas de gasolinas Magna y Premium.

6.1.2.3 Puntos de Destilación

Los puntos de destilación serán calculados usando los valores de mezclado del método ASTM D-86 para el intervalo de ebullición completa. No obstante, para los componentes del mezclado con puntos de ebullición cercanos, se tomará en cuenta su interacción empleando las curvas en forma de “S”, como se describió en el capítulo 4. Sin embargo, las restricciones de estos parámetros se encuentran marcadas por la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, como se indica en las ecuaciones 6.10 a 6.19.

$$(\% Evap_{158^{\circ}F})_M \geq 10 \quad \text{[Ecuación 6.10]}$$

$$(\% Evap_{171^{\circ}F})_M \leq 50 \quad \text{[Ecuación 6.11]}$$

$$(\% Evap_{250^{\circ}F})_M \geq 50 \quad \text{[Ecuación 6.12]}$$

$$(\% Evap_{374^{\circ}F})_M \geq 90 \quad \text{[Ecuación 6.13]}$$

$$(\% Evap_{437^{\circ}F})_M \geq 100 \quad \text{[Ecuación 6.14]}$$

$$(\% Evap_{158^{\circ}F})_P \geq 10 \quad \text{[Ecuación 6.15]}$$

$$(\% Evap_{171^{\circ}F})_P \leq 50 \quad \text{[Ecuación 6.16]}$$

$$(\% Evap_{250^{\circ}F})_P \geq 50 \quad \text{[Ecuación 6.17]}$$

$$(\% Evap_{374^{\circ}F})_P \geq 90 \quad \text{[Ecuación 6.18]}$$

$$(\% Evap_{437^{\circ}F})_P \geq 100 \quad \text{[Ecuación 6.19]}$$

Donde %Evap indica el porcentaje de evaporado a una temperatura específica indicada en el subíndice y los subíndices M y P representan a las gasolinas Magna y Premium.

6.1.3 Restricciones Ambientales

Este tipo de restricciones se diferencian porque se imponen con el fin de preservar el medio ambiente, aunque también se encuentran enmarcadas dentro de la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Estas restricciones comprenden las limitaciones en el contenido de azufre, aromáticos, benceno, oxígeno y olefinas en la formulación de gasolinas, como se indica a continuación.



6.1.3.1 Contenido de Azufre

Como se mencionó en el capítulo 4, el contenido de azufre se restringe en la formulación de gasolinas, ya que su presencia reduce la eficiencia de los dispositivos anticontaminantes de que disponen los vehículos modernos. Esta restricción puede considerarse aditiva, puesto que puede determinarse como el promedio del contenido de azufre de sus componentes en la mezcla y de acuerdo con la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, se representará como se indica en las ecuaciones 6.20 y 6.21 en partes por millón (ppm).

$$S_M = \sum_{i=1}^n W_i S_i \leq 300 \quad \text{[Ecuación 6.20]}$$

$$S_P = \sum_{i=1}^n W_i S_i \leq 250 \quad \text{[Ecuación 6.21]}$$

En donde W_i representa la fracción en peso del componente i , S_i el contenido de azufre de cada componente y los subíndices M y P las mezclas de gasolinas Magna y Premium.

6.1.3.2 Concentración de Aromáticos

Los aromáticos se limitan para reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera sin provocar daños al ecosistema y a la salud. De acuerdo con la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, estos compuestos no deben presentarse en ninguna formulación de gasolinas en una concentración mayor al 35% en volumen, de manera que la ecuación de la restricción de aromáticos quedará como se presenta en las ecuaciones 6.22 y 6.23.

$$A_M = \sum_{i=1}^n V_i A_i \leq 35 \quad \text{[Ecuación 6.22]}$$

$$A_P = \sum_{i=1}^n V_i A_i \leq 35 \quad \text{[Ecuación 6.23]}$$

En donde V_i representa la fracción en volumen del componente i , A_i el contenido de aromáticos de cada componente y los subíndices M y P las mezclas de gasolinas Magna y Premium.

6.1.3.3 Concentración de Olefinas

Al igual que los aromáticos, las olefinas se limitan de acuerdo con la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, como se indica en las ecuaciones 6.24 y 6.25.



$$O_M = \sum_{i=1}^n V_i O_i \leq 15 \quad [\text{Ecuación 6.24}]$$

$$O_P = \sum_{i=1}^n V_i O_i \leq 15 \quad [\text{Ecuación 6.25}]$$

En donde V_i representa la fracción en volumen del componente i , O_i el contenido de olefinas de cada componente y los subíndices M y P las mezclas de gasolinas Magna y Premium.

6.1.3.4 Contenido de Oxígeno y Benceno

El contenido de oxígeno y el benceno en las gasolinas también se encuentra regulado por la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, como se indica en las ecuaciones 6.26 a 6.29, en unidades de %peso para el oxígeno y %volumen para el benceno.

$$Ox_M = \sum_{i=1}^n W_i Ox_i \leq 2.7 \quad [\text{Ecuación 6.26}]$$

$$Ox_P = \sum_{i=1}^n W_i Ox_i \leq 2.7 \quad [\text{Ecuación 6.27}]$$

$$B_M = \sum_{i=1}^n V_i B_i \leq 3 \quad [\text{Ecuación 6.28}]$$

$$B_P = \sum_{i=1}^n V_i B_i \leq 2 \quad [\text{Ecuación 6.29}]$$

En donde W_i representa la fracción en peso del componente i , V_i representa la fracción en volumen del componente i , Ox_i el contenido de oxígeno de cada componente, B_i el contenido de benceno de cada componente y los subíndices M y P las mezclas de gasolinas Magna y Premium.

6.1.4 Restricciones de Disponibilidad de Componentes

Estas restricciones se imponen al modelo como resultado de los componentes de que dispone la Refinería de Estudio para realizar las mezclas de los dos tipos de gasolina, de manera que solo puedan formularse con los volúmenes existentes, tal como se describió en el capítulo 5. En consecuencia, estas restricciones se plantean como se puede observar en las ecuaciones 6.30 a 6.42.



$$X_1 = x_{1,M} + x_{1,P} \leq 19068 \quad [\text{Ecuación 6.30}]$$

$$X_2 = x_{2,M} + x_{2,P} \leq 22761 \quad [\text{Ecuación 6.31}]$$

$$X_3 = x_{3,M} + x_{3,P} \leq 12566 \quad [\text{Ecuación 6.32}]$$

$$X_4 = x_{4,M} + x_{4,P} \leq 5022 \quad [\text{Ecuación 6.33}]$$

$$X_5 = x_{5,M} + x_{5,P} \leq 15520 \quad [\text{Ecuación 6.34}]$$

$$X_6 = x_{6,M} + x_{6,P} \leq 12200 \quad [\text{Ecuación 6.35}]$$

$$X_7 = x_{7,M} + x_{7,P} \leq 16500 \quad [\text{Ecuación 6.36}]$$

$$X_8 = x_{8,M} + x_{8,P} \leq 12657 \quad [\text{Ecuación 6.37}]$$

$$X_9 = x_{9,M} + x_{9,P} \leq 2112 \quad [\text{Ecuación 6.38}]$$

$$X_{10} = x_{10,M} + x_{10,P} \leq 540 \quad [\text{Ecuación 6.39}]$$

$$X_{11} = x_{11,M} + x_{11,P} \leq 18976 \quad [\text{Ecuación 6.40}]$$

$$X_{12} = x_{12,M} + x_{12,P} \leq 12075 \quad [\text{Ecuación 6.41}]$$

$$X_{13} = x_{13,M} + x_{13,P} \leq 3124 \quad [\text{Ecuación 6.42}]$$

Donde las letras “X” en mayúsculas, representan a las cantidades totales disponibles de cada uno de los componentes y las letras “x” en minúsculas, representan a las cantidades empleadas de cada componente para formular las gasolinas, con los subíndices M para la gasolina Magna y P para la Premium. Los trece componentes se encuentran descritos en el capítulo 5.

6.2 Solución Óptima Mediante el Método del Gradiente Reducido

Una vez establecidas la función objetivo y cada una de las restricciones, se procedió a la implementación de la programación matemática para obtener una solución óptima del mezclado de componentes. Esto permitió encontrar las mezclas de gasolinas Magna y Premium que cumplieran con las restricciones antes enunciadas y que maximizara la ganancia a obtener por su comercialización. Para ello, se tomó en cuenta la forma del comportamiento de las propiedades de los componentes que constituirán las mezclas, de acuerdo con los anteriores apartados del presente capítulo. Bajo esta premisa y en



vista de la naturaleza no lineal de algunas restricciones como las de octanaje y presión de vapor Reid (PVR), se empleó el método del gradiente reducido para resolver el problema [Vanderplaats, 1984].

Para implementar el método del gradiente reducido, se tomó como punto de partida una producción esperada de 95 MBPD de Magna y 58 MBPD de Premium, establecida por los directivos de la Refinería de Estudio, como capacidad máxima estimada al concluir el proyecto. Sin embargo, bajo estas condiciones no se pudo encontrar una solución factible, debido a que las características de los componentes disponibles no permitían alcanzar dicho nivel de producción. En consecuencia, se procedió a variar las cantidades esperadas a obtener de gasolinas Magna y Premium, entre los límites mínimo y máximo establecidos por la Refinería para cada grado de combustible, simulando un análisis paramétrico, como se indica en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Resultados Iniciales

Corrida	Puntos de Partida		Resultados		
	Producción		Producción		Ganancia (USD\$)
Magna BPD	Premium BPD	Magna BPD	Premium BPD		
1	95000	25000	95000	25000	\$3,419,284
2	90000	30000	90000	30000	\$3,485,926
3	89000	31000	89000	31000	\$3,498,214
4	88000	32000	88000	32000	\$3,510,589
5	87000	33000	87000	33000	\$3,523,226
6	86000	34000	86000	34000	\$3,535,254
7	85000	35000	31315	35000	\$2,376,547
8	84000	40000	79322	40000	\$3,591,891
9	83000	45000	71704	45000	\$3,609,154
10	82000	46000	70159	46000	\$3,611,297
11	81000	47000	68613	47000	\$3,613,428
12	80000	48000	67212	48000	\$3,621,702
13	78000	50000	64135	50000	\$3,626,702
14	75000	55000	56424	55000	\$3,638,122
15	70000	58000	51768	58000	\$3,643,465

Como resultado, se encontró un conjunto de soluciones factibles en las que no siempre se alcanzaba el nivel de producción deseado, debiendo sacrificar producción de gasolina Magna para obtener un poco más de Premium. Al analizar detenidamente estos resultados, se observó que en todas las iteraciones siempre se satisfacían las restricciones relacionadas con los índices RON y MON, puntos de destilación, concentración de Aromáticos, Olefinas, Oxígeno y Benceno, por debajo de su límite máximo. Sin embargo, se notó que el contenido de azufre y la PVR siempre llegaban a este límite, especialmente al intentar aumentar la producción de Premium a más de 34 MBPD, como se aprecia en la tabla 6.2. Este suceso se atribuyó a que, de acuerdo con la norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, la gasolina Premium presenta las



restricciones más estrictas en este sentido y seguramente las características de los componentes disponibles no permitían obtener la producción esperada.

Tabla 6.2. Propiedades de las gasolinas de las iteraciones iniciales

Corrida	Gasolina	Propiedades								
		(R+M)/2	RON	MON	RVP	S (ppm)	O2 wt%	Arom v%	Olef v%	Benz %
1	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.000	19.161	3.816	1.844
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	2.037	8.399	3.260	0.617
2	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.557	18.559	3.753	1.853
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.000	12.062	3.550	0.696
3	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.559	18.619	3.741	1.858
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.010	12.082	3.549	0.697
4	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.570	18.452	3.728	1.824
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.000	12.731	3.557	0.809
5	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.576	18.513	3.736	1.827
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.000	12.768	3.557	0.813
6	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.461	18.997	3.749	1.836
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.313	11.703	3.499	0.799
7	MAGNA	93	92	85	11.5	0	1.637	17.615	0.137	2.268
	PREMIUM	92	95	89	11.5	1.6E-05	0.000	19.016	0.686	1.204
8	MAGNA	93	92	85	11.5	300	0.332	19.293	3.704	2.050
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.596	12.504	3.595	0.664
9	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.000	22.265	3.854	1.941
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	1.154	9.470	3.360	0.818
10	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.000	22.463	3.853	1.950
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	1.127	9.669	3.366	0.832
11	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.000	22.671	3.851	1.959
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	1.101	9.859	3.372	0.844
12	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.746	20.214	3.688	1.939
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.000	13.713	3.587	0.898
13	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.638	21.971	3.649	2.162
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.188	12.075	3.622	0.657
14	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.877	22.295	3.633	2.224
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.013	13.555	3.605	0.750
15	MAGNA	93	92	84	11.5	300	0.769	22.843	3.668	2.044
	PREMIUM	92	95	89	11.5	250	0.174	14.060	3.557	0.999

Con el fin de comprobar que el azufre y la PVR limitaban la producción de gasolinas, se procedió a realizar más iteraciones, variando el contenido de azufre en partes por millón (ppm) y la PVR en psia para ambas formulaciones. No obstante, no se encontraron soluciones posibles al intentar reducir la PVR, de manera que se realizaron 45 iteraciones más variando únicamente la concentración de azufre. Para hacerlo, se consideró que el azufre de la gasolina Magna podría variar entre 80 y 300 ppm, mientras que el de la Premium podría oscilar entre 30 y 250 ppm. Dichos niveles se establecieron basándose en los niveles permitidos por la norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que rigen actualmente y los que se deben cumplir a partir de enero



de 2009 en todo el país. En consecuencia, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resultados del Modelo

Corrida	Resultados						Ganancia
	Producción (BPD)		S (ppm)		PVR (psia)		
	Magna	Premium	Magna	Premium	Magna	Premium	
1	95000	25000	300	250	11.5	11.5	\$3,419,284
2	90000	30000	300	250	11.5	11.5	\$3,485,926
3	89000	31000	300	250	11.5	11.5	\$3,498,214
4	88000	32000	300	250	11.5	11.5	\$3,510,589
5	87000	33000	300	250	11.5	11.5	\$3,523,226
6	86000	34000	300	250	11.5	11.5	\$3,535,254
7	31315	35000	0	0	11.5	11.5	\$2,376,547
8	79322	40000	300	250	11.5	11.5	\$3,591,891
9	71704	45000	300	250	11.5	11.5	\$3,609,154
10	70159	46000	300	250	11.5	11.5	\$3,611,297
11	68613	47000	300	250	11.5	11.5	\$3,613,428
12	67212	48000	300	250	11.5	11.5	\$3,621,702
13	64135	50000	300	250	11.5	11.5	\$3,626,702
14	56424	55000	300	250	11.5	11.5	\$3,638,122
15	51768	58000	300	250	11.5	11.5	\$3,643,465
16	95000	25000	190	170	11.5	11.5	\$3,382,928
17	88044	30000	190	170	11.5	11.5	\$3,410,392
18	86551	31000	190	170	11.5	11.5	\$3,413,871
19	85059	32000	190	170	11.5	11.5	\$3,417,408
20	83567	33000	190	170	11.5	11.5	\$3,420,910
21	82074	34000	190	170	11.5	11.5	\$3,424,413
22	80582	35000	190	170	11.5	11.5	\$3,427,921
23	73119	40000	190	170	11.5	11.5	\$3,445,452
24	65657	45000	190	170	11.5	11.5	\$3,463,032
25	64165	46000	190	170	11.5	11.5	\$3,466,553
26	62670	47000	190	170	11.5	11.5	\$3,469,976
27	61181	48000	190	170	11.5	11.5	\$3,473,597
28	58198	50000	190	170	11.5	11.5	\$3,480,687
29	50740	55000	190	170	11.5	11.5	\$3,498,397
30	46262	58000	190	170	11.5	11.5	\$3,508,913
31	88932	25000	80	80	11.5	11.5	\$3,230,352
32	81659	30000	80	80	11.5	11.5	\$3,252,662
33	76976	31000	0	80	11.5	11.5	\$3,177,104
34	75577	32000	0	80	11.5	11.5	\$3,182,892
35	74191	33000	0	80	11.5	11.5	\$3,189,035
36	72822	34000	0	80	11.5	11.5	\$3,194,097
37	71407	35000	0	80	11.5	11.5	\$3,200,883



Tabla 6.3 (Continuación) Resultados del Modelo

Corrida	Resultados						
	Producción (BPD)		S (ppm)		PVR (psia)		Ganancia
	Magna	Premium	Magna	Premium	Magna	Premium	
38	64420	40000	0	80	11.5	11.5	\$3,230,383
39	57439	45000	0	80	11.5	11.5	\$3,259,674
40	55995	46000	0	80	11.5	11.5	\$3,263,336
41	54597	47000	0	80	11.5	11.5	\$3,269,291
42	53200	48000	0	80	11.5	11.5	\$3,275,252
43	52547	50000	80	80	11.5	11.5	\$3,341,160
44	43407	55000	0	80	11.5	11.5	\$3,316,519
45	39164	58000	0	80	11.5	11.5	\$3,332,261
46	43786	25000	0	0	11.5	11.5	\$2,085,216
47	47067	30000	0	0	11.5	11.5	\$2,367,985
48	46214	31000	0	0	11.5	11.5	\$2,388,655
49	77974	32000	80	30	11.5	11.5	\$3,242,855
50	76491	33000	80	30	11.5	11.5	\$3,246,608
51	75001	34000	80	30	11.5	11.5	\$3,250,051
52	73517	35000	80	30	11.5	11.5	\$3,253,755
53	66105	40000	80	30	11.5	11.5	\$3,272,697
54	58680	45000	80	30	11.5	11.5	\$3,291,178
55	57095	46000	80	30	11.5	11.5	\$3,290,060
56	55607	47000	80	30	11.5	11.5	\$3,293,629
57	54120	48000	80	30	11.5	11.5	\$3,297,247
58	51142	50000	80	30	11.5	11.5	\$3,304,205
59	43723	55000	80	30	11.5	11.5	\$3,322,788
60	39314	58000	80	30	11.5	11.5	\$3,336,264

Al analizar estos resultados, se observó que no era posible formular gasolinas con menos de 11.5 psia de RVP, que la cantidad de azufre especificada para cada tipo de gasolina limitaba la producción de ambos combustibles y que la producción de gasolina Premium se obtenía a expensas de sacrificar producción de Magna. Tales resultados advierten una posible correlación entre la cantidad de Magna producida, la cantidad obtenida de Premium y el contenido máximo de azufre permitido para el producto final. En consecuencia, se procedió a realizar un ajuste de estas variables que permitiera entender su comportamiento para entonces poder decidir cual sería el punto óptimo de producción.

6.3 Experimentación con el Modelo Mediante un Ajuste de Regresión

Uno de los problemas encontrados al intentar solucionar el modelo del mezclado, se presentó al momento de establecer las cantidades a producir de cada tipo de gasolina, acordes con la propia operación de la refinería. Como se observó anteriormente, definir



estas cantidades arbitrariamente puede causar que no se genere soluciones factibles, si su producción simultánea sobrepasa las limitaciones de capacidad y calidad impuestas por los componentes existentes. Con el fin de encontrar los valores iniciales apropiados para estas variables que permitan que siempre se llegue a una solución factible, es necesario determinar la relación entre ellas. Por esta razón, se empleó un análisis de regresión lineal múltiple entre las producciones de Magna y Premium y la concentración de azufre que se desea alcanzar, utilizando el paquete de análisis estadístico de datos de Microsoft Excel, como se ilustra en la tabla 6.4.

La hipótesis en que existe una correlación entre las producciones de Magna como variable dependiente y las producciones de Premium más la cantidad de azufre, con la que se respetarían las condiciones ecológicas ya mencionadas; se plantea que debe responder a la siguiente ecuación.

$$Y_{MAGNA} = \alpha + \beta X_{PREMIUM} + \delta X_{AZUFRE_MAGNA} + \varepsilon \quad \text{[Ecuación 6.43]}$$

Donde α , β y δ son los coeficientes de la ecuación de regresión, mientras que ε es el error de ajuste.

Tabla 6.4. Parámetros de Regresión

	Y_i	$X_{i,1}$	$X_{i,2}$
Corrida	Magna	Premium	S
1	95.000	25	0.3
2	90.000	30	0.3
3	89.000	31	0.3
4	88.000	32	0.3
5	87.000	33	0.3
6	86.000	34	0.3
8	79.322	40	0.3
9	71.704	45	0.3
10	70.159	46	0.3
11	68.613	47	0.3
12	67.212	48	0.3
13	64.135	50	0.3
14	56.424	55	0.3
15	51.768	58	0.3
16	95.000	25	0.19
17	88.044	30	0.19
18	86.551	31	0.19
19	85.059	32	0.19
20	83.567	33	0.19
21	82.074	34	0.19
22	80.582	35	0.19
23	73.119	40	0.19
24	65.657	45	0.19
25	64.165	46	0.19
26	62.670	47	0.19



Tabla 6.4. (Continuación)
Parámetros de Regresión

	Y_i	$X_{i,1}$	$X_{i,2}$
Corrida	Magna	Premium	S
27	61.181	48	0.19
28	58.198	50	0.19
29	50.740	55	0.19
30	46.262	58	0.19
31	88.932	25	0.08
32	81.659	30	0.08
43	52.547	50	0.08
49	77.974	32	0.08
50	76.491	33	0.08
51	75.001	34	0.08
52	73.517	35	0.08
53	66.105	40	0.08
54	58.680	45	0.08
55	57.095	46	0.08
56	55.607	47	0.08
57	54.120	48	0.08
58	51.142	50	0.08
59	43.723	55	0.08
60	39.314	58	0.08

Para la regresión, se decidió excluir los datos de las iteraciones en las que se obtuvieron gasolinas con 0 ppm de azufre por considerarlos irrelevantes, ya que obtener estas mezclas implicaría reducir la ganancia por producir formulaciones de mayor costo. Además, para elaborar gasolinas de dicha calidad habría que disminuir en un amplio margen la producción total, teniendo que cubrir el déficit de la oferta con importaciones, que es justamente lo que se intenta evitar. Por otro lado, la norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, no obliga a alcanzar esta concentración de azufre en ninguna de las gasolinas.

Después de ajustar el modelo de regresión múltiple a los datos de la tabla 6.4, usando como variables predictoras a la producción de Premium y la concentración de azufre de la Magna, se encontró la Ecuación 6.44.

$$Y_{MAGNA} = 119.9021 - 1.43684 X_{PREMIUM} + 51.58087 X_{AZUFRE} \quad \text{[Ecuación 6.44]}$$

Donde la ordenada al origen y la variable $X_{PREMIUM}$ están en MBPD y la variable azufre esta expresada en términos de concentración ppm/1000.

Los coeficientes de regresión para ambas variables fueron -1.43684 y 51.58087 respectivamente, siendo ambos significativamente distintos que cero. Esto indica que en promedio, la producción de Magna disminuye en 1.4 unidades por unidad de aumento en la producción de Premium y que aumenta en 51.6 unidades por aumento en la



concentración de azufre en la magna. El valor del coeficiente de determinación R^2 fue del 99.4 % y la significación del contraste F global de la regresión ($p \ll 0.001$) sugieren que gran parte de la variabilidad de la respuesta viene explicada por el modelo ajustado, con lo que se comprueba la hipótesis anterior.

En las tablas 6.5, 6.6 y 6.7, se presentan los resultados del análisis para caracterizar la bondad de la regresión, la significancia estadística y la utilidad del modelo.

Tabla 6.5 Estadística de la Regresión

Coef. Correl. Múltiple	0.996923412
Coef. Determ. R^2	0.993856289
R^2 Ajustado	0.993556596
Error Estándar	1.209172521
Observaciones	44

Tabla 6.6 Análisis de Varianza

	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Promedio Cuadrados	F	Significancia (Valor Crítico F)
Regresión	2	9697.353467	4848.676733	3316.245638	4.60077E-46
Residuos	41	59.94602565	1.462098186		
Total	43	9757.299492			

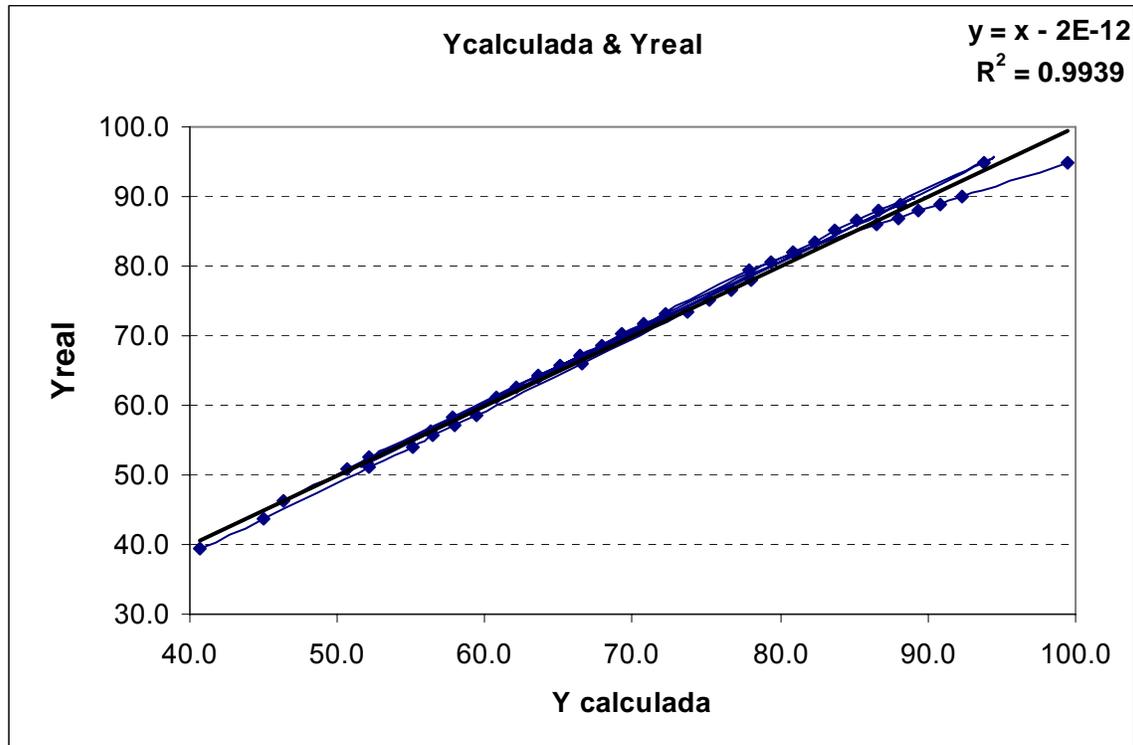
Tabla 6.7 Significancia Estadística

	Interceptos	$X_{i,1}$	$X_{i,2}$
Coeficientes	119.9020809	-1.43684	51.58087
Error Típico	0.894732378	0.018797	2.043456
Estadístico t Student	134.0088767	-76.441	25.24198
Probabilidad (Valores p)	8.36878E-56	7.55E-46	1.34E-26
Inferiores 95%	118.0951312	-1.4748	47.45403
Superiores 95%	121.7090306	-1.39888	55.70772
Inferiores 99%	117.4852467	-1.48762	46.06113
Superiores 99%	122.3189151	-1.38607	57.10062

En la Gráfica 6.1 se representa un ajuste entre los resultados obtenidos del modelo y los calculados a partir de la correlación lineal, en donde se puede observar un ajuste casi del 100%, por lo que la ecuación resultante fue $Y=X$. Este resultado indica que el



ajuste es adecuado, ya que el error matemático generado presenta valores mínimos, comprobando así la bondad del mismo.



Gráfica 6.1 Comparación entre los datos del modelo y los obtenidos por la correlación lineal.

Es importante mencionar que para el ajuste no se consideró como variable previctoria la concentración de azufre para la gasolina Premium, debido a que presenta una correlación inherente con la variable que determina la cantidad de producción de la misma.

6.4 Resultados

Una vez obtenido el ajuste solo resta decidir el punto de la mejor producción recomendada para la Refinería de Estudio, el cual debe corresponder con la máxima ganancia obtenida al comercializar gasolinas Magna de 80 ppm y Premium de 30 ppm, frente a la alternativa de importar los volúmenes restantes para cubrir la demanda de estas gasolinas. Esto con el fin de cumplir con la especificación de nivel de azufre en las gasolinas de la Norma 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que entrará en vigor a partir de enero del 2009. En consecuencia, el punto recomendado será aquel que proporcione el mínimo costo de importación, como se presenta en la ecuación 6.45.

$$MIN[(D_P - X_P)p_P - (D_M - X_M)p_M] \quad \text{[Ecuación 6.45]}$$



Donde X_M y X_P son las cantidades de Magna y Premium que se pueden elaborar en la refinería, D_M y D_P representan la demanda de Magna y Premium, estimados en 466,900 y 198,800 BPD respectivamente para el 2006, de acuerdo con la tabla 3.4; p_M y p_P son los precios de importación para Magna y Premium estimados en 76.4 y 83.3 USD/BBL, según datos proporcionados por la refinería.

De acuerdo a la ecuación 6.45, se obtuvieron los datos indicados en la tabla 6.8, en la cual se puede observar que el punto de mínimo costo de importación es de 15,819,506 USD que se gastarían para cubrir la demanda si se produjeran 77974 y 32000 BPD de Magna y Premium respectivamente. Este nivel de producción proporcionaría gasolinas Magna y Premium con las características indicadas en la tabla 6.9 y se alcanzaría mezclando los componentes en las proporciones señaladas en la tabla 6.10.

Tabla 6.8 Costos de importación

Producción Refinería		Ganancia	Importación		Costo
Magna	Premium		Magna	Premium	Importación
77974	32000	3242855	388926	166800	15819506
76491	33000	3246608	390409	165800	16016108
75001	34000	3250051	391899	164800	16213244
73517	35000	3253755	393383	163800	16409921
66105	40000	3272697	400795	158800	17392698
58680	45000	3291178	408220	153800	18376468
57095	46000	3290060	409805	152800	18580862
55607	47000	3293629	411293	151800	18777845
54120	48000	3297247	412780	150800	18974752
51142	50000	3304205	415758	148800	19368871
43723	55000	3322788	423177	143800	20352183
39314	58000	3336264	427586	140800	20938930

Tabla 6.9 Características de las Gasolinas Propuestas

Gasolina		MAGNA	PREMIUM
Propiedades	(R+M)/2	93	92
	RON	92	95
	MON	85	89
	RVP	11.5	11.5
	S (ppm)	80	30
	O ₂ wt%	0.641	0.000
	Arom v%	17.519	13.223
	Olef v%	1.220	1.100
	Benz %	1.862	0.968
Puntos de Destilacion (% Vol. Evaporado)	a 140°F	26.149	12.720
	a 171°F	37.863	20.962
	a 241°F	59.424	57.336
	a 365°F	97.043	94.488
	a 437°F	100	100



Tabla 6.10 Formulación óptima propuesta

Componentes	Magna	Premium
Nafta Catalitica FCC1	0	0
Nafta Catalitica FCC2	2616.205	350.2472
Reformado BTX	12566	0
Reformado NP1	5022	0
Reformado U-500	9005.288	6514.712
Reformado Pesado	10094.12	2105.882
Isómero Importado	18693	1099.87
Isómero U-200	12657	0
Pentanos Importados	0	0
Pentanos U-600	1.78E-14	0
Alquilado	0	18976
Butanos-Butilenos	4196.515	2953.289
TAME	3124	0

6.5 Análisis de Sensibilidad

Para la mejor solución anteriormente descrita, en las tablas 6.11, 6.12 y 6.13, se presentan los valores de las variables duales (Gradientes Reducidos y Multiplicadores de Lagrange), asociadas al problema.

En la tabla 6.11 se reportan los gradientes reducidos correspondientes a las restricciones de disponibilidad de componentes. De acuerdo a estos resultados, para la formulación de la gasolina Magna la nafta catalítica FCC1, los pentanos importados y pentanos U-600 no se usaron en la mezcla, de manera que no aparecen en la base óptima, pero incluirlos forzosamente implicarían un costo para la función objetivo, o disminución de la ganancia en -5, -41 y -41 USD/BBL respectivamente. No obstante, a pesar de que el alquiler tampoco aparece en la base óptima si se incluyera forzosamente la ganancia aumentaría a razón de 1 USD/BBL. Para el caso de la Premium, la nafta catalítica FCC1, isómero U-200, pentanos importados y pentanos U-600, no aparecen en la base e incluirlos costaría -3, -5, -42 y -42 USD/BBL, aunque los reformados BTX y NP1, que tampoco están en la base incrementarían la ganancia en 2 y 3 USD/BBL correspondientemente al ser incluidos en su formulación.

En la tabla 6.12 se muestran los multiplicadores de Lagrange correspondientes a las restricciones ambientales y de calidad impuestas al modelo. Los datos reportados en esta tabla indican que aumentar en una unidad el lado derecho de la restricción correspondiente al RON, en la elaboración de gasolina Magna, como costaría 508,383.6 USD, mientras que aumentar 1000 ppm de azufre a la Magna incrementarían la ganancia total en 10,108,557 USD. Para el caso de la Premium aumentarle una unidad de RON, costaría 243,143.7 USD, pero aumentarle 1000 ppm de azufre aumentarían la ganancia en 3,904,739.44 USD. De la misma forma, incrementar en una unidad el porcentaje en peso de Oxígeno a la Premium costaría 41,045 USD.

Por ultimo, en la tabla 6.13 se presentan los valores de los multiplicadores de Lagrange para el total de componentes empleados en la formulación de gasolinas. Como se



aprecia en esta tabla, de haber dispuesto de mayor cantidad de Reformados BTX, NP1 y U-500, así como de Alquilado, Isómero U-200 y Reformado Pesado se hubiese podido aumentar la ganancia en 27, 21, 55, 28, 1 y 69 USD respectivamente, por cada Barril de estos componentes que se aumentaran en el lado derecho de las restricciones.

Tabla 6.11 Gradiente reducido para los componentes

Componentes	Valor Final	Gradiente Reducido	Valor Final	Gradiente Reducido
	Producción de Magna		Producción de Premium	
Nafta Catalítica FCC1 (BBL)	0	-5	0	-3
Nafta Catalítica FCC2 (BBL)	2,616	0	350	0
Reformado BTX (BBL)	12,566	0	0	2
Reformado NP1 (BBL)	5,022	0	0	3
Reformado U-500 (BBL)	9,005	0	6,515	0
Reformado Pesado (BBL)	10,094	0	2,106	0
Isómero Importado (BBL)	18,693	0	1,100	0
Isómero U-200 (BBL)	12,657	0	0	-5
Pentanos Importados (BBL)	0	-41	0	-42
Pentanos U-600 (BBL)	0	-41	0	-42
Alquilado (BBL)	0	1	18,976	0
Butanos-Butilenos (BBL)	4,197	0	2,953	0
TAME (BBL)	3,124	0	0	0

Tabla 6.12 Multiplicadores de Lagrange para las restricciones ambientales y de calidad

Restricciones	Valor Final	Multiplicador de Lagrange	Valor Final	Multiplicador de Lagrange	
	MAGNA		PREMIUM		
Total (BBL)	77,974	0	32,000	4	
Calculado	RON	92.0	-508383.6	95.0	-243143.7
	MON	85.3	0.0	89.0	0.0
	S (ppm)	0.008	10108557.033	0.003	3904739.436
	O ₂ (% peso)	0.6	0.0	0.0	-41045.0
	Arom (%Vol)	17.5	0.0	13.2	0.0
	Olef (%Vol)	1.2	0.0	1.1	0.0
	Benceno (%)	1.9	0.0	1.0	0.0
%Evap @ 140 (%Vol)	26.1	0.0	12.7	0.0	
%Evap @ 171 (%Vol)	37.9	0.0	21.0	0.0	
%Evap @ 241 (%Vol)	59.4	0.0	57.3	0.0	



Tabla 6.13 Multiplicadores de Lagrange de los componentes

TOTAL		
Restricciones	Valor final	Multiplicador de Lagrange
Nafta Catalitica FCC1 (BBL)	0	0
Nafta Catalitica FCC2 (BBL)	2,966	0
Reformado BTX (BBL)	12,566	27
Reformado NP1 (BBL)	5,022	21
Reformado U-500 (BBL)	15,520	55
Reformado Pesado (BBL)	12,200	69
Isómero Importado (BBL)	19,793	0
Isómero U-200 (BBL)	12,657	1
Pentanos Importados (BBL)	0	0
Pentanos U-600 (BBL)	0	0
Alquilado (BBL)	18,976	28
Butanos-Butilenos (BBL)	7,150	0
TAME (BBL)	3,124	142



7. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se presentan las siguientes conclusiones, de acuerdo con la secuencia en que fue desarrollado y presentado en los capítulos anteriores.

1. Respecto del capítulo 2, el análisis realizado sobre el sector autotransporte en México, como principal consumidor de gasolinas automotrices, refleja un rezago tecnológico comparado con otros países como Inglaterra, Alemania, Japón y Estados Unidos. Este rezago se debe a que los países mencionados han diversificado sus medios de transporte y sus combustibles asociados, formalizando así una política de combustibles en el marco del desarrollo sustentable. Si se observa el análisis estadístico realizado sobre el parque vehicular en México, se encuentra que los vehículos a gasolina actualmente superan el 94.6% del total. En contraste, los automotores que consumen Diesel sólo representan el 3.5% y los impulsados por Gas L.P. y Gas Natural Comprimido, apenas llegan al 1.87% y el 0.011%, respectivamente. Estas cifras demuestran una muy baja diversificación del parque automotriz, que ha privilegiado el uso de las gasolinas en lugar de favorecer otras alternativas como automóviles a Diesel y Gas L.P. Lo mismo puede decirse sobre las nuevas tecnologías como la híbrida o los biocombustibles, a pesar de la discusión sobre si éstos son la mejor opción.
2. En el capítulo 3 se describió y analizó el mercado nacional de gasolinas, observándose que estos combustibles han tenido una producción prácticamente estancada, importaciones cada vez más crecientes y un consumo aparente de casi 100 MBPD y en aumento, durante el periodo 1995 – 2006. Así mismo, se encontró que la evolución del precio de las gasolinas durante el periodo de estudio, ha sufrido incremento sostenido y acelerado. En efecto, el precio de venta para la gasolina Magna ha subido en promedio 10.86% anual, pasando de 2.24 pesos por litro en 1995 a 6.74 pesos por litro en 2006. De la misma forma, el precio de la Premium ha incrementado en 10.3% anual, cambiando de 3.17 a 8.29 pesos por litro durante este periodo.

En el caso del pronóstico de la oferta, se prevé que se mantendrán las importaciones de gasolinas, pese al aumento proyectado en su capacidad de producción. Esto se debe a que la demanda, representada por el parque automotor a gasolinas, presentará un incremento acelerado, favorecido por las facilidades de crédito para su adquisición y la introducción de vehículos importados, entre otros factores descritos en el capítulo 2. En promedio, se espera que la Tasa Media de Crecimiento Anual de la importación de gasolinas sea de -1.9 entre el 2007 y el 2015, llegando a ser de sólo 191.3 MBPD al finalizar el periodo. De manera que el déficit de suministro de este combustible dejará un margen muy limitado para las exportaciones, por lo que se espera que sean casi nulas. Por esta razón, se considera necesario incrementar la capacidad de producción de gasolinas en México.

3. En relación con la hipótesis general planteada, se concluye que fue posible encontrar el mejor punto de producción del mezclado de componentes para formular gasolinas en la Refinería de Estudio, mediante el modelo desarrollado en los capítulos 4 y 6. Este modelo maximiza la ganancia a obtener por la comercialización de los productos y asegura que las mezclas cumplen con las especificaciones deseadas, en función de las limitaciones de capacidad y calidad impuestas por los componentes existentes. Además, el punto de producción propuesto considera el menor costo de importación que se obtendría como resultado de cubrir el déficit de la demanda no cubierta por la refinería.



Respecto de la producción de gasolinas en la Refinería de Estudio, se concluye que no es posible formular simultáneamente 95 MBPD de gasolina Magna y 58 MBPD de Premium, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones ambientales y de calidad estipuladas por la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, como lo pretendían realizar los directivos de la refinería. Esto se debe a que las características de los componentes disponibles no permiten alcanzar dicho nivel de producción.

Como resultado del análisis se encontró que la cantidad de Magna que se puede elaborar en la refinería de estudio, varía linealmente en función de la cantidad de Premium obtenida y la concentración de azufre, especificada para la gasolina Magna.

La propiedad limitante para formular gasolinas en la Refinería es la presión de vapor Reid, ya que la calidad de los componentes disponibles no permiten elaborar mezclas con menos de 11.5 psia de PVR, que es el límite máximo que admite la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. En consecuencia, las formulaciones de gasolinas que se elaboren no serían adecuadas para abastecer la demanda de la Zona Metropolitana del Valle de México a partir de enero de 2009. No obstante, pueden emplearse para abastecer las regiones del Centro-Noreste, Bajío y Monterrey, durante el periodo comprendido entre Noviembre y Febrero, que son los meses en que en dichas zonas se permitirá el nivel de PVR que alcanzarían las gasolinas.

4. La elaboración de esta tesis sirvió para encontrar una alternativa de producción de gasolinas en la Refinería de Estudio, de manera que se ahorren costos en tiempo y consumo ineficiente de componentes procediendo por prueba y error, para alcanzar la composición adecuada de las mezclas. Este ahorro se debe a que se utilizan ecuaciones matemáticas que representan el proceso mismo y un algoritmo de optimización para encontrar las condiciones óptimas de operación y mezclado que pueden implementarse en la planta. Entonces, la utilización del modelo servirá para mejorar la toma de decisiones, respecto de los componentes que deben estar disponibles para el mezclado, en lugar de hacerlo rudimentariamente y de manera especulativa.
5. Un tema de investigación que puede proponerse a partir de esta tesis, es desarrollar un modelo dinámico del mezclado, que considere posibles perturbaciones estocásticas sobre la calidad de los componentes, durante todo el horizonte de planeación. Esto obedece al hecho de que la calidad de los componentes no son parámetros fijos, sino que dependen de las variaciones en las condiciones de operación corriente arriba de la refinería. Sin embargo, para propósitos de este trabajo las calidades se concibieron como parámetros que pueden ser actualizados en línea, es decir, en la medida en que se detecten durante el proceso de mezclado.
6. Aunque el modelo formulado se desarrolló específicamente para ser implementado en la Refinería de Estudio, puede aplicarse en otras refinerías, ya que presenta la flexibilidad de variar las condiciones de operación que definen las características de los productos a obtener. En el caso de México, este modelo sería de gran utilidad para PEMEX Refinación, ya que es la empresa que tiene la responsabilidad de las actividades de producción de gasolinas en el país.



ANEXO A. NORMATIVIDAD VIGENTE

El marco jurídico Mexicano, en materia ambiental, ha evolucionado constantemente con el fin de disminuir significativamente las emisiones a la atmósfera, y adaptarse a las características de los sistemas de transporte. Este régimen jurídico es el del dominio directo de la nación, por conducto de los órganos federales, del petróleo y sus derivados y abarca 106 normas vigentes. A continuación se describe de manera resumida, las normas existentes directamente relacionadas con las emisiones contaminantes causadas por los vehículos de combustión interna. Estas normas se encuentran disponibles para su libre consulta a través de las oficinas federales, portales web y otras fuentes de consulta pública, en caso de requerir mayor información.

NOM-041-SEMARNAT-1999: Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

NOM-042-SEMARNAT-2003: Establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o diferentes al metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda de 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.

NOM-044-SEMARNAT-2006: Establece los niveles máximos permisibles de hidrocarburos totales, hidrocarburos diferentes al metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos.

NOM-045-ECOL-1996: Establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel o mezclas que incluyan diesel como combustible.

NOM-047-ECOL-1999: Dicta las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los límites de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.

NOM-048-ECOL-1993: Implanta los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina - aceite como combustible.

NOM-049-ECOL-1993: Se refiere las características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina - aceite como combustible.

NOM-076-ECOL-1995: Establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros



combustibles alternos y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta.

NOM-077-ECOL-1995: Versa sobre el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005: Describe los niveles máximos permisibles en peso de azufre en el gasóleo industrial que se consume por fuentes fijas en la zona metropolitana del Valle de México. Esta norma cancela la NOM-051-SEMARNAT-1993. Así mismo, indica el contenido máximo de azufre permisible para el combustóleo, el cual se mantuvo en 4% en peso.

NOM-034-ECOL-1993: Establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

NOM-035-ECOL-1993: Hace referencia a los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.

NOM-036-ECOL-1993: Dicta los métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

NOM-037-ECOL-1993: Establece los métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

NOM-038-ECOL-1993: Trata sobre los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

Con el fin de ilustrar más ampliamente el contenido normativo pertinente para la elaboración de esta tesis, en las líneas siguientes se incluye el contenido completo de la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.



NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, ESPECIFICACIONES DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES PARA LA PROTECCIÓN AMBIENTAL.

D. O. F.30 de enero de 2006.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

JOSE RAMON ARDAVIN ITUARTE, Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, LIC. CARLOS ALBERTO GARZA IBARRA, Subsecretario de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía y C.P. MIGUEL AGUILAR ROMO Director General de Normas de la Secretaría de Economía con fundamento en los artículos 26, 32 Bis fracciones IV y V, 33 fracciones I, III y IX y 34 fracciones XIII y XXX de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 25 fracción VIII del Reglamento Interior de la Secretaría de Energía; 8 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 19 fracciones I y XV del Reglamento Interior de la Secretaría de Economía 1o. fracciones III y VI, 5o. fracciones II, V, XII y XIII, 6o. 36, 37, 37 BIS, 111, 113 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 3o. fracciones III y VII y 7o. fracciones II y III del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera; 38 fracción II, 39 fracción V, 40 fracciones I, II y X, 43, 44, 47, 51, 53 y 63 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 28, 31 y 33 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

CONSIDERANDO

Que con fecha 2 de diciembre de 1994 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-086-ECOL-1994 "Contaminación atmosférica -especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles". A su vez, la citada Norma fue modificada mediante acuerdo publicado en el Diario Oficial de la Federación el 4 de noviembre de 1997.

Que la citada norma y su modificación fueron expedidas de manera conjunta por las anteriores secretarías de Desarrollo Social, de Energía Minas e Industria Paraestatal y de Comercio y Fomento Industrial, actualmente Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de Energía y de Economía.

Que con fecha 23 de abril de 2003 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Acuerdo por el cual se reforma la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales identificadas con las siglas "ECOL" y "REC NAT" identificándose en lo sucesivo bajo las siglas "SEMARNAT", el cual incluye la citada Norma Oficial Mexicana.

Que con fecha 6 de mayo de 2002 la Secretaría de Economía publicó un aviso de Normas Oficiales Mexicanas que se someten a consulta pública para su revisión quinquenal, encontrándose entre ellas la NOM-086-SEMARNAT-1994, a efecto de que los interesados presentasen sus comentarios dentro de los 60 días, y que cumplido ese plazo no se recibió ningún comentario sobre esta norma.

Que desde que se expidió la citada norma ha habido cambios en los esquemas de producción de Petróleos Mexicanos que incorporan avances en la mejora de la calidad de sus combustibles desde el punto de vista ambiental, que ha dejado de producir la gasolina Nova y produce ahora la denominada Premium, entre otros, lo cual hace necesario modificar la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-1994 para eliminar las Tablas 4 y 5 relativas a la gasolina Nova, incluir especificaciones para la gasolina Premium, simplificar la presentación de las tablas aplicables a todos los combustibles e incluir los cambios que se han dado en las especificaciones.

Que las industrias y vehículos automotores que usan combustibles generan contaminantes cuya emisión produce deterioro en la calidad del aire, lo cual hace necesario mejorar la calidad de los combustibles, la de los procesos de combustión y, en su caso, la de los equipos de control.

Que la definición de especificaciones sobre protección ambiental para los combustibles tiene como objeto disminuir significativamente las emisiones a la atmósfera y debe ser acorde con las características de los equipos y sistemas de combustión que los utilizan en fuentes fijas y en el transporte.



Que para atender los problemas de contaminación del país es necesario mejorar la calidad de los combustibles, en particular en lo que se refiere a su contenido de azufre, para poder incluir en los vehículos los sistemas más avanzados de control de emisiones.

Que en virtud de que el gas natural se encuentra regulado por la Comisión Reguladora de Energía, mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2003, Calidad del gas natural (cancela y sustituye a la NOM-001-SECRE-1997, Calidad del gas natural) publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 2004, para evitar duplicaciones se decidió referir dicha norma en lo relativo a este combustible toda vez que la misma incluye las especificaciones de protección ambiental.

Que en esta Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 se incluyeron, en la Tabla 9, los niveles máximos permisibles en peso de azufre en el combustible líquido denominado gasóleo industrial que se consume por fuentes fijas en la Zona Metropolitana del Valle de México, por lo cual se consideró conveniente con el fin de evitar duplicidades cancelar la NOM-051-SEMARNAT-1993 "Que establece el nivel máximo permisible en peso de azufre, en el combustible líquido gasóleo industrial que se consume por las fuentes fijas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México" publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.

Que la ubicación de la Central Termoeléctrica Valle de México en el Municipio de Acolman, Estado de México hace necesario considerar, para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana, a dicho municipio en el área de influencia de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Que con base en el Acuerdo por el que se Amplía el Pleno de la Comisión Ejecutiva de Coordinación Metropolitana con la Participación de los 28 municipios del Estado de México y las 16 demarcaciones territoriales del Distrito Federal, publicado en la Gaceta Oficial del Distrito Federal del 4 de mayo de 2000, para efectos de esta Norma Oficial Mexicana se considera Zona Metropolitana del Valle de México a esos 28 Municipios y las 16 demarcaciones del Distrito Federal;

Que teniendo en cuenta el contenido de la Norma Mexicana NMX-Z-13, Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas oficiales mexicanas, se simplifica el nombre de esta Norma para quedar como: Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI.- Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.

Que con fecha 29 de julio de 2005 el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales aprobó el Proyecto PROY-NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.- Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental, para que se publicara en el Diario Oficial de la Federación para consulta pública.

Que derivado de las observaciones de la Comisión Federal de Mejora Regulatoria fue necesario modificar el Proyecto antes mencionado lo cual aprobó el citado Comité en la segunda sesión del 2005, realizada el 7 de septiembre del 2005.

Que de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó el 20 de septiembre del 2005 en el Diario Oficial de la Federación, para consulta pública a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales contados a partir de la fecha de su publicación en el Diario Oficial de la Federación, presentaran sus comentarios ante el citado Comité, sito en Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, quinto piso, fraccionamiento Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, código postal 14210 en México, D.F. o al correo electrónico cgarciamoreno@semarnat.gob.mx

Que durante el plazo mencionado la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público para su consulta en el domicilio del Comité antes señalado.

Que de conformidad con lo establecido en el artículo 47 fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al Proyecto de Norma en cuestión, los cuales fueron analizados por el citado Comité realizándose las modificaciones procedentes al Proyecto.

Que cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sesión de fecha 15 de diciembre de 2005 aprobó la Respuesta a



comentarios recibidos en la Consulta Pública y la publicación definitiva de la presente Norma Oficial Mexicana y que las respuestas a comentarios recibidos durante la consulta pública fueron publicados el 11 de enero de 2006.

En virtud de lo antes expuesto, tenemos a bien expedir la siguiente Norma Oficial Mexicana, que tiene por objeto modificar la NOM-086-SEMARNAT-1994 y cancelar la NOM-051-SEMARNAT-1993:

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005,
ESPECIFICACIONES DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES PARA LA PROTECCION AMBIENTAL**

PREFACIO

En la elaboración de esta Norma Oficial Mexicana participaron:

Asociación Mexicana de la Industria Automotriz

Asociación Nacional de la Industria Química

Asociación Nacional de Productores de Autobuses, Camiones y Tractocamiones, A.C.

Comisión Ambiental Metropolitana

Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos

Petróleos Mexicanos

Petróleos Mexicanos

Pemex Refinación

Pemex Gas y Petroquímica Básica

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Dirección General de Autotransporte Federal

Secretaría de Economía

Subsecretaría Normatividad, Inversión Extranjera y Prácticas Comerciales Internacionales

Subsecretaría de Industria

Secretaría de Energía

Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico

Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

Dirección General de Gestión Ambiental del Aire

Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México

Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Coordinación de Asesores del Secretario

Instituto Nacional de Ecología

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental

Dirección General de Energía y Actividades Extractivas

Dirección General de Industria

Dirección General de Fomento Ambiental Urbano y Turístico

Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Contaminantes

Secretaría de Salud

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios

Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Ciencias de la Atmósfera

CONTENIDO

1. Objetivo
2. Campo de aplicación



3. Referencias
4. Definiciones
5. Especificaciones
6. Evaluación de la conformidad
7. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales
8. Bibliografía
9. Observancia de esta Norma

1. Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones sobre protección ambiental que deben cumplir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se comercializan en el país.

2. Campo de aplicación

Esta norma oficial mexicana aplica en todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los responsables de producir e importar los combustibles a que se refiere la presente.

3. Referencias

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2003, Calidad del gas natural (cancela y sustituye a la NOM-001-SECRE-1997, Calidad del gas natural) publicada en el Diario Oficial de la Federación el lunes 29 de marzo de 2004.

4. Definiciones

4.1 Aditivos de combustible: Son compuestos que se agregan a los combustibles para transferirles propiedades específicas, tales como: detergencia, antioxidación y antidetonancia, entre otras. No se incluyen los odorizantes para gas licuado y gas natural.

4.2 Combustibles fósiles líquidos y gaseosos: Los combustibles fósiles líquidos o gaseosos son el gas natural y los derivados del petróleo tales como: gasolinas, turbosina, diesel, combustóleo, gasóleo y gas L.P.

4.3 Responsables: Organismos públicos establecidos en los artículos 1 y 3 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal que realizan actividades para la producción e importación de los combustibles a que se refiere esta Norma.

4.4 Zonas Críticas (ZC): Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana, se consideran zonas críticas las zonas metropolitanas indicadas en los incisos 4.4.1 a 4.4.3 y además, aquellas regiones y centros de población listados en los incisos 4.4.4 a 4.4.9, con alta concentración de actividad industrial, en las cuales el consumo elevado de combustibles impacta la calidad del aire.

4.4.1 Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG): El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Jalisco: Guadalajara, Ixtlahuacán del Río, Tlaquepaque, Tonalá, Zapotlanejo y Zapopan.

4.4.2 Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM): El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Nuevo León: Monterrey, Apodaca, General Escobedo, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Benito Juárez.

4.4.3 Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM): El área integrada por las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal; los siguientes municipios del Estado de México: Atizapán de Zaragoza, Acolman, Atenco, Coacalco, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Valle de Chalco Solidaridad, Chalco, Chicoloapan, Chimalhuacán, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, Jaltenco, La Paz, Melchor Ocampo, Naucalpan de Juárez, Nextlalpan, Nezahualcóyotl, Nicolás Romero, Tecámac, Teoloyucan, Tepotzotlán, Texcoco, Tlalnepantla de Baz, Tultepec, Tultitlán y Zumpango.

4.4.4 Coatzacoalcos-Minatitlán: Municipios de Coatzacoalcos, Minatitlán, Ixhuatlán del Sureste, Cosoleacaque y Nanchital, en el Estado de Veracruz.



4.4.5 Irapuato-Celaya-Salamanca: Municipios de Celaya, Irapuato, Salamanca y Villagrán, en el Estado de Guanajuato.

4.4.6 Tula-Vito-Apasco: Municipios de Tula de Allende, Tepeji de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los Estados de Hidalgo y de México.

4.4.7 El corredor industrial de Tampico-Madero-Altamira: Municipios de Tampico, Altamira y Cd. Madero, en el Estado de Tamaulipas;

4.4.8 El Municipio de Ciudad Juárez en el Estado de Chihuahua;

4.4.9 El área integrada por los Municipios de Tijuana y Rosarito en el Estado de Baja California.

4.5 La Secretaría: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

5. Especificaciones

5.1 Las especificaciones sobre protección ambiental que deben cumplir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos son las establecidas en esta Norma Oficial Mexicana. Las tablas 1 a 6 establecen las especificaciones para las gasolinas, la tabla 7 las del diesel para automotores, embarcaciones y usos agrícolas, la tabla 8 las de la turbosina para aviones, la tabla 9 las de diversos combustibles líquidos para uso doméstico e industrial, la tabla 10 las del gas licuado de petróleo.

5.2 Aditivos y combustibles no especificados en esta Norma.- El responsable antes de utilizar cualquier otro aditivo o combustible no especificado en esta Norma, deberá proporcionar a las autoridades ambientales y de salud información completa sobre el producto que permita evaluar las ventajas ambientales del mismo y demostrar que por su uso no se afectarían los sistemas de control de los equipos o de los vehículos, ni se produce ningún efecto nocivo en la salud de la población, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 49 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

5.3 Combustibles Industriales Líquidos.- En las Zona Críticas (ZC), se dispondrá de al menos un combustible líquido cuyo contenido de azufre no rebasará el 2% en peso. Todos los combustibles de uso industrial que surta el responsable para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), a partir de la entrada en vigor de esta Norma, tendrán un contenido máximo de 0.05 % en peso de azufre. El responsable indicará en las facturas de embarque del combustible, el contenido de azufre, expresado en peso.

5.4 En el caso del gas natural se estará a lo dispuesto por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2003, Calidad del gas natural (cancela y sustituye a la NOM-001-SECRE-1997, Calidad del gas natural) señalada en el numeral 3 de la presente Norma, Referencias.

5.5 Los resultados de los análisis que hace el responsable de los parámetros establecidos en la presente Norma se organizarán a manera de informe semestral conteniendo el promedio mensual ponderado por volumen y la variabilidad de dichos parámetros. Los análisis se realizarán en los centros de producción.

6. Evaluación de la conformidad

6.1 La evaluación de la conformidad se llevará a cabo a solicitud de parte a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, la Procuraduría Federal de Protección al Consumidor o los Organismos de Tercera Parte debidamente acreditados por la entidad de acreditación autorizada y aprobados por la autoridad competente, de acuerdo con lo dispuesto en el "Procedimiento de evaluación de la conformidad genérico" de la Secretaría.

7. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales

Esta Norma Oficial Mexicana no concuerda con ninguna norma o lineamiento internacional, por no existir al momento de la emisión de la misma.

8. Bibliografía

Las últimas dos cifras corresponden al año en que se publicó la última revisión.

ASTM 056-05	Standard Test Method for Flash Point by Tag Closed Tester.
ASTM 086-05	Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products
ASTM 093-02a	Standard Test Method for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester.
ASTM 097 -05a	Standard Test Method for Pour Point of Products.



ASTM 0130-04	Standard Test Method for Detection of Copper Corrosion from Petroleum products by the Copper Strip Tarnish Test.
ASTM 0156-02e	Standard Test Method for Saybolt Color of Petroleum Products (Saybolt Chromometer Method).
ASTM 0240-02	Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.
ASTM D 287-92 (2000)	Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method).
ASTM D 323-99a	Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Reid Method).
ASTM D 0381-04	Standard Test Method for Existing Gum in Fuels by Jet Evaporation.
ASTM 0445-04e2	Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity).
ASTM 0482-03	Standard Test Method for Ash from Petroleum Products.
ASTM 0524-04	Standard Test Method for Ramsbottom Carbon Residue of Petroleum Products
ASTM 0525-05	Standard Test Method for Oxidation Stability of Gasoline (Induction Period Method).
ASTM 0613-05	Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil.
ASTM D 975-00	Standard Specification for Diesel Fuels Oils.
ASTM 0976-04be1	Standard Test Methods for Calculated Cetane index of Distillate Fuels
ASTM D 1094-00	Standard Test Methods for Water Reaction of Aviation Fuels
ASTM D 1266-98(2000)e1	Standard Test Methods for Sulfur in Petroleum Products (Lamp Method)
ASTMD1267-02	Standard Test Method for Vapor Pressure of Liquefied Petroleum (LP) Gases (LP-Gas Method).
ASTM D 1298-99e2	Standard Practice for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method.
ASTM D 1319-03	Standard Test Method for Hydrocarbon Types in Liquid Petroleum Products by Fluorescent Indicator Adsorption.
ASTM D 1322-97(2002)	Standard Test Method for Smoke Point of Aviation Turbine Fuels.
ASTM D 1405-01	Standard Test Method for Estimation of Net Heat of Combustion of Aviation Fuels.
ASTM D 1500-04a	Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale).
ASTM D 1655-05	Standard Specification for Aviation Turbine Fuels
ASTM D 1657-02	Standard Test Method for Density or Relative Density of Light Hydrocarbons by Pressure Thermohydrometer
ASTM D 1796-04	Standard Test Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure).
ASTM D 1826-94 (2003)	Standard Test Method for Calorific (Heating) Value of Gases in Natural Gas Range by Continuous Recording Calorimeter.
ASTM D 1837-02a	Standard Test Method for Volatility of Liquefied Petroleum (LP) Gases.
ASTM D 1838-05	Standard Test Method for Copper Corrosion by Liquefied Petroleum (LP) Gases.
ASTM D 1840-03	Standard Test Method for Naphthalene Hydrocarbons in Aviation Turbine Fuels by Ultraviolet Spectrophotometry.
ASTMD1945-03	Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography.



ASTM D 2158-04	Standard Test Method for Residues in Liquefied Petroleum (LP) Gases.
ASTM D 2161-05	Standard Test Method for Practice for Conversion of Kinematic Viscosity to Saybolt Universal Viscosity or to Saybolt Furol Viscosity.
ASTM D 2276-00	Standard Test Method for Particulate Contaminant in Aviation Fuel by Line Sampling.
ASTM D 2386-05	Standard Test Method for Freezing Point of Aviation Fuels.
ASTM D 2500-05	Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Oils.
ASTM D 2533-99	Standard Test Method for Vapor-Liquid Ratio of Spark-Ignition Engine Fuels
ASTM D 2598-02	Standard Practice for Calculation of Certain Physical Properties of Liquefied Petroleum (LP) Gases from Compositional Analysis.
ASTM D 2622-03	Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by X-Ray Spectrometry.
ASTM D 2699-04a	Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel.
ASTM D 2700-04a	Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-ignition Engine Fuel.
ASTM D 2709-06 (2001)e1	Standard Test Method for Water and Sediment in Middle Distillate Fuels by Centrifuge.
ASTM D 2713-91	Standard Test Method for Dryness of Propane (Valve Freeze Method).
ASTM D 3227-04a	Standard Test Method for Mercaptan Sulfur in Gasoline, Kerosene, Aviation Turbine and Distillate Fuels (Potentiometric Method).
ASTM D 3228-03	Test Method for Total Nitrogen in Lubricating Oils and Fuel Oils by Modified Kjeldahl Method
ASTM D 3231-99	Standard Test Method for Phosphorus in Gasoline
ASTM D 3241-98	Standard Test Method for Thermal Oxidation Stability of Aviation Turbine Fuels JFTOT Procedure).
ASTM D 3242-98	Standard Test Method for Acidity in Aviation Turbine Fuel.
ASTM D 3279-97	Standard Test Method for n-Heptane Insolubles
ASTM D 3588-98(2003)	Standard Practice for Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density (Specific Gravity) of Gaseous Fuels
ASTM D 3606-04a	Standard Test Method for the Determination of Benzene and Toluene in Finished Motor and Aviation Gasoline by Gas Chromatography
ASTM D 3828-05	Standard Test Methods for Flash Point by Small Scale Closed Tester.
ASTM D 3948-04	Standard Test Methods for Determining Water Separation Characteristics of Aviation Turbine Fuels by Portable Separometer.
ASTM D 4052-96 (2002)e1	Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter.
ASTM D 4294-03	Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy.
ASTM D 4468-85 (2000)	Standard Test Method for Total Sulfur in Gaseous Fuels by Hydrogenolysis and Rateometric Colorimetry.
ASTM D 4809-95	Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method)
ASTM D 4814-04be1	Standard Test Method for Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel
ASTM D 4815-00 (2005)	Standard Test Method for the determination of MTBE, ETBE, TAME, DIPE, TERTIARY-AMIL ALCOHOL
ASTM D 4468-85 (2000)	Standard Test method for Estimation of Net and Gross Heat of Combustion of Burner and Diesel fuels.



ASTM D 4952-02	Standard Test Method for Qualitative Analysis for Active Sulfur Species in Fuels and Solvents (Doctor Test).
ASTM D 4953-99a	Standard Test Method for Vapor Pressure of Gasoline and Gasoline Oxygenate Blends (Dry Method).
ASTM D 5188-04	Standard Test Method for Vapor-Liquid Ratio Temperature Determination of Fuels (Evacuated Chamber Method).
ASTM D 5190-99	Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Automatic Method).
ASTM D 5453-05	Standard Test Method for the Determination of Total Sulfur in Light Hydrocarbons.
ASTM D 5500-98 (2005)e1	Standard Test Method for Vehicle Evaluation of Unleaded Automotive Spark-Ignition Engine Fuel for Intake Valve Deposit Formation.
ASTM D 5598-01	Standard Test Method for Evaluating Unleaded Automotive Spark-Ignition Engine Fuel for Electronic Port Fuel Injector Fouling.
ASTM D 5863-00a (2005)	Standard Test Method for Determination of Nickel, Vanadium, Iron, and Sodium in Crude Oils and Residual fuels by Flame Atomic Absorption Spectrometry.

9. Observancia de esta Norma

9.1 La Secretaría, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y la Secretaría de Economía por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Consumidor vigilarán el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana, en los centros de producción y distribución, y en los centros de comercialización del producto, respectivamente.

9.2 De conformidad con la LFMN las muestras podrán recabarse de los establecimientos en que se realice el proceso o de aquellos en que se comercializa el producto, previa notificación al responsable.

9.3 Para tal fin, las autoridades se podrán auxiliar por los organismos de tercera parte, en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

9.4 El incumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana será sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y los demás ordenamientos jurídicos aplicables.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor 60 días después de su publicación como Norma Oficial Mexicana en el Diario Oficial de la Federación.

SEGUNDO.- La entrada en vigor de las especificaciones de azufre a que se refieren las Tablas 5 y 7 de la presente Norma Oficial Mexicana, estará sujeta a que el Congreso de la Unión apruebe el proyecto multianual de Calidad de Combustibles (Clave 0518TZZ0001), incluido en el Presupuesto de Egresos de la Federación 2006, Tomo IV.

TERCERO.- La Secretaría podrá prorrogar hasta 180 días las fechas previstas para cumplir con las especificaciones de azufre a que se refieren las Tablas 5 y 7 de la presente Norma Oficial Mexicana, cuando los responsables del cumplimiento de la misma demuestren a la Secretaría, dentro de los siguientes 30 días después de la fecha de publicación de la Norma, que no se pueden cumplir dichas especificaciones en las fechas referidas, por causas ajenas a su voluntad, asociadas al suministro de combustibles.

CUARTO.- A partir del 1 de enero de 2009 la Secretaría únicamente reconocerá los informes de resultados, dictámenes o certificados expedidos por laboratorios de pruebas, unidades de verificación u organismos de certificación acreditados y aprobados de conformidad con las disposiciones de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.



QUINTO.- La presente Norma Oficial Mexicana modifica a la NOM-086-SEMARNAT-1994 Contaminación atmosférica.- Especificaciones de protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles y su modificación publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 2 de diciembre de 1994 y el 4 de noviembre de 1997, respectivamente.

SEXTO.- La presente Norma Oficial Mexicana cancela la NOM 051-SEMARNAT-1993 que establece el nivel máximo permisible en peso de azufre, en el combustible líquido gasóleo industrial que se consume por las fuentes fijas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.

SEPTIMO.- En tanto no se publiquen las normas oficiales mexicanas que establecen los métodos de prueba, se estará a lo establecido en el título tercero de la LFMN y el Título Cuarto del Reglamento de dicha Ley.

OCTAVO.- Provéase la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el Diario Oficial de la Federación.

México, Distrito Federal, a los quince días del mes de diciembre de dos mil cinco.- El Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, **José Ramón Ardavín Ituarte.-** Rúbrica.- El Subsecretario de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, **Carlos Alberto Garza Ibarra.-** Rúbrica.- El Director General de Normas de la Secretaría de Economía, **Miguel Aguilar Romo.-** Rúbrica.

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE PRESION DE VAPOR Y TEMPERATURAS DE DESTILACION DE LAS GASOLINAS SEGUN LA CLASE DE VOLATILIDAD

Propiedad	Unidad	CLASE DE VOLATILIDAD (1)			
		AA	A	B	C
Presión de Vapor Reid (2)	kPa (lb/pulg ²)	45 a 54 (6.5 a 7.8)	54 a 62 (7.8 a 9.0)	62 a 69 (9 a 10.0)	69 a 79 (10 a 11.5)
Temperatura máxima de destilación del 10%	°C(3)	70	70	65	60
Temperatura de destilación del 50%	°C	77 a 121	77 a 121	77 a 118	77 a 116
Temperatura máxima de destilación del 90%	°C	190	190	190	185
Temperatura máxima de ebullición final	°C	225	225	225	225
Residuo de la destilación, valor máximo	% vol	2	2	2	2

OBSERVACIONES:

- (1) Las clases de volatilidad mencionadas en la Tabla 1 corresponden a las de la especificación para combustible de motores de encendido por chispa (ASTM D 4814-04be1). La volatilidad de un



combustible se especifica con una designación alfanumérica que utiliza una letra de la Tabla 1 y un número de la Tabla 2.

- (2) Se especifica un intervalo para la presión de vapor, a diferencia de la especificación para combustible de motores de encendido por chispa, que sólo establece un valor máximo para cada clase de volatilidad (ASTM D 4814-04be1). La determinación de la presión de vapor se efectúa de acuerdo al método Reid o el método Presión de vapor de gasolina o mezclas oxigenadas de gasolina (Método Seco) (ASTM 0323-99^a)
- (3) Las temperaturas de destilación de todas las tablas de esta NOM están indicadas en °C, normalizadas a una presión de 101.3 kPa (760 mm Hg) y se determinan mediante el método de Destilación para Productos de petróleo. (ASTM 086-05) En el numeral 8. Bibliografía se pueden encontrar los métodos de prueba ASTM indicados en las Tablas.

TABLA 2. ESPECIFICACIONES PARA PROTECCION CONTRA SELLO DE VAPOR

Clase de Protección contra Sello de Vapor	1	2	3	4	5
Temperatura (°C) para crear una relación vapor/líquido igual a 20, determinada con base al método Proporción vapor-líquido de combustibles para motores de encendido por chispa. (ASTM D 2533-99)	60	56	51	47	41

TABLA 3. ZONAS GEOGRAFICAS DE DISTRIBUCION DE GASOLINA

Zona	Descripción (1)
Noreste	CE Cadereyta, TAD: Cd. Juárez, Chihuahua, Durango, Gómez Palacio, Matehuala, S.L.P., Santa Catarina, Sat. Monterrey, N. Laredo, Reynosa, Sabinas, Saltillo, Parral.
Centro-NE	TAD Cd. Madero, Cd. Mante, Cd. Valles, Cd. Victoria, Poza Rica, San Luis Potosí
Sureste	Campeche, Escamela, Jalapa, Mérida, TAD Pajaritos, Ver., Perote, Suptcia. Veracruz, CE Progreso, Puebla, Tehuacán, Tierra Blanca, Veracruz, Villahermosa, Tabasco.
Bajío	Aguascalientes, El Castillo, El Salto, Irapuato, León, Morelia, Uruapan, Zacatecas, Zamora, Tepic.
Centro	TAD Cuautla, Cuernavaca, Iguala, Pachuca, Toluca, Celaya, Querétaro. TAD 18 de Marzo Azcapotzalco, TS. Oriente A., TS Sur Barranca del Muerto, TS Norte S. Juan Ixhuatpec, Tula.
Pacífico	Z1 Acapulco, Colima, Lázaro Cárdenas, Manzanillo Term., Oaxaca, Oax., Salina Cruz, Tapachula, Tuxtla Gutiérrez Z2 Culiacán, Mazatlán Z3 Guamúchil Suptcia. V., Guaymas, La Paz, Navojoa, Topolobampo. Z4 Cd. Obregón, Ensenada, Hermosillo, Magdalena, Mexicali, Nogales, Rosarito (Tijuana).

(1) CTT (Centro de Transportación Terrestre) CE (Centro Embarcador)

TAD (Terminal de Almacenamiento y Distribución) TS (Terminal Satélite)



TABLA 4. CLASE DE VOLATILIDAD DE LAS GASOLINAS DE ACUERDO A LAS ZONAS GEOGRAFICAS Y A LA EPOCA DEL AÑO (1)

MES	Noreste	Centro-Noreste	Sureste	Bajo	Pacífico				Centro	ZMVM y ZMG	Monterrey
					Z1	Z2	Z3	Z4			
Enero	C-3	C	B	C	B	B	B	B	C	AA-3	C
Febrero	C-3	C	B	C	B	B	B	B	C	AA-3	C
Marzo	B-2	B	B	B	B	B	B	B	B	AA-2	B
Abril	B-2	B	B	B	B	B	B	B	B	AA-2	B
Mayo	B-2	B	A	B	A	B	B	B	B	AA-2	B
Junio	A-1	A	A	A	A	A	A	A	A	AA-2	B
Julio	A-1	A	A	A	A	A	A	A	A	AA-3	B
Agosto	A-1	A	A	A	A	A	A	A	A	AA-3	B
Septiembre	B-2	B	A	B	A	A	A	A	B	AA-3	B
Octubre	B-2	B	B	B	B	B	B	B	B	AA-3	C
Noviembre	C-3	B	B	C	B	B	B	B	C	AA-3	C
Diciembre	C-3	C	B	C	B	B	B	B	C	AA-3	C

En esta Tabla, A debe leerse como A-1, B como B-2, C como C-3, tal como se indica para la zona Noreste.

TABLA 5. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LAS GASOLINAS(1)

NOMBRE DEL PRODUCTO:			Pemex Premium	Pemex Magna
Propiedad	Unidad	Método de Prueba (7)		
Peso específico a 20°C		Procedimiento para densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad de petróleo crudo o productos de petróleo líquido por hidrómetro. (ASTM D 1298-99e2)	Informar	Informar
Prueba Doctor o Azufre Mercaptánico	ppm PESO	Análisis cualitativo de especies activas de azufre en combustibles y solventes (Prueba Doctor). (ASTM D 4952-02) Determinación de azufre mercaptánico en gasolina, queroseno, combustibles destilados para aviones de turbina (Método potenciométrico). (ASTM D 3227-04 ^a)	Negativa 20 máximo	Negativa 20 máximo
Corrosión al Cu, 3 horas a 50°C		Detección de corrosión por cobre en productos de petróleo por la prueba de mancha de tira de cobre. (ASTM 0130-04)	Estándar # 1 máximo	Estándar # 1 máximo



Goma preformada	g/l	Gomas existentes en combustibles por evaporación por chorro. (ASTM 0381-04)	0.040 máximo	0.040 máximo
Gomas no lavadas	g/l	Gomas existentes en combustibles por evaporación por chorro. (ASTM 0381-04)	0.7 máximo	0.7 máximo
Azufre,	ppm EN PESO	Determinación de S en productos de petróleo por espectroscopia de rayos X de fluorescencia por dispersión de energía. (ASTM D 4294-03) Determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros (ASTM D 5453-05)	250 promedio 300 máximo Octubre 2006: 30 promedio / 80 máximo	300 promedio 500 máximo ZMVM, ZMG, ZMM Octubre 2008: 30 promedio / 80 máximo Resto del País (2) Enero 2009: 30 promedio/ 80 máximo
Periodo de inducción	minutos	Estabilidad de oxidación de gasolina (Método de periodo de inducción) (ASTM 0525-05)	300 mínimo	300 mínimo
Número de octano (RON)		Número de octano Research de combustible para motores de encendido por chispa (ASTM D 2699-04a)	95 mínimo	Informar
Número de octano (MON)		Número de octano Motor de combustibles para motores de encendido por chispa (ASTM D 2700-04 ^a)	Informar	82 mínimo
Indice de octano (RON+MON)/2		(ASTM D 2699-04a) (ASTM D 2700-04 ^a)	92 mínimo	87 mínimo
Contenido de fósforo	g/l	Fósforo en gasolina (ASTM D 3231-99)	0.001 máximo	0.001 máximo
Color ⁽³⁾		Visual	Informar (4)	rojo (5)
Aditivo detergente dispersante (6)	mg/kg	Evaluación de combustible automotriz sin plomo en inyectores para motores de encendido por chispa: incrustaciones en el puerto electrónico del inyector de combustible (ASTM D 5598-01) Evaluación de combustible automotriz sin plomo para motores de encendido por chispa: formación de depósitos en la válvula de admisión. (1) (ASTM D 5500-98 (2005)e1)	Según aditivo, en la cantidad que permita que el combustible pase las pruebas indicadas de restricción de flujo en los inyectores y de formación de depósitos en las válvulas de admisión.	

OBSERVACIONES:

- (1) Las especificaciones aplican a centros de producción.
- (2) Para esta Tabla, se considera Resto del País toda la extensión del territorio nacional excluyendo las Zonas Metropolitanas del Valle de México, de Guadalajara y de Monterrey.
- (3) Para fines de comparación se colocan la muestra tipo y la gasolina en botellas de 120 ml (aproximadamente 4 onzas).
- (4) No se agrega anilina ni otro colorante a la gasolina Pemex Premium.
- (5) El color rojo de la gasolina, logrado con 2 mg de anilina por cada litro de gasolina debe igualar al de una muestra patrón que se prepara en solución acuosa como sigue:

Compuesto

Concentración



- (6) Actualmente se utiliza el aditivo IMP DG-15 que efectivamente mantiene los niveles de depósitos establecidos en los métodos de prueba indicados.
- (7) En la columna de Método de Prueba de esta Tabla y las siguientes se incluye la clave del método de prueba correspondiente de la ASTM (American Society for Testing of Materials), en tanto se expiden las normas oficiales mexicanas o normas mexicanas correspondientes. La cita completa se encuentra en el numeral 8. Bibliografía

TABLA 6. ESPECIFICACIONES ADICIONALES DE GASOLINAS POR REGION

			ZMVM	ZMG	ZMM	Resto del País (1)	
Contenido máximo de:	Unidad	Método de prueba	Premium y Magna			Premium	Magna
Aromáticos	% vol	Tipos de hidrocarburos en productos líquidos de petróleo por absorción de indicador fluorescente (ASTM D 1319-03)	25	35	35	35	Informar
Olefinas	% vol	Tipos de hidrocarburos en productos líquidos de petróleo por absorción de indicador fluorescente (ASTM D 1319-03)	10	12.5	12.5	15	Informar
Benceno	% vol	Determinación de benceno y tolueno en gasolina terminada para uso en motores y aviación por cromatografía de gases (ASTM D 3606-04 ^a)	1	1	1	2	3
Oxígeno (2)(3)	% peso, máximo	Determinación de MTBE, ETBE TAME, DIPE y de Acohol teramilico (ASTM D 4815-00 (2005))	2.7	2.7	2.7	2.7	No aplica
BTX	% vol	Determinación de benceno y tolueno en gasolina terminada para uso en motores y aviación por cromatografía de gases (ASTM D 3606-04 ^a)	Informar				

OBSERVACIONES

- (1) Para esta Tabla, se considera Resto del País toda la extensión del territorio nacional excluyendo las Zonas Metropolitanas del Valle de México, de Guadalajara y de Monterrey.
- (2) Informar además el tipo de compuesto oxigenante empleado y la concentración de oxígeno en la gasolina, expresada en por ciento en peso.
- (3) Durante el periodo invernal (noviembre a marzo) se requiere que las gasolinas comercializadas en Ciudad Juárez presenten un contenido de oxígeno máximo de 2.7% en peso.

TABLA 7. ESPECIFICACIONES DEL DIESEL(4)

NOMBRE DEL PRODUCTO:			PEMEX DIESEL	DIESEL(1)
Propiedad	Unidad	Método de prueba		



Peso específico a 20°C	-	Densidad, densidad relativa (gravedad específica o gravedad de petróleo crudo y productos líquidos de petróleo por el método hidrométrico). (ASTM D 1298-99e2)	informar	informar
Temperaturas de destilación: Temp. inicial de ebullición: el 10 % destila a el 50 % destila a el 90 % destila a Temp. final de ebullición	°C	Destilación de productos de petróleo. (ASTM 086-05)	informar 275 máximo informar 345 máximo informar	- informar - 350 máximo -
Temperatura de inflamación	°C	Temperatura de inflamabilidad: Prueba Pensky-Martens de copa cerrada (ASTM 093-02 ^a)	45 mínimo	60 mínimo
Temperatura de escurrimiento	°C	Punto de fluidez de productos (ASTM 097 -05a)	Marzo a octubre: 0°C máximo; Noviembre a febrero: -5°C máximo	
Temperatura de nublamiento	°C	Punto de enturbamiento de combustibles de petróleo (ASTM D 2500-05)	informar ⁽²⁾	informar
Número de cetano	-	Número de cetano del diesel (ASTM 0613-05)	48 mínimo	-
Índice de cetano		Cálculo del índice de cetano de combustibles destilados (ASTM 0976-04be1)	48 mínimo	40 mínimo
Azufre total	ppm peso	Determinación de azufre en productos de petróleo por espectroscopia de rayos X de fluorescencia por dispersión de energía. (ASTM D 4294-03) Determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros. (ASTM D 5453-05)	500 máximo Zona Fronteriza Norte ⁽⁵⁾ Enero 2007: 15 máximo ZMVM, ZMG, ZMM Enero 2009: 15 máximo Resto del País Septiembre 2009: 15 máximo	5000 máximo
Corrosión al Cu, 3 horas a 50°C	-	Detección de corrosión por cobre en productos de petróleo	estándar # 1 máximo	estándar # 2 máximo



		por la prueba de mancha de tira de cobre (ASTM 0130-04)		
Residuos de carbón (en 10% del residuo)	% peso	Residuos de carbón Ramsbottom de productos de petróleo. (ASTM 0524-04)	0.25 máximo	0.25 máximo
Agua y sedimento	% vol	Agua y sedimento en combustibles de destilación media por centrifugado (ASTM D 2709-06 (2001)e1)	0.05 máximo	0.05 máximo
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (cálculo de viscosidad dinámica) (ASTM 0445-04e2)	1.9 a 4.1	1.9 a 4.1
Cenizas	% peso	Cenizas en productos de petróleo (ASTM 0482-03)	0.01 máximo	0.01 máximo
Color		Color de productos de petróleo/visual (ASTM D 1500-04 ^a)	2.5 máximo	Morado
Contenido de aromáticos	% vol	Tipos de hidrocarburos en productos líquidos de petróleo por absorción de indicador fluorescente. (ASTM D 1319-03)	30 máximo	–
Lubricidad ⁽³⁾	micrones	HFRR Test (ISO 12156)	520 máximo	
HAPS	% vol		Informar	

(1) Producto para motores a diesel para servicio agrícola y marino. No debe utilizarse en motores a diesel para uso automotriz.

(2) La temperatura máxima debe ser menor o igual que la temperatura ambiente mínima esperada.

(3) El valor de 520 máximo es aplicable sólo para diesel de importación. Para el diesel de producción nacional la especificación de lubricidad entrará en vigor considerando el mismo calendario establecido para la especificación de azufre.

(4) Las especificaciones aplican a centros de producción



(5) Zona Fronteriza Norte: Se refiere a la Zona Noreste y Pacífico Z4 definidas en la Tabla 3 y a la Terminal de Almacenamiento y Distribución de Ciudad Madero.

TABLA 8.- ESPECIFICACIONES DE LA TURBOSINA.

Propiedad	Unidad	Método de prueba.	Especificación
Peso específico a 20°C	kg/l	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad de petróleo crudo y productos líquidos de petróleo por el método hidrométrico. (ASTM D 1298-99e2)	0.772 a 0.837
Gravedad específica	°API	Gravedad API de petróleo crudo y productos de petróleo (Método por hidrómetro) (ASTM D 4052-96(2002)e1) (ASTM D 287-92 (2000))	37 a 51
Apariencia		Visual	Brillante y clara
Temperatura de destilación del 10%	°C	Destilación de productos de petróleo (ASTM 086-05)	205 máximo
Temperatura de destilación del 50%	°C		informar
Temperatura de destilación del 90%	°C		300 máximo
Temperatura final de ebullición Residuo de la destilación	% vol.		1.5 máximo
Pérdida de la destilación	% vol.		1.5 máximo
Temperatura de inflamación (1)	°C	Temperatura de inflamabilidad:	38 mínimo
Temperatura de congelación	°C	Prueba Penski-Martens de copa cerrada (ASTM 056-05) Punto de congelación para combustibles de aviación (ASTM D 2386-05)	-47 máximo
Valor calorífico (2)	MJ/kg	Estimación del calor neto de combustión para combustibles para aviación. ASTM D 4809-95 Calor de combustión de combustibles fósiles líquidos por calorímetro de bomba (Método de precisión) (ASTM D 4809-95)	42.8 mínimo (equivalente a 18,400 BTU/lb)
Acidez total	mg	Acidez en combustibles para turbinas de aviación. (ASTM D 3242-98) Tipos de hidrocarburos en productos líquidos de petróleo por indicador fluorescente de absorción. (ASTM D 1319-03)	0.1 máximo
Aromáticos	KOH/g % vol.		25 máximo
Azufre total	ppmp	Determinación de azufre en productos de petróleo por espectroscopia de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía. (ASTM D 4294-03) (ASTM D 5453-05)	3000 máximo
Azufre mercaptánico (3)	ppmp	Azufre mercaptánico en gasolina, queroseno, combustibles para turbinas de aviación y combustibles destilados (Método potenciométrico) (ASTM D 3227-04 ^a)	30 máximo
Prueba Doctor		Análisis cualitativo para especies activas de azufre en combustibles y solventes	negativa



		(Prueba Doctor) (ASTM D 4952-02)	
Viscosidad cinemática a -20 °C	cSt	Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (Cálculo de viscosidad dinámica) (ASTM 0445-04e2)	8 máximo
Estabilidad térmica (4): Caída de presión Depósitos en tubo precalentador,	kPa (mm Hg)	Estabilidad de la oxidación térmica de combustibles para turbinas de aviación (Procedimiento JFTOT) (ASTM 0445-04e2) Visual	3.3 (25) máximo menor a código 3
Aditivos: Inhibidor antioxidante (5) Deactivador metálico (6)	mg/l mg/l		24 máximo 5.7 máximo
Punto de humo ó Punto de humo y Naftalenos (7) Partículas contaminantes	mm mm, vol mg/l	Temperatura de punto de humo de combustibles para turbinas para aviación o Determinación de naftalenos en combustibles para turbinas de aviación por espectrofotometría ultravioleta. (ASTM D 1322-97(2002)) (ASTM D 1840-03) Partículas contaminantes en combustibles de aviación por muestreo por líneas. (ASTM D 2276-00)	25 mínimo 20 mínimo y 3 máximo 0.8 máximo
Corrosión al Cu, 2 horas a 100°C	–	Detección de corrosión al cobre de productos de petróleo por prueba de mancha en tira de cobre. (ASTM 0130-04)	Estándar 1, máximo
Goma preformada Reacción al agua: Separación Interfase	mg/l – –	Gomas existentes en combustibles por evaporación por chorro. (ASTM 0381-04) Reacción al agua en combustibles para aviación. (ASTM D 1094-00)	70 máximo 2 máximo 1-b máximo
Índice modificado de separación de agua		Determinación de características de separación de agua de combustibles para turbinas de aviación por separador portátil(8) (ASTM D 3948-04)	90 mínimo
HAPS	% vol		Informar

OBSERVACIONES:

- (1) La temperatura de inflamación será 42°C mínimo, para clientes de exportación que así lo soliciten.
- (2) El valor calorífico se calcula en MJ/kg usando las tablas y las ecuaciones descritas en el Método de Prueba Estimación del calor neto de combustión para combustibles para aviación.
- (3) Si hay discrepancia entre el resultado de la prueba Doctor y el de la de azufre mercaptánico, prevalecerá el de ésta.
- (4) La prueba de estabilidad térmica (ASTM D 3241-98) debe efectuarse a 260°C, pero puede llevarse a cabo a 245°C en ambos casos la prueba se efectúa durante 2.5 horas. Es conveniente pero no obligatoria, la determinación del depósito en el tubo precalentador por el método de densidad óptica.
- (5) Solamente se podrá usar los siguientes antioxidantes: a) N,N-diisopropil-parafenilen-diamina; b) 75% mínimo 2-6-diterbutil-fenol más 25% máximo de ter y triterbutil-fenol; c) 72% mínimo 2-4-dimetil-6-terbutil-fenol más 28% máximo de mono-metil y dimetil-terbutilfenol; d) 55% mínimo 2-4-dimetil-6-terbutil-fenol más 45% máximo de ter y diterbutilfenol.



- (6) Solamente se podrá usar el compuesto N,N di-salicilideno, 1,2-propanodiamina.
- (7) Si el punto de humo tiene un valor entre 20 y 18 mm y el contenido de naftalenos es menor de 3%, se puede comercializar el producto notificando al comprador dentro de los 90 días de la fecha de envío, a no ser que se acuerden otras condiciones.
- (8) Este método se utilizará sólo en caso de discrepancia de resultados y predominará sobre el método de prueba Reacción al agua en combustibles para aviación. (ASTM D 1094-00)

TABLA 9.- ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES INDUSTRIALES LIQUIDOS ⁽¹⁾

COMBUSTIBLE			DIESEL INDUS- TRIAL	GASOLEO DOMES- TICO	COM- BUS- TOLEO
Propiedad	Unidad	Método de prueba			
Peso específico 20°C	-	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad de petróleo crudo y productos líquidos de petróleo por Método de hidrómetro (ASTM D 1298-99e2)	Informar	-	-
Temperatura de inflamación	°C	Temperatura de inflamabilidad: Prueba Pensky-Martens, de copa cerrada. (ASTM 093-02 ^a)	52 mínimo	41 mínimo	66 mín
Temperatura de escurrimiento	°C	Punto de fluidez de productos. (ASTM 097 -05a)	10 máximo		15 máx
Destilación (90% destila a)	°C	Destilación de productos de petróleo. (ASTM 086-05)		350 máx	
Viscosidad cinemática	cSt	Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (Cálculo de viscosidad dinámica). (ASTM 0445-04e2)	1.9 a 5.8 a 40°C		1008 a 1166 a 50°C
Azufre	% peso (ppmP)	Azufre en productos de petróleo por espectroscopia de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía. (ASTM D 4294-03) Determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros. (ASTM D 5453-05)	0.5 (5000 máx) 0.05 máximo(2) (500 máx)	0.05 máximo (500 máx)	4 máximo
Nitrógeno	ppm peso	Nitrógeno total en aceites lubricantes y en combustibles líquidos (ASTM D 3228-03)			Informar
Vanadio, níquel, hierro, cromo	ppm peso	Determinación de níquel, vanadio, hierro y sodio en petróleos crudos y combustibles residuales por espectrometría de absorción atómica con detector de flama. (ASTM D 5863-00a (2005))	-	-	Informar
Poder Calorífico	MJ/kg	Estimación de calor neto y bruto de combustión de		-	40 mínimo



		combustibles diesel y para quemadores			
Asfaltenos (Insolubles en nC7)	% peso	Determinación de insolubles en n-heptano. (ASTM D 3279-97)	-	-	informar
Color	-	Color de productos de petróleo (ASTM D 1500-04a).	5.0 máximo	(3)	
Agua y Sedimento	% volumen	Agua y sedimentos en combustibles de destilación media por centrifugado. (ASTM D 2709-06 (2001)e1)	0.05 máximo	-	1 máximo

OBSERVACIONES:

- (1) Estos combustibles se usarán únicamente en procesos de combustión a fuego directo y no se deberán usar en motores a diesel para servicio automotriz, agrícola ni en embarcaciones.
- (2) Límite aplicable al diesel industrial para la ZMVM.
- (3) Igual o menor al estándar preparado correspondiente a 10 mg de anilina morada en un litro del producto base.

TABLA 10.- ESPECIFICACIONES DEL GAS LICUADO DE PETROLEO (GAS LP)

Propiedad	Unidad	Método de Prueba	Resto del País (1)	ZMVM
Presión de vapor en exceso a la atmosférica a 37.8°C	kPa (lb/pulg ²)	Presión de vapor de gases licuados de petróleo (Método gas-LP) Procedimiento para el cálculo de ciertas propiedades físicas de gases licuados de petróleo por análisis de composición. (ASTM D 1267-02)	688 (100) mínimo 1379 (200) máximo	896 (130) mínimo 1379 (200) máximo
Temperatura máxima de destilación del 95%	°C	Volatilidad de gases licuados de petróleo (LP) (ASTM D 1837-02 ^a)	2	2
Composición: Etano Propano n-butano + iso-butano Pentano y más pesados Olefinas totales	% vol	Análisis de gases licuados de petróleo (LP) y concentrados de propano por cromatografía de gases. (ASTM D 2163-91(96))	2.5 máximo - - 2 máximo -	2.5 máximo 60 mínimo 40 máximo 2 máximo 2 máximo
Residuo de la evaporación de 100 ml	ml	Residuos en gases licuados de petróleo (LP). (ASTM D 2158-04)	0.05 máximo	0.05 máximo
Peso específico a 15.6°C	kg/dm ³	Densidad o densidad relativa de hidrocarburos ligeros por	informar	0.504 a 0.54



		termohidrómetro de presión. (ASTM D 1657-02) (ASTM D 2598-02)		
Corrosión de placa de cobre, 1 hora a 37.8°C		Corrosión de cobre por gases licuados de petróleo (LP) (ASTM D 1838-05)	Estándar no. 1 máximo	Estándar no. 1 máximo
Azufre total	ppm (en peso)	Azufre total en combustibles gaseosos por hidrogenólisis y colorimetría con medidor de relaciones (logómetro) (ASTM D 4468-85 (2000)).	140 máximo	140 máximo
Agua libre	-	Visual y Método estándar para la sequedad del propano (Método de válvula congelada) (ASTM D 2713-91)	Nada	Nada

OBSERVACIONES:

- (1) Para esta tabla únicamente, se considera Resto del País toda la extensión territorial nacional excluyendo la ZMVM.
- (2) La verificación de las especificaciones de gas L.P. deberá realizarse en los centros de distribución, donde se realiza el ajuste de calidad.
- (3) El gas licuado que se distribuye al consumidor deberá ser odorizado por razones de seguridad.



**ANEXO B. TITULO XV DE LA ENERGY POLICY ACT 2005 (EPACT05):
REGULACIÓN DEL USO DE ETANOL Y COMBUSTIBLES AUTOMOTORES**

TITLE XV--ETHANOL AND MOTOR FUELS

Subtitle A--General Provisions

SEC. 1501. RENEWABLE CONTENT OF GASOLINE.

(a) In General.--Section 211 of the Clean Air Act (42 U.S.C. 7545) is amended--

- (1) by redesignating subsection (o) as subsection (r); and
- (2) by inserting after subsection (n) the following:

``(o) Renewable Fuel Program.--

``(1) Definitions.--In this section:

``(A) Cellulosic biomass ethanol.--The term 'cellulosic biomass ethanol' means ethanol derived from any lignocellulosic or hemicellulosic matter that is available on a renewable or recurring basis, including--

- ``(i) dedicated energy crops and trees;
- ``(ii) wood and wood residues;
- ``(iii) plants;
- ``(iv) grasses;
- ``(v) agricultural residues;
- ``(vi) fibers;
- ``(vii) animal wastes and other waste materials; and
- ``(viii) municipal solid waste.

The term also includes any ethanol produced in facilities where animal wastes or other waste materials are digested or otherwise used to displace 90 percent or more of the fossil fuel normally used in the production of ethanol.

``(B) Waste derived ethanol.--The term 'waste derived ethanol' means ethanol derived from

- ``(i) animal wastes, including poultry fats and poultry wastes, and other waste materials; or
- ``(ii) municipal solid waste.

``(C) Renewable fuel.--

``(i) In general.--The term 'renewable fuel' means motor vehicle fuel that--

``(I)(aa) is produced from grain, starch, oilseeds, vegetable, animal, or fish materials including fats, greases, and oils, sugarcane, sugar beets, sugar components, tobacco, potatoes, or other biomass; or

``(bb) is natural gas produced from a biogas source, including a landfill, sewage waste treatment plant, feedlot, or other place where decaying organic material is found; and

(II) is used to replace or reduce the quantity of fossil fuel present in a fuel mixture used to operate a motor vehicle.

``(ii) Inclusion.--The term 'renewable fuel' includes--

``(I) cellulosic biomass ethanol and waste derived ethanol'; and

``(II) biodiesel (as defined in section 312(f) of the Energy Policy Act of 1992 (42 U.S.C. 13220(f))) and any blending components derived from renewable fuel (provided that only the renewable fuel portion of any such blending



component shall be considered part of the applicable volume under the renewable fuel program established by this subsection).

“(D) Small refinery.--The term ‘small refinery’ means a refinery for which the average aggregate daily crude oil throughput for a calendar year (as determined by dividing the aggregate throughput for the calendar year by the number of days in the calendar year) does not exceed 75,000 barrels.

“(2) Renewable fuel program.--

“(A) Regulations.--

“(i) In general.--

Not later than 1 year after the date of enactment of this paragraph, the Administrator shall promulgate regulations to ensure that gasoline sold or introduced into commerce in the United States (except in noncontiguous States or territories), on an annual average basis, contains the applicable volume of renewable fuel determined in accordance with subparagraph (B).

“(ii) Noncontiguous state opt-in.--

“(I) In general.--On the petition of a noncontiguous State or territory, the Administrator may allow the renewable fuel program established under this subsection to apply in the noncontiguous State or territory at the same time or any time after the Administrator promulgates regulations under this subparagraph.

“(II) Other actions.--In carrying out this clause, the Administrator may--

“(aa) issue or revise regulations under this paragraph;

“(bb) establish applicable percentages under paragraph

(3);

“(cc) provide for the generation of credits under paragraph

(5); and

“(dd) take such other actions as are necessary to allow for the application of the renewable fuels program in a noncontiguous State or territory.

“(iii) Provisions of regulations.--Regardless of the date of promulgation, the regulations promulgated under clause (i)--

“(I) shall contain compliance provisions applicable to refineries, blenders, distributors, and importers, as appropriate, to ensure that the requirements of this paragraph are met; but

“(II) shall not--

“(aa) restrict geographic areas in which renewable fuel may be used; or

“(bb) impose any per-gallon obligation for the use of renewable fuel.

“(iv) Requirement in case of failure to promulgate regulations.--If the Administrator does not promulgate regulations under clause (i), the percentage of renewable fuel in gasoline sold or dispensed to consumers in the United States, on a volume basis, shall be 2.78 percent for calendar year 2006.

“(B) Applicable volume.--

“(i) Calendar years 2006 through 2012.--For the purpose of subparagraph (A), the applicable volume for any of calendar years 2006 through 2012 shall be determined in accordance with the following table:

Applicable volume of renewable fuel.....	
Calendar year (in billions of gallons)	
2006	4.0
2007	4.7
2008	5.4
2009	6.1
2010	6.8



2011	7.4
2012	7.5

“(ii) Calendar year 2013 and thereafter.-- Subject to clauses (iii) and (iv), for the purposes of subparagraph (A), the applicable volume for calendar year 2013 and each calendar year thereafter shall be determined by the Administrator, in coordination with the Secretary of Agriculture and the Secretary of Energy, based on a review of the implementation of the program during calendar years 2006 through 2012, including a review of--

“(I) the impact of the use of renewable fuels on the environment, air quality, energy security, job creation, and rural economic development; and

“(II) the expected annual rate of future production of renewable fuels, including cellulosic ethanol.

“(iii) Minimum quantity derived from cellulosic biomass.—For calendar year 2013 and each calendar year thereafter--

“(I) the applicable volume referred to in clause (ii) shall contain a minimum of 250,000,000 gallons that are derived from cellulosic biomass; and

“(II) the 2.5-to-1 ratio referred to in paragraph (4) shall not apply.

“(iv) Minimum applicable volume.--For the purpose of subparagraph (A), the applicable volume for calendar year 2013 and each calendar year thereafter shall be equal to the product obtained by multiplying--

“(I) the number of gallons of gasoline that the Administrator estimates will be sold or introduced into commerce in the calendar year; and

“(II) the ratio that--

“(aa) 7,500,000,000 gallons of renewable fuel; bears to

“(bb) the number of gallons of gasoline sold or introduced into commerce in calendar year 2012.

“(3) Applicable percentages.--

“(A) Provision of estimate of volumes of gasoline sales.--Not later than October 31 of each of calendar years 2005 through 2011, the Administrator of the Energy Information Administration shall provide to the Administrator of the Environmental Protection Agency an estimate, with respect to the following calendar year, of the volumes of gasoline projected to be sold or introduced into commerce in the United States.

“(B) Determination of applicable percentages.--

“(i) In general.--Not later than November 30 of each of calendar years 2005 through 2012, based on the estimate provided under subparagraph (A), the Administrator of the Environmental Protection Agency shall determine and publish in the Federal Register, with respect to the following calendar year, the renewable fuel obligation that ensures that the requirements of paragraph (2) are met.

“(ii) Required elements.--The renewable fuel obligation determined for a calendar year under clause (i) shall--

“(I) be applicable to refineries, blenders, and importers, as appropriate;

“(II) be expressed in terms of a volume percentage of gasoline sold or introduced into commerce in the United States; and

“(III) subject to subparagraph

(C)(i), consist of a single applicable percentage that applies to all categories of persons specified in subclause (I).

“(C) Adjustments.--In determining the applicable percentage for a calendar year, the Administrator shall make adjustments--



“(i) to prevent the imposition of redundant obligations on any person specified in subparagraph (B)(ii)(I); and

“(ii) to account for the use of renewable fuel during the previous calendar year by small refineries that are exempt under paragraph (9).

“(4) Cellulosic biomass ethanol or waste derived ethanol.--

For the purpose of paragraph (2), 1 gallon of cellulosic biomass ethanol or waste derived ethanol shall be considered to be the equivalent of 2.5 gallons of renewable fuel.

“(5) Credit program.--

“(A) In general.--The regulations promulgated under paragraph (2)(A) shall provide--

“(i) for the generation of an appropriate amount of credits by any person that refines, blends, or imports gasoline that contains a quantity of renewable fuel that is greater than the quantity required under paragraph (2);

“(ii) for the generation of an appropriate amount of credits for biodiesel; and

“(iii) for the generation of credits by small refineries in accordance with paragraph (9)(C).

“(B) Use of credits.--A person that generates credits under subparagraph (A) may use the credits, or transfer all or a portion of the credits to another person, for the purpose of complying with paragraph (2).

“(C) Duration of credits.--A credit generated under this paragraph shall be valid to show compliance for the 12 months as of the date of generation.

“(D) Inability to generate or purchase sufficient credits.--The regulations promulgated under paragraph

(2)(A) shall include provisions allowing any person that is unable to generate or purchase sufficient credits to meet the requirements of paragraph (2) to carry forward a renewable fuel deficit on condition that the person, in the calendar year following the year in which the renewable fuel deficit is created--

“(i) achieves compliance with the renewable fuel requirement under paragraph (2); and

“(ii) generates or purchases additional renewable fuel credits to offset the renewable fuel deficit of the previous year.

“(6) Seasonal variations in renewable fuel use.--

“(A) Study.--For each of calendar years 2006 through 2012, the Administrator of the Energy Information Administration shall conduct a study of renewable fuel blending to determine whether there are excessive seasonal variations in the use of renewable fuel.

“(B) Regulation of excessive seasonal variations.--

If, for any calendar year, the Administrator of the Energy Information Administration, based on the study under subparagraph (A), makes the determinations specified in subparagraph (C), the Administrator of the Environmental Protection Agency shall promulgate regulations to ensure that 25 percent or more of the quantity of renewable fuel necessary to meet the requirements of paragraph (2) is used during each of the 2 periods specified in subparagraph (D) of each subsequent calendar year.

“(C) Determinations.--The determinations referred to in subparagraph (B) are that--

“(i) less than 25 percent of the quantity of renewable fuel necessary to meet the requirements of paragraph (2) has been used during 1 of the 2 periods specified in subparagraph (D) of the calendar year;

“(ii) a pattern of excessive seasonal variation described in clause (i) will continue in subsequent calendar years; and



“(iii) promulgating regulations or other requirements to impose a 25 percent or more seasonal use of renewable fuels will not prevent or interfere with the attainment of national ambient air quality standards or significantly increase the price of motor fuels to the consumer.

“(D) Periods.--The 2 periods referred to in this paragraph are--

“(i) April through September; and

“(ii) January through March and October through December.

“(E) Exclusion.--Renewable fuel blended or consumed in calendar year 2006 in a State that has received a waiver under section 209(b) shall not be included in the study under subparagraph (A).

“(F) State exemption from seasonality requirements.--Notwithstanding any other provision of law, the seasonality requirement relating to renewable fuel use established by this paragraph shall not apply to any State that has received a waiver under section

209(b) or any State dependent on refineries in such State for gasoline supplies.

“(7) Waivers.--

“(A) In general.--The Administrator, in consultation with the Secretary of Agriculture and the Secretary of Energy, may waive the requirements of paragraph (2) in whole or in part on petition by one or more States by reducing the national quantity of renewable fuel required under paragraph (2)--

“(i) based on a determination by the Administrator, after public notice and opportunity for comment, that implementation of the requirement would severely harm the economy or environment of a State, a region, or the United States; or

“(ii) based on a determination by the Administrator, after public notice and opportunity for comment, that there is an inadequate domestic supply.

“(B) Petitions for waivers.--

The Administrator, in consultation with the Secretary of Agriculture and the Secretary of Energy, shall approve or disapprove a State petition for a waiver of the requirements of paragraph (2) within 90 days after the date on which the petition is received by the Administrator.

“(C) Termination of waivers.--A waiver granted under subparagraph (A) shall terminate after 1 year, but may be renewed by the Administrator after consultation with the Secretary of Agriculture and the Secretary of Energy.

“(8) Study and waiver for initial year of program.--

“(A) In general.--Not later than 180 days after the date of enactment of this paragraph, the Secretary of Energy shall conduct for the Administrator a study assessing whether the renewable fuel requirement under paragraph (2) will likely result in significant adverse impacts on consumers in 2006, on a national, regional, or State basis.

“(B) Required evaluations.--The study shall evaluate renewable fuel--

“(i) supplies and prices;

“(ii) blendstock supplies; and

“(iii) supply and distribution system capabilities.

“(C) Recommendations by the secretary.--Based on the results of the study, the Secretary of Energy shall make specific recommendations to the Administrator concerning waiver of the requirements of paragraph (2), in whole or in part, to prevent any adverse impacts described in subparagraph (A).

“(D) Waiver.--

“(i) In general.--

Not later than 270 days after the date of enactment of this paragraph, the Administrator shall, if and to the extent recommended by the Secretary of Energy under subparagraph (C), waive, in whole or in part, the renewable fuel requirement under



paragraph (2) by reducing the national quantity of renewable fuel required under paragraph (2) in calendar year 2006.

“(ii) No effect on waiver authority.--Clause

(i) does not limit the authority of the Administrator to waive the requirements of paragraph (2) in whole, or in part, under paragraph (7).

“(9) Small refineries.--

“(A) Temporary exemption.--

“(i) In general.--The requirements of paragraph (2) shall not apply to small refineries until calendar year 2011.

“(ii) Extension of exemption.--

“(I) Study by secretary of energy.--Not later than December 31, 2008, the Secretary of Energy shall conduct for the Administrator a study to determine whether compliance with the requirements of paragraph (2) would impose a disproportionate economic hardship on small refineries.

“(II) Extension of exemption.--In the case of a small refinery that the Secretary of Energy determines under subclause (I) would be subject to a disproportionate economic hardship if required to comply with paragraph (2), the Administrator shall extend the exemption under clause (i) for the small refinery for a period of not less than 2 additional years.

“(B) Petitions based on disproportionate economic hardship.--

“(i) Extension of exemption.--A small refinery may at any time petition the Administrator for an extension of the exemption under subparagraph (A) for the reason of disproportionate economic hardship.

“(ii) Evaluation of petitions.--In evaluating a petition under clause (i), the Administrator, in consultation with the Secretary of Energy, shall consider the findings of the study under subparagraph (A)(ii) and other economic factors.

“(iii) Deadline for action on petitions.--The Administrator shall act on any petition submitted by a small refinery for a hardship exemption not later than 90 days after the date of receipt of the petition.

“(C) Credit program.--If a small refinery notifies the Administrator that the small refinery waives the exemption under subparagraph (A), the regulations promulgated under paragraph (2)(A) shall provide for the generation of credits by the small refinery under paragraph (5) beginning in the calendar year following the date of notification.

“(D) Opt-in for small refineries.--A small refinery shall be subject to the requirements of paragraph (2) if the small refinery notifies the Administrator that the small refinery waives the exemption under subparagraph (A).

“(10) Ethanol market concentration analysis.--

“(A) Analysis.--

“(i) In general.--

Not later than 180 days after the date of enactment of this paragraph, and annually thereafter, the Federal Trade Commission shall perform a market concentration analysis of the ethanol production industry using the Herfindahl-Hirschman Index to determine whether there is sufficient competition among industry participants to avoid price-setting and other anticompetitive behavior.

“(ii) Scoring.--For the purpose of scoring under clause (i) using the Herfindahl-Hirschman Index, all marketing arrangements among industry participants shall be considered.

“(B) Report.--Not later than December 1, 2005, and annually thereafter, the Federal Trade Commission shall submit to Congress and the Administrator a report on the results of the market concentration analysis performed under subparagraph (A)(i).”



(b) Penalties and Enforcement.--Section 211(d) of the Clean Air Act (42 U.S.C. 7545(d)) is amended--

- (1) in paragraph (1)--
 - (A) in the first sentence, by striking "or (n)" each place it appears and inserting "(n), or (o)"; and
 - (B) in the second sentence, by striking "or (m)" and inserting "(m), or (o)";
- and
- (2) in the first sentence of paragraph (2), by striking "and (n)" each place it appears and inserting "(n), and (o)".

(c) Exclusion From Ethanol Waiver.--Section 211(h) of the Clean Air Act (42 U.S.C. 7545(h)) is amended--

- (1) by redesignating paragraph (5) as paragraph (6); and
- (2) by inserting after paragraph (4) the following:
 - (5) Exclusion from ethanol waiver.--
 - (A) Promulgation of regulations.—Upon notification, accompanied by supporting documentation, from the Governor of a State that the Reid vapor pressure limitation established by paragraph (4) will increase emissions that contribute to air pollution in any area in the State, the Administrator shall, by regulation, apply, in lieu of the Reid vapor pressure limitation established by paragraph (4), the Reid vapor pressure limitation established by paragraph (1) to all fuel blends containing gasoline and 10 percent denatured anhydrous ethanol that are sold, offered for sale, dispensed, supplied, offered for supply, transported, or introduced into commerce in the area during the high ozone season.
 - (B) Deadline for promulgation.--The Administrator shall promulgate regulations under subparagraph (A) not later than 90 days after the date of receipt of a notification from a Governor under that subparagraph.
 - (C) Effective date.--
 - (i) In general.--With respect to an area in a State for which the Governor submits a notification under subparagraph (A), the regulations under that subparagraph shall take effect on the later of--
 - (I) the first day of the first high ozone season for the area that begins after the date of receipt of the notification; or
 - (II) 1 year after the date of receipt of the notification.
 - (ii) Extension of effective date based on determination of insufficient supply.--
 - (I) In general.-- If, after receipt of a notification with respect to an area from a Governor of a State under subparagraph (A), the Administrator determines, on the Administrator's own motion or on petition of any person and after consultation with the Secretary of Energy, that the promulgation of regulations described in subparagraph (A) would result in an insufficient supply of gasoline in the State, the Administrator, by regulation--
 - (aa) shall extend the effective date of the regulations under clause (i) with respect to the area for not more than 1 year; and
 - (bb) may renew the extension under item (aa) for two additional periods, each of which shall not exceed 1 year.
 - (II) Deadline for action on petitions.--The Administrator shall act on any petition submitted under subclause (I) not later than 180 days after the date of receipt of the petition."

(d) Survey of Renewable Fuel Market.--



(1) Survey and report.--Not later than December 1, 2006, and annually thereafter, the Administrator of the Environmental Protection Agency (in consultation with the Secretary acting through the Administrator of the Energy Information Administration) shall--

(A) conduct, with respect to each conventional gasoline use area and each reformulated gasoline use area in each State, a survey to determine the market shares of--

- (i) conventional gasoline containing ethanol;
- (ii) reformulated gasoline containing ethanol;
- (iii) conventional gasoline containing renewable fuel; and
- (iv) reformulated gasoline containing renewable fuel; and

(B) submit to Congress, and make publicly available, a report on the results of the survey under subparagraph (A).

(2) Recordkeeping and reporting requirements.--The Administrator of the Environmental Protection Agency (hereinafter in this subsection referred to as the "Administrator") may require any refiner, blender, or importer to keep such records and make such reports as are necessary to ensure that the survey conducted under paragraph (1) is accurate. The Administrator, to avoid duplicative requirements, shall rely, to the extent practicable, on existing reporting and recordkeeping requirements and other information available to the Administrator including gasoline distribution patterns that include multistate use areas.

(3) Applicable law.--Activities carried out under this subsection shall be conducted in a manner designed to protect confidentiality of individual responses.

SEC. 1502. FINDINGS.

Congress finds that--

(1) since 1979, methyl tertiary butyl ether (hereinafter in this section referred to as "MTBE") has been used nationwide at low levels in gasoline to replace lead as an octane booster or anti-knocking agent;

(2) Public Law 101-549 (commonly known as the "Clean Air Act Amendments of 1990") (42 U.S.C. 7401 et seq.) established a fuel oxygenate standard under which reformulated gasoline must contain at least 2 percent oxygen by weight; and

(3) the fuel industry responded to the fuel oxygenate standard established by Public Law 101-549 by making substantial investments in--

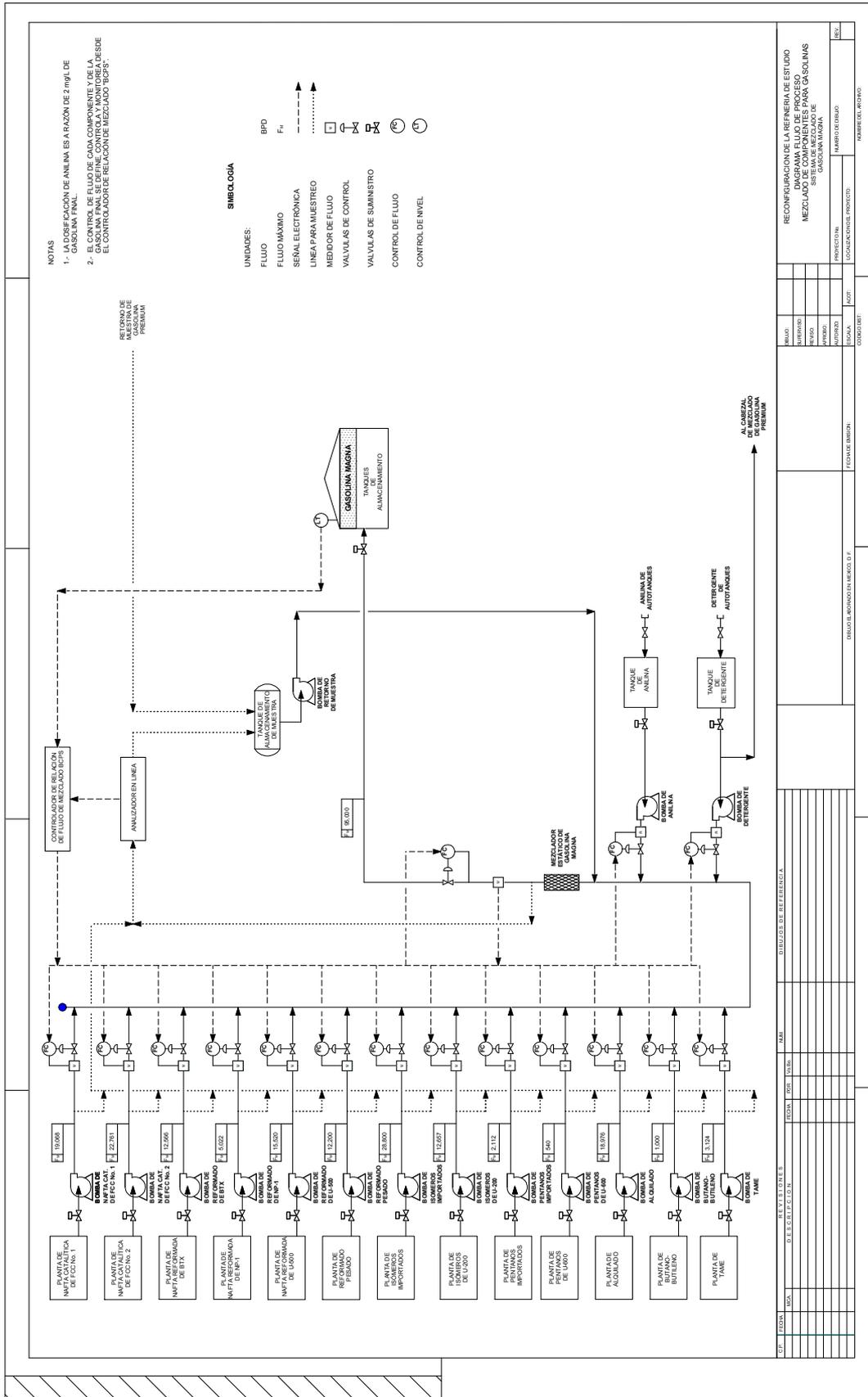
- (A) MTBE production capacity; and
- (B) systems to deliver MTBE-containing gasoline to the marketplace.

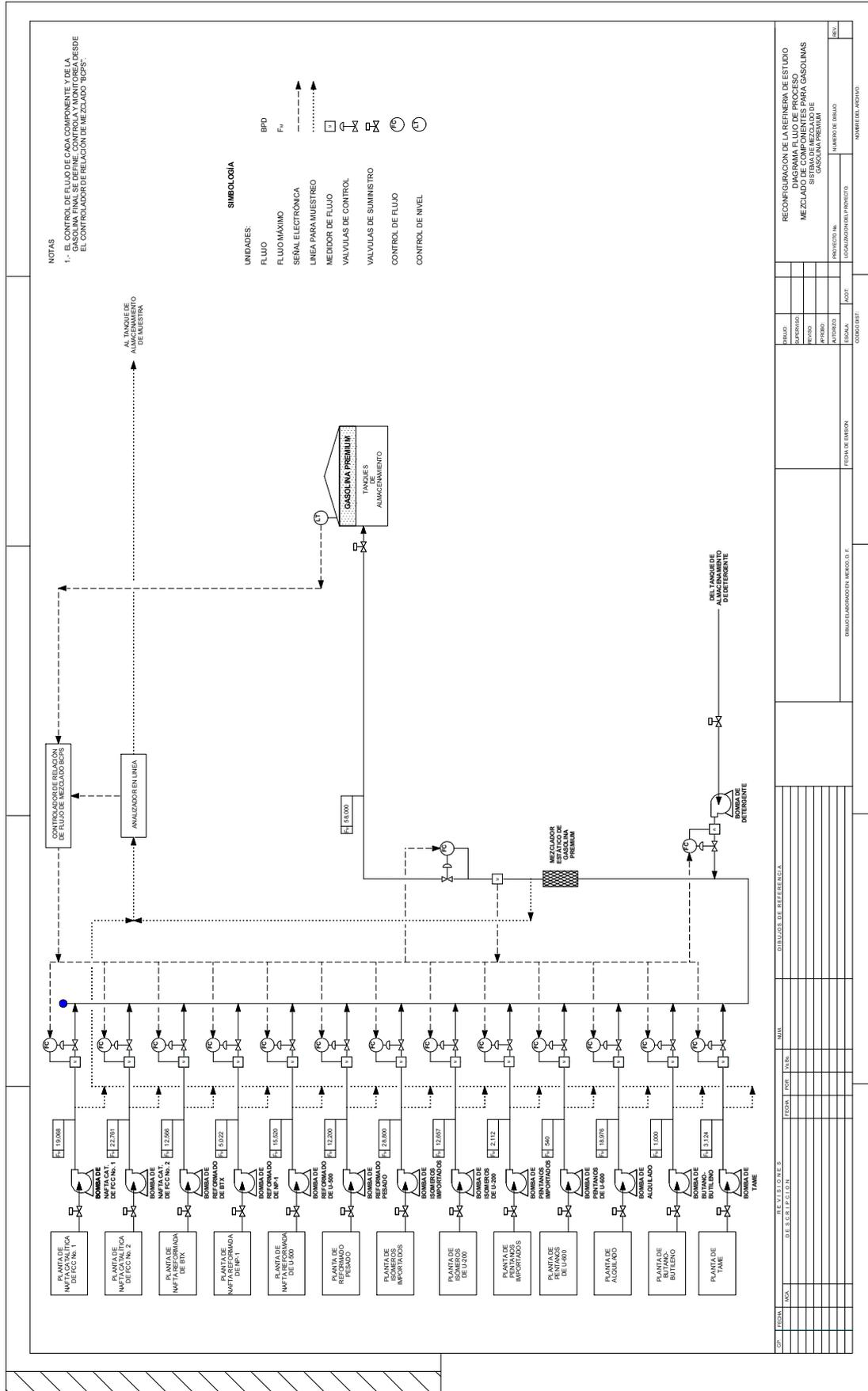
SEC. 1503. CLAIMS FILED AFTER ENACTMENT.

Claims and legal actions filed after the date of enactment of this Act related to allegations involving actual or threatened contamination of methyl tertiary butyl ether (MTBE) may be removed to the appropriate United States district court.



ANEXO C. DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESO





**BIBLIOGRAFIA**

ANFAC. Panorama y Perspectivas de la Industria del Automóvil [en línea], [Citado Septiembre 29, 2007] Madrid, España 2004. Disponible de World Wide Web: <http://www.anfac.es/impubli/panorama.pdf> 38 p.

ARDINES, ISABEL A.; FONG, Ana T. y RUÍZ, Eric E. El Petróleo y su Proceso de Refinación [en línea]. Universidad Tecnológica de Panamá. [citado Abril 30, 2007]. Disponible de World Wide Web: <http://www.monografias.com/trabajos5/petroleo/petroleo2.shtml>.

ARSHAM Hossein, Modelos Deterministas: Optimización Lineal, [en línea] ; [Citado 10 de Diciembre de 2007], Disponible en World Wide Web: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm>

ASEEMA, Singh. Modeling and Model Updating in the Real-Time Optimization of Gasoline Blending. [en línea]. A thesis submittea in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Department of Chernal Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto, Canadá 1997: National Library of Canada. [citado Mayo 24, 2007]. Disponible de World Wide Web: <http://www.ualberta.ca/CHEMENG/groups/control/reports/fraser/asingh.pdf>

BARROW, G.M. (1961). Physical Chernistry. McGraw-Hill. New York.

BAZAN, GERARDO. Gasolinas y Contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de México [en línea]. Revista Energía a Debate. [citado Mayo 24, 2007]. Disponible de World Wide Web: http://www.energiaadebate.com.mx/Articulos/Agosto%202004/gerardo_bazan_navarrete

CONAE. Ficha Técnica: Vehículo Eléctrico. [en línea]. [Citado Septiembre 29, 2007]. Disponible de World Wide Web: http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/466/1/images/vehiculo_electrico.pdf 10 p.

DEWITT. C.W. L.S. LASDON. A.D. WAREN. DA. BRENNER (et al) (1989). Omega: An improved gasoline blending system for texaco. 1989 Interfaces N° 19.pag 85-101.

DHULESĀ. H. Equation fits ASTM distillations. Hydrocarbon Processing 1984, vol. 62, n°9, pp. 179-180. ISSN 0018-8190

DIRECCIÓN General de Planeación Energética, SENER . Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015 [en línea], México D.F. : SENER , 2006. primera edición, ISBN: 968-874-201-5 Disponible de World Wide Web: http://www.energia.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Prosp petrol2006.pdf 139 p

ENAC. Sector Transporte [en línea]. [Citado Septiembre 29, 2007] Disponible de World Wide Web: http://pnd.sct.gob.mx/uploads/tx_wecdiscussion/ENAC-Sector_Transporte.doc



ESCOBAR Carlos E. El Uso Limpio de Hidrocarburos: Tecnologías y Costos. Publicado en Memorias del Simposio México: Los Relevos Energéticos – Ambientales – Desarrollo Económico con Energía Limpia del Programa Universitario de Energía. Primera Ed., México D.F., 1992.

ESCOBAR Carlos E. Programación no-lineal, Facultad de Química, aprox 2000 UNAM, 82 pag.

FUELCELLS. [en línea]. [citado Septiembre 29, 2007] Disponible de World Wide Web: http://worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim?template=sp_fcfaqs

GALE, SYDNEY. Gasoline Blending Model Spreadsheet Application. Barnes & Click, Inc., U.S.A., 2006.

GARCIA G., PEDRO. Determinación de Alternativas para la Producción de Gasolinas Reformuladas con Características Ecológicas en la Refinería de Salamanca, Gto., 1995-2010. Tesis para obtener el título de maestro en ciencias en ingeniería química. UNAM, México D.F., 1996.

GARY. J.H. and G.E. Handwerk. Petroleum Refining Technology and Economics. 3rd ed.. Marcel Dekker. New Cork 1994 . ISBN: 0824791576. 448 pag

HASKELL, N.B. and D.K. Beavon. Front end volatility of gasoline blends. Ind. Eng. Chem. (2). vol. 34, No. 2, Feb., 1942, p. 167-170

HEALY, W.C. Jr.. C.W. Maassen and R.T. Peterson. A new approach to blending octanes. In: Proc. 24th Midyear Meeting of the American Petroleum Institute's Division of Refining 1959 . Vol. 39. New York.

HEREDIA , Agustin y CIBRIÁN, Primitivo. La Evolución de las Gasolinas Automotrices en Pemex a Partir de la Expropiación Petrolera [en línea] Revista Octanaje. Nº 3 Febrero 1996. [citado Octubre 13, 2007] Disponible de World Wide Web: <http://www.ref.pemex.com/octanaje/nstrprd3.html>

INSTITUTO Nacional de Ecología. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero [en línea], Tercera Comunicación Nacional Ante la CMNUCC, [Citado Septiembre 29, 2007] México D.F. : SEMARNAT e INE , septiembre 25 2006. Disponible de World Wide Web: http://www.ine.gob.mx/cclimatico/download/inegei_res_ejecutivo.pdf 32 pag

INSTITUTO para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Combustibles y vehículos alternativos [en línea], [Citado Septiembre 29, 2007] octubre 2005. Disponible de World Wide Web: <http://www.treatise.eu.com/UserFiles/Manual%20Treatise%20de%20vehiculos%20y%20combustibles%20alternativos.pdf>

LOZANO T., Jose A., Coches Eléctricos, ¿Ya? [en línea]. [Citado Septiembre 29, 2007] La Verdad Digital S.L.U. Murcia, España, 2003. Disponible de World Wide Web: http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/7_2_14.html



MAGOULAS K., D. Marinos-Kouris and A. Lygeros. Instructions are given for building gasoline blending lp. *Oil & Gas J.* 1988 Julio N° 4. pag 32-37.

MCLELLAN, P.J. Thesis. A Nonlinear Refinery Model for Scheduling and Economic Evaluation, M. A. Sc. Thesis. University of Waterloo. 1981 Canada.

MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons. New York. 1991 ISBN: 978-0-471-48735-7 660 pag

MONTGOMERY, D.C. and JOHNSON L. A. Forecasting and Time Series Analysis. MacGraw-Hill. New York. 1976 ISBN-13: 978-0070428577. 288 pag

MORRIS. W.E. Optimum blending gives best pool octane. *Oil & Gas J.* 1986 Enero N° 20, 63-66.

MORRIS, W.E. The interaction approach to gasoline blending. NPRA 73rd Annual Meeting Mar., 1975 paper no. AM-75-30.

MORRIS, W.E. Prediction of mogas blend distillations can be improved. *Oil & Gas J.* 1983 Abril. N° 25, pag 71-74.

MORRIS. W.E. Simple calculations predict hydrocarbon loss from gasoline blends. *Oil & Gas J.* 1992 Junio N° 22, 68-71.

MORRIS, W.E., W.E. Smith and R.D. Snee. Interaction blending equations enhance reformulated gasoline profitability. *Oil & Gas J.* 1994 Enero. N° 17, 54-58.

MILLER Irving R., FREUND John E. y JOHNSON Richard. Probabilidad y estadística para ingenieros, cuarta edición. Prentice Hall Hispanoamericana ISBN: 968-880-235-2 1992

MULLER, A. New method produces accurate octane blending values. *Oil & Gas J.* 1992 Marzo. N° 23, 80-90.

NOTIMEX. Autos híbridos, sólo una tecnología de transición [en línea], : [Citado Septiembre 29, 2007] Centro Mario Molina 10 de mayo de 2006. Disponible de World Wide Web: http://www.centromariomolina.org/doctos/noticias/EL%20UNIVERSAL%20Autos%20híbridos%20R_Lacy.pdf

PÉRTEGA DÍAZ S., PITA FERNANDEZ S. Técnicas de Regresión Lineal: Regresión Lineal Múltiple [en línea], : [Citado Septiembre 29, 2007] Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo. A. Coruña, 20 de agosto de 2001. Disponible en World Wide Web: www.fisterra.com

REEVES, E.J. Determining Volume Changes in Hydrocarbon Blending. *Petroleum Proc.*, April 1952, pp. 478 – 479.



REFINERIA de Estudio. Bases de Usuario para el proyecto Sistema de Mezclado de Gasolinas, Especificación Magna y Premium. México, 2006.

RUSIN, M. The structure of nonlinear models. Chem. Eng. Sci. 1975 30, 937-944.

RUSIN, M.H.; CHUNG H.S. and MARSHALL J.F. A "transformation" method for calculating the research and motor octane numbers of gasoline blends. Ind. Eng. Chem. Fundam. 1951 20. 195-204.

SECRETARIA de Comunicaciones y Transportes e INSTITUTO Mexicano del Transporte. Manual Estadístico del Sector Transporte 2006 [en línea]. [Citado Septiembre 29, 2007] Sanfandila, Qro, México 2006. Disponible de World Wide Web: <http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/mans/mn2006.pdf> ISSN 0188-7246 319 p

SEMARNAT. Estudio de Evaluación Socio-Económica del Proyecto Integral de Calidad de Combustibles. Junio 26 de 2006 [en línea]. [Citado Septiembre 29, 2007] Disponible de World Wide Web: http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/download/azufre_comb_est_costo_bene_2006.pdf 77 p.

SENER. Prospectiva de Petrolíferos 2006-2015, México D.F., 2006.

STANLEY, M.E. and G.D. Pingrey. Prediction of ASTM end points of blended light petroleum products. Industrial and Engineering Chemistry 1954 46, 2182-2185.

STEWART, W.E. Predict octanes for gasoline blends. Petroleum Refiner 1959a 38, 135-139.

STEWART, W.E.. Predict rvp of blends accurately. Petroleum Refiner 1959b 38: 231-234.

U.S. CONGRESS. ENERGY POLICY ACT OF 2005, Public Law 109-58 [en línea]. Agosto 8 de 2005. [Citado Octubre 14, 2007] Disponible de World Wide Web: http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=109_cong_bills&docid=f:h6enr.txt.pdf

VANDERPLAATS G. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design.[en línea], Research and Development (V&RD) Inc. [Citado 8 de agosto de 2008] Disponible en World Wide Web: <http://www.vrand.com/textbook.htm>

VAZQUEZ Esparragoza, J.J., G.A. IGLESIAS Silva, M.W. HLAVINKA and J. BULLIN (1992). How to estimate RVP of blends [en línea]. Hydrocarbon Processing Aug., 135-138. Disponible de World Wide Web: [http://www.bre.com/portals/0/technicalarticles/How%20to%20Estimate%20Reid%20Vapor%20Pressure%20\(RVP\)%20of%20Blends.pdf](http://www.bre.com/portals/0/technicalarticles/How%20to%20Estimate%20Reid%20Vapor%20Pressure%20(RVP)%20of%20Blends.pdf) 10 pag

ZAHED, A.H., S.A. MUIIAH and M.D. BASHIR. Predict octane number for gasoline blends. Hydrocarbon Processing 1993 May, 85-87.