



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2D, ENTRE LAS CUATRO  
COMPAÑÍAS DE MAYOR COMERCIALIZACIÓN EN GUATEMALA, SEGÚN  
LAS NORMAS VIGENTES DEL PAÍS**

**CARLOS ENRIQUE AGUILAR ROSALES**  
**ASESORADO POR ING. JOSÉ FRANCISCO DE LEÓN**

**GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2003**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2D, ENTRE LAS CUATRO  
COMPAÑÍAS DE MAYOR COMERCIALIZACIÓN EN GUATEMALA, SEGÚN  
LAS NORMAS VIGENTES DEL PAÍS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CARLOS ENRIQUE AGUILAR ROSALES**

ASESORADO POR ING. JOSÉ FRANCISCO DE LEÓN ROSALES  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2003

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>VOCAL I</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Manuel Galván Estrada
<b>EXAMINADOR</b>	Inga. Lisely De León Arana
<b>EXAMINADOR</b>	Inga. Hilda Palma de Martini
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

### **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2D, ENTRE LAS CUATRO  
COMPAÑÍAS DE MAYOR COMERCIALIZACIÓN EN GUATEMALA, SEGÚN  
LAS NORMAS VIGENTES DEL PAÍS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha, 28 septiembre de 2001.

**CARLOS ENRIQUE AGUILAR ROSALES**

**ACTO QUE DEDICO**

**A DIOS**

**A MIS PADRES**

Luis Armando Aguilar Monroy  
Victoria del Transito Rosales Cardona

**A MIS ABUELOS**

Sotero Aguilar (Q.E.P.D.)  
Cleotilde de Jesús Monroy (Q.E.P.D.)  
José Vicente Rosales Miranda  
Elvira del Carmen Cardona (Q.E.P.D.)

**A MIS HERMANOS**

Karla Mercedes, Manuel Armando y Mileny  
Mishell

**A MI TÍA**

Hermelinda Cardona Cardona

**A MI SOBRINA**

Brittany Giselle Paiz Aguilar

**A MIS FAMILIARES Y AMIGOS**

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para la realización de este trabajo de graduación.

**AGRADECIMIENTO A**

Dios, por permitir llegar a una de mis metas.

Mi madre, por sus esfuerzos y sacrificios para que lograra llegar a esta meta.

Mi padre, por sus ejemplos, consejos y su apoyo incondicional.

Mi tía Hermelinda Cardona, por su cariño y sus consejos.

Mis compañeros de trabajo, por su confianza y apoyo.

Ing. José Francisco de León Rosales, por su apoyo y colaboración para el desarrollo del presente trabajo de graduación.

Departamento de Transformación y Distribución, de la Dirección General de Hidrocarburos, del Ministerio de Energía y Minas, por haber facilitado todos los recursos necesarios para la realización del presente trabajo de graduación.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	III
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	V
<b>GLOSARIO</b>	VII
<b>RESUMEN</b>	XIX
<b>OBJETIVOS</b>	XXI
<b>HIPÓTESIS</b>	XXIII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XXV
<b>1. MOTORES DIESEL</b>	1
<b>2. EL DIESEL</b>	5
2.1 Calidad del Diesel	7
2.2 Propiedad del Diesel	13
<b>3. EL COMBUSTIBLE DIESEL</b>	17
3.1 Evolución tecnológica de los motores Diesel	18
3.2 Usos de los motores Diesel	19
3.3 Clasificación de los combustibles Diesel	20
3.3.1 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 1-D	20
3.3.2 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 2-D	21
3.3.3 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 4-D	21
<b>4. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL DIESEL 2D</b>	23

4.1	Gravedad API	24
4.2	Punto de Inflamación	25
4.3	Índice de Cetano	25
4.4	Contenido de Azufre	27
4.5	Viscosidad Cinemática	28
4.6	Punto de Destilación	29
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>31</b>
5.1	Gráficos	31
5.2	Varianza	38
5.3	Diferencias de medias	39
<b>6.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>41</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>53</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>55</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>57</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>59</b>
	<b>APÉNDICE</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>77</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Diagrama de flujo del proceso de refinación del petróleo	6
2. Comparación del Índice de Cetano y porcentaje de Azufre en algunos países	12
3. Gravedad API, datos experimentales	31
4. Punto de Inflamación, datos experimentales	32
5. Índice de Cetano , datos experimentales	32
6. Contenido de Azufre, datos experimentales	33
7. Viscosidad Cinemática, datos experimentales	33
8. Punto de Destilación al 90%, datos experimentales	34
9. Gravedad API, datos estadísticos	34
10. Punto de Inflamación, datos estadísticos	35
11. Índice de Cetano, datos estadísticos	35
12. Contenido de Azufre, datos estadísticos	36
13. Viscosidad Cinemática, datos estadísticos	36
14. Punto de Destilación al 90%, datos estadísticos	37
15. Cálculo Índice de Cetano	79

## TABLAS

I. Adopción de la especificación del Diesel de bajo Azufre	8
--	---

II.	Especificaciones del Diesel, resultados promedio	8
III.	Requisitos para el Diesel grado A1 y grado A2, en Chile	9
IV.	Especificaciones del Diesel mexicano	11
V.	Comparación de los estándares del Diesel en algunos países	16
VI.	Varianza, datos experimentales	38
VII.	Varianza, datos estadísticos	38
VIII.	Diferencia de medias, datos experimentales	39
XIX.	Diferencia de medias, datos estadísticos	39
X.	Varianza, año 1998	72
XI.	Varianza, año 1999	72
XII.	Varianza, año 2000	73
XIII.	Promedios entre datos estadísticos y experimentales	73
XIV.	Diferencias de medias, año 1998	74
XV.	Diferencias de medias, año 1999	74
XVI.	Diferencias de medias, año 2000	75
XVII.	Promedios entre datos estadísticos y experimentales	75
VIII.	Datos experimentales	77
XIX.	Requisitos fisicoquímicos del Diesel 2D, según las normas establecidas en el país	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados centígrados
cm	Centímetro
D.R.	Densidad relativa
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
Kg	Kilogramo
Kpa	Kilopascales
mm	Milímetro
No.	Número
s <sup>2</sup>	Varianza
Xm	Diferencia de Medias
%	Porcentaje
Σ	Sumatoria

## **GLOSARIO**

<b>Absorción</b>	Un proceso para separar mezclas en sus constituyentes, aprovechando la ventaja de que algunos componentes son más fácilmente absorbidos que otros. Un ejemplo es la extracción de los componentes más pesados del gas natural.
<b>Aceite lubricante</b>	Aceite usado para facilitar el trabajo de las uniones mecánicas y partes móviles.
<b>Aditivo</b>	Sustancia química especial que se agrega a un producto para mejorar sus propiedades.
<b>Adsorción</b>	Un proceso de separación para remover impurezas basado en el hecho de que ciertos materiales altamente porosos fijan ciertos tipos de moléculas en su superficie.
<b>API</b>	Instituto Americano del Petróleo ( <i>American Petroleum Institute</i> ).
<b>Aromáticos</b>	Hidrocarburos con una estructura de anillo, generalmente con un olor aromático distintivo y buenas propiedades solventes (ejemplo: BTX).
<b>Asfalto</b>	Residuo pesado de petróleo que se utiliza para la pavimentación de caminos.

<b>ASTM</b>	Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales ( <i>American Society for Testing and Materials</i> ).
<b>Azufre total</b>	Es la cantidad total de Azufre que se encuentra presente en los productos derivados del petróleo y la cual se determina bajo condiciones de pruebas específicas.
<b>Barril</b>	Una medida estándar para el petróleo y para sus derivados. Un barril = 35 galones imperiales, 42 galones US, ó 159 litros.
<b>Barriles por día</b>	En términos de producción, el número de barriles de petróleo que produce un pozo en un período de 24 horas, normalmente se toma una cifra promedio de un período largo. (En términos de refinación, el número de barriles recibidos o la producción de una refinería durante un año, divididos por trescientos sesenta y cinco días menos el tiempo muerto utilizado para mantenimiento).
<b>Buque-tanquero</b>	Buque que puede transportar petróleo crudo o productos refinados.
<b>Carbono</b>	Un elemento sólido que existe de muchas formas incluyendo diamantes, grafito, coque y carbón vegetal. Las combinaciones de carbono con Hidrógeno son conocidas como Hidrocarburos y

pueden consistir de moléculas muy grandes (tales como polipropilenos) o muy cortas (como metano).

<b>Carga de alimentación</b>	Materia prima para una unidad de proceso.
<b>Catalizador</b>	Una sustancia que ayuda o promueve una reacción química sin formar parte del producto final. Hace que la reacción tenga lugar más rápidamente o a menor temperatura, y permanece sin cambio al final de la reacción. En procesos industriales, sin embargo, el catalizador debe ser cambiado periódicamente para mantener una producción económica.
<b>CO</b>	Monóxido de carbono.
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono.
<b>Combustible Diesel</b>	Es una fracción del petróleo usada como combustible en los vehículos de combustión interna del tipo ignición-compresión o motores Diesel. Un término general que cubre aceite combustible ligero proveniente del gasóleo, se le conoce comúnmente con el nombre destilado medio.
<b>Combustible Diesel 2D</b>	Es un tipo de combustible Diesel, que incluye la clase de gasóleos destilado de la más baja volatilidad. Es el que se consume normalmente en el país con el nombre de Diesel. En este trabajo mencionar Diesel, se refiere al Diesel 2D, a menos que se especifique de otra manera.

<b>Combustóleo</b>	Nombre con el cual se conoce también a los aceites combustibles como el Bunker C o <i>Fuel Oil</i> número 6.
<b>Compuesto</b>	Término químico que se refiere a una sustancia de dos o más elementos químicos unidos en proporciones fijas, por peso.
<b>Condensado</b>	Este puede referirse a cualquier mezcla de Hidrocarburos relativamente ligeros que permanecen líquidos a temperatura y presión normales. Tendrán alguna cantidad de propano y butano disueltos en el condensado. A diferencia del aceite crudo, tienen poca o ninguna cantidad de Hidrocarburos pesados de los que constituyen el combustible pesado.
<b>Contenido de Azufre</b>	Es la cantidad de Azufre total que se encuentra presente en los productos derivados del petróleo, como Azufre elemental y expresado en porcentaje en masa, el cual se determina bajo condiciones de pruebas específicas.
<b>De destilación primaria</b>	Expresión aplicada a un derivado del petróleo crudo obtenido por destilación, sin conversión química.
<b>Destilación</b>	Proceso ampliamente usado en las industrias para separar una sustancia en sus componentes, en base a sus puntos de ebullición..

<b>Destilación fraccionada</b>	Es un proceso basado en la diferencia de puntos de ebullición de los líquidos en la mezcla de la que van a separarse. Mediante vaporización y condensación sucesiva del petróleo crudo en una columna de fraccionamiento, se separarán los productos ligeros dejando un residuo de aceite combustible. La destilación se lleva a cabo en forma tal que se evite cualquier desintegración. Es el proceso básico que tiene lugar en una refinería.
<b>Destilado</b>	Los productos de condensación obtenidos durante el proceso de destilación fraccionada (combustibles gaseosos, nafta, gasolina, querosina y gasóleos).
<b>Detector de gas</b>	Un instrumento para detectar la presencia de varios gases, a menudo como medida de seguridad contra flama o gases tóxicos.
<b>Distribución</b>	Después que el petróleo ha sido procesado, es transportado hasta centros de distribución local o internacional, para ser medido y entregado a los clientes.
<b>Elemento</b>	Término químico referente a una sustancia que no puede ser subdividida químicamente en una forma más simple.
<b>Ensayo de destilación</b>	Es un ensayo que consiste en vaporizar los productos derivados del petróleo, mediante la aplicación de calor y bajo determinadas condiciones

	de prueba, y su posterior condensación en una cámara diferente a la de vaporización.
<b>Fraccionamiento</b>	Nombre genérico del proceso de separación de una mezcla en sus componentes o fracciones.
<b>Fracciones ligeras</b>	Las fracciones de bajo peso molecular y bajo punto de ebullición que emergen de la parte superior de la columna de fraccionamiento durante la refinación del petróleo.
<b>Fracciones pesadas</b>	También conocidas como productos pesados, estos son los aceites formados de moléculas grandes que emergen del fondo de una columna fraccionadora, durante la refinación del petróleo.
<b>Gas Envasado</b>	Generalmente gas licuado de petróleo (GLP) mantenido en un recipiente a presión.
<b>Gas licuado de petróleo</b>	El GLP está compuesto de propano, butano, o una mezcla de los dos, la cual puede ser total o parcialmente licuada bajo presión con objeto de facilitar su transporte y almacenamiento. El GLP puede utilizarse para cocinar, para calefacción o como combustible automotriz.
<b>Gas natural</b>	Mezcla de Metano y Etano hallada en la corteza terrestre, a menudo asociada con el petróleo.

<b>Gasóleo</b>	El aceite intermedio procedente del proceso de refinación; utilizado como combustible en motores Diesel, quemado en sistemas de calefacción central y como carga de alimentación para la industria química.
<b>Gasolina</b>	El combustible usado en automóviles y motocicletas, etc. (también conocido como petrol). La gasolina que se encuentra en forma natural se conoce como condensado.
<b>Gravedad API</b>	Es una escala especial adoptada por el Instituto Americano del Petróleo (API) y, es principalmente usado para petróleos líquidos y sus derivados. Es una escala arbitraria, relacionada con la gravedad específica.
<b>Gravedad específica</b>	La relación de la densidad de una sustancia a determinada temperatura con la densidad del agua a 15.6 °C.
<b>Hidrocarburo</b>	Cualquier compuesto o mezcla de compuestos, sólido, líquido o gas que contiene carbono e Hidrógeno (p. ej. : carbón, petróleo crudo y gas natural).
<b>Hidrocarburos alifáticos</b>	Se denomina así, a los Hidrocarburos no aromáticos, los cuales son: Los alcanos, alquenos y alquinos.

<b>Hidrodesulfuración</b>	Proceso para remover Azufre de las moléculas, utilizando Hidrógeno bajo presión y un catalizador.
<b>Hidrógeno</b>	El más ligero de todos los gases, presente principalmente, combinado con oxígeno, en el agua. El Hidrógeno se combina con el carbono para formar una enorme variedad de Hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos.
<b>Hidrotratamiento</b>	Usualmente se refiere al proceso de Hidrodesulfuración, pero también puede aplicarse a otros procesos de tratamiento que utilizan Hidrógeno.
<b>Índice de Cetano</b>	Variable utilizada para especificar la calidad de ignición de los combustibles Diesel. Esta se determina a partir de la gravedad API y de la temperatura de destilación al obtener el 50% de condensado.
<b>Kerosina</b>	Un aceite medio ligero procedente de la refinación del petróleo, intermedio entre el gasóleo y la gasolina; utilizado para alumbrado y calefacción y también como combustible para los motores de los aviones a chorro y los de turbo-hélice.
<b>Metano</b>	La más pequeña de las moléculas de los Hidrocarburos, con un átomo de carbono y cuatro átomos de Hidrógeno. Es el componente principal del gas natural, pero también está presente en las capas de carbón, y es producido por animales y por la

descomposición de los vegetales. Es un gas ligero, sin color, sin olor e inflamable bajo condiciones normales.

**Molécula** La partícula más pequeña a la que un compuesto puede ser reducido sin perder su identidad química.

**Nafta** Fracciones de gasolina de destilación primaria cuyo punto de ebullición es inferior a la de la querosina. Se utiliza como alimentación para la conversión en la refinería de gasolina para motores y como materia prima para obtener productos químicos.

**Oleoducto** Tubería para el transporte de petróleo crudo o sus derivados entre dos puntos.

**Olefinas** Grupo de Hidrocarburos, incluyendo Etileno y Propileno, de especial importancia como insumo a la industria química.

**OPEP** Organización de Países Exportadores de Petróleo. Fundada en 1960, sus países miembros son Argelia, Gabón, Indonesia, Irán, Irak, Kuwait, Libia, Nigeria, Qatar, Saudi Arabia, Emiratos Arabes Unidos y Venezuela.

**Parafina** Material sólido o semi sólido derivado de destilados o residuos; se emplea para distintos propósitos incluyendo velas y encerados.

<b>Petróleo</b>	Nombre genérico para Hidrocarburos, incluyendo petróleo crudo, gas natural y líquidos del gas natural. El nombre se deriva del Latín, oleum, presente en forma natural en rocas, petra. En su estado natural es un líquido espeso y negrozco, compuesto de Carbono e Hidrógeno.
<b>Petroquímico</b>	Producto químico derivado del petróleo o gas natural (p. ej. : benceno, etileno).
<b>Presión</b>	El esfuerzo ejercido por un cuerpo sobre otro cuerpo, ya sea por peso (gravedad) o mediante el uso de fuerza. Se le mide como fuerza entre área, tal como Newton/por metro <sup>2</sup> .
<b>Producto de destilación</b>	Descripción aplicada a un producto obtenido del petróleo crudo mediante destilación y sin conversión química.
<b>Protección catódica</b>	Un método empleado para minimizar la corrosión electroquímica de estructuras tales como las plataformas de perforación, tuberías y tanques de almacenamiento.
<b>Punto de anilina</b>	Temperatura mínima para la miscibilidad completa de volúmenes iguales de anilina y de la muestra de ensayo.

<b>Punto de inflamabilidad</b>	Es la temperatura más baja a la cual se inflaman los vapores que se desprenden de los productos derivados del petróleo, cuando se le aplica una pequeña llama bajo determinadas condiciones de prueba.
<b>Refinería</b>	Complejo de instalaciones en el que el petróleo crudo se separa en fracciones ligeras y pesadas, las cuales se convierten en productos aprovechables o insumos.
<b>Residuo</b>	Los componentes pesados, no volátiles, del crudo que fluyen del fondo de la columna de fraccionamiento durante la destilación fraccionada.
<b>Viscosidad</b>	Es la resistencia de un líquido al movimiento o flujo; normalmente se abate al elevar la temperatura.
<b>Viscosidad cinemática</b>	Es el tiempo requerido para que un volumen determinado de líquido fluya por gravedad a través de un tubo capilar.
<b>Volátil</b>	Término que describe sustancias de bajo peso molecular que se evaporan a temperaturas y presiones atmosféricas normales.

## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación se compara de la calidad del Diesel 2D, entre las cuatro compañías de mayor comercialización en Guatemala, según las normas vigentes del país.

Las propiedades fisicoquímicas estimadas fueron: la gravedad API, el punto de inflamación, el Índice de Cetano, porcentaje de Azufre, viscosidad cinemática y punto 90% de destilado.

Para obtener la información correspondiente se evaluaron muestras de Diesel 2D, provenientes de las cuatro compañías más importantes que comercializan este producto en el país, dichas muestras fueron tomadas en toda la cadena de distribución, estos análisis se realizaron en el Laboratorio del Ministerio de Energía y Minas, ya que esta unidad funcional posee los

conocimientos y lineamientos químicos y físicos necesarios para verificar la calidad de los Hidrocarburos

Para comprobar si han existido cambios significativos en dichas propiedades y así hacer una comparación más efectiva entre las compañías, se realizará un estudio estadístico de los resultados obtenidos por el Laboratorio de Servicios Técnicos, del Ministerio de Energía y Minas del año 1998 al 2000.

Como medida de referencia se utilizó el Acuerdo Ministerial No. 180-85 del Ministerio de Energía y Minas, en donde se establecen los mínimos y máximos de las propiedades analizadas. Adicionalmente, a los resultados de las propiedades estudiadas, se les hicieron análisis de varianza y diferencia de medias, para conocer la variación y la calidad del combustible analizado.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el Diesel 2D, que se comercializa en el país cumple con las especificaciones mínimas de calidad. Al comparar las compañías estudiadas, aunque no hay diferencias significativas, el combustible Diesel 2D de mejor calidad es distribuido por la compañía A, seguida en orden descendente referente al cumplimiento de las especificaciones mínimas de calidad por las compañías C, B y D respectivamente.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Comparar la calidad del combustible Diesel 2D, que se comercializa en Guatemala entre las diferentes compañías que lo refinan y distribuyen en el país, mediante las principales propiedades fisicoquímicas

### **Específicos**

1. Determinar qué compañía distribuye el Diesel 2D, de mejor calidad y cuál es la que distribuye el de menor calidad.
2. Determinar si el Diesel 2D, que se consume en Guatemala, cumple con las especificaciones mínimas de calidad, establecidas en el país.



## **HIPÓTESIS**

Si se determina la calidad del Diesel 2D, que se consume en Guatemala y se analizan estadísticamente los resultados se podría establecer si éste es de buena calidad y si las diferencias de calidad entre las compañías distribuidoras en el país, son significativas.



## INTRODUCCIÓN

El consumo de productos derivados del petróleo, en Guatemala, sea ha incrementado con el paso de los años. En 1996 la demanda de estos productos era de 15,921,400 de barriles y en el 2000 de 21,156,339 de barriles, por lo tanto, su producción e importación han aumentado en los últimos años. De estos productos, son los combustibles líquidos tales como: la gasolina, Diesel y Bunker C, los que presentan el mayor porcentaje de consumo en el país, siendo el Diesel el de mayor consumo. En cuando al Diesel en el 2000 su demanda fue de 7,523,361 de barriles. Por tal razón, es necesario conocer sobre las diferentes actividades de producción, refinación, comercialización, consumo y especialmente sobre el control de calidad de este combustible.

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad comparar la calidad del combustible Diesel entre las diferentes compañías que lo comercializan en Guatemala, con base en sus propiedades fisicoquímicas.

La determinación de la calidad de este combustible se llevará a cabo tomando especificaciones mínimas de calidad con base al Acuerdo No. 180-85, en revisión, del Ministerio de Energía y Minas, que es la entidad estatal que tiene entre otras actividades, el control y fiscalización de las actividades petroleras. Las normas de calidad pudieran no cumplirse en algunos casos, por importaciones de mala calidad, malos procesos de refinación, contaminación

en plantas, en el trayecto de plantas a estaciones de servicio y en éstas últimas. En tales casos es el Ministerio antes mencionado el encargado de aplicar las diferentes sanciones y multas referente a cada caso. Los parámetros de calidad más importantes que deben medirse en el Diesel son: gravedad API, punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto 90% de destilado.

Son varias las compañías que importan y distribuyen Diesel en nuestro país, sin embargo, se hará una comparación entre las cuatro compañías más importantes que distribuyen este combustible en el país, y que en el presente estudio se identificarán con las letras A, B, C y D.

Para la caracterización fisicoquímica del Diesel, se analizarán muestras tomadas en plantas de almacenamiento, estaciones de servicio y buques-tanqueros de este combustible en las compañías antes mencionadas. Estos análisis se realizarán utilizando el equipo del Laboratorio de Servicios Técnicos del Ministerio de Energía y Minas. Para comprobar si han existido cambios significativos en dichas propiedades y así hacer una comparación mas efectiva entre las compañías, se realizará un estudio estadístico de los resultados obtenidos por el laboratorio antes mencionado, desde el año 1998 al 2000.

Los resultados se presentaran en gráficos, por propiedad y año, para observar su comportamiento, así como el análisis de varianza y diferencia de medias, para observar la variación en la calidad del combustible Diesel.

## 1. MOTORES DIESEL

El motor Diesel tiene la misma apariencia que el de gasolina. La gran diferencia estriba en que el de Diesel no tiene bujías. En los años posteriores a la explotación del petróleo mediante la perforación (1859), el kerosene, empleado en el alumbrado con lámparas, era el producto más valioso que se obtenía. La gasolina se quemaba por inservible, el residuo pesado iba al basurero y el destilado intermedio se enviaba a la ciudad (1).

Con el invento del motor Diesel, el destilado encontró aplicación. Las necesidades de los primeros motores que emplearon Diesel no eran tan específicas como ahora y ha habido necesidad de mejorarlo a fin de que los diseños de las máquinas cumplan con una relación potencia/peso más elevada. Lo primero fue eliminar los carburantes con alta viscosidad y residuos difíciles de quemar. Lo segundo, mejorar la combustión. Los carburantes para máquinas que operaban a baja velocidad y pocas revoluciones por minuto, perdían su utilidad cuando se trataba de construir aparatos que se desplazaran a altas velocidades, a más de 2 000 revoluciones por minuto. La calidad de ignición de un Diesel inicialmente se expresaba por el llamado Índice Diesel que era una función de la densidad multiplicada por el punto de anilina y dividido entre cien. Los crudos y sus destilados están constituidos por muchas variedades de hidrocarburos: parafinas, naftenos y aromáticos. Los aromáticos tienden a mantenerse líquidos y no formar sólidos cuando la temperatura disminuye. La anilina es un compuesto químico aromático, y se denomina punto de anilina de un carburante a la temperatura más baja a la cual cantidades iguales de anilina

y carburante permanecen en solución. Un carburante con alto contenido de aromáticos tendrá un punto de anilina menor que uno de alto contenido en parafinas. El Índice Diesel se ha dejado de usar por su falta de precisión y hoy en día los Diesel se caracterizan por el Índice de Cetano.

El Cetano es un hidrocarburo parafínico de fórmula  $C_{16}H_{34}$ . Para juzgar el Índice de Cetano se usa el que no está ramificado y se le da un valor de cien en la escala de cero a cien, la otra molécula de referencia es el 2,2,4,4,6,8,8, heptametil nonano, que tiene un número de Cetano de 15 (1).

El Índice de Cetano es un sustituto del número de Cetano de un Diesel, y se calcula a partir de una relación empírica con parámetros de densidad y volatilidad. El número de Cetano en sí es una medida de la calidad de ignición de un Diesel y está basado en el tiempo de encendido de la máquina. Cuanto mayor es el número de Cetano, menor es el tiempo que tarda en encender y por ende mejor la calidad de la ignición (1).

### **Rendimiento de un combustible**

La eficacia de un motor no se mide sólo por las prestaciones que le pueda entregar a un automóvil, sino que influyen una serie de factores como el aprovechamiento térmico de la combustión.

Existe una variable que relaciona las prestaciones y el consumo del motor y se llama rendimiento. Una de las formas de expresar esta relación, es el denominado rendimiento térmico, que equivale a la proporción del calor desprendido por la combustión que aprovecha el motor. Un buen motor, tiene un rendimiento térmico del 40 por ciento. Es decir, sólo aprovecha un 40 por

ciento del calor de la combustión. Los motores más convencionales están por debajo de ese rendimiento térmico, ubicándose en el 30 por ciento (1).

Otra medida que da idea del rendimiento del motor es el consumo específico que relaciona el consumo con la potencia. La unidad con la que se mide son gramos de combustible por cada kilovatio/hora (o CV/hora). El consumo específico depende del régimen del motor (1).

El número octano indica el poder antidetonante del combustible. Si se superponen las curvas de consumo específico y par máximo, se puede apreciar que el menor consumo específico está muy cerca del régimen de par máximo (1).

Y si se habla de combustible, la diferencia entre el Diesel y la bencina está dada por su volatilidad. La bencina es mucho más volátil. Le siguen el kerosene que utilizan los aviones y por último el Diesel, destinado a los motores de encendido por compresión.

En los motores bencineros, la combustión se produce con el salto de la chispa en la bujía. Esta combustión se extiende a las partículas más cercanas con una cierta velocidad que se denomina propagación de la llama, mientras que la presión y temperatura en el interior del cilindro siguen aumentando por efecto de esa combustión. Si el combustible se enciende espontánea o descontroladamente se produce la detonación (1).

El poder antidetonante indica la resistencia a la detonación de un determinado carburante y se mide a través del número de octano. Si es igual a cien, es muy resistente, si no lo es, lo inverso. En el caso de los motores Diesel, se produce un cierto retraso en el encendido desde que se inyecta el

combustible que se empieza a quemar por el mismo efecto de la presión. El Índice de Cetano mide la capacidad de un combustible para encenderse o quemarse en el menor tiempo posible (1).

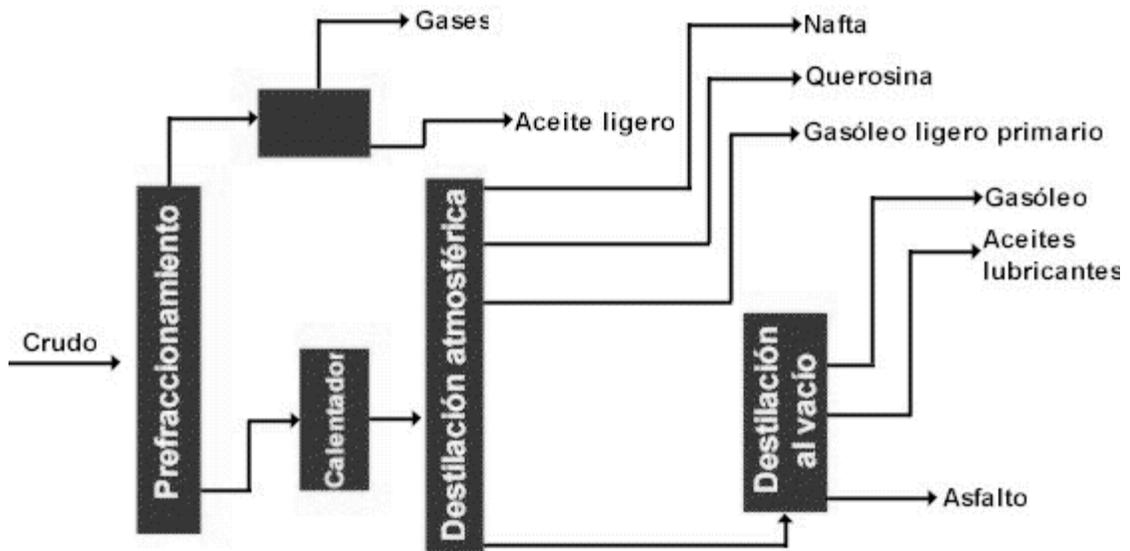
## **2. DIESEL**

En una refinería, el petróleo es convertido a una variedad de productos mediante procesos físicos y químicos (1).

El primer proceso al que se somete el petróleo en la refinería, es la destilación para separarlo en diferentes fracciones (Figura 1). La sección de destilación es la unidad más flexible en la refinería, ya que las condiciones de operación pueden ajustarse para poder procesar un amplio intervalo de alimentaciones, desde crudos ligeros hasta pesados. Dentro de las torres de destilación, los líquidos y los vapores se separan en fracciones de acuerdo a su peso molecular y temperatura de ebullición. Las fracciones más ligeras, incluyendo gasolinas y gas LP, vaporizan y suben hasta la parte superior de la torre donde se condensan. Los líquidos medianamente pesados, como el kerosene y la fracción Diesel, se quedan en la parte media. Los líquidos más pesados y los gasóleos ligeros primarios, se separan más abajo, mientras que los más pesados en el fondo. Las gasolinas contienen fracciones que ebullen por debajo de los 200°C mientras que en el caso del Diesel sus fracciones tienen un límite de 350°C. Este último contiene moléculas de entre 10 y 20 átomos de Carbono, mientras que los componentes de la gasolina se ubican en el orden de 12 átomos de Carbono o menos (1).

El combustible Diesel, también se manufactura, en muchos casos a partir de mezclas de gasóleos con kerosene, y aceite cíclico ligero, el cual es producto del proceso de desintegración catalítica fluida (1).

**Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de refinación del petróleo**



Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

En un tiempo, la manufactura de Diesel involucró utilizar lo que quedaba después de remover productos valiosos del petróleo. Hoy en día el proceso de fabricación del Diesel es muy complejo ya que comprende escoger y mezclar diferentes fracciones de petróleo para cumplir con especificaciones precisas. La producción de Diesel estable y homogéneo requiere de experiencia, respaldada por un estricto control de laboratorio (1).

## 2.1 Calidad del Diesel

**¿Cómo se determina la calidad del Diesel?**

El Diesel es un combustible hidrocarburo, derivado de la destilación atmosférica del petróleo crudo, utilizado en máquinas de combustión interna de alto aprovechamiento de energía y con elevado rendimiento de eficiencia mecánica, así como en el parque vehicular equipado con motores diseñados para éste combustible, tales como camiones de carga, autobuses, locomotoras, embarcaciones, maquinaria agrícola e industrial, entre otros. El Índice de Cetano es la medida de la calidad de ignición y capacidad antidetonante y es indicativo del grado de eficiencia de la combustión en el motor, de forma tal que se produzca la máxima cantidad de energía aprovechable.

A mayor Índice de Cetano, mejor es el Diesel. Otro parámetro importante es el contenido de Azufre. Su efecto se manifiesta en un desgaste de la máquina. A menor contenido de este elemento, el combustible es más limpio y menos contaminante (1)

### **Comparaciones de calidades**

La situación mexicana es interesante, pues en Latinoamérica se puede comparar con la situación chilena, dado que ambos países abordan el tema de la contaminación ambiental de forma similar, por eso es importante. También se compara las calidades del Diesel norteamericano y europeo, para tener una mejor perspectiva de la calidad del Diesel en Latinoamérica. En la tabla I, se especifica la fecha de implantación de la especificación del Diesel de bajo Azufre, ósea menor del 0.05% (1).

#### **Tabla I. Adopción de la especificación del Diesel de bajo Azufre**

TABLA I	
ADOPCION DE LA ESPECIFICACION DE DIESEL DE BAJO AZUFRE (0.05%)	
PAIS	FECHA DE IMPLANTACION
Suecia	Enero de 1991
Dinamarca	Julio de 1992
Finlandia	Julio de 1993
EUA (Inc. California)	Octubre de 1993
Suiza	Enero de 1994
Noruega	Enero de 1994
Canadá	Octubre de 1994
México (ZMVM)	Octubre 1993
Austria	Octubre de 1995
Taiwán	Enero de 1997
Japón	Mayo de 1997
Corea del Sur	Enero de 1998
Tailandia	Enero de 2000
<b>Chile</b>	<b>Abril de 2002</b>

Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

La tabla II ofrece una comparación de los combustibles Diesel en varios países. Es notorio el bajo valor del Índice de Cetano del Diesel americano, tal vez debido al bajo porcentaje de Diesel virgen que se utiliza (1).

**Tabla II. Especificaciones del Diesel, resultados promedio**

TABLA II							
ESPECIFICACIONES RESULTADOS PROMEDIO							
	Pemex Diesel	EUA Prom.	EUA Carb.	Canadá	Alemania	Japón	Chile
Azufre, % P Max.	0.021	0.03	0.02	0.027	0.03	0.03	0.05
Í. de Cetano. min.	53	46	48.2	44	50.6	53	48
Viscosidad Cinemática a 40°C CST	3.0	2.5		2.0	2.58	3.0	1.9
Densidad			0.83		0.820-0.860		0.84
Aromáticos	22	37	23				20-30

Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

Las características del Diesel mexicano, Pemex Diesel, lo sitúan como uno de los mejores del mundo, encontrándose al Diesel chileno en una situación

favorable, ya que está adaptándose a los requerimientos exigidos a nivel mundial.

En la tabla III, especifica los requisitos para el Diesel grado A1 (1D) y grado A2 (2D), establecidos por CONAMA de Chile (1).

**Tabla III. Requisitos para el Diesel grado A1 y grado A2, en Chile**

TABLA III  
Requisitos para el Petróleo Diesel Grado A1 y Grado A2, establecidos por la CONAMA.

	Características	Grado A1	Grado A2	Método de Ensayo
1	Punto de inflamación, °C, mínimo	52	52	NCh 69
2	Punto de escurrimiento, °C, máximo	-1	2	NCh 1983
3	Agua y sedimento, % (v/v), máximo	0,10	0,10	NCh 1982
4	Residuo carbonoso (i) sobre 10% residuo, % (m/m), máximo - según Ramsbottom - según Conradson	0,21 0,20	0,21 0,20	NCh 1985 NCh 1986
5	Cenizas, % (m/m), máximo	0,01	0,01	NCh 1984
6	Destilación, temperatura °C al 90% recuperado - mínimo - máximo	282 338	282 366	NCh 66
7	Viscosidad dinámica a 40°C, cSt (ii) - mínimo - máximo	1,9 5,5	1,9 5,5	NCh 1950
8	Azufre % (m/m), máximo	0,15(vi)	0,2(viii)	NCh 1947
9	Corrosión de la lámina de cobre, máximo	Nº2	Nº2	NCh 70
10	Número de cetano, mínimo	48 (iii) (vii)	-	NCh 1987
11	Densidad kg/L, a 15°C	0,84+0,01	Informar	NCh 822
12	Aromáticos % (v/v)	informar	Informar	(v)
13	Aromáticos policíclicos % (m/m)	informar	Informar	(v)
14	Nitrógeno ppm	informar	Informar	(v)
15	Color	prohibese el uso de colorantes	Azul (iv)	

Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

- i. En caso de arbitraje debe usarse el método Ramsbottom.

- ii.  $1cSt=1mm^2/s$ .
- iii. Como método práctico puede usarse el Índice de Cetano calculado (NCh1988), pero en caso de desacuerdo o arbitraje el método de referencia es el del número de Cetano (NCh1987).
- iv. Se agrega colorante azul, 1,4- dialquilamino-antraquinona. Dosificación: alrededor de 10 g/m<sup>3</sup>.
- v. Este parámetro es obligatorio a partir de agosto de 1998. A partir de esta fecha se deberá indicar la norma utilizada.
- vi. A partir de las siguientes fechas, el parámetro exigido será el siguiente: 1º de abril de 2000: 0.1; 1º de abril de 2002: 0.05.
- vii. A partir del 1º de abril de 2002 el parámetro exigido será 50.
- viii. A partir de las siguientes fechas, el parámetro exigido será el siguiente: 0.2; 1º de abril de 2000: 0.15; 1º de abril de 2002: 0.05.

El Pemex Diesel, satisface ampliamente las especificaciones mexicanas como se puede apreciar en la Tabla IV. Cabe mencionar que en California y Alemania se están dañando los motores, al parecer por usar Diesel de muy bajo contenido de Hidrocarburos aromáticos (los aromáticos lubrican la máquina). El Pemex Diesel promedió 27.8% en volumen de aromáticos en el Valle de México durante 1996 y 25.2% en volumen en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca ( ZMVT) (1).

**Tabla IV. Especificaciones del Diesel mexicano**

Tabla IV. Especificaciones del diesel mexicano con bajo contenido de azufre

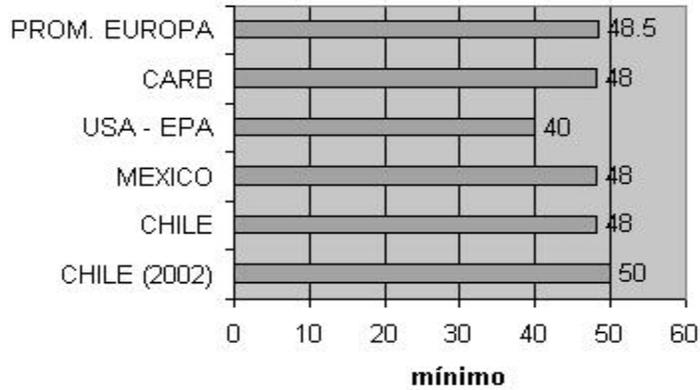
Propiedad	Pemex diesel		
	México NOM-086* 1994	ZMYM Valor típico en 1996	ZMYT Valor típico en 1996
10% destila a °C (máximo):	275	236	242
90% destila a °C (máximo):	345	337	336
Agua y sedimento, % en volumen (máximo):	0.05	0.010	0.003
Cenizas, % en peso (máximo):	0.01	0.001	0.004
Carbón Ramsbottom, % en peso (máximo):	0.25	0.078	0.086
Azufre, % en peso (máximo):	0.05	0.040	0.037
Índice de cetano (mínimo):	48	54.5	53.8
Viscosidad, (SSU), segundos	32 – 40		-
Aromáticos, % en volumen	30	27.8	25.2

Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

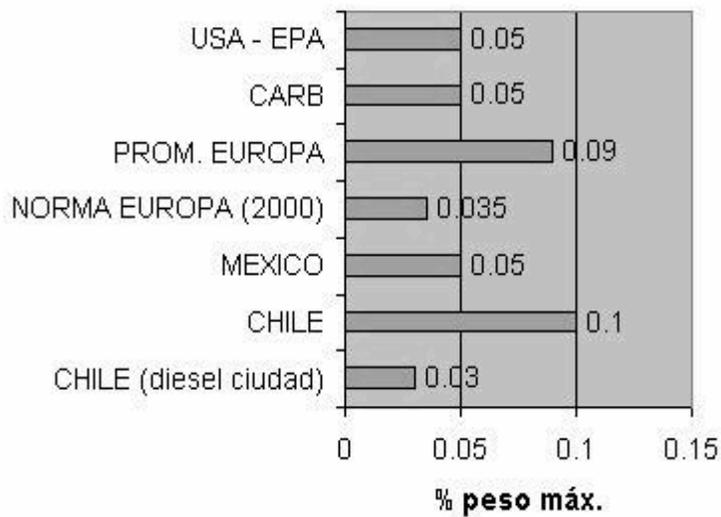
En la figura siguiente se comparan dos de los varios parámetros, que hablan de la calidad del Diesel, los cuales son el Índice de Cetano y Azufre.

**Figura 2. Comparación del Índice de Cetano y porcentaje de Azufre en algunos países**

### ÍNDICE DE CETANO



### AZUFRE



Fuente: <http://www.cipress.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>. Consultada agosto 2002

Puede apreciarse que el Índice de Cetano, con un valor típico de 54.5 en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y de 53.8 en la ZMVT, muestra que el Diesel mexicano es de mucho mejor calidad que el norteamericano y europeo. En la ZMVM, además de tener un excelente Índice de Cetano, su

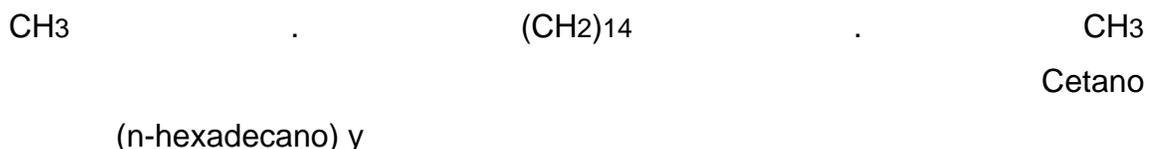
número fluctúa muy poco, manteniéndose dentro del intervalo 55.0-55.9%. En Chile , el Índice de Cetano mínimo está en 50, lo que lo deja comparativamente mejor que el Diesel de USA y el europeo (1).

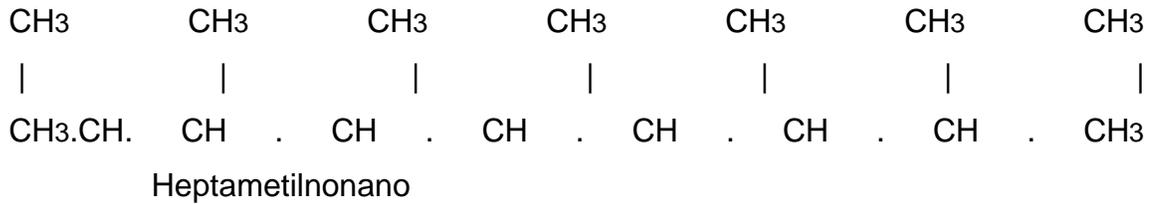
En Azufre el Diesel mexicano presentó en 1996 un valor típico de 0.040% en peso en la ZMVM y de 0.037% en la ZMVT, con un intervalo de variación de 0.03-0.05% para el primero. La calidad del Diesel automotriz mexicano, en cuanto a su contenido de Azufre, es muy similar al norteamericano y californiano, pero mucho mejor que el europeo. Es por ello que se explica la aparición de la Norma Europea (2000) de un contenido de Azufre de 0.035%. La tendencia mundial es lograr un porcentaje de Azufre de 0.05%. En ese sentido , la calidad del Diesel chileno es bastante aceptable, tomando en cuenta las normas de la CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente de Chile), y la aparición del Diesel ciudad que tiene un porcentaje de 0.03% de Azufre, lo que lo sitúa entre uno de los mejores Diesel de América Latina, y similar al Diesel de USA, y mejor que varios países europeos (1).

## **2.2 Propiedades del Diesel**

### **Índice de Cetano**

Así como el octano mide la calidad de ignición de la gasolina, el Índice de Cetano mide la calidad de ignición de un Diesel. Es una medida de la tendencia del Diesel a cascabelear en el motor. La escala se basa en las características de ignición de dos hidrocarburos,





El n-hexadecano tiene un periodo corto de retardo durante la ignición y se le asigna un Cetano de 100; el Heptametilnonano tiene un periodo largo de retardo y se le ha asignado un Cetano de 15. El Índice de Cetano es un medio para determinar la calidad de la ignición del Diesel y es equivalente al porcentaje por volumen del Cetano en la mezcla con Heptametilnonano, la cual se compara con la calidad de ignición del combustible prueba (ASTM D-613). La propiedad deseable de la gasolina para prevenir el cascabeleo es la habilidad para resistir la auto ignición, pero para el Diesel la propiedad deseable es la auto ignición (1).

Típicamente los motores se diseñan para utilizar Índices de Cetano de entre 40 y 55, debajo de 38 se incrementa rápidamente el retardo de la ignición (1).

En las gasolinas, el número de octano de las parafinas disminuye a medida que se incrementa la longitud de la cadena, mientras que en el Diesel, el Índice de Cetano se incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena. En general, los aromáticos y los alcoholes tienen un Índice de Cetano bajo. Por ello el porcentaje de gasóleos desintegrados, en el Diesel, se ve limitado por su contenido de aromáticos (1).

Muchos otros factores también afectan el Índice de Cetano, así por ejemplo la adición de alrededor de un 0.5 por ciento de aditivos mejoradores de Cetano incrementan el Cetano en 10 unidades. Estos aditivos pueden estar formulados

con base a alquilnitratos, amil nitratos primarios, nitritos o peróxidos. La mayoría de ellos contienen nitrógeno y tienden, por lo tanto, a aumentar las emisiones de Nox (1).

El Índice de Cetano es una propiedad muy importante, sin embargo existen otras relevantes que caracterizan la calidad del combustible.

### **Azufre**

El Azufre ocurre naturalmente en el petróleo. Si éste no es eliminado durante los procesos de refinación, contaminará al combustible. El Azufre del Diesel contribuye significativamente a las emisiones de partículas (PMOs). La reducción del límite de Azufre en el Diesel a 0.05 por ciento es una tendencia mundial. La correlación del contenido de Azufre en el Diesel con las emisiones de partículas y el SO<sub>2</sub> está claramente establecida. En la Tabla I, se presenta las fechas en que los principales países han adoptado el 0.05 por ciento como máximo en el límite de Azufre en el Diesel (1).

Para poder cumplir con los requerimientos de niveles bajos de Azufre, es necesario construir capacidades adicionales de desulfuración. Así como las unidades de desintegración catalítica (FCC), son primordiales para la producción de gasolina, la hidrodesintegración es fundamental para la producción de Diesel. En ambos procesos la cuestión se enfoca en la selección de la materia prima alimentada (1).

Mejorar la calidad del combustible no resolverá el problema de la contaminación a menos que se imponga un riguroso programa de inspección y mantenimiento para los vehículos viejos con motores a Diesel. Los super

emisores del mundo, por consumo del Diesel, son los motores viejos que han recibido un mantenimiento pobre (1).

El nuevo Diesel ciudad, en Chile, tiene ahora 300 partículas de Azufre por millón (antes tenía 1000) lo que significa una gran reducción, ya que es un combustible usado por la gran mayoría del transporte en Santiago, la capital chilena (1).

**Tabla V. Comparación de los estándares del Diesel en algunos países**

TABLA V  
Comparación de los estándares de petróleo diesel en algunos países

Comparación Estándares Petróleo Diesel	
Lugar	Concentración Azufre (ppmm)
Pemex Diesel – México	300
Usa - EPA (1998)	500
Usa - EPA (2005)	50
Usa – California (2000)	120/15
CARB (1996)	300
Brasil (Sao Paulo, 1998)	2000
Promedio Europa (1996)	900
Norma europea (1998)	500
Norma europea (2000)	350
Japón (1996)	1300
Japón (1997)	500
China (1996)	500
Tailandia (1999)	500
India (1999)	2500
Chile (2000)	2500
Chile (2000) RM	1000
Chile (abril 2001) RM	300
Sueda	15

Fuente: Revista Ecoamérica. Edición Nº 5 de marzo de 2001

### 3. EL COMBUSTIBLE DIESEL

El problema de la contaminación ambiental es un fenómeno que se ha enfatizado en las últimas dos décadas, su origen y causas son muy variadas;

en general esta situación es producto de algunos factores entre los que destacan: La alta densidad de población de las zonas urbanas, la concentración de la actividad industrial, densidad de vehículos de circulación, las condiciones climatológicas y metereológicas adversas (2).

Actualmente, a nivel mundial, el problema ambiental juega un papel importante en las políticas del desarrollo de los países. En los principios del desarrollo industrial se presentaba un binomio que lo integraban los productores de los energéticos y los consumidores de los mismos. Como se sabe, la energía que mueve el mundo es el eje motriz del desarrollo de las naciones (2).

Así hasta hace algunos años, el productor de los combustibles obtenían energéticos que satisfacían integralmente las necesidades del consumidor, en los últimos años esta relación recíproca se ha visto interrumpida por el fenómeno del deterioro del entorno ambiental, producto de las diferentes actividades antropogénicas (2).

Resultante de esta preocupación por preservar los recursos que nos ha dado la naturaleza, nace una nueva mística del desarrollo de los países y se origina un fenómeno simbiótico que da origen a un triangulo estratégico: La combinación del productor de los energéticos, el sector que los consume y las normas ambientales que regulan las actividades; para con ello buscar soluciones al problema ambiental y lograr el desarrollo sostenido en las naciones (2).

Al hacer la referencia al crecimiento sustentable de los países se esta considerando a los combustibles como un factor importante dentro del mismo, incluídos los utilizados por la industria automotriz, que juegan un papel

preponderante junto a los de servicio industrial: Las gasolinas, el Diesel, el gas licuado del petróleo, el gas natural licuado, el gas natural comprimido (2).

Los dos primeros son considerados combustibles convencionales y los tres restantes son identificados hoy en día como los energéticos alternos. Cabe mencionar, que los tres últimos reciben esta clasificación por ser productores cuya combustión es casi limpia y no impactan el medio ambiente con el sistema de manejo integral, con los dispositivos de inyección específicamente diseñados, así como la integración con el convertidor catalítico (2).

Las gasolinas y el Diesel, denominados convencionales en un principio, y que en la actualidad se ha desarrollado una generación de ellos, son identificados como combustibles reformulados. Un energético reformulado es aquel en el que se han llevado a cabo modificaciones en su formulación con el fin de minimizar su impacto al ambiente, al emplearse en las diversas actividades que el desarrollo de los países demanda (2).

### **3.1 Evolución tecnológica de los motores a Diesel**

El primer motor a Diesel se desarrolló en 1892 por el doctor Rudolph Diesel; era una máquina que consumía carbón pulverizado como combustible. Producto de la problemática que representaba el quemado del energético, el inventor buscó combustibles que pudiesen sustituir al originalmente utilizado, encontrando que algunos tipos de aceite derivados del petróleo satisfacían las necesidades del motor (2).

Así, nace con la máquina el combustible que hoy en día se conoce en la industria petrolera como Diesel, en honor al descubridor de tan revolucionario invento que cambio drásticamente el desarrollo del mundo (2).

Los motores a Diesel han tenido a lo largo del tiempo una serie de modificaciones significativas, a partir de 1970, como resultado de la restricción aplicada en los Estados Unidos de Norteamérica a los vehículos a Diesel, en lo relativo a la opacidad de los humos que emitían las maquinas hasta llegar a las actuales que satisfacen normas ambientales estrictas (2).

Actualmente los motores de reciente desarrollo muestran entre sus innovaciones las siguientes: Modificaciones al diseño de los pistones y anillos, incorporación de turbocargadores, modificaciones del diseño de los inyectores, Incorporaciones de dispositivos anticontaminantes. Toda esta serie de cambios en la tecnología de motor han dado como resultado los vehículos actuales, con niveles de emisión notoriamente inferiores a los que se tenía en los años setenta (2).

Se ha citado que en los próximos veinte años los vehículos a Diesel serán una alternativa para las ciudades densamente pobladas y con problemas en la calidad del aire (2).

### **3.2 Usos de los motores Diesel**

Las máquinas a Diesel tienen aplicaciones muy diversas en las diferentes actividades antropogénicas entre las que se pueden citar entre otras: Camiones de servicio ligero y pesado, autobuses de servicio urbano y extra-urbano; locomotoras; propulsión de motores de embarcaciones; en maquinaria

agrícola, industrial y de la construcción; y en la generación de energía eléctrica (3).

En general, en cualquier actividad en donde se demande de una máquina de potencia eficiente ahí se encontrará un motor a Diesel. Esto se debe a que es la máquina de combustión interna que mejor aprovecha la energía, así como la de mayor durabilidad y confiabilidad comparada con otras de su tipo (3).

Las propiedades de los aceites combustibles para motores Diesel, dependen de los procesos de refinación empleados en su obtención y de la naturaleza de los petróleos crudos a partir de los cuales son producidos. Por ejemplo, pueden ser producidos dentro del intervalo de ebullición de 149 °C a 402 °C y en dicho intervalo estos combustibles podrán tener diferentes propiedades físicas y químicas (3).

### **3.3 Clasificación de los combustibles Diesel**

Los combustible Diesel se clasifican según su volatilidad y la velocidad de los motores en los que se emplean. En Guatemala según las normas COGUANOR hay tres clasificaciones: Aceite combustible para motores Diesel grado No. 1-D, grado No. 2-D y Grado No. 4-D. En la actualidad el que se comercializa es el de grado No. 2-D.

#### **3.3.1 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 1-D**

Son combustibles destilados que comprende la clase de aceites combustibles volátiles que abarcan desde el queroseno hasta los destilados intermedios y se emplean en motores de alta velocidad de vehículos automotores, los cuales prestan servicio en aplicaciones que involucran cambios de velocidad y de carga relativamente amplios y frecuentes, tales como en autobuses y en aplicaciones similares; también se emplean en aquellos casos donde es frecuente encontrarse con temperaturas ambientales anormalmente bajas (4).

### **3.3.2 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 2-D**

Son combustibles destilados que incluyen la clase de gasóleos destilados de más baja volatilidad y se emplean en motores de alta velocidad de las instalaciones industriales o en motores de vehículos automotores de servicio pesado, tales como tractores, camiones o vehículos similares, los cuales prestan servicios que involucran velocidades uniformes y cargas relativamente altas; también se emplea en aquellos motores que no requieren un combustible con las características de y la alta velocidad del aceite combustibles para motores Diesel del grado No. 1-D (4). Sobre el 2D trata este trabajo de graduación .

### **3.3.3 Aceite combustible para motores Diesel grado No. 4-D**

Son los combustibles destilados que abarcan la clase de destilados más viscosos y las mezclas de estos destilados con aceites combustibles residuales, y se emplean en motores de velocidad media y baja, los cuales prestan servicios que involucran cargas sostenidas y velocidades substancialmente constantes, tales como ferrocarriles con motores Diesel (4).

#### **4. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DEL DIESEL**

La calidad del Diesel comercial, está definida por normas o especificaciones, a nivel de cada país, y en el caso de Europa a nivel regional. Los factores que permiten definir las características del Diesel son los siguientes:

- La estructura del parque automotriz, tipos y modelo de los motores

- El impacto de la tecnología de los motores, en particular de los sistemas de reducción de contaminantes
- El modo de conducción, variable según los usuarios
- Las condiciones locales de temperatura, altitud y humedad
- Los efectos sobre el medio ambiente, pérdidas por evaporación.

La influencia de la composición del carburante, sobre las emisiones de contaminantes.

Las especificaciones consideradas para el Diesel son: gravedad API, punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de 90% de destilado.

#### **4.1 Gravedad API**

La densidad o gravedad API es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. La gravedad API a cierta temperatura en, grados *Fahrenheit* por ejemplo, es una forma de expresar la densidad. Esta es una escala arbitraria, calibrada en grados, y API significa *American Petroleum Institute*, que traducido al español significa Instituto Americano del Petróleo. Se usa normalmente en la industria del petróleo (5).

La gravedad API está relacionada con la Densidad Relativa, a 60 °F, de tal manera que a mayor API menor es la Densidad Relativa y al contrario. Por lo tanto, hidrocarburos de alto API son más livianos que los de bajo API. El Diesel tiene más alto API que el asfalto por ejemplo (5).

La precisa determinación de la gravedad API del petróleo y sus productos es necesaria para la conversión de volúmenes medidos, a volúmenes a la temperatura estándar de 60 °F (6).

La relación entre la gravedad API y la Densidad Relativa a 60 °F es:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141.5}{\text{D.R. } 60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

La gravedad API es un factor que gobierna la calidad del petróleo crudo. Pero, la gravedad API de un producto de petróleo es indicador incierto de calidad. Correlacionada con otras propiedades, la gravedad API puede usarse para dar aproximadamente la composición del hidrocarburo y el calor de combustión (6).

#### **4.2 Punto de Inflamación**

El punto de Inflamación o *Flash Point*, es la temperatura más baja de muestra, corregida a una presión barométrica de una atmósfera, a la cual la aplicación de una llama de prueba hace que el vapor de la muestra se inflame bajo las condiciones específicas de la prueba. Esto significa que es la temperatura mínima a la cual se evapora suficiente líquido para crear una mezcla de combustible y aire que se quemará al ser encendida. Es decir que la temperatura a la que aparece la llama en la muestra, la cual solo dura un instante (3).

El punto de Inflamación puede indicar la posible presencia de materiales altamente volátiles e inflamables en un material relativamente no volátil o no inflamable. Por ejemplo, un punto de Inflamación anormalmente bajo en una

muestra de Diesel puede indicar contaminación con kerosina. Al contrario, un punto de inflamación muy alto puede deberse a la posible contaminación con materiales poco volátiles (5).

Esta variable es una de un número de propiedades que deben considerarse para asegurar el riesgo global de la inflamabilidad de un material. Se usa en regulaciones de embarque y seguridad para definir materiales inflamables y combustibles (6).

### 4.3 Índice de Cetano

El Índice de Cetano es un estimado del Número de Cetano de combustibles Diesel, que se obtiene a partir de la gravedad API y el punto medio de ebullición, ya sea por medio de una formula o por el uso de una gráfica (9). La formula utilizada es la siguiente:

$$\text{Índice de Cetano} = -420.34 + 0.016 * G^2 + 0.192 G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 0.0001809 M^2$$

G = gravedad API, determinada por el método de prueba D 287 o D 1298

M = temperatura del punto de ebullición medio, °F, determinada por el método de prueba D y corregida a presión barométrica estándar (7).

De la formula anterior se estable la Figura No. 15 del Anexo III, la cual es utilizada para el calculo del Índice de Cetano con mayor facilidad y rapidez que utilizando dicha formula.

El Índice de Cetano no es un método opcional para expresar el Número de Cetano. Es una herramienta suplementaria para predecir el Número de Cetano cuando se usa con las debidas consideraciones por sus limitaciones, y cuando no se dispone de motores, equipo especial, tiempo, ni dinero requerido (6).

Número de Cetano. En el funcionamiento de los motores Diesel se presenta el problema de combustión incontrolada e ineficiente. Para aliviar este problema es deseable limitar el retardo de la ignición del combustible a un mínimo (6).

Hay varios factores a través de los cuales se puede lograr esto, y uno de ellos es la composición del combustible. Los hidrocarburos alifáticos de cadena larga se queman bien bajo compresión, pero los de cadena corta y los aromáticos reaccionan pobremente. Por lo tanto, es deseable evaluar el combustible en su retardo de ignición y medir esta propiedad (3).

El Número de Cetano del Diesel es el resultado numérico de un motor test diseñado para evaluar el retraso de ignición del combustible. Para establecer la escala del Número de Cetano se establecieron dos combustibles de referencia, asignándosele un número de 100 al Cetano Normal, y un número de 15 al Heptametilnonano. Y para determinar el Número de Cetano de cualquier combustible, su retardo de ignición es comparado en una máquina de test estándar con una mezcla de los combustibles de referencia (3).

A menor período de retardo de ignición, más alto el Número de Cetano y más pequeña la cantidad de combustible en la cámara de combustión cuando el combustible se inflama. Por lo tanto, combustibles con un alto Número de Cetano normalmente causan bajas razones de presión con picos elevados y bajos. Ambas tendencias contribuyen a aminorar el ruido en la combustión y permite mejorar el control de loa misma, resultando en un incremento en la eficiencia de la máquina y poder de salida (6).

#### **4.4 Contenido de Azufre**

Es la cantidad de Azufre total presente en una muestra, como Azufre elemental y expresada en porcentaje en masa.

Esta determinación cuantitativa de Azufre es una indicación de las tendencias de corrosión del combustible en sus productos de combustión (6).

El Azufre puede estar presente en un número de formas diferentes; como mercaptanos, sulfuros, disulfuros, compuestos heterocíclicos, y tiofenos. Todos los cuales afectan a los motores causando desgaste y depósitos (3).

El Azufre activo en el combustible tiende a atacar y corroer los componentes del mismo sistema de inyección. Los compuestos de Azufre también provocan depósitos en la cámara de combustión y el sistema de inyección (3).

#### **4.5 Viscosidad Cinemática**

La prueba de Viscosidad Cinemática es una medida de resistencia de los líquidos a fluir. Esta se mide generalmente registrando el tiempo requerido para que un volumen dado de combustible a temperatura constante fluya a través de un pequeño orificio de dimensiones estándar. Lo que se desea saber es qué tan espeso es un líquido (7).

La viscosidad del Diesel es importante saberla primeramente debido a su efecto en el manejo del combustible por las bombas y el sistema de inyección.

La viscosidad del combustible tiene una gran influencia en la forma de su esparcimiento. Altas viscosidades pueden causar pobre atomización, mucho goteo, y alta penetración de *spray* (6).

Con altas viscosidades el chorro tiende a ser una corriente más sólida en lugar de un spray en pequeñas gotas. Como resultado, el combustible no es distribuido en o mezclado con el aire requerido para el quemado. Ello resulta en una pobre combustión, acompañada por pérdida del poder de salida y baja de la economía. En máquinas pequeñas el combustible esparcido puede chocar sobre las paredes del cilindro, lavar la capa de aceite lubricante y diluir el aceite del motor. Esto contribuye al desgaste excesivo (6).

Las bajas viscosidades resultan en un spray el cual es muy suave y no penetra suficientemente lejos en la cámara de combustión para una buena mezcla. La combustión es perjudicada y la potencia de salida y economía decrecen. La baja viscosidad lleva a una excesiva fuga en el paso de inyección de la bomba de émbolo. Las medidas del combustible resultan inexactas y la eficiencia de la máquina es reducida. El desgaste de los componentes del sistema del combustible pueden incrementarse debido a que las propiedades lubricantes de los combustibles decrecen cuando baja la viscosidad (6).

La inyección de Diesel en el motor, está controlada por volumen o por tiempo de la válvula de solenoide. Las variaciones en la densidad y viscosidad del combustible resultan en variaciones en la potencia del motor y, consecuentemente, en las emisiones y el consumo. Se ha encontrado, además, que la densidad influye en el tiempo de inyección de los equipos de inyección controlados mecánicamente (3).

#### **4.6 Punto de Destilación**

Un punto de Destilación es la temperatura a la cual ha ocurrido un porcentaje de destilación de una muestra determinada. Dado que los combustibles son mezclas de hidrocarburos, estos no tienen un punto de

destilado singular, su tendencia a evaporizarse es caracterizada por la determinación de una serie de temperaturas a las cuales varios porcentajes de evaporación tienen lugar. Se usan entonces las temperaturas a las cuales ocurre la evaporación del 10, 50, 90% y final para caracterizar la volatilidad de los combustibles.

Si un combustible se calienta gradualmente, se vaporizan primero altas proporciones de componentes con bajo punto de ebullición y siguen las de mayor punto de ebullición conforme aumenta la temperatura.

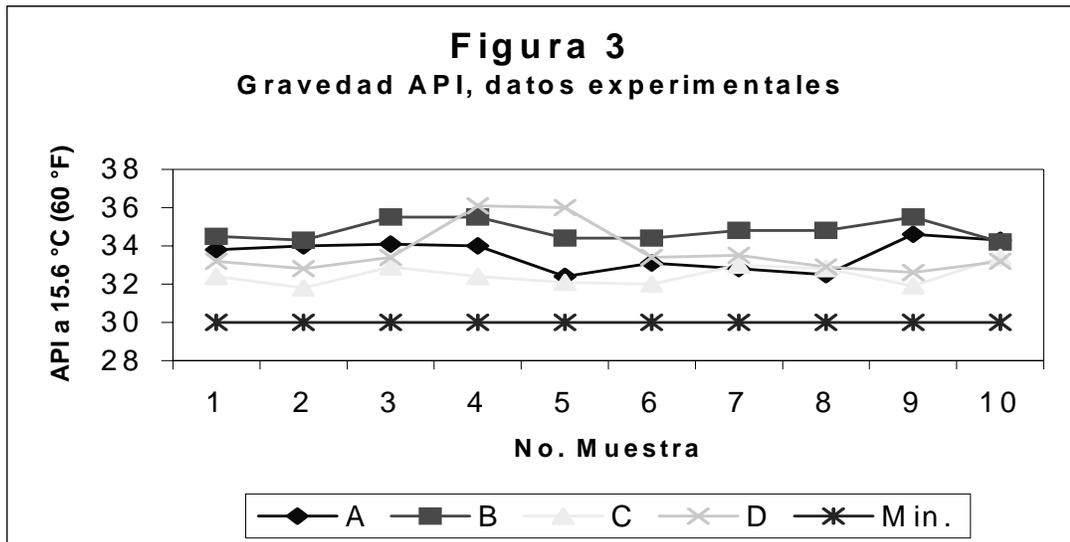
En general, los Puntos de Destilación son especificados para asegurar el suministro de un combustible balanceado apropiadamente libre de una proporción indebida de fracciones ligeras o pesadas (6).

Para el caso del Diesel 2D, la temperatura para recuperar el 90%, según la especificación para Guatemala, es de una mínima de 282.22 y una máxima de 350.00 °C. Si el punto del 90% es muy bajo, tiende a asegurar bajos residuos de carbón y minimizar la dilución del aceite en el motor (6).

## 5. RESULTADOS

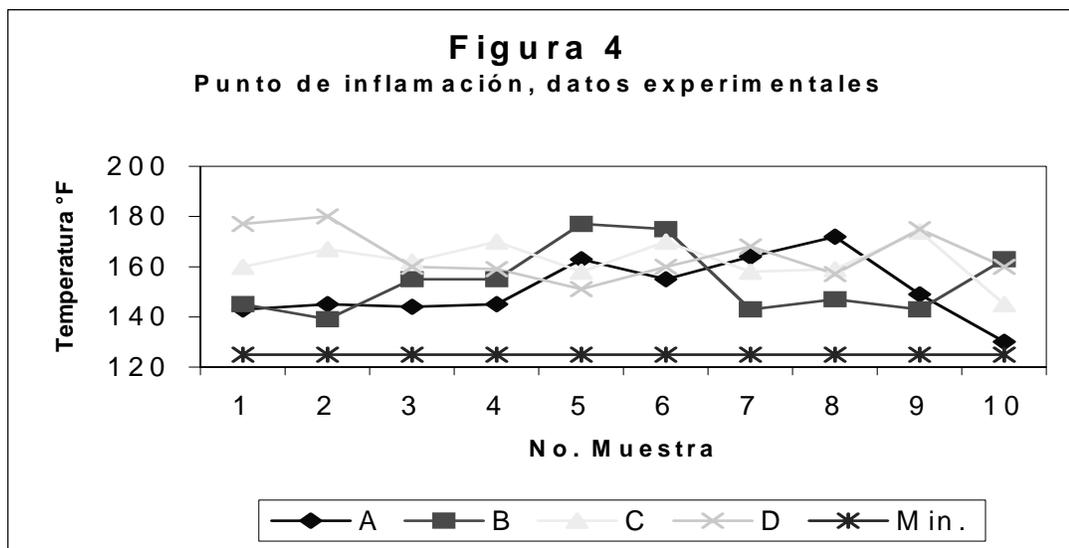
### 1. Gráficos

Figura 3. Gravedad API, datos experimentales



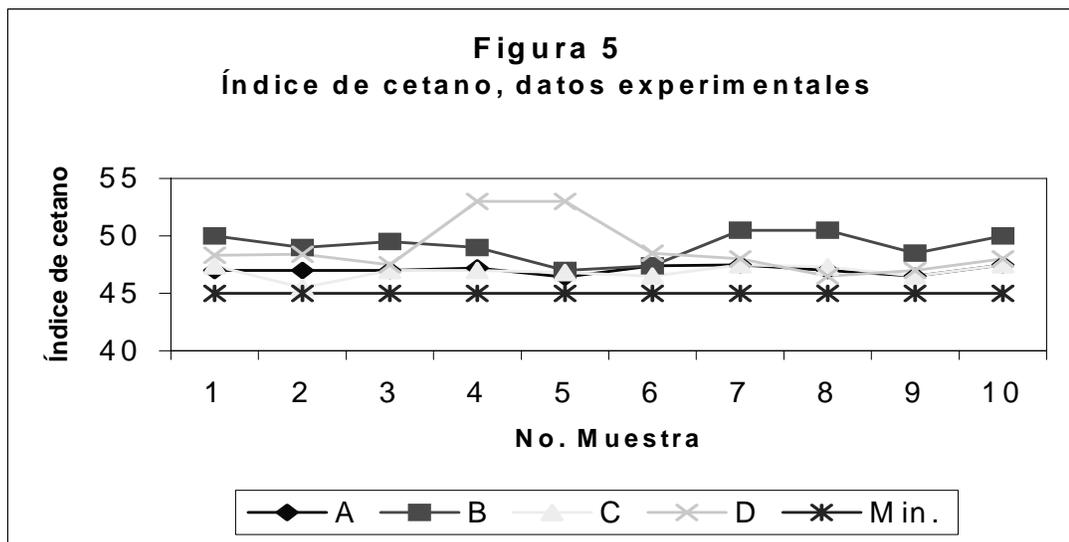
Gravedad API, mínima según Norma = 30

Figura 4. Punto de Inflamación, datos experimentales



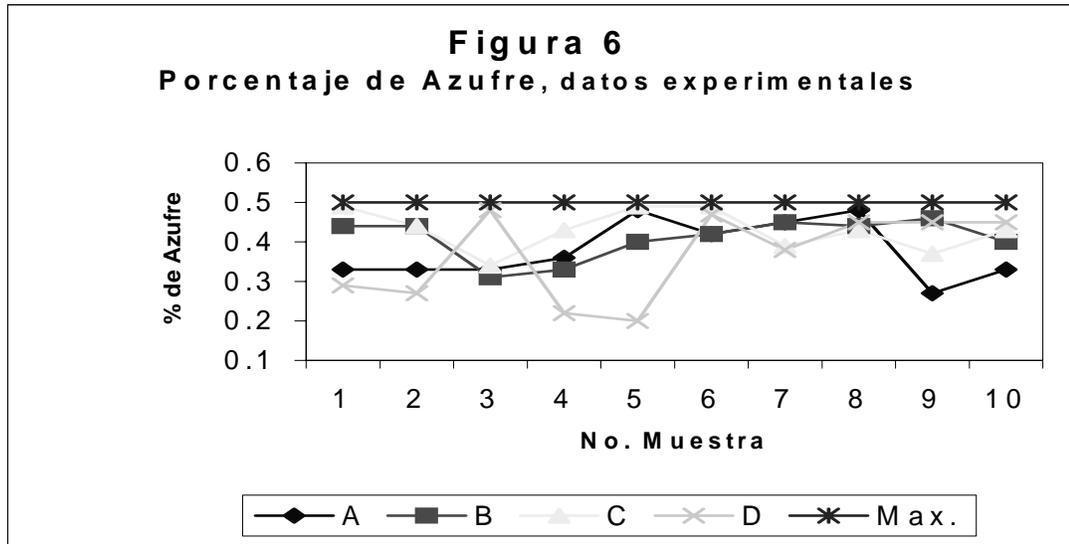
Punto de Inflamación, mínimo según Norma = 125 °F

Figura 5. Índice de Cetano, datos experimentales



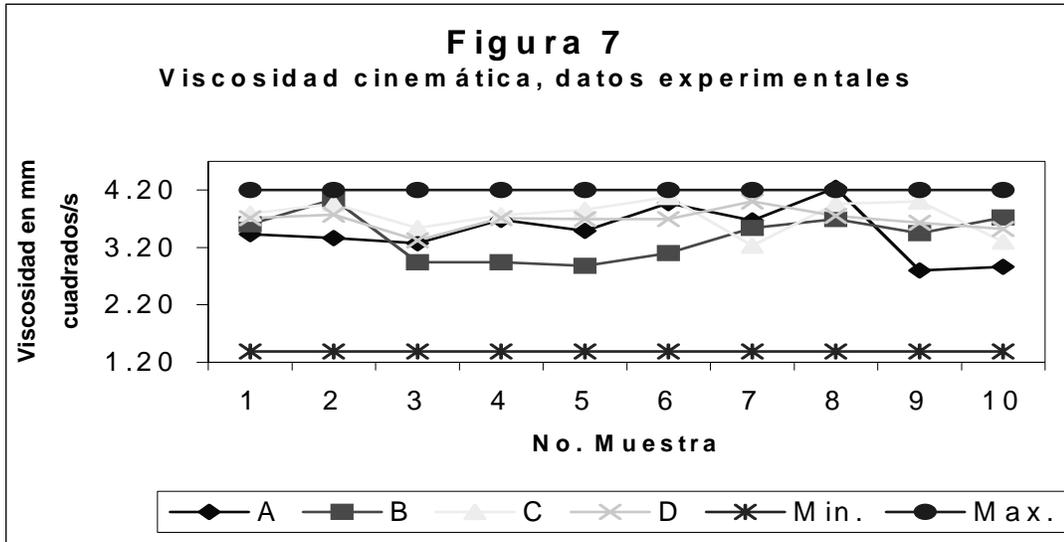
Índice de Cetano, mínimo según Norma = 45

**Figura 6. Porcentaje de Azufre, datos experimentales**



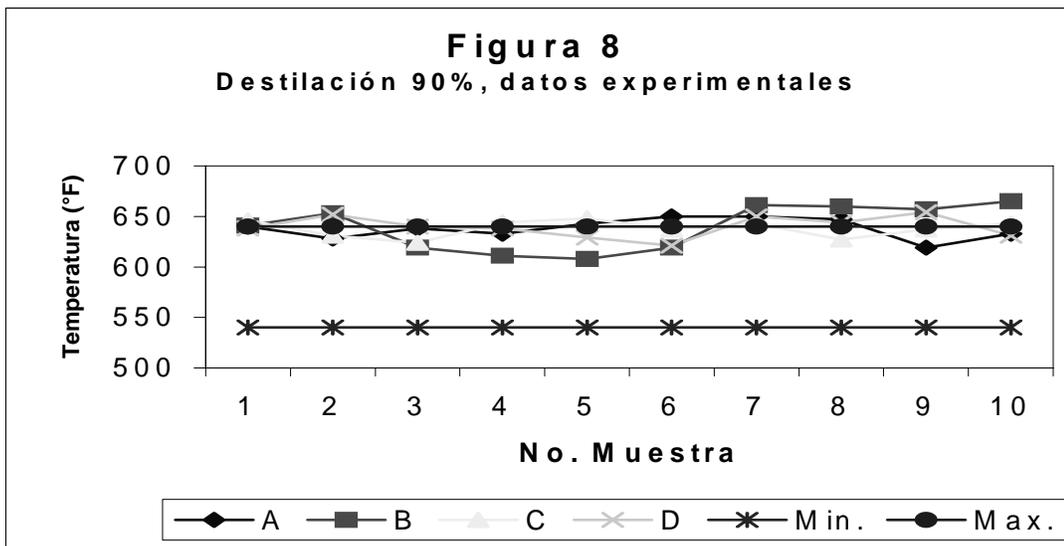
Porcentaje de contenido de Azufre, máximo según Norma = 0.5 %

**Figura 7. Viscosidad Cinemática, datos experimentales**



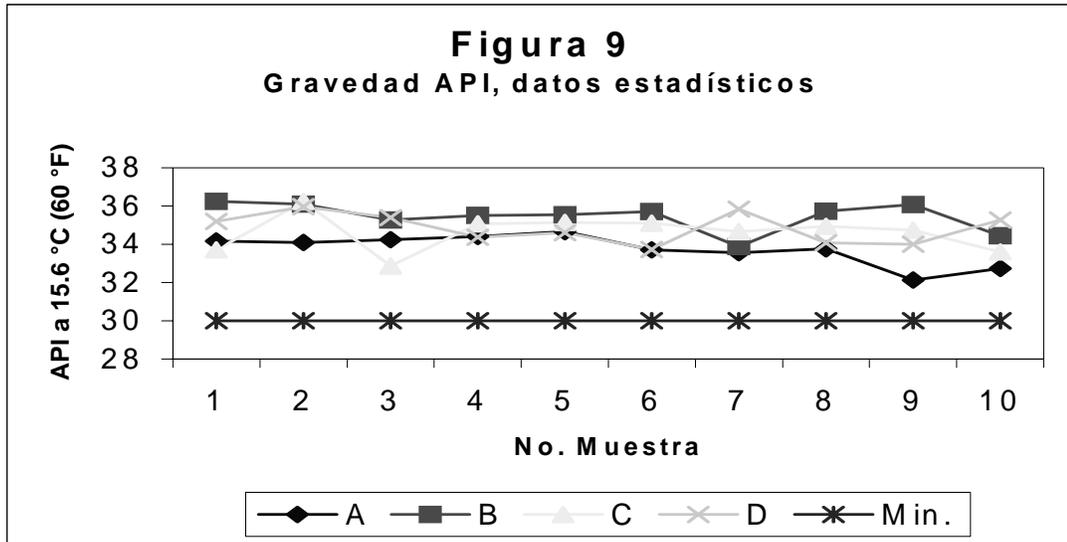
Viscosidad Cinemática, en mm cuadrados/s, mínimo – máximo, según Norma = 1.39 – 4.20

**Figura 8. Destilación 90 %, datos experimentales**



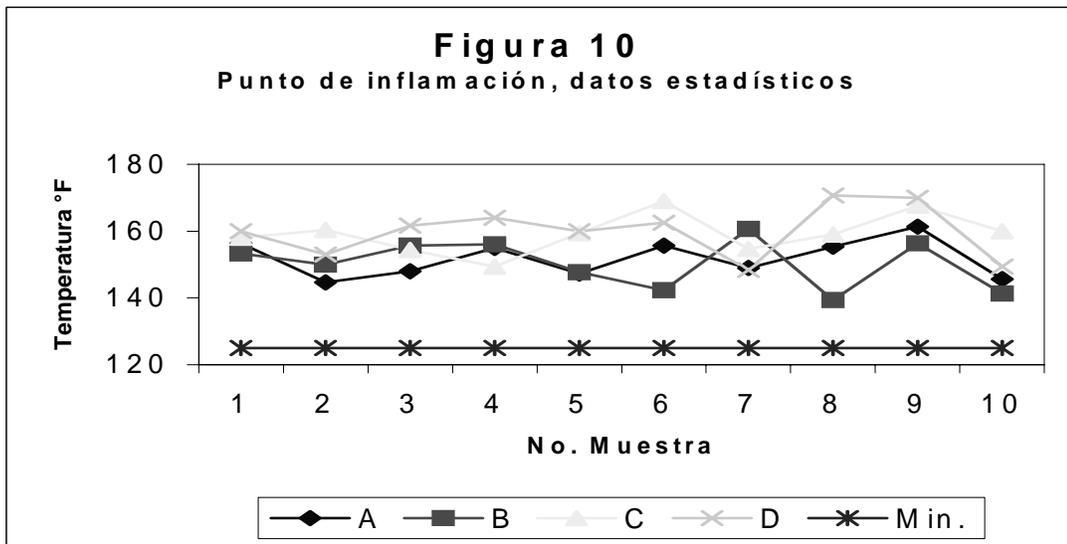
Temperatura, mínima – máxima, al recuperar el 90% según Norma = 540 °F – 640 °F

**Figura 9. Gravedad API, datos estadísticos**



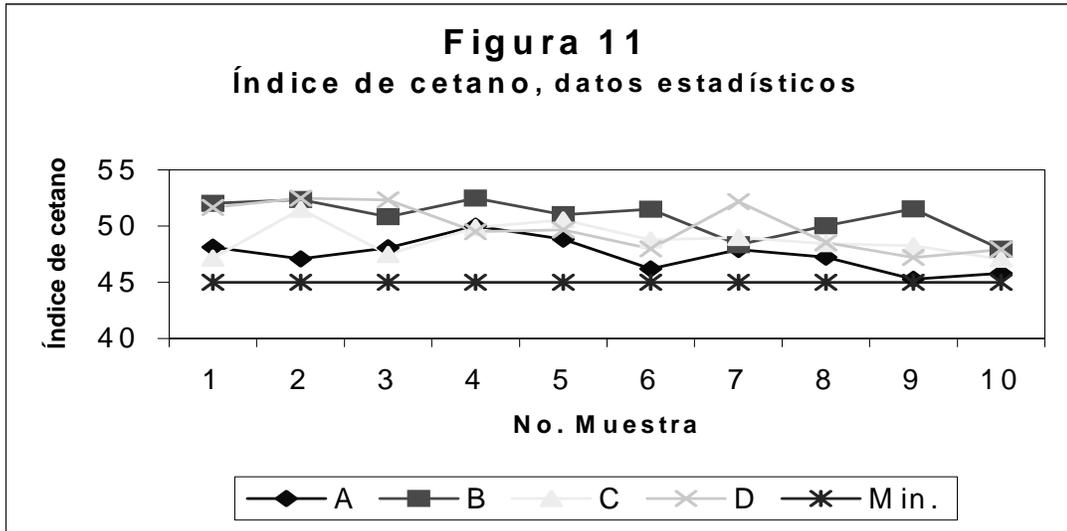
Gravedad API , mínima según Norma = 30

**Figura 10. Punto de Inflamación, datos estadísticos**



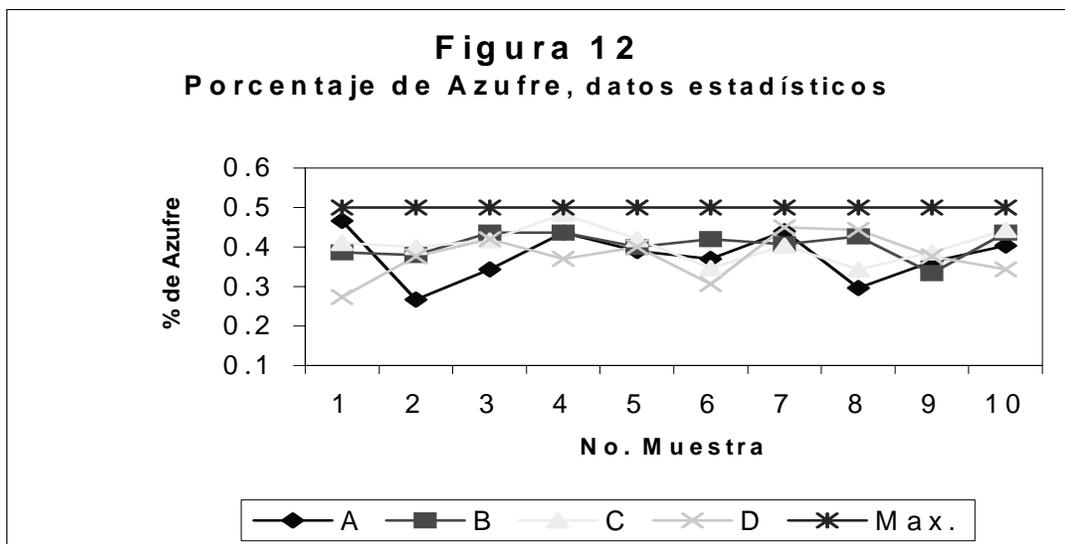
Punto de Inflamación, mínimo según Norma = 125 °F

Figura 11. Índice de Cetano, datos estadísticos



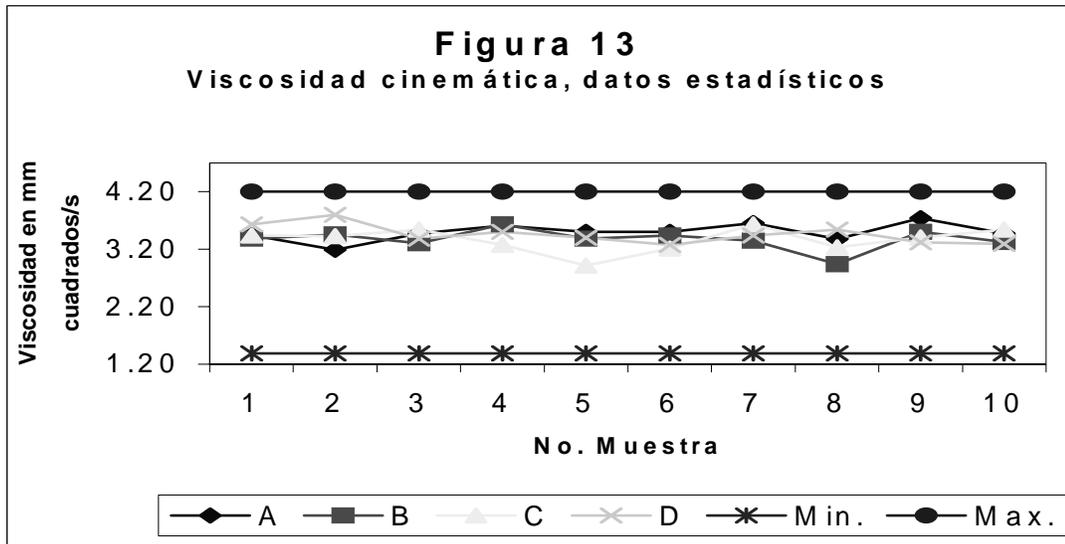
Índice de Cetano, mínimo según Norma = 45

Figura 12. Porcentaje de Azufre, datos estadísticos



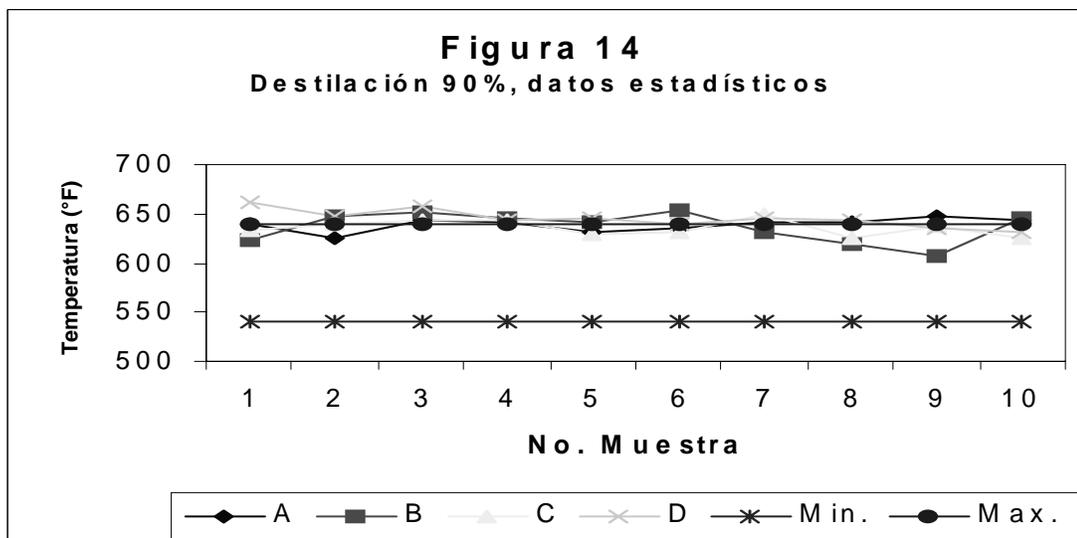
Porcentaje de contenido de Azufre, máximo según Norma = 0.5 %

**Figura 13. Viscosidad Cinemática, datos estadísticos**



Viscosidad Cinemática, en mm cuadrados/s, mínimo – máximo, según Norma = 1.39 – 4.20

**Figura 14. Destilación 90 %, datos estadísticos**



Temperatura, mínima – máxima, al recuperar el 90% según Norma = 540 °F – 640 °F

## 5.2 Varianza

### 5.2.1 Datos experimentales

Tabla VI. Varianza, datos experimentales

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	0.52	0.28	0.29	1.60
Punto de Inflamación	156	183	70	194
Índice de Cetano	0.14	1.48	0.38	5.25
Porcentaje de Azufre	0.005	0.003	0.003	0.012
Viscosidad Cinemática	0.20	0.16	0.09	0.03
Destilación 90%	101	519	69	114

## 5.2.2 Datos estadísticos

Tabla VII. Varianza, datos estadísticos

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	1.42	1.37	2.13	1.48
Punto de Inflamación	176	240	109	246
Índice de Cetano	4.43	5.21	4.91	7.73
Porcentaje de Azufre	0.009	0.007	0.008	0.015
Viscosidad Cinemática	0.15	0.10	0.09	0.19
Destilación 90%	203	318	192	162

## 6.3 Diferencias de Medias

### 6.3.1 Datos experimentales

Tabla VIII. Diferencia de medias, datos experimentales

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	3.61	4.79	2.47	3.71
Punto de Inflamación	26	29	37	40
Índice de Cetano	2.05	4.14	1.90	3.82
Porcentaje de Azufre	-0.12	-0.09	-0.07	-0.13
Viscosidad Cinemática	0.68	0.59	0.95	0.88
Destilación 90%	48	49	48	50

### 6.3.2 Datos estadísticos

Tabla XIX. Diferencia de medias, datos estadísticos

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	3.79	5.39	4.54	4.87
Punto de Inflamación	26.94	24.97	34.47	33.83
Índice de Cetano	3.13	5.96	2.97	3.05
Porcentaje de Azufre	-0.12	-0.09	-0.09	-0.13
Viscosidad Cinemática	0.68	0.59	0.57	0.63
Destilación 90%	46.92	44.39	43.28	47.58

## **6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Se comparó la calidad del Diesel 2D, entre las cuatro compañías que comercializan el mayor volumen en el país, según normas vigentes que regulan este combustible en Guatemala. Para tal efecto se determinaron las propiedades fisicoquímicas más importantes para determinar la calidad del Diesel (API, punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de destilado al 90%) en muestras analizadas en el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas, las cuales fueron tomadas en toda la cadena de comercialización de las diferentes compañías estudiadas. Para tener un resultado más eficiente en la determinación de la calidad del Diesel 2D, se recopilaron los datos de dichos análisis estudiados en este trabajo, efectuados entre los años 1998 al 2000.

Para interpretar de mejor forma los resultados se efectuaron gráficos para cada análisis tanto en los datos experimentales como en la recopilación estadística. Para realizar la comparación entre las compañías se efectuó cálculo de varianzas y diferencias de medias. La varianza ayudó a establecer la consistencia en los datos estudiados y determinar que compañía distribuye Diesel 2D con menos variación en la calidad. La diferencia de medias estableció un punto promedio entre los datos estudiados, lo cual se utilizó para comparar los resultados obtenidos y los parámetros mínimos de calidad estudiados para determinar si el resultado es positivo o negativo. Si el resultado es positivo esto significa que cumple con la calidad establecidas en las normas del país y por lo contrario si el resultado es negativo esa muestra no cumple con las normas del país, esto es en el caso donde el parámetro de calidad existe un límite mínimo; pero cuando existe un límite mínimo y un superior, se calcula un promedio entre el intervalo de estos dos límites y el dato obtenido en esta operación es el que se utiliza para calcular la diferencia de medias. El Diesel de mejor calidad tomando el caso anterior es el que el resultado de diferencia de medias se acerque más a cero.

A continuación se detalla los resultados de cada parámetro fisicoquímico analizado para determinar la calidad del Diesel 2D, de las cuatro compañías estudiadas.

## **6.1 Gravedad API**

La gravedad API es una escala que permite la representación de la densidad, utilizándose como Índice de calidad solamente en aplicaciones a productos petroleros. Su importancia principal son los cálculos de peso en volumen (8)

La gravedad API está relacionada con el peso específico, a una temperatura de 60 °F, por lo tanto, los hidrocarburos de alto API son más livianos que los de bajo API. El Diesel tiene más bajo API que la gasolina por ejemplo. El petróleo y sus productos se comercializan a un volumen convertido a una temperatura estándar de 60 °F, ya que los hidrocarburos tienen la propiedad de expandirse o comprimirse según la temperatura del medio donde se encuentra, por lo que es importante ser preciso en la determinación de la gravedad API, para encontrar un factor que lleve al cálculo de dicho volumen.

La gravedad API de un producto de petróleo es indicador incierto de calidad. Correlacionada con otras propiedades, la gravedad API puede usarse para dar aproximadamente la composición del hidrocarburo y el calor de combustión.

En el caso del Diesel la gravedad API es muy importante para convertir un volumen de dicho producto a cualquier temperatura a un volumen a la temperatura estándar de 60 °F.

Para el Diesel 2D, la gravedad mínima especificada es de 30 grados API, en las figuras 3 y 9 se observa que las diferentes compañías cumplen con la especificación referente a este parámetro de calidad.

Según los resultados de varianzas en el análisis experimental (tabla VI), la compañía B es la que presenta la menor variación, seguido por la compañía C. En lo referente al análisis estadístico (tabla VII), la compañía B es la que presenta menos variación seguido por la compañía A.

Con relación a las diferencias de medias, todas las muestras cumplen con lo especificado, porque las mismas dan resultados positivos, por lo que se deduce que están sobre el parámetro establecido, ya que en el caso de la norma

guatemalteca referente a la escala API, para el Diesel 2D, tiene un mínimo, pero no especifica un máximo. En el análisis experimental (tabla VIII), la compañía B es la que supera con mayor margen el límite especificado y la compañía C es la que supera con menor margen. En el análisis estadístico (tabla XIX), es la compañía B la que supera con mayor margen, seguida de las compañías D, A y C respectivamente, deduciendo que para este parámetro fisicoquímico solo se toma en cuenta un mínimo y no un máximo.

## **6.2 Punto de Inflamación**

El punto de Inflamación o *Flash Point*, es la temperatura más baja a la cual se inflaman los vapores que se desprenden de los productos derivados del petróleo, cuando se les aplica una pequeña llama bajo determinadas condiciones de prueba.

El punto de inflamación es de utilidad para determinar si el Diesel está contaminado con otro hidrocarburo. Por ejemplo, un punto de inflamación anormalmente alto puede indicar contaminación con kerosina, y al contrario, un punto de inflamación muy bajo puede deberse a la posible contaminación con hidrocarburos más pesados que el Diesel.

El punto de inflamabilidad del Diesel 2D, no se encuentra directamente relacionado al comportamiento del motor; sin embargo es de importancia cuando se le usa en conexión con las precauciones de seguridad y con los requisitos legales involucrados en el transporte y almacenamiento de dicho combustible; también es importante cumplir con las regulaciones contra incendios.

Para el Diesel 2D, el punto de inflamación mínimo especificado es de 125.6 °F, en las figuras 4 y 10, se observa que las diferentes compañías cumplen con la especificación referente a este parámetro de calidad.

Según los resultados de varianzas tanto en el análisis experimental (tabla VI), como el estadístico (tabla VII), la compañía C es la que presenta la menor variación, seguido por la compañía A, B y D respectivamente.

Con relación a las diferencias de medias, en el análisis experimental (tabla VIII) la compañía D es la que supera con mayor margen el límite especificado, seguido de las compañías C, B y A. En el análisis estadístico (tabla XIX) la compañía B es la que supera con mayor margen, mientras la compañía A, D y C le siguen en ese orden, esto se debe a que este parámetro está normado solo un límite inferior, por lo que se deduce que arriba del límite es de mejor calidad.

### **6.3 Índice de Cetano**

En el combustible Diesel, el Índice de Cetano es un indicativo de la capacidad o facilidad de ignición.

Se puede medir en el laboratorio en un motor especialmente acondicionado para ello. En este caso se habla del Número de Cetano. Si es calculado a partir de los datos de la destilación se dice del Índice de Cetano.

La diferencia entre los dos puede ser del orden de 1 a 2 puntos. Entre mayor es el Índice de Cetano, mayor será la facilidad de ignición del combustible e indica mejor calidad.

Existen otras asociaciones del comportamiento del motor con el Índice de Cetano tales como que a mayor Índice de Cetano menor ruido del motor, aceleración más amortiguada, etcétera.

El Número de Cetano del Diesel es el resultado numérico de un motor test diseñado para evaluar el retraso de ignición del combustible. Para establecer la escala del Número de Cetano se establecieron dos combustibles de referencia, asignándosele un número de 100 al Cetano Normal, y un número de 15 al Heptametilnonano. Y para determinar el Número de Cetano de cualquier combustible, su retardo de ignición es comparado en una máquina de test estándar con una mezcla de los combustibles de referencia.

Para el Diesel 2D, el mínimo especificado es de 45, en las figuras 5 y 11 se observa que las diferentes compañías cumplen con esta especificación.

Según los resultados de varianza referente al análisis experimental (tabla VI), la compañía A es la que presenta la menor variación seguida de las compañías C, B y D respectivamente. En el análisis estadístico se tiene el mismo comportamiento que el experimental.

Con relación a la diferencia de medias, en el análisis experimental la compañía D es la que supera con mayor margen el límite especificado, seguido de las compañías B, C y A. En los datos estadísticos el orden es B, D, C y A.

#### **6.4 Contenido de Azufre**

Azufre total, es la cantidad de Azufre que se encuentra presente en los derivados del petróleo y la cual se determina bajo condiciones de prueba

específica. Esta determinación cuantitativa de Azufre es una indicación de las tendencias de corrosión del combustible en sus productos de combustión (9)

El Azufre contenido en el Diesel presenta los mismos inconvenientes que para la gasolina: corrosión, emisión de  $\text{SO}_2$ , desactivación de los catalizadores. Los contenidos de Azufre muy bajos serán necesarios para que funcionen eficientemente los equipos anticontaminación del futuro. El Diesel producido a partir de petróleos crudos pesados tiene contenido de Azufre elevado y es necesario invertir en costosas unidades de desulfuración para respetar las especificaciones descritas en este documento. El petróleo que se explota en Guatemala es pesado, por tal razón el Diesel que se produce del mismo contiene alto contenido de Azufre, tal motivo hace que no cumpla con las especificaciones normadas en este país y por ende no se comercializa.

El efecto del contenido de Azufre del Diesel 2D para motores Diesel sobre la formación de depósitos y sobre el desgaste del motor, varía dependiendo del motor y de las condiciones de operación, por lo que debe evitarse contenidos de Azufre más altos que los especificados en la norma estudiada (10).

Para el Diesel 2D, el porcentaje máximo especificado presente en una muestra es de 0.5 %, en las figuras 6 y 12 se observan que todas las muestras de las diferentes compañías no exceden del porcentaje especificado.

Según los resultados de varianza referente al análisis experimental las compañías B y C son las que presentan menos variación, seguidas de la compañía A y por último la compañía D. En lo relacionado a los datos estadísticos, la compañía B es la que presenta menos variación seguida de las compañías C, A y D respectivamente.

Con relación a las diferencias de medias tanto en el análisis experimental como el estadístico, el comportamiento es el mismo; la compañía D es la que manifiesta mayor margen de diferencia, seguida por las compañías A, B y C.

## **6.5 Viscosidad Cinemática**

La prueba de Viscosidad Cinemática es una medida de resistencia de los líquidos a fluir, y se define como el tiempo requerido para que un volumen determinado de un líquido fluya por gravedad a través de un tubo capilar, bajo una determinada cabeza hidrostática de presión. Dicha cabeza hidrostática es proporcional a la densidad absoluta del líquido.

Para la mayoría de motores Diesel resulta ventajoso especificar una viscosidad mínima y máxima del combustible Diesel 2D, puesto que una viscosidad baja puede dar como resultado un desgaste excesivo de las bombas de inyección y pérdidas de potencia que son provocadas por fugas en el inyector y en las bombas de inyección del combustible. Por otro lado se tiene que la viscosidad máxima esta limitada por consideraciones relativas al diseño y tamaño del motor, y por las características del sistema de inyección, pues una viscosidad alta ofrece resistencia excesiva en las bombas y deterioro de los filtros del combustible.

Para el Diesel 2D, el rango especificado es de un mínimo de 1.90 y un máximo de 4.30 milímetros cuadrados por segundo, en las figuras 7 y 13 todas las compañías estudiadas cumplen con esta norma.

Según los resultados de varianza, análisis experimentales (tabla VI), la compañía D es la que presenta menos variación, seguido de la compañía C, B y A consecutivamente. En lo referente al análisis estadístico (tablas VII), la compañía C, es la que presenta menos variación, seguido de las compañías B, A y D respectivamente.

Con relación a la diferencia de medias, en el análisis experimental, la compañía B es la que más se acerca a la media, seguido de las compañías A, D y C. En los datos estadísticos el orden es C, B, D y A.

## **6.6 Punto de Destilación**

El volumen de Diesel producido en una refinería puede ser influenciado significativamente por el rango de destilación permitido en el producto final. Debido a que todas las refinerías de América Central utilizan componentes de petróleo crudo más pesados que el Diesel, para el combustible pesado esas refinerías siempre desearán el rango de destilación más alto posible para el Diesel, de manera que la especificación no influya sus factores económicos. Sin embargo, como el Diesel contiene más componentes pesados, su combustión tiende a ser menos eficiente y el motor Diesel tiende a emitir más partículas en forma de humo negro. Este humo, en particular, es materia de inquietud, porque contiene cantidades significativas de partículas pequeñas que pueden causar efectos respiratorios adversos.

Un punto de Destilación es la temperatura a la cual ha ocurrido un porcentaje de destilación de una muestra determinada. Dado que los combustibles son mezclas de hidrocarburos, estos no tienen un punto de

destilado singular, su tendencia a evaporarse es caracterizada por la determinación de una serie de temperaturas a las cuales varios porcentajes de evaporación tienen lugar. Se usan entonces las temperaturas a las cuales ocurre la evaporación del 10, 50, 90% y final para caracterizar la volatilidad de los combustibles (9).

Si un combustible se calienta gradualmente, se vaporizan primero altas proporciones de componentes con bajo punto de ebullición y siguen las de mayor punto de ebullición conforme aumenta la temperatura.

Para el caso del Diesel 2D, la temperatura para recuperar el 90%, según la especificación para Guatemala, es de una mínima de 282 °C y una máxima de 350 °C. Este nivel provee un balance entre los factores económicos y las implicaciones de rendimiento de las especificaciones bajas de destilación del Diesel y las implicaciones ambientales de una especificación alta de destilación.

Si el punto del 90% es muy bajo, tiende a asegurar bajos residuos de carbón y minimizar la dilución del aceite en el motor.

En la figura 8, las compañías A y C cumplen con esta norma, para las compañías B y D algunas muestras están sobre el máximo establecido en la referida especificación. En la figura 14, todas las compañías presenta por lo menos una muestra que esta arriba del máximo permitido por esta especificación. La compañía A y C cumple de mejor manera con esta norma, las compañías B y D presentan algunas muestras que están por encima del limite especificado. Regularmente cuando un dato esta abajo del intervalo normado se debe a que el Diesel tiene un número alto de moléculas volátiles, por lo que se deduce que puede estar contaminado con un hidrocarburo más liviano (kerosina, gasolinas etc.); pero cuando un dato esta arriba del intervalo

normado tiene número de moléculas volátiles bajo, por lo que puede estar contaminado con un hidrocarburo mas pesado (Búnker, asfalto, etc.)

Según los resultados de varianza, análisis experimentales (tabla VI), la compañía C es la que presenta menos variación, seguido de la compañía A, D y B consecutivamente. En lo referente al análisis estadístico (tablas VII), la compañía D, es la que presenta menos variación, seguido de las compañías C, A y B respectivamente.

En relación a diferencia de medias en el análisis experimental las compañías A y C son las que mas se acerca a la media, seguido de la compañías B y D consecutivamente. En los datos estadísticos el orden es C, B, A y D.

Para determinar qué compañía distribuye el Diesel 2D de mejor calidad, se compararon los resultados de todos los parámetros analizados, dándole una puntuación a cada empresa, referente a que compañía cumplía de mejor forma cada parámetro fisicoquímico analizado. Por ultimo se sumo los puntos obtenidos por cada compañía y así se determino el lugar de cada una en cumplimiento de las normas de calidad establecidas en Guatemala. Tomando en cuenta el análisis anterior fue la compañía A la que distribuye el Diesel 2D de la mejor calidad, luego sigue la compañía C, B y D respectivamente. Referente a la compañía que distribuye este producto con menos variación en su calidad, es la compañía C, luego la A, B y por ultimo la D.

En general el Diesel que se distribuye en la República de Guatemala, es de buena calidad, ya que cumple sobre el 95 % con las especificaciones establecidas en el país, una de las especificaciones que mejor cumple es el

contenido de Azufre, por lo que el mismo contamina en menor proporción el medio ambiente.

## CONCLUSIONES

1. Según la diferencia de medias, el combustible Diesel 2D de mejor calidad se distribuye por la compañía A, seguidos en orden descendente referente al cumplimiento de las especificaciones mínimas de calidad por las compañías C, B y D respectivamente.
2. Los resultados de análisis de varianza, para el Diesel 2D indican que la compañía C, presente la menor variación respecto a su media, seguida por las compañías A y B, mientras la compañía D es la que presenta la mayor variación..
3. Según la diferencia de medias y los resultados de los análisis fisicoquímicos, el combustible Diesel 2D distribuido en el país cumple con las especificaciones mínimas más importantes de calidad.
4. Al comparar la calidad del Diesel 2D entre las compañías estudiadas los resultados no presentan diferencias significativas.



## RECOMENDACIONES

1. Los parámetros de calidad del Diesel 2D, analizados en este estudio son los mínimos requeridos tanto en el funcionamiento de los motores Diesel, como para el medio ambiente, por tal motivo es necesario que se analicen periódicamente en toda la cadena de distribución y no solo cuando el producto es importado, ya que puede contaminarse al manipularlo tanto en las terminales de almacenamiento, en el transporte o en las estaciones de servicio.
2. El número de Cetano es uno de los parámetros de calidad que se tiene que tomar en cuenta en un estudio futuro, ya que el mismo incide en el rendimiento de los motores Diesel, lo que hace que el mismo sea de mucha importancia para determinar la calidad de un Diesel analizado.
3. Actualmente, se cuenta en el Ministerio de Energía y Minas con equipo que obtiene directamente el número de Cetano, por lo que se puede incluir este parámetro en las especificaciones de calidad establecidas en el país.
4. Efectuar un estudio sobre el Liviano 2D obtenido del petróleo nacional, para verificar que especificaciones del Diesel 2D establecidas en el país cumple.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1

**Calidad del petróleo Diesel.** [www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html](http://www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html). Consultada agosto del 2002.

2

**Evolución de La Calidad del Diesel en México.** [www.franquiciapemex.com/octanaje/5evo.htm](http://www.franquiciapemex.com/octanaje/5evo.htm). Consultada agosto 2002.

3

**Pemex Diesel.** [www.franquiciapemex.com/productos/cuatrdies.html](http://www.franquiciapemex.com/productos/cuatrdies.html)  
Consultada agosto del 2002.

4

Ministerio de Economía. **Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR).** Guatemala, 1987.

5

Fausto Daniel Escalante Pérez. Evaluación de las características Físicoquímicas de las gasolinas, que se comercializan en Guatemala, para conocer su calidad. Tesis de Ing. Qco. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1995. pp. 1-20

6

Ministerio de Energía y Minas. **Especificaciones mínimas de calidad.** (Acuerdo ministerial 180-85, 1985).

**7**

Villatoro Mayra. **Manual de Procedimientos.** Laboratorio Químico Julio Beltranena. Ministerio de Energía y Minas. Guatemala 2001. pp. 5-30

**8**

Perry/Green/Maloney. **Manual del Ingeniero Químico.** (3ª. Edición; México: Editorial McGraw-Hill, 1986). Tomo I, Sección 2.

**9**

James Gary y Glenn Hanwerk. **Refino de petróleo.** (España: Editorial Reverte,1980) pp. 34, 33.

**10**

Esso Inter-América. **Control de calidad.** pp. 4, 46, 47.

**11**

Dirección General de Hidrocarburos. **Archivos de transformación y distribución.** Ministerio de Energía y Minas. Guatemala 1998-2001.

**12**

ASTM *Committee D-2 On Petroleum Products and Lubricants.* **Significance of test for petroleum products.** (1981). pp. 41, 42, 43.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. *Annual book ASTM. **Petroleum products, lubricants, and fossil fuels.***  
**USA:** Editorial Staff, 1998. Section 5, D 975.
2. Archivo del Departamento de transformación y Distribución, Ministerio de Energía y Minas. **Datos de importaciones y refinación de combustible Diesel.** Guatemala, 1999.
3. Centro internacional de educación y desarrollo. **Procesos de refinación para personal técnico.** Venezuela, 1997. 233pp.
4. Formación e investigación petrolera y energética. **Refinación de petróleo.** Venezuela, 1997. 180pp.
5. Gary James & Handwerk Glenn. **Refino de petróleo.** España: Editorial Reverté, 1980. 392pp.
6. Levin Richard & Rubin David. **Estadística para administradores.** 6ª. edición en español, México: editorial Prentice-Hall Hispanoamericana. S.A., 1989. 1120pp



## APÉNDICE

### A.1 Antecedentes

Las primeras importaciones de productos derivados del petróleo en Guatemala se hicieron alrededor de 1935; en ese tiempo las negociaciones de estos hidrocarburos, no exigían un certificado de calidad, no había control en la cantidad exacta, por lo que en estas negociaciones, solo se involucraban la parte vendedora y la parte compradora, las cuales establecían sus propios criterios de calidad, no existiendo una parte que sirviera de fiscalizadora de los productos petroleros que entonces se distribuían en el país. Este tipo de negociación se dio por espacio de una década (5).

Por motivo de la Segunda Guerra Mundial, Guatemala al igual que otros países, se vio en la necesidad de crear un ente regulador en las importaciones de estos productos. Por tal razón fue creado en 1945 el Ministerio de Economía, que estableció Acuerdos y Decretos concernientes a los precios, pero no a las especificaciones mínimas de calidad (5).

El primer Acuerdo Ministerial que establece las especificaciones mínimas de calidad, se publicó, en 1983; efectuándose modificaciones en 1985, y luego emitiéndose así el Acuerdo 180-85, por el Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Hidrocarburos, basándose en el Decreto de Ley 130-83 (5).

En 1997 se publica el Decreto 109-97 "Ley de Comercialización de Hidrocarburos" y en 1999 su Reglamento, el cual establece la publicación anual

de especificaciones de calidad de combustibles. Este decreto deroga toda disposición legal o reglamentaria emitida anteriormente al mismo. Actualmente se utiliza, como normativa de la calidad de los combustibles (5).

## **Medios de obtención de productos limpios de petróleo, en Guatemala**

### **1. Importación vía marítima**

Por este medio se satisface actualmente el 60% de la demanda nacional, entrando el producto por Puerto Barrios, en el Atlántico, y por Puerto de San José, en el Pacífico. Las principales compañías que importan, almacenan y distribuyen productos son tres, otra más los producirá en el futuro cercano, pues hay probabilidad de que se instale una refinería en el oriente del país. Los productos que importan y producen son principalmente, gasolina superior, gasolina regular, kerosina de aviación, kerosina, Diesel y Bunker C.

El GLP es importado por esta vía por Puerto Barrios en el Atlántico, y por Puerto Quetzal, en el Pacífico.

### **2. Refinación**

Por este medio se obtenían combustibles por dos vías; importando petróleo crudo reconstituido o utilizando el petróleo que se produce en el país. En el primer caso existía una refinería ubicada en el departamento de Escuintla, la cual cubría el 40% de las necesidades nacionales. Esta refinería tenía una capacidad de procesamiento de petróleo reconstituido de aproximadamente 17,600 barriles diarios (2). Este crudo reconstituido era importado principalmente de Venezuela y en menor medida de Ecuador. De esta refinería se obtenían productos tales como GLP, Gasolina superior, gasolina regular, kerosina, Diesel y bunker C, pero esta refinería funcionó hasta finales del año 2002. En el segundo caso se encuentra instalada una mini-refinería ubicada en

el municipio de La Libertad, del departamento de Petén, cuyo producto principal es la producción de asfalto, pero también producen otros productos livianos, que son regresados a las tuberías que transportan crudo hacia puerto Barrios, donde es exportado. En la actualidad existe una compañía interesada en transformar estos livianos en productos comerciales que cumplan con las normas del país.

En el caso del Diesel 2D, en el 2000, se importaron 5,323,084 de barriles, y su producción en la refinería ubicada en Escuintla fue de 2,123,106 barriles (11).

## **A.2 Metodología**

### **A.2.1 Material a emplear**

Se utilizarán muestras tomadas en plantas de almacenamiento, estaciones de servicio y buques de cargamentos de Diesel, de las cuatro principales compañías que distribuyen Diesel en Guatemala

También se utilizarán datos de análisis de gravedad API, punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de 90% de destilación, que se tomarán de los certificados de calidad del Diesel obtenidos del año 1998 al 2000, de las cuatro diferentes compañías que serán objeto de estudio.

Los datos son resultados de análisis practicados en el laboratorio del MEM, de muestras tomadas en plantas de almacenamiento estaciones de servicio y buques de cargamentos de Diesel de las compañías antes mencionadas.

## **A.2.2. Procedimiento**

### **A.2.2.1. Para el análisis práctico:**

- Se tomara 10 muestras por cada compañía estudiada, para las pruebas de API, Punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y el 90% de destilado.
- Para la prueba de API, se utilizará un hidrómetro. Norma ASTM D-287 (12).
- Para la prueba del punto de inflamación, se usará un analizador diseñado para tal efecto de copa cerrada. Norma ASTM D-93 (12).
- Para encontrar el Índice de Cetano, se hará por medio de un calculo numérico diseñado especialmente para este análisis. Norma ASTM D-976 (12).
- Para el cálculo del contenido de Azufre, se utilizará una bomba calorimétrica. Norma ASTM D-129 (12).
- Para el análisis de viscosidad cinemática, se usará un viscosímetro No. 100. Norma ASTM D-445 (12).
- Para la prueba del 90% de destilado, se utilizará un destilador atmosférico. Norma ASTM D-86 (12).
- Tabulación de datos API por compañía.

- El mismo procedimiento descrito en el inciso anterior se aplicará a las pruebas de punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de 90% de destilado.
- Los datos de API se trasladarán a gráficos, para observar su comportamiento, y los desfases de los resultados con respecto al acuerdo No. 180-85 del Ministerio de Energía y Minas.
- El mismo mecanismo presentado en el inciso anterior se utilizará para las otras pruebas.
- Luego se compararán los resultados API entre las cuatro compañías para observar cambios que fueron significativos mediante la aplicación de varianza, permitiendo de esta forma cuantificar la variabilidad de los resultados, respecto a su propia media . Se compararan cuatro conjuntos de datos, teniendo en cuenta que varianzas grandes indican un alto grado de variación. Sin embargo, es conveniente aclarar que la aplicación de la varianza en este caso solamente se hará para observar y cuantificar la consistencia de los resultados.
- El procedimiento presentado en el inciso anterior se aplicará a las otras pruebas.
- Se compararán los resultados de API mediante la diferencia de medias, permitiendo de esta manera cuantificar la variación de la media de los resultados, respecto a la media de las especificaciones.

**A.2.2.2. Para el análisis estadístico:**

- Se seleccionará un dato promedio por mes, para la prueba de API, y por año, en cada una de las compañías estudiadas. Luego se unificó los datos de los años estudiados para tener datos estadísticos en general.
- El mismo procedimiento presentado en el inciso anterior se aplicará a las pruebas punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de 90% de destilado.
- Tabulación de datos API del análisis estadístico..
- El mismo procedimiento descrito en el inciso anterior se aplicará a las pruebas de punto de inflamación, Índice de Cetano, contenido de Azufre, viscosidad cinemática y punto de 90% de destilado.
- Los datos de API se trasladarán a gráficos que permitirá visualizar los desfases que presentaron los resultados respecto a las especificaciones establecidas en el acuerdo No. 180-85 del Ministerio de Energía y Minas.
- El mismo mecanismo presentado en el inciso anterior se utilizará para las otras pruebas.
- Luego se compararán los resultados API entre las cuatro compañías para observar cambios que fueron significativos mediante la aplicación de varianza, permitiendo de esta forma cuantificar la variabilidad de los resultados , respecto a su propia media . Se compararan cuatro conjuntos de datos, teniendo en cuenta que varianzas grandes indican un alto grado de variación. Sin embargo, es conveniente aclarar que la aplicación de la varianza

en este caso solamente se hará para observar y cuantificar la consistencia de los resultados.

- El procedimiento presentado en el inciso anterior se aplicará a las otras pruebas.
- Se compararán los resultados de API mediante la diferencia de medias, permitiendo de esta manera cuantificar la variación de la media de los resultados, respecto a la media de las especificaciones.
- El procedimiento descrito en el inciso anterior se aplicará a las otras pruebas.
- La evaluación de los resultados de API que se obtendrán por aplicación de la varianza y diferencias de medias, se realizará de la siguiente manera: para cada resultado y por cada compañía en un mismo año, se le asignarán valores que van de mayor a menor. Un valor mayor será asignado al resultado que presentó la menor variación o diferencia de medias. Lo anterior descrito se realizará para los valores que tendrán como especificaciones un límite superior y su límite inferior. Cuando la especificación sea solamente un límite, la evaluación se hará dependiendo de las condiciones que se estuvieran evaluando, mencionando la misma para su interpretación.
- La anterior evaluación se aplicará a todos los años, y la compañía que acumule la mayor cantidad de puntos, es la de menor variación, según la varianza y la de mejor calidad, según la diferencia de medias.
- El mismo procedimiento del inciso anterior se realizará para todas las pruebas.

### **A.2.3. Recursos**

Se contará con el apoyo del Departamento de Transformación y Distribución, de la Dirección General de Hidrocarburos, del Ministerio de Energía y Minas, que es el encargado de fiscalizar y controlar los combustibles en Guatemala. Así también con el apoyo del Laboratorio de Servicios Técnicos del Ministerio en mención, que es el encargado de hacer los análisis fisicoquímicos a dichos combustibles.

### **A.2.4. Equipo**

Un hidrómetro, un analizador de punto de inflamación de copa cerrada, una bomba calorimétrica, un viscosímetro No. 100, un destilador atmosférico, una computadora.

### **A.2.5 Gráficos**

Las características de la calidad a evaluarse, pueden o no localizarse dentro de los límites de las especificaciones, por que los límites superior y/o inferior, serán especificaciones dadas.

### **A.2.6 Varianza**

La varianza de una muestra de  $n$  mediciones  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , se define como la suma de los cuadrados de las desviaciones de las mediciones respecto a su media  $\bar{X}$  dividida entre  $(n-1)$ . La varianza se denota por  $s^2$  y se determina mediante la formula:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

### A.2.7 Diferencia de medias

La diferencia de medias  $X_m$ , es la diferencia entre la media de los resultados  $X_r$  y la media de las especificaciones  $X_e$ .

$$X_m = X_r - X_e$$

## A.3 Cálculo de muestra

### A.3.1 Análisis experimental

#### Corrida 1.

Muestra No. 1

Compañía A

## **API**

Método ASTM:	D-287 / D-1298
Gravedad hidrómetro:	34.5 API
Temperatura:	78 °F
Tabla utilizada:	5 B.
Gravedad corregida:	33.2 API.

## **Punto de Inflamación**

Analizador de copa cerrada: 212

## **Índice de Cetano**

Para calcular este parámetro se utilizó la figura 15, anexo III, página

Ejemplo: ¿Cuál es el Índice de Cetano de un Diesel con un API = 33.2 y una temperatura del punto de ebullición medio de 532 °F

Solución: Índice de Cetano = 46

## **Porcentaje de Azufre**

Bomba calorimétrica: 0.20

## **Viscosidad cinemática**

Viscosímetro No.100: 2.3

## **Prueba del 90% de destilado**

Destilador atmosférico: 660 °F

Todas las muestras de las compañías estudiadas se analizaron de la misma manera, obteniéndose los datos agrupados en los cuadros 13 al 18 en el anexo I.

### **A.3.2 Análisis estadísticos**

Los datos fueron obtenidos del archivo del Departamento de Transformación y Distribución, de la Dirección General de Hidrocarburos, del Ministerio de Energía y Minas de los años 1998 al 2000, y los promedios mensuales se calcularon de la siguiente forma:

Mes de enero de 1998.

Compañía B

No. Muestras: 20

Gravedades específicas: 31...

Promedio del mes:  $(30+32+33+32\dots) / 20 = 32$

Todos los demás datos de los diferentes parámetros de calidad, compañías y años estudiados se calcularon de la misma manera obteniéndose los cuadros 19 al 38 de los datos calculados.

## A.4 DATOS CALCULADOS

### A.3.1 Varianza

Tabla X. Varianza, año 1998

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	0.88	1.45	3.90	1.84
Punto de Inflamación	100	119	71	228

Índice de Cetano	2.73	4.81	4.09	2.27
Porcentaje de Azufre	0.014	0.003	0.010	0.016
Viscosidad Cinemática	0.09	0.06	0.13	0.05
Destilación 90%	82	215	261	132

**Tabla XI. Varianza, año 1999**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	1.70	0.63	2.02	0.94
Punto de Inflamación	323	405	78	284
Índice de Cetano	4.61	1.27	4.70	6.24
Porcentaje de Azufre	0.002	0.003	0.011	0.015
Viscosidad Cinemática	0.20	0.14	0.06	0.31
Destilación 90%	295	358	193	251

**Tabla XII. Varianza, año 2000**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	1.67	2.04	0.47	1.67
Punto de Inflamación	106	198	179	226
Índice de Cetano	5.94	9.56	5.93	14.69
Porcentaje de Azufre	0.011	0.014	0.004	0.014
Viscosidad Cinemática	0.15	0.1	0.08	0.21
Destilación 90%	232	382	123	104

**Tabla XIII. Promedios entre datos estadísticos y experimentales**

ENSAYO	COMP AÑÍA			
	A	B	C	D
API	0.97	0.83	1.21	1.54
Punto de Inflamación	165.86	211.89	89.58	220.03
Índice de Cetano	2.28	3.35	2.64	6.49
Porcentaje de Azufre	0.007	0.005	0.006	0.014
Viscosidad Cinemática	0.17	0.13	0.09	0.11
Destilación 90%	151.97	418.52	130.57	138.15

#### A.4.2 Diferencias de medias

**Tabla XIV. Diferencias de medias, año 1998**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	3.53	5.57	3.98	3.34
Punto de Inflamación	30	21	39	31
Índice de Cetano	3.93	6.88	3.64	3.17
Porcentaje de Azufre	-0.06	-0.07	-0.06	-0.08
Viscosidad Cinemática	1.11	0.77	0.72	0.79

Destilación 90%	50	42	39	50
-----------------	----	----	----	----

**Tabla XV. Diferencias de medias, año 1999**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	4.17	6.00	6.41	7.75
Punto de Inflamación	26	20	32	33
Índice de Cetano	3.90	6.90	3.60	3.10
Porcentaje de Azufre	-0.17	-0.08	-0.15	-0.16
Viscosidad Cinemática	0.39	0.39	0.24	0.20
Destilación 90%	46	44	42	45

**Tabla XVI. Diferencias de medias, año 2000**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	3.66	4.61	3.22	3.51
Punto de Inflamación	25	34	33	38
Índice de Cetano	1.56	4.11	1.68	2.88
Porcentaje de Azufre	-0.13	-0.13	-0.07	-0.15
Viscosidad Cinemática	0.54	0.62	0.74	0.90
Destilación 90%	45	47	49	48

**Tabla XVII. Promedios entre datos estadísticos y experimentales**

ENSAYO	COMPAÑÍA			
	A	B	C	D
API	3.70	5.09	3.50	4.29
Punto de Inflamación	26.47	27.09	35.89	36.77
Índice de Cetano	2.59	5.05	2.44	3.44
Porcentaje de Azufre	-0.12	-0.09	-0.08	-0.13
Viscosidad Cinemática	0.68	0.59	0.76	0.76
Destilación 90%	47.51	46.90	45.64	48.64

## ANEXOS

### Anexo I

Tabla VIII. Datos experimentales

Muestra	Gravedad API				Punto de inflamación (°F)				Índice de Cetano			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	34	35	32	33	143	145	160	177	47	50	47	48
2	34	34	32	33	145	139	167	180	47	49	46	48
3	34	36	33	33	144	155	162	160	47	50	47	48
4	34	36	32	36	145	155	170	159	47	49	47	53
5	32	34	32	36	163	177	158	151	46	47	47	53
6	33	34	32	33	155	175	170	160	47	47	47	49

7	33	35	33	34	164	143	158	168	48	51	48	48
8	33	35	33	33	172	147	159	157	47	51	47	47
9	35	36	32	33	149	143	174	175	47	49	47	47
10	34	34	33	33	130	163	145	160	48	50	48	48
	<b>Contenido de Azufre (%)</b>				<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>				<b>Punto de destilación al 90% (°F)</b>			
<b>Muestra</b>	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0.33	0.44	0.49	0.29	3.4	3.6	3.8	3.7	640	662	646	644
2	0.33	0.44	0.44	0.27	3.4	4.0	4.0	3.8	628	653	653	652
3	0.33	0.31	0.34	0.48	3.3	2.9	3.5	3.3	638	619	649	640
4	0.36	0.33	0.43	0.22	3.7	2.9	3.8	3.7	633	611	644	682
5	0.48	0.40	0.49	0.20	3.5	2.9	3.9	3.7	643	608	648	683
6	0.42	0.42	0.49	0.47	4.0	3.1	4.1	3.7	650	619	652	621
7	0.45	0.45	0.39	0.38	3.7	3.5	3.2	4.0	650	661	655	650
8	0.48	0.44	0.43	0.45	4.2	3.7	4.0	3.8	647	660	648	657
9	0.27	0.46	0.37	0.45	2.8	3.5	4.0	3.6	619	657	637	654
10	0.33	0.40	0.43	0.45	2.9	3.7	3.3	3.5	633	665	643	661

## Anexo II

**Tabla XIX. Requisitos fisicoquímicos del Diesel 2D, según las normas establecidas en el país.**

REQUISITO	ESPECIFICACION	METODO ASTM
Gravedad API, a 60 °F, mínima.	30	D-287/D-1298
Viscosidad cinemática, en milímetros Cuadrados por segundo, a 100 °F, Mínimo-máxima.	1.39-4.20	D-88/D-445

Indice de Cetano, calculado, mínimo.	45	D-976
Punto de inflamabilidad, en grados Fahrenheit, máximo.	125	D-93
Contenido de Azufre, en porcentaje en masa, máximo.	0.5	D-2622/D-129
Características de destilación del producto a una presión de 101.3 kpa. Temperatura al recuperar el 90%, en Grados Fahrenheit, mínima-máxima.	540-640	D-86

Fuente: Acuerdo Ministerial 180-85 , Ministerio de Energía y Minas.

### Anexo III

Figura 15 . Cálculo Índice de Cetano

