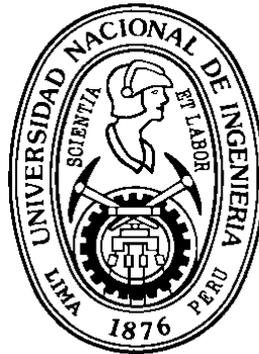


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**Facultad de Ingeniería de Petróleo**



**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2**  
**BASADO EN SUS PROPIEDADES CETÁNICAS**

**TESIS:**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO PETROQUIMICO**

**KARIM LIDIA POMA FLORES**

**PROMOCION 99 - 0**

**LIMA – PERU**

**2004**

## INDICE

1. Introducción
  - 1.1. Antecedentes
  - 1.2. Objetivos
  
2. La Industria de Refinación en el Perú.
  - 2.1. Producción y Consumo
    - 2.1.1. Producción
    - 2.1.2. Consumo
  - 2.2. Producción de Derivados de Petróleo en el Perú
  - 2.3. Ventas Internas de Derivados de Petróleo en el Perú
  
3. El Diesel
  - 3.1. Elaboración del Combustible Diesel
  - 3.2. Definición y Tipos de Hidrocarburos presentes en el Combustible Diesel
  - 3.3. Hidrotratamiento
  - 3.4. Uso del Combustible Diesel
  - 3.5. Propiedades del Combustible Diesel
  
4. Calidad del combustible diesel.
  - 4.1. Especificaciones del Combustible Diesel.
    - 4.1.1. Tendencia Mundial.
    - 4.1.2. Aspectos Técnicos
    - 4.1.3. Impactos sobre las Refinerías
    - 4.1.4. Estándar propuesto de Cetano
    - 4.1.5. Estándar propuesto de Azufre
    - 4.1.6. Estándar propuesto para Destilación
  - 4.2. Clases de Combustibles Diesel en el Perú
  - 4.3. Especificaciones del Combustible Diesel según Norma Técnica Peruana NTP 321.003:2001
  
5. Combustión en Motores Ciclo Diesel

- 5.1. El Proceso de Combustión
- 5.2. Formación del Spray
- 5.3. Análisis de la Combustión
  - 5.3.1. Retraso de la Ignición e Inflamación de la premezcla
  - 5.3.2. Combustión controlada de mezcla
  - 5.3.3. Formación de carbonilla y final de la combustión
  
- 6. Combustibles Alternativos. Biodiesel
  - 6.1. Tecnología para la Producción de Biodiesel
  - 6.2. Producción de Biodiesel
  - 6.3. Propiedades
  - 6.4. Particularidades de los combustibles alternativos. Combustión
    - 6.4.1. Similitudes
    - 6.4.2. Diferencias
  
- 7. El Diesel y el Medio Ambiente. Emisiones
  
- 8. Diagnóstico de las Emisiones del Parque Automotor del Área Metropolitana de Lima y Callao.
  
- 9. Determinación de Propiedades Cetánicas
  - 9.1. Número de Cetano en Diesel ASTM D-613
    - 9.1.1. Definición
    - 9.1.2. Comportamiento del Combustible Diesel con respecto al Número de Cetano
    - 9.1.3. Procedimiento
    - 9.1.4. Limitantes del Uso del Motor Waukesha ASTM D-613
  
  - 9.2. Índice de Cetano
    - 9.2.1. Definición
    - 9.2.2. Correlación de la Norma ASTM D-976. Índice de Cetano Calculado por Dos Variables
      - 9.2.2.1. Limitaciones de la Ecuación
      - 9.2.2.2. Precisión

- 9.2.3. Correlación de la Norma ASTM D-4737. Índice de Cetano  
Calculado por Cuatro Variables
  - 9.2.3.1. Limitaciones de la Ecuación
  - 9.2.3.2. Precisión
- 9.3. Limitantes del Uso del Motor Waukesha ATM D-613
- 9.4. Otras Tecnologías
  
- 10. Estudio de la Variabilidad de la Calidad del Diesel 2 respecto de su Propiedad Cetánica. Análisis de muestras de Diesel 2.
  
- 11. Interpretación de Resultados de Análisis.
  - 11.1. Estudio de las Correlaciones y Evaluación de resultados –Gráficos
  
- 12. Observaciones
  
- 13. Conclusiones
  
- 14. Recomendaciones
  
- 15. Bibliografía

## **ANEXOS**

- A. Normas de los Métodos de Ensayo
- B. Norma ASTM D976-04 a
- C. Norma ASTM D4737-03
- D. Decreto Supremo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones N° 047-2001-MTC, El Peruano
- E. Resolución Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales del Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y Protección de la Propiedad Intelectual N° 0112-2004/CRT-INDECOPI, El Peruano
- F. Documento Técnico de la World - Wide Fuel Charter Comitée Diciembre 2002

## **EVALUACION DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2 BASADO EN SUS PROPIEDADES CETÁNICAS**

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Debido a la demanda creciente de Diesel 2 en nuestro medio, se ha observado que las empresas productoras en el país han tenido que incrementar la proporción de componentes procedentes de la Unidad de Craqueo Catalítico en los tanques de mezcla de destilados medios. Estos componentes son, entre otros, el Gasóleo obtenido del Craqueo Catalítico del Gasóleo Pesado de Vacío (HVGO). En la Refinería La Pampilla, el Gasóleo Ligero de Vacío (LVGO) es considerado para incrementar la producción de diesel; esto es posible por tener el LVGO características semejantes al diesel, pero debe tenerse cuidado en su apariencia, sobre todo el color. El uso de estos componentes así como la diversa procedencia de los crudos utilizados ha llevado a una disminución gradual en la calidad del combustible:

**TABLA I**  
**CALIDADES DE DIESEL DE UNIDAD DE DESTILACIÓN PRIMARIA I (UDPI) Y LVGO CON CRUDO CAÑO LIMON DE REFINERIA LA PAMPILLA**

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>DIESEL</b>	<b>LVGO</b>
<b>Gravedad API</b>	<b>34</b>	<b>37,8</b>
<b>Viscosidad a 37,8 cSt</b>	<b>6,52</b>	<b>2,17</b>
<b>Destilación ASTM, °C</b>		
<b>P. Inicial</b>	<b>250</b>	<b>197</b>
<b>5%</b>	<b>265</b>	<b>212</b>
<b>10%</b>	<b>276</b>	<b>219</b>
<b>20%</b>	<b>288</b>	<b>229</b>
<b>50%</b>	<b>313</b>	<b>251</b>
<b>90%</b>	<b>357</b>	<b>297</b>
<b>95%</b>	<b>373</b>	<b>339</b>
<b>P. Final</b>	<b>382</b>	<b>359</b>

Fuente: Refinería La Pampilla

**TABLA II**  
**90% RECUPERADO (T<sub>90</sub>) DE DESTILACIÓN ASTM DEL DIESEL PARA**  
**CRUDOS PROCESADOS EN UDPI**

<b>Crudos</b>	<b>CAÑO LIMÓN</b>	<b>MEZA 30</b>	<b>VASCONIA</b>
<b>Gravedad API</b>	<b>29,5</b>	<b>29,8</b>	<b>29,6</b>
<b>T<sub>90%</sub> recuperado, °C</b>	<b>357</b>	<b>356</b>	<b>377</b>

Fuente: Refinería La Pampilla

La mayor demanda del Diesel 2, en el país, se presenta en las unidades de transporte de pasajeros (camionetas rurales, taxis y otros) y de carga, presentándose unidades con motores de inyección muy sensibles a la calidad del combustible.

Es por ello, que existe la necesidad de realizar un estudio sobre la calidad del combustible Diesel 2 en nuestro medio y así establecer una correlación idónea que reemplace el uso de la máquina de cetano, que establece la norma ASTM D-613, y que no existe en el país, incluyendo las refinerías, lo que permitiría el establecimiento de la norma adecuada para especificar el combustible Diesel 2 con respecto al valor del Número de Cetano.

## **1.2. OBJETIVOS**

- Intentar establecer una correlación entre las dos normas ASTM D-976 y ASTM D-4737, para la determinación del índice de cetano, con el número de cetano; basada en un método estándar alterno técnicamente válido.
- Determinar qué norma para el cálculo del índice de cetano es la más adecuada para el Diesel 2 que se comercializa en nuestro medio.
- Analizar la calidad del combustible Diesel 2 que se comercializa en nuestro medio evaluando las propiedades del combustible Diesel 2 que afectan los requisitos de la Norma Técnica Peruana NTP 321.003.2001 y aquellas propiedades que afectan la satisfacción de los usuarios finales, transportistas y comercializadores.

## 2. LA INDUSTRIA DE REFINACIÓN EN EL PERÚ

Esta actividad comprende básicamente la refinación de petróleo crudo. Entre los principales productos refinados del petróleo se encuentran las Gasolinas, Aceites Pesados, Aceites para Alumbrado, Aceites y Grasas Lubricantes y otros productos derivados del Petróleo Crudo y Fraccionado.

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) y Kerosene son básicamente de uso doméstico, en tanto, las Gasolinas y combustibles de uso industrial (Diesel 2 y Residual) son utilizados en el parque automotor nacional y en diversas industrias de procesamiento, tales como: industria de harina y conservas de pescado, loza y porcelana, vidrios, químicos, pinturas, cemento, plástico, hierro y acero, etc. (véase Figura 1).

La importancia de la industria de refinación en la economía peruana radica en la alta relación que tiene con otros sectores productivos. En efecto, la rama industrial de refinación presenta importantes encadenamientos con diversos sectores, pues está articulada con empresas proveedoras de petróleo crudo (Pluspetrol, Petrotech, Petrobras Energía, Aguaytía, Sapet, Petrolera Monterrico, GMP, Maple, Unipetro, etc.) y con empresas de servicios de transporte.

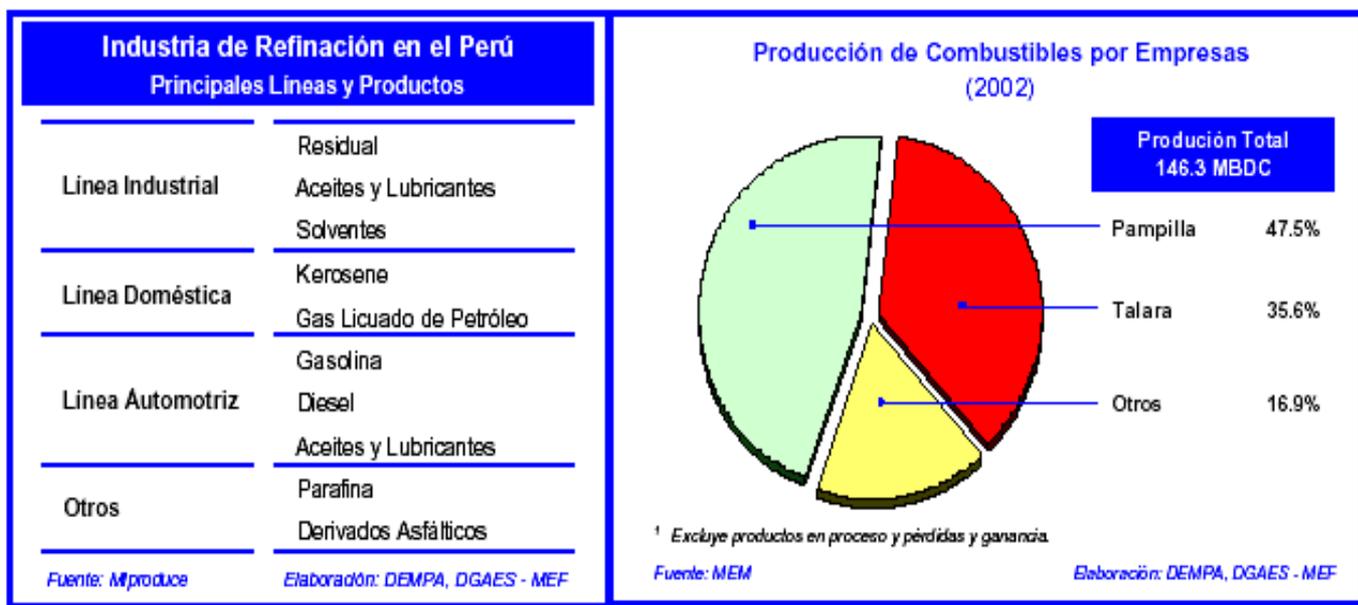


FIGURA 1

## 2.1- PRODUCCIÓN Y CONSUMO

El Perú es altamente dependiente de petróleo crudo y productos derivados procedentes del exterior. El combustible que importa el Perú proviene de países como Ecuador, Venezuela y Colombia, principalmente. La producción nacional de crudo en el 2002 alcanzó 96,9 MBDC, de los cuales se exportó el 22% y la diferencia, se destinó al mercado nacional. Sin embargo, como el nivel requerido por las refinerías locales fue 149,3 MBDC se tuvo que importar 73,8 MBDC, 49% del total demandado. Por su parte, la producción de productos derivados de petróleo (principalmente combustibles) fue 146,3 MBDC, 24% destinado al mercado externo y el 76% restante al mercado interno. En el citado año, además, se importaron 29,6 MBDC de productos derivados, nivel que representó el 21% de la demanda total del mercado nacional (véase Figura 2).

En millones de barriles se estima que el Perú importó aproximadamente 43,8 millones de barriles de combustible en el 2003, mientras que exportó sólo 24,1 millones de barriles, generándose un déficit de 19 millones de barriles (véase Figura 3, página 9).



FIGURA 2

### IMPORTACIONES DE COMBUSTIBLES Y DERIVADOS, 2003 POR PAÍS DE ORIGEN

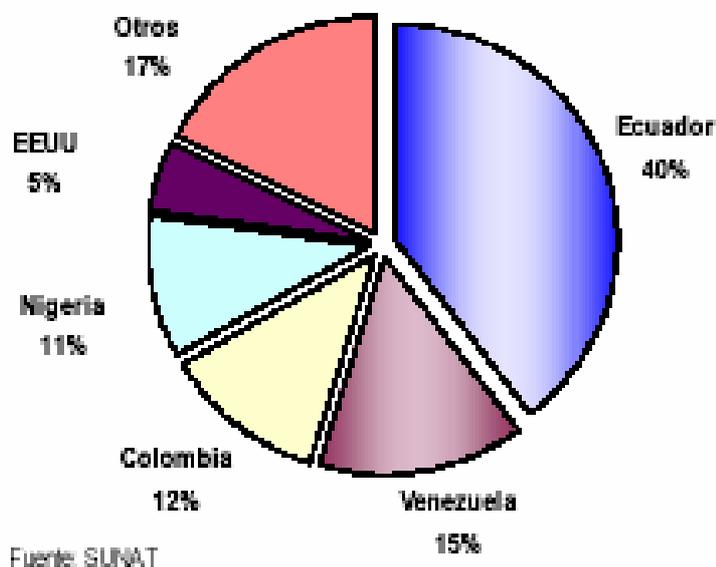


FIGURA 3

#### 2.1.1. PRODUCCIÓN

La producción nacional de petróleo crudo, después de haberse incrementado significativamente desde 1977 con el ingreso de la extracción de crudo procedente de la selva peruana, muestra a partir de 1986 una tendencia a la baja debido al agotamiento natural de las reservas y las menores inversiones exploratorias realizadas en el sector. De una producción total de 195,5 mil barriles diarios en 1980, se contrajo progresivamente a un nivel de sólo 96,9 mil barriles por día en el 2002, cayendo alrededor de 100 mil barriles de producción por día.

Por su parte, en el período 1992 - 2002 la producción anual de las refinerías locales se ha mantenido entre 54 y 61,9 millones de barriles, con un crecimiento promedio anual de 0,9%. Los años de mayor producción fueron 1998 con 61,9 MMB (millones de barriles) y el 2002 con 59,9 MMB. En ambos casos, el principal factor que influyó en dichos resultados fue el margen de refinación - entendido

como la diferencia de precios entre los combustibles que refinan y venden, y el petróleo crudo que adquieren – cuyos valores en estos dos años, fueron mayores a los obtenidos en años anteriores.

### **2.1.2. CONSUMO**

La demanda total de los derivados de petróleo guarda una relación directa con el crecimiento económico del país (PBI). En el período 1990 – 2002, dicha demanda total creció a una tasa promedio anual de 1,7%, registrándose, en el caso del Diesel 2, la tasa de crecimiento más alta entre todos los productos derivados del petróleo (3,9% promedio anual). **Este producto es el combustible que más consume el país (35,1%)** y es utilizado principalmente en el transporte, la industria y en la generación eléctrica. Le siguen en orden de importancia el Kerosene doméstico (12,6%), GLP (11,5%) y la Gasolina 84 (8,6%).

### **2.2. PRODUCCIÓN DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EN EL PERÚ**

La producción total de derivados de petróleo en el mes de junio del 2003 fue de 730,84 miles de metros cúbicos, (4 596,83 miles de bls.), con un promedio diario aproximado de 24,36 miles de metros cúbicos (153,23 miles de bls/día). El 47,50% de la producción nacional de derivados de petróleo corresponde a la Refinería La Pampilla (Repsol y Asociados); el 36,39% a Refinería Talara (Petroperú); y 16,10% a otras refinerías menores, tales como: El Milagro, Iquitos y Conchán (Petroperú), la Refinería Pucallpa (Maple Gas Corporation) y las Plantas Verdún (EPPSA) y Aguaytía (Aguaytía).

La mayor producción corresponde al Diesel 2: 200,03 miles de metros cúbicos, seguida por los Petróleos Industriales (residuales): 175,51 miles de metros cúbicos, de las Gasolinas: 123,23 miles de metros cúbicos, Turbo A -1: 57,21 miles de metros cúbicos, GLP: 41,58 miles de metros cúbicos, Kerosene: 37,70 miles de metros cúbicos y otros productos con 95,58 miles de metros cúbicos (véase Tabla III, página 11).

**TABLA III**  
**PRODUCCION DE DERIVADOS DE PETROLEO POR REFINERIA Y TIPO DE**  
**PRODUCTO: AÑO 2003 (Miles de m<sup>3</sup>)**

Producto	Refinería La Pampilla		Refinería Talara		Otras Refinerías		Total	
	Junio	Ene/Jun	Junio	Ene/Jun	Junio	Ene/Jun	Junio	Ene/Jun
<b>Prod. Terminados</b>								
GLP	9,68	60,29	23,58	142,50	8,33	45,94	<b>41,58</b>	<b>248,73</b>
Propano	-	-	-	-	0,03	0,28	<b>0,03</b>	<b>0,28</b>
Butano	-	-	0,00	0,32	-	-	<b>0,00</b>	<b>0,32</b>
Gasolina 95	8,75	42,60	7,32	28,66	-	2,41	<b>16,07</b>	<b>73,66</b>
Gasolina 97	3,89	22,05	1,92	16,44	0,71	4,81	<b>6,52</b>	<b>43,30</b>
Gasolina 90	20,14	137,60	12,43	67,83	2,47	14,31	<b>35,04</b>	<b>219,75</b>
Gasolina 84	18,34	124,95	22,78	136,33	11,56	67,86	<b>52,68</b>	<b>329,14</b>
Gasolina 86 – Exportación	-	-	12,92	117,67	-	0,09	<b>12,92</b>	<b>117,76</b>
Turbo A1	44,10	180,20	10,86	62,73	2,25	14,68	<b>57,21</b>	<b>257,60</b>
Turbo JP-5	-	-	-	0,69	-	-	-	<b>0,69</b>
Kerosene	13,13	135,21	20,70	167,23	3,87	31,77	<b>37,70</b>	<b>334,21</b>
<b>Petróleo Diesel 2</b>	<b>115,12</b>	<b>581,30</b>	<b>62,77</b>	<b>353,16</b>	<b>22,14</b>	<b>125,27</b>	<b>200,03</b>	<b>1059,72</b>
Pet. Diesel 2 Bunker Nac.	-	-	-	-	-	-	-	-
Marine Gas Oil D2 – MGO	-	-	-	5,30	-	-	-	<b>5,30</b>
Marine Fuel Oil – MFO	-	-	1,84	10,57	-	-	<b>1,84</b>	<b>10,57</b>
Intermed. Fuel Oil --IFO	9,47	57,84	-	4,57	-	6,81	<b>9,47</b>	<b>69,23</b>
Petróleo Industrial 5	-	-	-	-	0,55	2,19	<b>0,55</b>	<b>2,19</b>
Petróleo Industrial 6	34,09	129,88	54,64	362,83	9,26	102,28	<b>97,99</b>	<b>594,99</b>
Pet. Industrial 500	66,05	757,89	2,47	56,91	8,45	43,13	<b>76,97</b>	<b>857,94</b>
Asfalto Líquido RC/MC	0,21	0,46	0,47	4,03	0,85	2,21	<b>1,52</b>	<b>6,70</b>
Asfalto Sólido	1,40	6,99	0,16	2,33	1,35	11,06	<b>2,91</b>	<b>20,37</b>
Brea	-	-	-	-	-	-	-	-
Solvente Light PESA	-	-	-	-	1,18	4,03	<b>1,18</b>	<b>4,03</b>
Solvente 1	-	-	0,67	3,46	5,52	37,23	<b>6,19</b>	<b>40,70</b>
Solvente 3	-0,00	-0,10	1,78	9,29	-	0,55	<b>1,78</b>	<b>9,74</b>
Acido Nafténico	-	-	-	-	-	-	-	-
Naftoil Industrial Premium	-	-	-	-	2,46	10,80	<b>2,46</b>	<b>10,80</b>
Gasolina Natural Maple	-	-	-	-	-	2,47	-	<b>2,47</b>
<b>Sub Total</b>	<b>344,35</b>	<b>2237,17</b>	<b>237,33</b>	<b>1552,83</b>	<b>80,98</b>	<b>530,17</b>	<b>662,66</b>	<b>4320,17</b>
<b>Product. En Proceso</b>	5,07	40,52	37,74	201,63	35,72	239,40	<b>78,53</b>	<b>481,55</b>
<b>Pérdidas Y Ganancias</b>	-2,24	-9,64	-9,08	-57,67	0,98	10,17	<b>-10,35</b>	<b>-57,13</b>
<b>Total</b>	<b>347,17</b>	<b>2268,05</b>	<b>265,98</b>	<b>1696,79</b>	<b>117,68</b>	<b>779,74</b>	<b>730,84</b>	<b>4744,58</b>

Fuente : PETROPERU, MEM-DGH

### 2.3. VENTAS INTERNAS DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EN EL PERÚ

La cifra de ventas internas de derivados de petróleo en junio del 2003 fue de 636,51 miles de metros cúbicos, (4 003,51 miles de bls.), con un promedio diario de 21,22 miles de metros cúbicos (133,45 miles de bls/día). Dicha cifra es inferior en 2,1% a la del mismo mes del año pasado, debido a la disminución en las ventas del Kerosene, Petróleo Residual 6 y Turbo A-1, entre otros productos.

Del total de ventas, la mayor venta le correspondió al Diesel 2: 256,44 miles de metros cúbicos, seguida de los Petróleos Residuales: 103,55 miles de metros cúbicos, de las Gasolinas con 100,43 miles de metros cúbicos, del GLP: 82,98 miles de metros cúbicos, Kerosene: 60,10 miles de metros cúbicos y Residual 500: 53,97 miles de metros cúbicos, entre otros productos (véase Tabla IV).

**TABLA IV**  
**VENTAS INTERNAS DE DERIVADOS DE PETROLEO CRUDO SEGÚN TIPO**  
**DE PRODUCTO**  
**(Miles de m<sup>3</sup>)**

Producto	2003		2002		Variación %	
	Junio	Ene/Jun	Junio	Ene/Jun	Junio	Ene/Jun
<b>Total</b>	<b>636,51</b>	<b>3 754,23</b>	<b>650,23</b>	<b>4 009,39</b>	<b>-2,1</b>	<b>-6,4</b>
GLP	82,98	476,24	76,480	424,97	8,5	12,1
Gasolina 84	51,62	308,59	54,832	341,72	-5,9	-9,7
Gasolina 90	35,33	217,15	34,223	224,18	3,2	-3,1
Gasolina 95	6,05	39,71	7,049	42,82	-14,2	-7,3
Gasolina 97	7,43	48,20	8,307	55,24	-10,6	-12,8
Turbo A-1	13,67	76,45	21,672	128,54	-36,9	-40,5
Kerosene	60,10	391,60	92,029	513,29	-34,7	-23,7
Diesel 2	<b>256,44</b>	<b>1 489,28</b>	<b>224,465</b>	<b>1 389,88</b>	<b>14,2</b>	<b>7,2</b>
Residual 5 y 6	49,58	273,55	59,876	312,04	-17,2	-12,3
Residual 500	53,97	318,62	50,790	418,47	6,3	-23,9
Otros	19,33	114,85	20,511	158,24	-5,8	-27,4

Fuente: PETROPERU, MEM-DGH

### **3. EL DIESEL**

#### **3.1. ELABORACION DEL COMBUSTIBLE DIESEL**

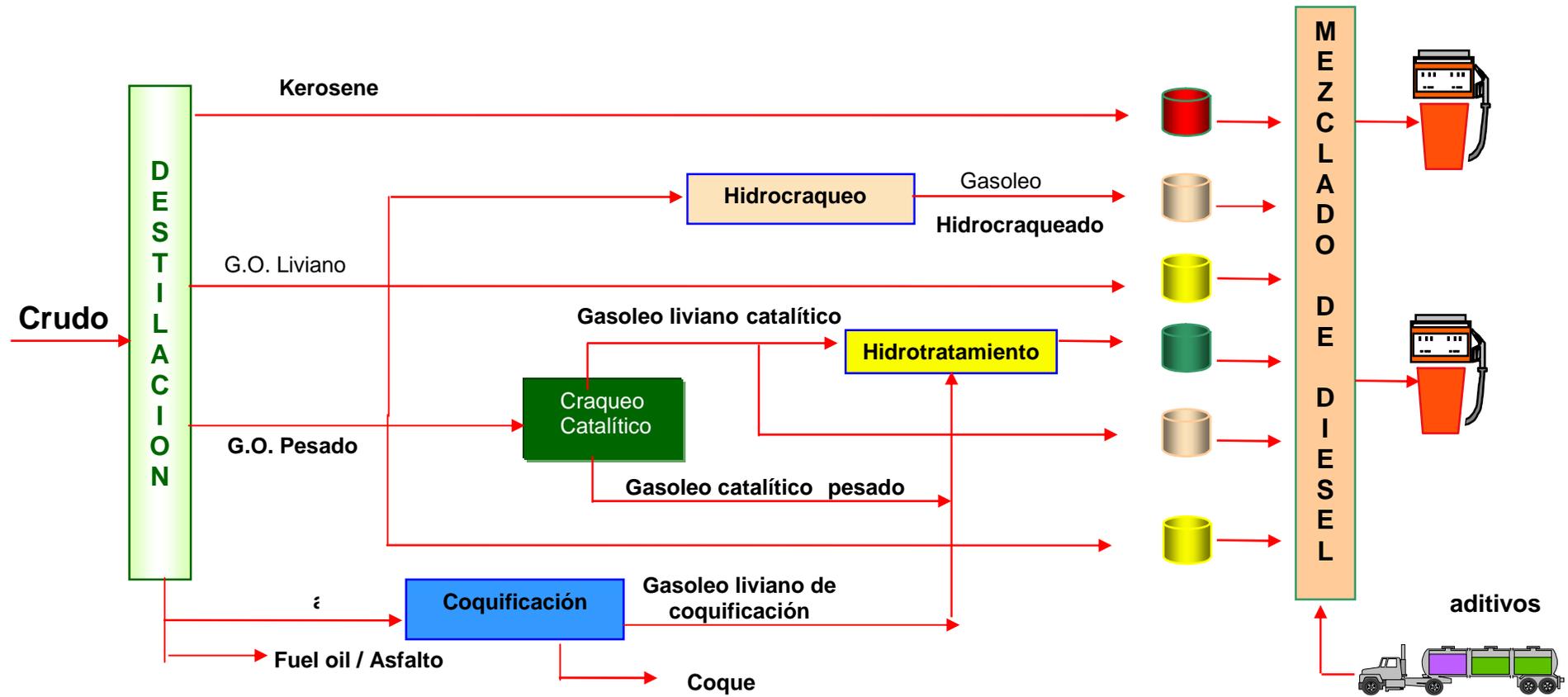
En una refinería, el petróleo es convertido a una variedad de productos mediante procesos físicos y químicos.

El primer proceso al que se somete el petróleo en la refinería, es la destilación para separarlo en diferentes fracciones. 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 Licuado de Petróleo (GLP), vaporizan y suben hasta la parte superior de la torre donde se condensan. Los líquidos medianamente pesados, como el Kerosene y el 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 hierven por debajo de los 200 °C mientras que en el caso del Diesel sus fracciones tienen un límite de 350 °C. Esta última, contiene moléculas de entre 10 y 20 Carbonos, mientras que los componentes de la gasolina se ubican en el orden de 12 carbonos o menos.

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 Craqueo Catalítico Fluido.

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 (véase Figura 4).

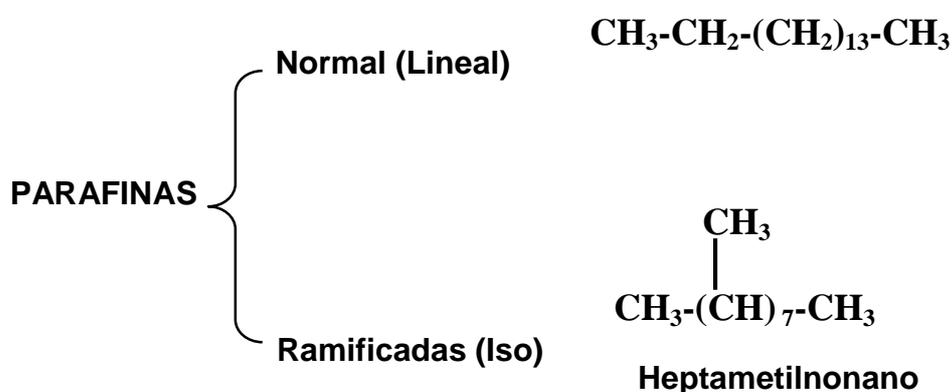
**FIGURA 4**  
**ELABORACIÓN Y MEZCLADO DE DIESEL**



### 3.2. DEFINICIÓN Y TIPOS DE HIDROCARBUROS PRESENTES EN EL COMBUSTIBLE DIESEL

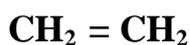
Es una mezcla balanceada cuyo rango de ebullición se encuentra entre 130°C a 400°C y en su composición, existen hidrocarburos de tipo: **parafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos.**

- **Hidrocarburos Parafínicos:** Son hidrocarburos saturados (alcanos), pues solo sólo presentan enlaces sencillos. Pueden ser de cadena recta (alcanos normales) o ramificados



**Parafinas = Alcanos o Saturados**

- **Hidrocarburos Olefínicos:** Son hidrocarburos que contienen uno o más enlaces dobles carbono-carbono. En virtud de que contienen menos hidrógenos que los alcanos con la misma cantidad de átomos de carbono, con frecuencia se les dice **no saturados.**



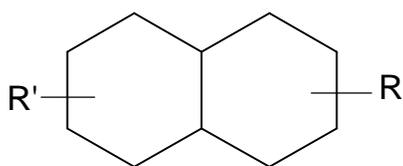
**Etileno**



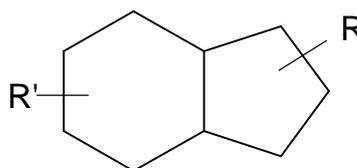
**Butileno**

- **Hidrocarburos Nafténicos:** Son hidrocarburos cíclicos saturados, muchos de ellos con grupos metil.

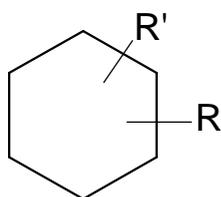
Las bicicloparafinas poseen 2 ó más anillos saturados fusionados con 2 ó más carbonos vecinos comunes.



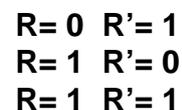
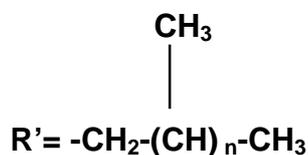
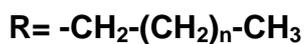
**Derivados de decalina**



**Derivados de hexahidroindanos**

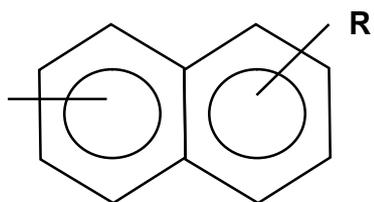


**Derivados de ciclohexano**



$$n = 0, 1, 2, \dots$$

- **Hidrocarburos Aromáticos:** Son aquellos hidrocarburos que poseen anillos bencénicos.



**Derivados de naftaleno  
(Diaromáticos)**

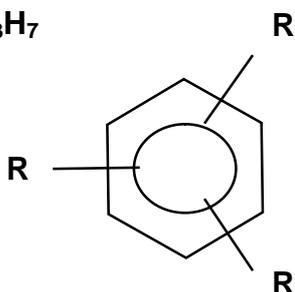
$R = \text{CH}_3, -\text{C}_2\text{H}_5, -\text{C}_3\text{H}_7$

$R' = \text{CH}_3, -\text{C}_2\text{H}_5, -\text{C}_3\text{H}_7$

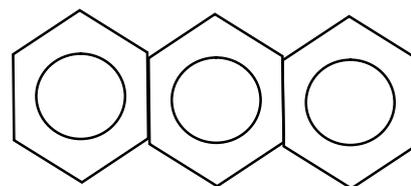
$R = 0 \quad R' = 1$

$R = 1 \quad R' = 0$

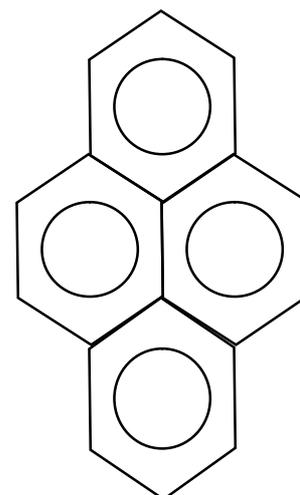
$R = 1 \quad R' = 1$



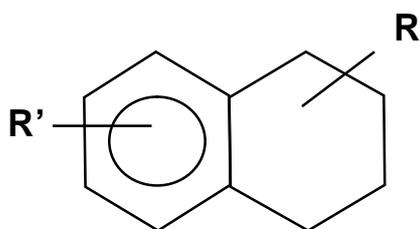
**Derivados de Benceno  
(Monoaromáticos)**



**Antraceno  
(Triaromáticos)**



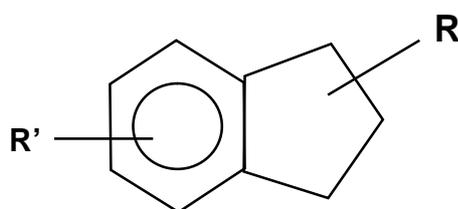
**Pireno  
(Tetraaromáticos)**



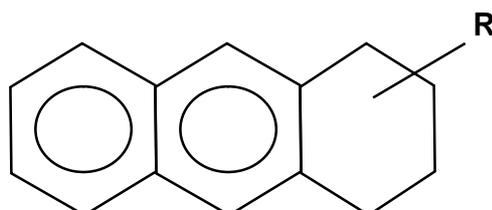
**Derivados de  
tetrahidronaftaleno**

$R = \text{CH}_3, -\text{C}_2\text{H}_5, -\text{C}_3\text{H}_7$

$R' = \text{CH}_3, -\text{C}_2\text{H}_5, -\text{C}_3\text{H}_7$



**indano**

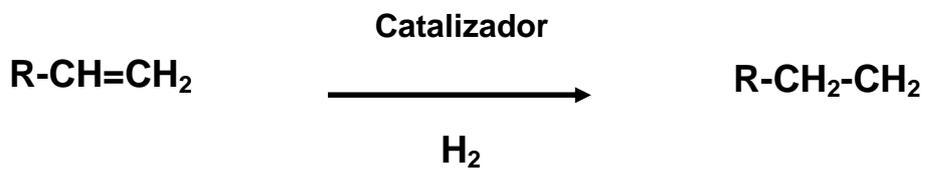
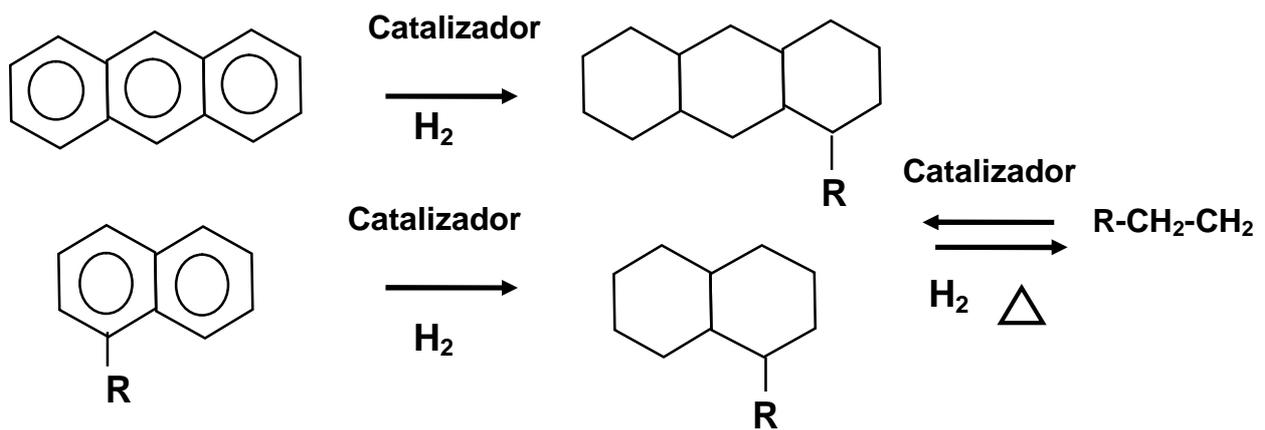


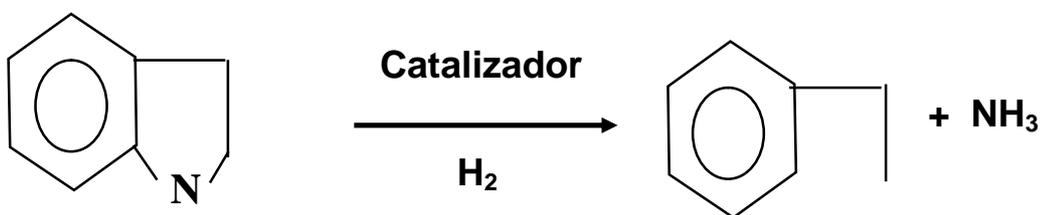
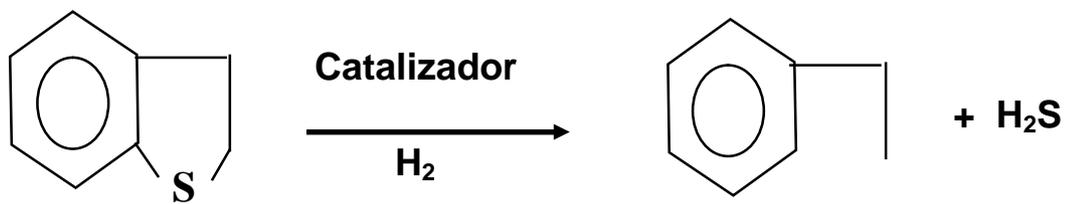
**Derivados de tetrahidroantraceno**

### 3.3. HIDROTRATAMIENTO (HDT)

Con el objeto de mejorar la calidad del Diesel, uno de los procesos usados es el Hidrotratamiento. Este consiste en hacer pasar la carga sobre un catalizador en presencia de hidrógeno.

Con esto se logra reducir el contenido de azufre, reducir el contenido de nitrógeno, saturar olefinas y reducir aromáticos. Así, se logran Gases, Naftas, Kerosene (Jet A-1) y Gas Oil de muy buena calidad.





**TABLA V**

**COMPOSICION DE LAS FRACCIONES DE PETROLEO USADOS EN LA ELABORACION Y MEZCLADO DE DIESEL**

	<b>Gasoleo Liv.</b>	<b>Gasoleo Pes.</b>	<b>Kerosene</b>	<b>HDT</b>	<b>Gasoleo Catalítico Liv.</b>
<b>(%vol)</b>					
<b>Parafinas</b>	<b>40-50</b>	<b>35-45</b>	<b>55-65</b>	<b>75-85</b>	<b>12-16</b>
<b>Naftenos</b>	<b>35-43</b>	<b>38-45</b>	<b>20-25</b>	<b>20-10</b>	<b>5-12*</b>
<b>Aromáticos (Total)</b>	<b>12-18</b>	<b>15-20</b>	<b>5-10</b>	<b>5-10</b>	<b>75-80</b>
<b>Monoaromáticos</b>	<b>10-15</b>	<b>12-18</b>	<b>4-9</b>	<b>5-10</b>	<b>25-32</b>
<b>Diaromáticos</b>	<b>1-4</b>	<b>3-6</b>	<b>0-1</b>	<b>0</b>	<b>40-45</b>
<b>Triaromáticos</b>	<b>0</b>	<b>0-1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1-2</b>
<b>Azufre(%p)</b>	<b>0,1 - 0,3</b>	<b>0,4 - 0,8</b>	<b>0,05 - 0</b>	<b>0,05-0,5</b>	<b>0,7 – 1,1</b>

**\* Incluye olefinas**

### 3.4. USO DEL COMBUSTIBLE DIESEL

Se consume principalmente en máquinas de combustión interna de alto aprovechamiento de energía, con elevado rendimiento y eficiencia mecánica.

Su uso se orienta fundamentalmente como energético en el parque vehicular equipado con motores diseñados para combustible Diesel, tales como camiones de carga de servicio ligero y pesado, autobuses de servicio urbano y de transporte interprovincial, locomotoras, embarcaciones, maquinaria agrícola, industrial y de la construcción (grúas, tractores, aplanadoras, entre otros).

### 3.5. PROPIEDADES DEL DIESEL

#### a) Número de Cetano

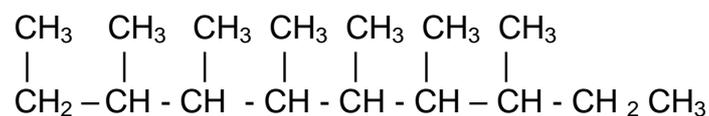
Así como el octano mide la calidad de ignición de la Gasolina, el número de cetano mide la calidad de ignición de un Diesel. Es una medida de la tendencia del Diesel a cascabelear en el motor.

La escala se basa en las características de ignición de dos hidrocarburos,



#### **Cetano (n-hexadecano)**

y



#### **Heptametilnonano**

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 número 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 autoignición, pero para el Diesel la propiedad deseable es la autoignición.

Típicamente, los motores se diseñan para utilizar números de cetano de entre 40 y 55, debajo de 38 se incrementa rápidamente el retardo de la ignición. El incremento del número de cetano por encima de los valores realmente requeridos por el motor no mejora significativamente su funcionamiento.

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 número de cetano se incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena. En general, los aromáticos y los alcoholes tiene un número de cetano bajo. Por ello, el porcentaje de Gasóleos desintegrados, en el Diesel, se ve limitado por su contenido de aromáticos.

Muchos otros factores también afectan el número 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 Oxido de Nitrógeno (NOx).

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

## **b) Destilación**

Los requerimientos de volatilidad del combustible dependen del diseño y tamaño del motor, así como de la naturaleza de las variaciones de velocidad y carga, de las condiciones atmosféricas y del arranque. Para motores en servicio que involucran rápidas fluctuaciones de carga y velocidad como en la operación de omnibuses y camiones, los combustibles más volátiles pueden proporcionar una mejor performance, especialmente con respecto al humo y olor. Sin embargo, la mejor economía de combustible generalmente se obtiene con los tipos de combustibles más pesados a causa de su mayor poder calorífico.

## **c) Viscosidad**

Para algunos motores es ventajoso especificar una viscosidad mínima, debido a la pérdida de potencia originada por las fugas en la bomba de inyección e inyector. Por otra parte, la viscosidad máxima está limitada por consideraciones relacionadas con el diseño y tamaño del motor y las características del sistema de inyección.

## **d) Residuo de Carbón**

El residuo de carbón da una medida de la tendencia de un combustible a depositar carbón al ser calentado en un bulbo bajo condiciones prescritas. Si bien no está directamente correlacionada con los depósitos en el motor, esta propiedad se considera una aproximación.

## **e) Azufre**

El efecto del contenido de azufre en el desgaste del motor y la formación de depósitos en su interior parece que varía considerablemente en importancia y depende en gran medida de las condiciones de operación. El azufre del combustible puede afectar el funcionamiento del sistema de control de emisiones.

#### **f) Punto de Inflamación**

El punto de inflamación especificado no está directamente relacionado con la performance del motor. Sin embargo, su importancia está relacionada con requisitos legales y precauciones de seguridad relacionadas con el manejo y almacenamiento del combustible y normalmente se especifica para satisfacer las regulaciones de seguridad y de prevención de incendios.

#### **g) Punto de escurrimiento**

El punto de escurrimiento es importante en relación a la menor temperatura que el combustible pueda alcanzar y aun estar suficientemente fluido para ser bombeado o transferido.

#### **h) Cenizas**

Las sustancias que forman cenizas se pueden presentar en el combustible en dos formas: (1) sólidos abrasivos y (2) jabones metálicos solubles. Los sólidos abrasivos contribuyen al desgaste del motor, bomba de combustible, pistones y anillos; así como a los depósitos en el motor. Los jabones metálicos solubles tienen poco efecto en el desgaste pero pueden contribuir a la formación de depósitos en el motor.

#### **i) Corrosión a la Lámina de Cobre**

Esta prueba sirve como una medida de las posibles dificultades con las piezas de cobre, latón y bronce del sistema de combustible.

#### **j) Agua y Sedimentos**

Cantidades apreciables de agua y sedimentos en los motores tienden a causar problemas en las facilidades del manejo del combustible y a su vez, ocasionar averías en el sistema de combustible de un quemador o un motor. Una acumulación de sedimentos en los tanques de almacenamiento y en los filtros, puede obstruir el flujo del combustible del tanque hacia la cámara de

combustión. La presencia de agua en los combustibles destilados medios puede causar corrosión de tanques y equipos, si existe la presencia de detergentes, el agua puede causar emulsiones o mostrar una apariencia brumosa. También la presencia de agua fortalece el crecimiento de microorganismos en la interfase combustible – agua en los sistemas de combustibles.

#### **k) Densidad**

La densidad es una prueba física fundamental que puede ser usada en conjunción con otras propiedades para caracterizar a los combustibles en productos ligeros y pesados. Su determinación es necesaria para la conversión de volúmenes medidos a volúmenes a la temperatura estándar de 15 °C; sin embargo, las variaciones en la densidad del combustible resultan en variaciones en la potencia del motor y, consecuentemente, en las emisiones y el consumo. Se ha encontrado, que la densidad influye en el tiempo de inyección de los equipos de inyección controlados mecánicamente.

#### **l) Acidez total**

La presencia de compuestos ácidos puede deberse a la presencia de ácidos orgánicos e inorgánicos, metales pesados y algunos componentes de los aditivos como agentes inhibidores y detergentes o como producto de degradación formados durante su uso o almacenamiento. Principalmente, los productos de degradación contribuyen a un aumento en el número de acidez. Por más que los ácidos presentes pueden variar ampliamente por sus propiedades corrosivas, el número de acidez no puede ser usado para predecir la corrosividad del combustible en condiciones de servicio. No es conocida alguna correlación general entre el número de acidez y la tendencia a la corrosión del combustible sobre la superficie metálica.

### **m) Aromáticos**

Los aromáticos son moléculas del combustible que contienen al menos un anillo de benceno. Esta prueba es usada como un indicador del contenido de aromáticos en los combustibles Diesel. El contenido de aromáticos es especificado para prevenir un incremento en el promedio de aromáticos presentes en los combustibles Diesel de bajo contenido de azufre.

El contenido de aromáticos afecta la combustión, pues influye en la temperatura de la flama y, por lo tanto, en las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx) durante la combustión, además de la formación de Material Particulado (PM).

Niveles altos de contenido de aromáticos pueden tener un impacto negativo en las emisiones vehiculares, debido a la formación de hidrocarburos poliaromáticos.

### **n) Lubricidad**

La vida corta de los componentes del motor como la bomba de inyección y los inyectores, muchas veces han sido atribuidos a la carencia de lubricidad del combustible, es por ello necesario evaluar la lubricidad con la finalidad de prevenir el desgaste en las piezas del sistema de inyección.

Las bombas de Diesel, como la bomba de inyección y los inyectores, a falta de un sistema de lubricación externa, dependen de las propiedades lubricantes del Diesel para asegurar una operación apropiada. Se piensa que los componentes lubricantes del Diesel son los hidrocarburos más pesados y las sustancias polares.

Los procesos de refinación para remover el azufre del Diesel tienden a reducir los componentes del combustible que proveen de lubricidad natural. A medida que se reducen los niveles de azufre, el riesgo de una lubricidad inadecuada aumenta.

**o) Estabilidad a la oxidación**

Esta prueba determina la estabilidad inherente del combustible a la formación de materia insoluble (gomas y barnices) producto de su degradación. Sin embargo, esta prueba no proporciona una predicción de la cantidad de materia insoluble que se formará durante el almacenamiento para un determinado periodo. La cantidad de materia insoluble que se forma durante el almacenamiento está sujeta a condiciones variables de campo y a la composición del combustible.

**p) Índice de cetano**

Es una medida de la cualidad del encendido del combustible que indica la habilidad del encendido espontáneo bajo las condiciones de temperatura y presión de la cámara de combustible del motor.

**q) Punto de enturbiamiento**

Importante para motores marinos y militares que pueden operar a muy bajas temperaturas. Importan la relación viscosidad/temperatura y el contenido de parafina.

#### **4. CALIDAD DEL COMBUSTIBLE DIESEL**

Los cambios en la tecnología de refinación han tenido un impacto negativo en la estabilidad del combustible Diesel. El “craqueo catalítico” está reemplazando al proceso de destilación atmosférica para poder producir una mayor proporción (más de 85 % contra 50% en el proceso de destilación) de productos livianos y medios (Diesel, Jet Fuel, Kerosene, Gasolina); este Diesel trata de regresar a su estado anterior de aceite pesado formándose sólidos (asfaltenos, ceras etc.). La repetida exposición del Diesel a la alta temperatura y presión del sistema de inyección para ser retornado luego al tanque, acelera el proceso de descomposición, generando depósitos en los picos de los inyectores que modifican el patrón de pulverización esencial para una óptima combustión, produciendo, emisión de humo, acumulación de carbón en la cámara de combustión, contaminación del aceite, y deterioro prematuro del motor.

Este reemplazo además de las diversas calidades de crudo que se procesa en nuestro medio nos permite ver un desmejoramiento gradual en la calidad del Diesel nacional. Adicionalmente, se presentan variaciones significativas en las calidades del combustible procedentes de importación.

La mayor demanda del Diesel 2 se presenta en las unidades de transporte de pasajeros (camionetas rurales, taxis y otros) y de carga, presentándose unidades con motores de inyección muy sensibles a la calidad del combustible.

La calidad del combustible Diesel afecta:

- Los requisitos de la Norma Técnica Peruana
- Los requisitos reglamentarios de diseño y certificación de motores
- La satisfacción del cliente

Las propiedades del combustible Diesel que afectan los requisitos reglamentarios se muestran en la Tabla VI (véase página 29).

**TABLA VI**  
**PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE DIESEL QUE AFECTAN LOS**  
**REQUISITOS REGLAMENTARIOS**

<b>REQUISITO REGLAMENTARIO</b>	<b>PROPIEDAD DEL COMBUSTIBLE</b>
Potencia	Densidad, Viscosidad
Economía de Combustible	Densidad, Poder calorífico, <b>Número de Cetano</b>
Ruido	Destilación, Viscosidad, <b>Número de Cetano</b> , Estabilidad*, Composición
Humos	Densidad, Viscosidad
Emisiones	Viscosidad, Destilación, Azufre, <b>Número de Cetano</b> , Estabilidad*, Composición*.

Fuente: The Associated Octel Company Limited

\*Efectos indirectos atribuibles a fenómenos tales como bloqueo por deposición de carbón en el inyector, producido por la descomposición del diesel.

El problema de la satisfacción al cliente es mucho más complejo y se afectan con un gran número de propiedades del combustible como se observa en la Tabla VII (véase página 30).

**TABLA VII**  
**PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE DIESEL QUE AFECTAN LA**  
**SATISFACCIÓN AL CLIENTE**

<b>CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO</b>	<b>PROPIEDAD DEL COMBUSTIBLE</b>
Comportamiento funcional a baja temperatura <ul style="list-style-type: none"> <li>• Primer encendido</li> </ul>	Punto de enturbamiento, Viscosidad, Destilación, <b>Número de Cetano</b> , Composición, Estabilidad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desalojamiento de humos</li> </ul>	Destilación, <b>Número de Cetano</b> , Composición, Estabilidad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación sostenida</li> </ul>	Punto de enturbamiento, Viscosidad, Contaminantes.
Durabilidad del motor	<b>Número de Cetano</b> , Estabilidad, Contaminantes, Corrosividad.
Requisito de mantenimiento	Azufre, Estabilidad, Composición, Contaminantes, Corrosividad
Economía de combustible	Densidad, Poder Calorífico, <b>Número de Cetano</b> .
Ruido	Destilación, Viscosidad, <b>Número de Cetano</b> , Estabilidad, Composición.
Olor	Numerosas inclusive el empleo de odorizantes.
Espuma en el Combustible	Composición y empleo de aditivo.

Fuente: The Associated Octel Company Limited

El Número de Cetano expresa la calidad de ignición del combustible. Este factor influencia en el arranque, la duración del humo blanco después del arranque, fluidez después del encendido, y la explosión del Diesel en condiciones de reposo. Si la demora en la ignición es reducida, el proceso de combustión empieza más rápido y las emisiones de CO (Monóxido) y HC (Hidrocarburos) son reducidas.

Por lo tanto, si se mejora el **Número de Cetano**, se mejora el consumo de combustible (debido a un mejor control de la combustión), se mejora el encendido a baja temperatura, se reducen las emisiones y el ruido del motor.

Existen Aditivos tales como los Alquitratos (2-Etilhexilnitrato) y los Dialquil peróxidos (diterbutilperóxido), que mejoran el Número de Cetano. También, se suelen incorporar disolventes y detergentes para controlar las gomas y barnices.

Los aditivos más importantes que se emplean son los siguientes:

- **Aditivos detergentes multifuncionales.**- para la reducción de obstrucción de inyector, mejoramiento de la estabilidad del combustible, protección en contra de corrosión, mejoramiento de la lubricidad del combustible y de otras propiedades de comportamiento funcional.
- **Aditivos antiespumantes.**- para la reducción de salpicaduras espumantes y derramamiento durante el reabastecimiento de combustible.
- **Odorizantes.**- empleados por algunas compañías para superar los problemas del olor del Diesel.

Los aditivos están integrados en formulaciones de patente diseñada para promover la imagen de la marca de compañías petroleras individuales e incrementar la aceptabilidad del combustible Diesel en el mercado de combustible de transporte.

## **4.1. ESPECIFICACIONES DEL COMBUSTIBLE DIESEL**

### **4.1.1. TENDENCIA MUNDIAL**

Mundialmente, el combustible Diesel esta bajo intensa revisión, a medida que los fabricantes de vehículos mejoran la operación de los mismos y se implementan límites de emisiones cada vez más estrictos. En general, todos los mercados están proponiendo valores más altos de cetano, una temperatura final de destilación más baja, y menores niveles de azufre.

En América Latina existe considerable diversidad en las especificaciones y en la calidad del producto ofrecido en el mercado. Esta diversidad de especificaciones dificulta la comercialización del producto y dificulta la disponibilidad de combustibles apropiados para los viajeros de algunos países. Este problema se agravará a medida que la liberación de los mercados de América Latina cree más comercio interfronterizo y un mayor movimiento de productos.

### **4.1.2. ASPECTOS TÉCNICOS**

Los aspectos claramente importantes son: **nivel de cetano, temperatura T90 y azufre**. Aunque hay muchas otras especificaciones de Diesel que caracterizan a un combustible y deben ser especificadas para asegurar la calidad consistente del Diesel, los estándares propuestos, a continuación, por el Comité de Armonización de Especificaciones de Combustibles de América Latina y el Caribe, asegurarán en general, una calidad confiable del combustible.

### **4.1.3. IMPACTOS SOBRE LAS REFINERÍAS**

Las refinerías deben cambiar sus operaciones de destilación si se requiere producir Diesel con una temperatura menor de T90. Esto puede crear dificultades en las refinerías, pero el mayor problema es que debe utilizarse más petróleo crudo para obtener la misma cantidad de Diesel. Esta es una inquietud significativa en los mercados de América Latina y el Caribe, en los cuales el

combustible Diesel constituye una gran porción de la demanda de combustibles de transporte.

#### **4.1.4. ESTÁNDAR PROPUESTO DE CETANO**

El índice de cetano para el Diesel vendido en América Latina y el Caribe varía de 40 a 48. La mayoría de los países de la región tienen una especificación de índice de cetano de 45. El resultado del énfasis puesto en las emisiones y la continua inquietud de los fabricantes de motores con respecto a los requerimientos de cetano para sus motores, es que el estándar de cetano para la región sea establecido en número de cetano 47, hacia el año 2005. El Número de Cetano, en lugar del Índice de Cetano, ha sido escogido pues permite el uso de aditivos mejoradores del cetano. **Como existen pocas máquinas de prueba en América Latina que puedan calcular el Número de Cetano del Diesel, es importante que los países establezcan correlaciones entre el Número de Cetano y el Índice de Cetano de sus combustibles Diesel para los crudos que utilicen y los procesos de refinación que dispongan.**

#### **4.1.5. ESTÁNDAR PROPUESTO DE AZUFRE**

El azufre en el Diesel produce emisiones de partículas de los motores. Como resultado, muchos países han propuesto una disminución de los niveles de azufre en el combustible Diesel. Actualmente, las especificaciones para azufre varían de 0,5 % masa (5000 partes de azufre por millón) a 1,0 % masa (10000 partes de azufre por millón) en el Diesel vendido en América Latina y el Caribe.

En el mes de Diciembre del 2002 el World Wide Fuel Charter Comitee (WWFC) emitió un documento técnico que clasifica los mercados de combustibles en 4 niveles según el mayor o menor control gubernamental de las emisiones contaminantes:

- El nivel 1 corresponde a un mercado con escaso o nulo control de emisiones contaminantes. Para este caso el WWFC admite que el contenido de azufre en el combustible Diesel N° 2 estándar puede llegar hasta 3000 partes por millón.

- El nivel 2 corresponde a un mercado con requisitos rigurosos para el control de emisiones u otras demandas del mercado. Por ejemplo, mercados que requieren EURO I y II o estándares equivalentes de las emisiones. Para este caso el WWFC admite que el contenido de azufre en el combustible Diesel N° 2 estándar puede llegar hasta 300 partes por millón.
- El nivel 3 corresponde a mercados con requisitos avanzados para el control de emisiones u otras demandas del mercado. Por ejemplo, mercados que requieren EURO III y IV, o estándares equivalentes de las emisiones. Para este caso el WWFC admite que el contenido de azufre en el combustible Diesel N° 2 estándar puede llegar hasta 30 partes por millón.
- El nivel 4 corresponde a mercados con otros requisitos avanzados para el control de emisiones; por ejemplo mercados que requieren EURO IV, o estándares equivalentes de las emisiones. Para este caso el WWFC recomienda que el combustible Diesel N° 2 se encuentre libre de azufre

Por lo tanto, un vehículo automotor que utilice combustible Diesel N° 2 estándar con 5000 partes de azufre por millón arrojará emisiones contaminantes que exceden los límites máximos señalados en las Directivas 94/12/EC y 96/69/EC del Parlamento Europeo, comprendidos en el estándar EURO II; es así que, el 30 de Octubre del 2001 fue publicado el Decreto Supremo N° 047-2001-MTC del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, en el cual se establece los límites máximos permisibles para las emisiones contaminantes de los vehículos automotores que circulan en la red vial peruana y ordena que a partir del año 2003 los vehículos nacionales o importados que se incorporen al parque automotor peruano deberán cumplir los requisitos del estándar EURO II. Para que los vehículos puedan cumplir estos requisitos el WWFC recomienda que el contenido de azufre en el combustible Diesel N° 2 estándar no exceda de 300 partes por millón.

#### 4.1.6 ESTÁNDAR PROPUESTO PARA DESTILACIÓN

El mercado de América Latina y el Caribe es impulsado por la demanda de Diesel por lo que en el establecimiento de las especificaciones se debe considerar el volumen de Diesel. Si se disminuye el valor de T90 aumentará el requerimiento de petróleo crudo o la instalación de unidades de craqueo. Por lo tanto, la propuesta es que el valor máximo de T90 para el Diesel es que sea de 360 °C.

Se ha reconocido que un estándar de 360 °C es mayor que los estándares propuestos en muchas partes del mundo, y que esto originaría mayores emisiones de partículas que si la temperatura T90 fuera reducida a un menor valor. Una temperatura T90 de 320 es justificable en áreas urbanas donde las emisiones de material particulado (PM<sub>10</sub>) sea un problema serio.

#### 4.2. CLASES DE COMBUSTIBLES DIESEL EN EL PERU

Las propiedades de los combustibles comerciales dependen de las prácticas de refinación empleadas y de la naturaleza de los petróleos crudos de los cuales se producen. Los combustibles destilados, por ejemplo, se pueden producir, dentro del rango de ebullición de 150 °C a 400 °C, teniendo muchas combinaciones posibles de varias propiedades, tales como volatilidad, calidad de ignición, viscosidad, y otras características.

En el Perú existen tres clases de combustibles Diesel apropiados para varios tipos de motores Diesel:

- **Combustible Diesel Nº 1:** Combustible destilado liviano para uso especial en vehículos con motores Diesel en aplicaciones que requieren mayor volatilidad que la del combustible Diesel Nº 2.
- **Combustible Diesel Nº 2 estándar:** Combustible destilado medio para uso general en vehículos con motores Diesel, también apropiado para su uso en

motores estacionarios, especialmente en condiciones de frecuentes variaciones de velocidad y carga.

- **Combustible Diesel N° 2 especial:** Combustible destilado medio para uso específico en vehículos con motores Diesel que requieren un combustible con un contenido medio de azufre y elevado número de cetano, también apropiado para su uso en motores estacionarios, especialmente en condiciones de frecuentes variaciones de velocidad y carga.
- **Combustible Diesel N° 2 superior:** Combustible destilado medio para su uso específico en vehículos con motores Diesel que requieren un combustible con bajo contenido de azufre y elevado número de cetano, también apropiado para su uso en motores estacionarios, especialmente en condiciones de frecuentes variaciones de velocidad y carga.

#### **4.3. ESPECIFICACIONES DEL COMBUSTIBLE DIESEL SEGÚN NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 321.003:2001**

La Norma Técnica Peruana NTP 321.003:2001 establece los límites permisibles de las propiedades significativas de los combustibles usados para especificar la variedad de combustibles diesel comerciales disponibles.

En las Tablas VIII y IX (páginas 37 y 39, respectivamente), se muestran los requerimientos detallados de los combustibles Diesel N° 1, Diesel N° 2 Estándar, Diesel N° 2 especial y Diesel N° 2 Superior.

En la Tabla X (página 40), se muestra las Calidades Típicas del Combustible Diesel en el Perú

**TABLA VIII**  
**ESPECIFICACIONES**

**Especificaciones Diesel N°1, Diesel N°2 y Diesel N°2 Especial**

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES						METODO DE ENSAYO		
	DIESEL N° 1		DIESEL N°2		DIESEL N° 2 ESPECIAL		ASTM	ISO	NORMA TÉCNICA PERUANA
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.			
<b>VOLATILIDAD</b>									
Destilación, °C (a 760 mm Hg)							D 86:99a	3405:88	PNTTP 312.023
90% recuperado a		288	282	360	282	360			
Punto de inflamación Pensky Martens, °C	38		52		52		D 93:99B	2719:88	PNTTP 321.024
<b>FLUIDEZ</b>									
Viscosidad Cinemática a 40°C, cSt	1,3	2,4	1,9	4,1	1,9	4,1	D 445:97	3104:94	PNTTP 321.031
Punto de Escurrimiento, °C (1)		-12		+.4		+.4	D 97:96A	3016:94	
<b>COMPOSICIÓN</b>									
Número de Cetano (2)	40		45		50		D 613:95	5165:98	
Índice de Cetano	40		40		45		D 4737:96a D 976:95 (4)	4264:95	PNTTP 321.130
Cenizas, % masa		0,01		0,01		0,01	D 482:95	6245:93	
Residuos Carbón Ramsbottom, 10% Fondos, % masa (3)		0,15		0,35		0,35	D 524:97 D 189:97	4262:93, 6615:93	
<b>CORROSIVIDAD</b>									
Corrosión Lámina de Cobre.3h.50°C,Nº		3		3		3	D 130:94	2160:98	PNTTP 321.021
Azufre Total, % masa.		0,5		0,5		0,15	D 129:95 D2622:98 D 4294:98	8754:92	
<b>CONTAMINANTES</b>									
Agua y Sedimentos, %Vol.		0,05		0,05		0,05	D 1796:97, D 2709:96	3734:97	PNTTP 321.029
<b>OBSERVACION:</b> Estas especificaciones técnicas son el resultado de tomar como referencia: Norma ASTM D 975:98b (En vigencia), Norma Técnica Peruana NTP 321.003:1989: PETRÓLEO Y DERIVADOS. Combustibles Diesel y recomendaciones del Joint Nations Development Programme - World Bank - " Armonización de las especificaciones de los Combustibles en américa Latina y el Caribe" - Junio 1998 (En vigencia).									

NOTAS:

- (1) Cuando el Cliente lo requiere, se determinará el PUNTO DE NIEBLA O ENTURBIAMIENTO Método de Ensayo ASTM D 2500-98a.
- (2) En caso de no contar con el equipo del Método de Ensayo ASTM D 613-95(Número de Cetano), se calculará el Índice de Cetano con el Método de Ensayo ASTM D 4737:96a.
- (3) En caso de no contar con el equipo, se calculará esta propiedad utilizando el apéndice X1 del Método de Ensayo ASTM D 524:97, que relaciona el ensayo de Carbón Conradson (Método de ensayo ASTM D 189:97) con el carbón Ramsbottom.
- (4) Solamente para combustibles Diesel de rango de número de cetano entre 56,5 a 60,0 se utilizará el método ASTM D 976 para calcular el índice de cetano.

Fuente: INDECOPI

Con respecto a la Temperatura T90, la Norma Técnica Peruana 321.003:2001 para el Diesel N° 2 estándar, especifica como máximo una Temperatura de 360 °C, lo cual concuerda con el estándar propuesto por el Comité de Armonización de Especificaciones de Combustibles de América Latina y el Caribe, para el año 2005; sin embargo, con respecto a las Propiedades Cetánicas, se requiere realizar estudios de dichas propiedades y determinar si existe la posibilidad de cambiar los límites de la especificación, de modo que se cumpla con el estándar propuesto de número de cetano 47 hacia el año 2005, lo cual asegurará, en general, una calidad confiable del combustible.

Cabe anotar, con respecto a la especificación del azufre, que según Resolución de la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales N° 0112-2004/CRT-INDECOPI, publicada el 06 de Noviembre del 2004, se deja sin efecto el extremo que admite una proporción de hasta 5000 partes de azufre por millón en la composición del Combustible Diesel N° 2 estándar, contenido en la NTP 321.003.2001, debido a que como se mencionó anteriormente, existe un Decreto Supremo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones que ordena que todo vehículo que ingrese al parque automotor peruano a partir del 2003, deberá cumplir con el estándar EURO II, por lo que el combustible estándar Diesel N° 2 no excederá de 300 ppm de azufre .

Actualmente el Comité Técnico de Normalización de Petróleo y Derivados viene elaborando una nueva NTP sobre las especificaciones del Petróleo Diesel, al término del cual, presentará su propuesta a la Comisión de Reglamentos para su aprobación.

**TABLA IX**

**Especificaciones Diesel N°2 Superior**

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES		METODO DE ENSAYO		
	MINIMO	MAXIMO	ASTM	ISO	NORMA TÉCNICA PERUANA
<b>VOLATILIDAD</b>					
Destilación, °C (a 760 mm Hg) (A) (B)			D 86:99a	3405:88	PNTP 312.023
% Vol. Recuperado a 250°C		65			
% Vol. Recuperado a 350°C	80				
95% recuperado a		360			
Punto de inflamación Pensky Martens, °C	55		D 93:99b	2719:88	PNTP 321.024
Densidad a 15°C, kg/m <sup>3</sup>	820	845	D 1298:99 D 4052:96	3675:98 12185:96	
<b>FLUIDEZ</b>					
Viscosidad Cinemática, 40°C, mm <sup>2</sup> /s, (cSt)	2,0 (2,0)	4,50 (4,50)	D 445:97	3104:94	PNTP 321.031
Punto de Niebla, °C		(D)	D 2500:98a	3015:92	
<b>COMPOSICIÓN</b>					
Número de Cetano	51		D 613:95	5165:98	
Índice de Cetano	46		D 4737:96a D 976:95 (F)	4264:95	PNTP 321.130
Cenizas, % masa		0,01	D 482:95	6245:93	
Residuos de Carbón Conradson, 10% Fondos, % masa (C)		0,30	D 4530:93 D 189:97	10370:93, 6615:93	
Aromáticos, %Vol.		35	D 1319:98	3837:96	
Azufre Total, mg/kg (% masa)		350 (0,035)	D 2622:98 D 4294:98 D2785:80	14596:98 8754:95 4260:87	
Acidez Total, mg KOH/g		0,08	D 974:97	6618:97	
<b>CORROSIVIDAD</b>					
Corrosión Lámina de Cobre.3h.50°C,N°		1	D 130:94	2160:98	PNTP 321.021
Estabilidad a la Oxidación, g/m <sup>3</sup>		25	D 2274:94	122205:95	
<b>CONTAMINANTES</b>					
Contenido de agua, mg/kg (%masa)		200 ( 0,02)	D 1744-93	12937:96	
Material particulado, mg/L		24	D 2276:98a	EN 12662 (E)	
<b>LUBRICIDAD</b>					
Lubricidad, diámetro rasgado de uso corregido (wsd 1,4) a 60°C, um		460	D 6079:97	12156:1:97	
<p><b>OBSERVACION:</b> Estas especificaciones técnicas son el resultado de tomar como referencia la Norma Europea EN 590:1999, Norma ASTM D 975:98b y Normas de Combustibles: WORLD-WIDE FUEL CHARTER - Diciembre 1998 (editado por: AAMA, ACEA,EMA y JAMA)</p>					

**NOTAS:**

- (1) Para el cálculo del índice de cetano es necesario las temperaturas para el 10%, 50% y 90% Vol. de recuperado.
- (2) Los límites para la destilación a 250°C y 350°C son incluidos para este combustible Diesel.  
El valor esta basado sobre el combustible sin la adición de aditivos mejoradores de cetano.
- (3) Debe ser igual o menor que la temperatura del ambiente mas baja esperada.  
Al no existir una norma europea equivalente a la Norma ISO, se mantendrá la Norma Europea EN 12662 como método de referencia.
- (4) Solamente para combustibles Diesel de rango de números de cetano entre 56,5 a 60,0 se utilizará el método ASTM D-976 para calcular el índice de Cetano.

Fuente: INDECOPI

**TABLA X**  
**CALIDADES TIPICAS DEL COMBUSTIBLE DIESEL EN EL PERU**  
**DIESEL N ° 2**

PROPIEDADES	Método ASTM/otro	Especificaciones		Refinería la Pampilla	Refinería Conchán	Refinería Talara	Refinería Iquitos
		Min	Máx				
<b>APARIENCIA</b>							
Color ASTM				0,5		1,5	
<b>VOLATILIDAD</b>							
Destilación (° C )	ASTM-D86						
Punto Inicial de Ebullición		Reportar		152	173	163	155
10% Recuperado		Reportar		197	237	204	208
50% Recuperado		Reportar		298	298	297	298
90% Recuperado (A)		282	360	348	349	350	350
Punto Final de Ebullición				373	379	379	369
Recuperado % vol		Reportar		98	98	98	97,8
Residuo		Reportar		1,8	1	1,5	1,6
Pérdida		Reportar		0,2	1	0,5	0,6
Gravedad API @ 15,6 °C	ASTM-D1298			33,3	32	34,3	36,4
Punto de Inflamación P.M.,°C	ASTM.D93	52		57	67	60	58
<b>FLUIDEZ</b>							
Viscosidad Cinemática @ 37°C	ASTM-D445			3,98		4,3	4.85
Punto de Ecurrimiento °C	ASTM-D97		+4	-15		-6	
<b>COMPOSICION</b>							
Indice de Cetano	ASTM-D976	40		49,4	48	51,3	
Cenizas, % masa	ASTM-D48		0,01	0,02		0,004	
Carbón Conradson, % masa	ASTM-D189		0,35	0,01		0,01	
<b>CORROSION</b>							
Lam. Cobre 3 Hrs. @ 100° C	ASTM-D130			3a	3a		
Azufre Total, % masa	ASTM-D129		0,5	0,48	0,15	0,15	
<b>CONTAMINANTES</b>							
Agua y Sedimentos %vol	ASTM-D1796		0,05	0,00		0,02	
<b>ESTABILIDAD</b>							
Estab. a la Oxidac, mg/100ml	ASTM-D2274					0,3	
<b>COMBUSTION</b>							
Poder Calorífico Bruto BTU/lb.	ASTM-D240			19 517,0			

(A) A una presión de 760 mmmHg

Fuente: PETROPERU

## 5. COMBUSTIÓN EN MOTORES CICLO DIESEL

### 5.1. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

La Combustión es una reacción termoquímica muy rápida entre el oxígeno del aire y el combustible, para formar teóricamente CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, más el consiguiente desprendimiento de calor (Reacción exotérmica). Cuando la reacción emite luz en el visible, se la denomina Llama.

Para que se produzca la reacción de una manera efectiva el combustible debe de pasar a estado gaseoso para mezclarse con el oxígeno. De esta manera, la reacción se generará de una forma más eficaz. Debido a que el proceso no es 100% eficaz, parte de los reactivos no se transforman en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, sino que se formarán sustancias contaminantes que se emiten al exterior en forma de **emisiones**. Como consecuencia, parte de la energía química de los reactivos no se transformará en calor.

El periodo de combustión es muy corto, en torno a decenas de milisegundo, ya que se necesita que la reacción sea rápida y completa. El periodo de combustión normalmente está entre 40-50° de giro de cigüeñal.

Si por ejemplo, un motor funciona a 1500 rpm el tiempo disponible para la combustión será de:

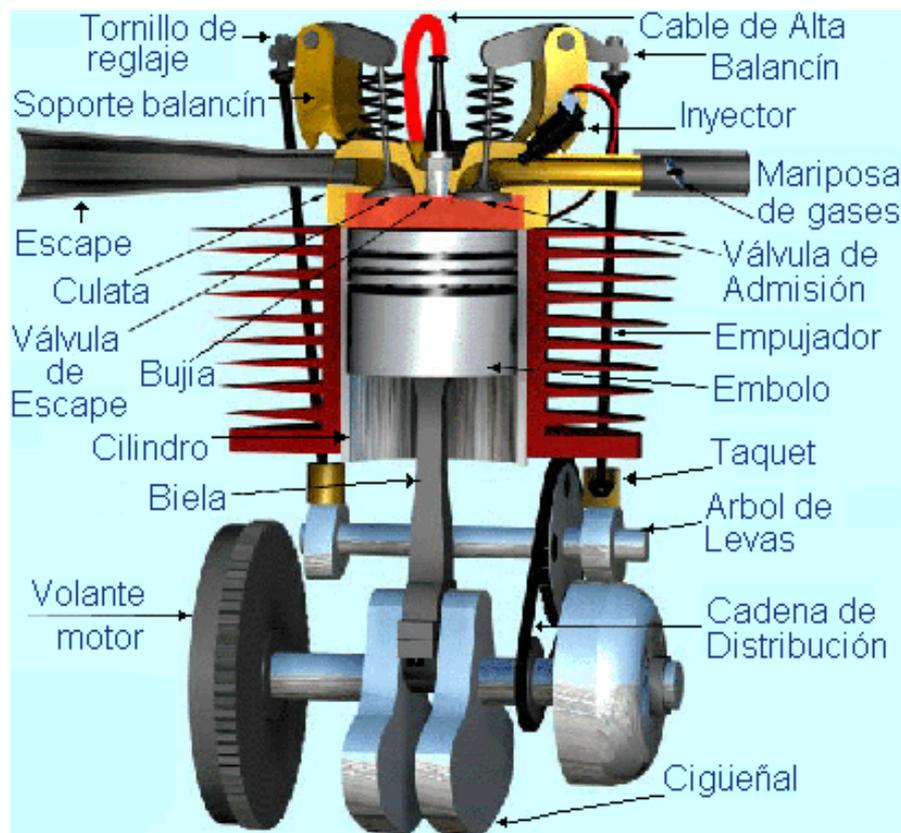
$$50^{\circ}(1\text{min}/1500\text{rpm})*(1\text{rpm}/360^{\circ})*(60\text{seg}/1\text{min}) = 5,6\text{ms}$$

Para que se produzca una buena combustión se deben de cumplir varias premisas:

1. Transformar el combustible líquido a estado gaseoso. Cuanto mayor sea el peso molecular del compuesto hidrocarburo menos volátil será, y más complejo será el proceso de combustión.
2. Hacer que el aire y el combustible se mezclen y alimenten la zona de ignición y combustión. En la primera zona, el aire y combustible están íntimamente

mezclados en forma de gas, mientras que en la segunda zona es más heterogéneo ya que el combustible no está totalmente en forma de gas ni mezclado homogéneamente con el aire.

La ignición del combustible se produce cuando las gotas de éste finamente formadas están a una temperatura suficiente dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, si no se dan las condiciones adecuadas (moléculas muy grandes, poca cantidad de oxígeno y/o temperatura insuficiente) el combustible se quemará parcialmente, es decir, se oxidará formando partículas de carbonilla y otros tipos de partículas contaminantes.



**FIGURA 5: Motor de Explosión**

## 5.2. FORMACIÓN DEL SPRAY

Cuando se inyecta combustible en la cámara de combustión de un motor diesel se forman zonas ricas y otras pobres en él. Tanto las zonas ricas como las pobres están involucradas en el proceso de combustión. En las zonas ricas en combustible se suelen generar mayor cantidad de monóxido de carbono (CO),

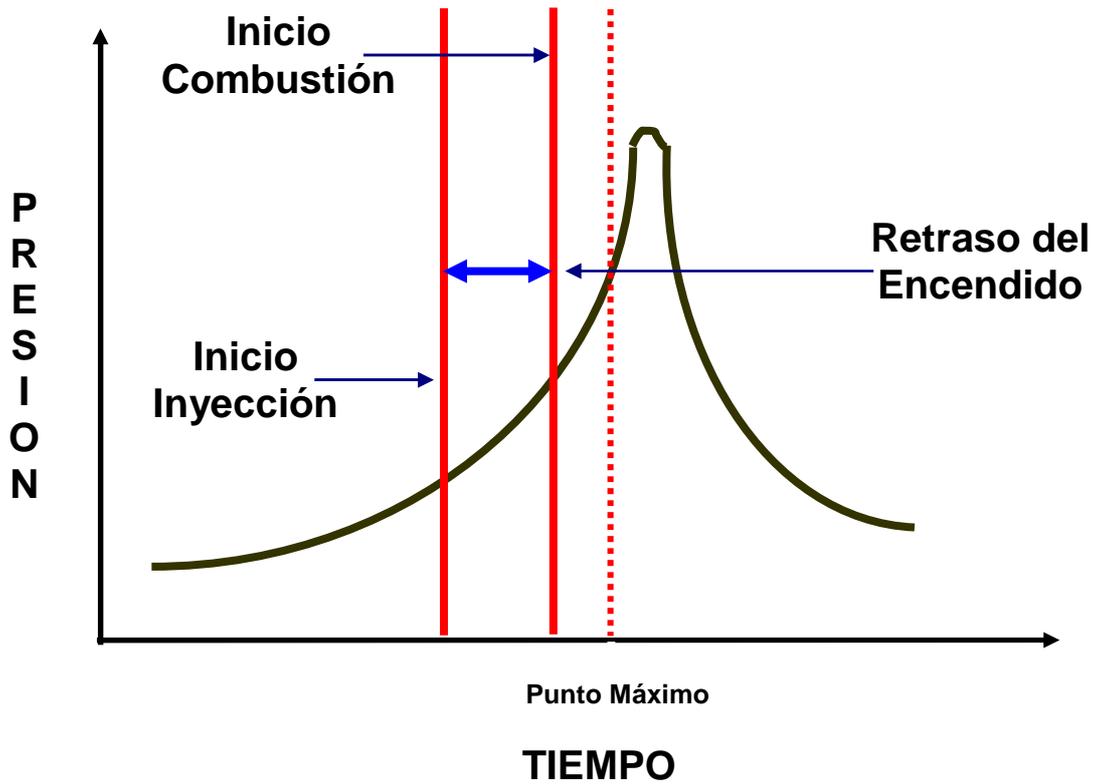
hidrocarburos inquemados (HC) y carbonilla, mientras que en las zonas pobres se producen mayor cantidad de Óxidos de Nitrógeno (NOx). Sin embargo, en las zonas pobres en combustible, se suelen ir quemando el CO, HC y carbonilla formados en la zona rica antes de que se eliminen por la válvula de escape. La carbonilla no se elimina tan fácilmente debido a que es un sólido y no se oxida lo suficientemente rápido como para desaparecer antes de que abandone la cámara de reacción.

El chorro de combustible se atomiza en finas gotas de combustible. Cuando el aire se encuentre aproximadamente en 1000° K, el combustible se evapora de manera muy fácil. La entrada del aire en la cámara de combustión hace que se forme un torbellino, evaporando más fácilmente el combustible al arrastrar parte de él del spray y mezclándose con él, creando zonas ricas y pobres en combustible. La inflamación suele producirse muy cerca del punto estequiométrico, quemándose toda la mezcla disponible instantáneamente. La mezcla que no se puede quemar por su pobreza tiende a oxidarse en parte pero no se quema.

La mezcla formada alrededor del spray de diesel produce dos zonas: la inflamable y la combustible. Cada una de ellas es importante desde el punto de vista de formación de contaminantes.

### **5.3. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN**

Los motores diesel inyectan combustible líquido en una atmósfera de aire caliente comprimido lo que provoca la ignición. La etapa de difusión de la llama se produce cuando la combustión comienza con el aire y el combustible pobremente mezclados. La velocidad de combustión se determina por la velocidad de inyección de combustible y por la velocidad de mezclado en el cilindro. Los fenómenos más importantes en la combustión son el retraso de la combustión, la combustión por inflamación de la premezcla, la combustión de la mezcla controlada y la combustión de carbonilla y la combustión tardía (véase Figura 6, página 44).



**FIGURA 6: Perfil de desprendimiento de calor del Diesel durante la combustión.**

La reacción química de combustión es muy sensible a la temperatura. Esta dependencia se puede observar mediante la ecuación de Arrhenius:

$$R = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

donde  $R$  es la velocidad de la reacción,

$E_a$  es la energía de activación,

$A$  es el factor pre-exponencial,

Se puede ver que la velocidad de reacción es proporcional al exponencial de la temperatura. De esta manera, un pequeño aumento en la temperatura produce un gran efecto en la velocidad de la reacción. Esto es muy importante a la hora de

conocer el proceso de la combustión. Cuando el pistón se acerca al punto muerto superior PMS (es decir, cuando el embolo está en su máxima posición "arriba"), el aire se va comprimiendo hasta que se produce el primer golpe de combustión. Este calienta al resto de la mezcla inquemada. El resultado es una combustión muy rápida, casi instantánea, de toda la mezcla que había sido premezclada durante la etapa de retraso a la ignición. La combustión comienza tras un retraso inicial y luego comienza con una cuña de quemado muy rápida donde todo el combustible que había sido vaporizado y premezclado con el aire caliente se quema. Esta inflamación del combustible tiende a producir una luz naranja muy brillante cuando se calienta el exceso de combustible de la zona rica en combustible para formar partículas de carbonilla incandescentes. La radiación del cuerpo sólido de las partículas de carbonilla proporciona una transferencia de calor muy grande, lo que posibilita el calentamiento del resto de gotas de combustible, acelerando la evaporación y mezcla del mismo.

### **5.3.1. Retraso de la ignición e Inflamación de la premezcla**

Este es uno de los parámetros más importantes que hay que tener en cuenta durante el proceso de la combustión del diesel. Se define como el tiempo que transcurre desde que se comienza la inyección de combustible hasta el momento en el que comienza su combustión. El comienzo de la inyección de combustible se determina mediante la medida de presión en la cámara de combustión. La apertura de la válvula de aguja del inyector normalmente produce un cambio en la pendiente de la línea de presión. Este punto se considera como el comienzo de la inyección.

Mediante el análisis del instante en el cual se produce el comienzo de la inyección y la presión máxima obtenida se puede obtener información sobre la calidad del combustible. El combustible líquido se inyecta en forma de finas gotas al final del periodo de compresión del cilindro. El aire comprimido en este punto está bastante por encima de la temperatura de ignición del combustible, por lo que la ignición se produce de una manera muy rápida. Sin embargo, existe un lapso de tiempo suficiente como para que parte del combustible se evapore. Este, se mezcla inmediatamente con el aire y se forman reacciones de pre-inflamación por

rotura de moléculas de combustible en presencia de aire para formar radicales los cuales son capaces de propagar la cadena de reacción de combustión exotérmica.

Normalmente, la formación de la mezcla y las reacciones de pre-inflamación se producen en diversos puntos alrededor del chorro de combustible o de los inyectores.

El control del retraso de la ignición es muy importante en la combustión de un motor diesel. Se desea que esta etapa sea muy corta, ya que si es larga puede producirse el “golpeteo” al producirse una combustión espontánea. Este “golpeteo” causa una gran pérdida de energía calorífica, eficacia del motor y puede llegar incluso a provocar averías, por lo que se debe evitar. Este típico “golpeteo” en un motor diesel se acentúa cuando el motor está frío o con bajas cargas. Para controlarlo es importante poseer un combustible que se autoinflame fácil y fiablemente. **La medida de la calidad de la ignición por compresión es el llamado Número de Cetano. Cuanto mayor sea este menor tendencia tendrá al “golpeteo”.**

### **5.3.2. Combustión controlada de la mezcla**

Una vez que la combustión ha comenzado, el diesel actúa como una llama de difusión, inyectado en forma de chorro, mezclándose y reaccionando con el aire. Esta llama está cerca del punto de relación estequiométrica. Debido a que siempre existe una zona rica en combustible y otra pobre, el motor diesel tiende a producir contaminantes que provienen tanto de las zonas ricas como de las pobres.

Para reforzar la mezcla, los motores diesel necesitan que las velocidades del torbellino de aire sean muy altas. Durante el periodo controlado de combustión de mezcla, el combustible se quema según se va inyectando a una velocidad constante. En las zonas ricas en combustible se forma una gran cantidad de carbonilla. Las moléculas de combustible se van craqueando por el calor y los compuestos ligeros como el hidrógeno se difunden preferentemente hacia el

exterior de la zona de reacción, dejando unos residuos con alto contenido en carbono dentro. Estos residuos se aglomeran para formar partículas de carbonilla y cadenas de partículas de carbonilla. Normalmente, en un motor diesel, una gran parte del combustible forma carbonilla durante esta etapa de la combustión.

### **5.3.3. Formación de carbonilla y final de la combustión**

Como se ha comentado, se forma una gran cantidad de carbonilla en la zona del spray rica en combustible. Esto ocurre incluso en mezclas con exceso de aire. Después de que se han formado estas partículas, durante el periodo de inyección/evaporación del combustible, la mayor parte de ellas se queman con el final de la inyección. Sin embargo, esta reacción es entre un sólido y un gas, la cual es mucho más lenta que una reacción típica gas-gas. Además, al final de la inyección la temperatura de la mezcla disminuye porque el motor está en la etapa de expansión, por lo que la carbonilla tiende a enfriarse y depositarse en el conjunto pistón-cilindro o eliminarse por el escape. Cuando el motor funciona con defecto de aire se forman mucha más carbonilla y emisiones de humo en el motor.

-----00000-----

## **6. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS. BIODIESEL.**

A diferencia de combustibles alternativos no renovables como el gas natural comprimido y el gas licuado de petróleo y renovables como el bioetanol, los metil-ésteres de aceites vegetales -mejor conocidos como biodiesel I- no requieren de modificaciones en los motores de combustión interna, salvo sustituciones menores de algunos empaques y mangueras. Pueden sustituir grandes cantidades de combustible diesel convencional en un corto plazo y reducir significativamente las emisiones provocadas por unidades de transporte público y de carga, ya que estos son, precisamente, los que contribuyen en forma sobreproporcionada a la contaminación del aire en las grandes ciudades.

### **6.1. TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

Existen, al menos, tres formas de hacer funcionar un motor diesel con biopotencia, utilizando aceites vegetales, grasas animales o ambos. Las tres funcionan tanto con aceites frescos como usados.

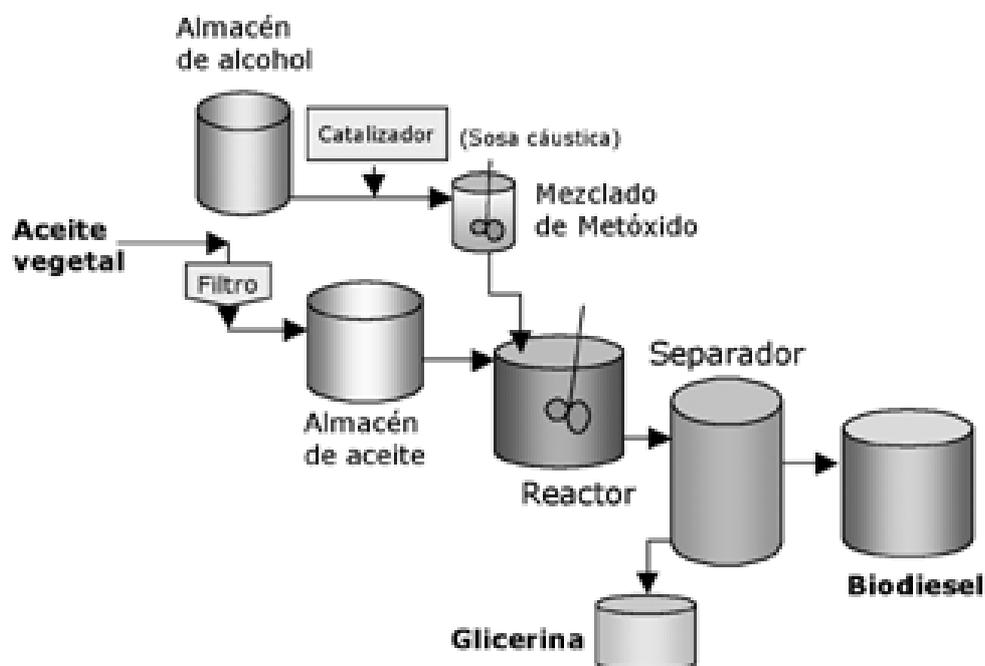
- Utilizando el aceite tal como es;
- Mezclándolo con kerosene (parafina);
- Convirtiéndolo en biodiesel.

Los dos primeros métodos suenan como los más fáciles, pero poseen desventajas; la principal de las cuales que funciona mejor si se enciende la máquina con diesel ordinario, luego se cambia a biocombustible y posteriormente se vuelve a cambiar a diesel antes de parar el motor. Esto implica tener dos depósitos de combustible, algo que no es un asunto sencillo con los diesel, que tienen sistemas de combustible hermético. El utilizar aceite vegetal directamente requiere pre -calentar el aceite en cada etapa y volver al segundo depósito de combustible.

El biodiesel, obtenido a partir de materias primas renovables, es un combustible líquido no contaminante y biodegradable, que se puede utilizar en el sector del transporte urbano, minero, agrícola y marino, así como en calderas de calefacción, incorporándolo directamente o mezclado con gasóleo.

## 6.2- PRODUCCIÓN DE BODIESEL

La producción del biodiesel es un proceso conceptualmente simple; los pasos básicos se resumen en la Figura 7: Aceite vegetal de características conocidas reacciona a temperaturas moderadas ( $\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con metanol en presencia de un catalizador alcalino o ácido; típicamente, se utiliza hidróxido de sodio o de potasio. Después de aproximadamente dos horas bajo condiciones de constante agitación, los triglicéridos, las moléculas complejas que forman el aceite y que le dan su consistencia viscosa, reaccionaron completamente con el metanol para formar cadenas de metil-éster (biodiesel) y glicerina, un producto secundario de valor comercial.



**FIGURA 7: Esquema de la producción de biodiesel en un proceso por lotes**

Las materias primas que se pueden emplear en la obtención de biodiesel son muy variadas y pueden clasificarse en:

a) Aceites vegetales.

- Aceites de semillas oleaginosas: girasol, colza, soja y coco.
- Aceites de frutos oleaginosos: palma.

- Aceites de semillas oleaginosas alternativas: Brassica carinata, Camelina sativa, Poganus
- Aceites de semillas oleaginosas modificadas genéticamente: Aceite de girasol de alto oleico.
- Aceites vegetales de final de campaña: Aceite de oliva de alta acidez.

b) Aceites de fritura usados.

c) Grasas animales: Sebo de distintas calidades.

Los sectores implicados en el proceso de obtención de biodiesel se detallan a continuación:

- Agrícola: Siembra y recogida del grano.
- Industrias aceiteras: Producción de aceite
- Industria química
- Compañías petroleras: Mezcla con gasóleo y distribución del biodiesel.
- Cooperativas Agrícolas: Uso de biodiesel en tractores y maquinaria agrícola
- Administraciones locales y autonómicas: Flotas de autobuses, taxis, calefacciones etc.
- Áreas ambientalmente protegidas: Utilización de biodiesel en los medios de transporte de parques nacionales, lagos etc.

### **6.3. PROPIEDADES**

Como se puede apreciar en la Tabla XI (véase página 51), las propiedades físico-químicas del biodiesel son muy comparables con las del combustible Diesel normal (petrodiesel). El poder calorífico es aproximadamente un 10 por ciento inferior al del petrodiesel lo cual en la práctica tiene consecuencias despreciables para el consumo.

**TABLA XI**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>DIESEL 2</b>	<b>BIODIESEL</b>
Agua y Sedimentos, % vol	0,05 máx	0,05 máx
Viscosidad, 40 °C, cSt	1,9-4,1	1,9-6,0
Punto de Inflamación, °C	>52	>130
Contenido de Azufre, % masa	0,5 máx	0,5 máx
Número de Cetano	>45	>47
Temperatura 90 % recuperado, °C	360 máx	360 máx
Poder Calorífico, Mj/dm <sup>3</sup>	35,6	32,9

#### **6.4. PARTICULARIDADES DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS. COMBUSTION**

Fundamentalmente se quiere estudiar el Biodiesel (metil-éster de aceite vegetal)

Lo primero que se debe tener en cuenta es cómo afectan las propiedades físicas del combustible a la forma de la atomización, penetración, evaporación y mezcla con el aire para quemarse. Los requisitos que debe tener el combustible son:

- Retraso de la ignición pequeño (ms) para evitar el golpeteo diesel, ya que se forman grandes cantidades de mezcla antes de la ignición.
- Cuanto mayor número de cetano posean mejor ya que los retrasos a la ignición son menores. Cuanto mayor y más lineal sea la molécula poseerá un número de cetano mayor.
- Cuanto mayor sea el número de cetano menos tiempo (en grados de cigüeñal) tarda en alcanzar la presión máxima de combustión. Cuanto menor avance de cigüeñal se utilice el tiempo (en grados de cigüeñal) que tarda en alcanzar la presión máxima de pico disminuye.

- Cuanto más fácil sea de crear las turbulencias con el combustible mejor mezcla entre combustible y aire se dará.

#### **6.4.1. SIMILITUDES**

Se han visto una serie de similitudes con el diesel, que le hace apto para ser usado en los motores de combustión interna ciclo diesel:

- El biodiesel posee un número de cetano similar o superior al diesel.
- El mecanismo de combustión de los ésteres parece ser similar al del diesel. Las moléculas se descomponen a altas temperaturas generando radicales libres que promueven la autoignición.
- Las velocidades de combustión son similares. El diesel tiene un ligero aumento en el retraso a la ignición y también una velocidad de combustión máxima durante la etapa de combustión de “premezcla”.
- Una vez que la etapa de precombustión se ha terminado la siguiente etapa es muy similar entre ambos combustibles.

#### **6.4.2. DIFERENCIAS**

También existen una serie de diferencias que hace que se obtengan unos rendimientos y partículas contaminantes diferentes.

- La mayor viscosidad y menor volatilidad del biodiesel frente al diesel hace que las condiciones de formación del spray y atomización varíen. Esto afecta fundamentalmente a las emisiones.
- En las mezclas biodiesel/diesel se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de biodiesel el retraso de la ignición disminuye (al tener un número de cetano mayor) hasta un porcentaje donde aumenta (debido a las características de densidad, viscosidad, de formación del spray, etc.). Los

tiempos que tardan desde la inyección hasta que se observa la presión máxima son mayores que en el diesel, aún teniendo un número de cetano superior.

- El tiempo de retraso a la ignición es inferior para el biodiesel con unas características de presión similares al diesel.
- Al formar mayor cantidad de depósitos en la punta del inyector que el diesel, la forma de crear el spray y la combustión varían por lo cual los perfiles de combustión también difieren.

-----00000-----

## **7. EL DIESEL Y EL MEDIO AMBIENTE. EMISIONES.**

El gas producido por los motores a diesel es considerado una de las fuentes más contaminantes del aire. Entre sus componentes se encuentra el material particulado (PM), Óxidos de nitrógeno que conforman el smog (NOx); dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que forma partículas finas nocivas y regresa a la tierra en forma de lluvia ácida; y una mezcla dañina de sustancias químicas tóxicas.

Estos son algunos de los contaminantes tóxicos del aire que se encuentran en las emisiones de diesel:

- Acetaldehído
- Benceno
- Formaldehído
- plomo inorgánico
- compuestos de manganeso
- compuestos de mercurio
- monóxido de carbono
- dióxido de sulfuro
- compuestos de cianuro
- metanol
- fenol
- arsénico

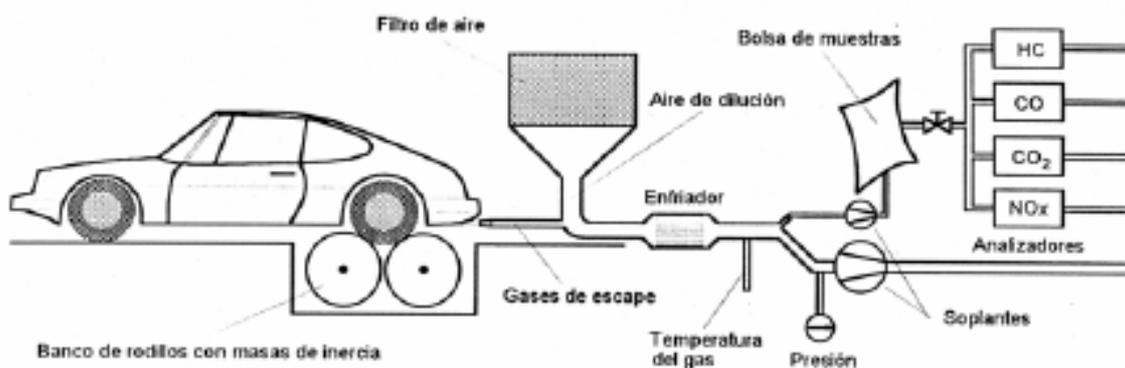
Sin embargo, con motores diesel mantenidos correctamente, las emisiones gaseosas son menores que aquellas procedentes de motores de gasolina comparables. Aún así, perfeccionamientos adicionales por fabricantes de motores en Europa han producido compuestos diesel “limpios” que eliminan humo y producen menos contaminación que un motor de gasolina equipado con un catalizador especial. Las mejoras en sistemas de inyección electrónica para autobuses y camiones ya han reducido las emisiones de humo en un 50%.

El motor diesel también ha reducido significativamente las emisiones de dióxido de carbono, el gas invernadero principal. Comparado con un motor de gasolina un diesel equivalente puede consumir 30 % menos combustible y, por lo tanto, emitir en relación directa menos dióxido de carbono.

Una ventaja adicional para los motores que usan diesel es que existe una reducción significativa en emisiones evaporativas durante la transferencia y el empleo del combustible comparadas con las emitidas por motores que usan gasolina.

Estas ganancias potenciales solo se obtienen si combustibles diesel de alto número de cetano y de calidad “superior” se encuentran disponibles. El mantenimiento de la calidad cetánica y del comportamiento funcional a baja temperatura son factores críticos en el logro o en el mantenimiento de bajas emisiones gaseosas, bajos ruidos y de un mejor encendido a bajas temperaturas.

La producción de contaminantes por los motores de automóviles se mide en bancos de ensayo bajo carga. La Figura 8, muestra el esquema de un banco de ensayos típico:



**Figura 8: Banco de ensayos de automotor**

## **8. DIAGNOSTICO DE LAS EMISIONES DEL PARQUE AUTOMOTOR DEL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO**

La calidad del aire en exteriores del área metropolitana de Lima-Callao se ha deteriorado en los últimos años. Según mediciones de la Dirección General de Salud Ambiental, las concentraciones de monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y material particulado (PM) exceden los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Una de las principales causas de este deterioro ha sido el crecimiento del parque automotor que actualmente excede la capacidad de la infraestructura vial, es antiguo y de mala calidad. La oferta del transporte público sobrepasa la demanda, no se realizan revisiones técnicas y se usa gasolina con plomo y combustible diesel con alto contenido de azufre.

Un primer diagnóstico de las emisiones de partículas totales en suspensión (PTS), SO<sub>2</sub>, NOx, CO, compuestos orgánicos volátiles (COV) y plomo provenientes del parque automotor de Lima-Callao, indica que los taxis y mototaxis representan casi 70% de las emisiones de CO y aproximadamente 50% de las emisiones de plomo y COV y los camiones, buses y remolcadores contribuyen entre 60% y 65% de las emisiones de PTS, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Para reducir las emisiones es necesario elaborar un plan de acción con medidas de corto, mediano y largo plazo. Se debería incluir medidas relativas a los combustibles, vehículos e infraestructura del transporte, que de implementarse, las emisiones de PTS y NOx se reducirían 30%, 60% las de SO<sub>2</sub>, 70% las de CO, 45% las de COV y las emisiones de plomo casi se eliminarían por completo.

Actualmente, no existe un inventario de emisiones del parque automotor en Lima-Callao. A continuación se presenta un primer diagnóstico de las emisiones de partículas totales en suspensión (PTS), SO<sub>2</sub>, NOx, CO, compuestos orgánicos volátiles (COV) y plomo provenientes del parque automotor de Lima-Callao y las posibles medidas de acción que se podrían implementar para reducir estas emisiones.

Para este estudio, la información se recolectó mediante visitas a nueve instituciones públicas y privadas. Lamentablemente, la información es de dudosa calidad, escasa y de difícil acceso. Del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Superintendencia Nacional de Registros Públicos, Centro de Investigación y Asesoría de Transporte Terrestre y Servicio de Taxis Metropolitano se obtuvo información sobre las características del parque automotor; de la Municipalidad de Lima se obtuvo información sobre las distancias recorridas; y del Ministerio de Energía y Minas y la compañía de petróleo YPF-REPSOL se obtuvo información sobre la calidad y cantidad de los combustibles.

Los datos disponibles del Ministerio de Transportes censan un parque automotor en el año 2000 de 1'114,100 vehículos, correspondiendo el 51,5% a automóviles, el 25,0% a camionetas, el 8,9% a camiones, el 7,9% a station wagons, el 4,6% a ómnibus y el 2,1% a remolques (véase Tabla XII).

**TABLA XII**

<b>PARQUE AUTOMOTOR</b>					
<b>En miles de unidades.</b>					
Tipo de vehículo	1990	1992	1994	1996	2000
Automóvil	324	353	389	483	566
<i>Station wagon</i>	44	49	55	74	119
Camioneta	139	163	195	234	263
Ómnibus	21	27	35	43	44
Camión	67	68	71	83	97
Remolcador	5	6	7	10	12
Trailer y semitrailer	6	7	8	10	13
<b>Total</b>	<b>606</b>	<b>673</b>	<b>760</b>	<b>937</b>	<b>1 114</b>

Fuente: Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción.

El parque automotor de Lima-Callao cuenta con aproximadamente 750 mil vehículos, de los cuales 100 mil son taxis, 45 mil son moto taxis y 85 mil son vehículos pesados (buses, camiones y remolcadores), resaltando que el 15% tiene más de 20 años de antigüedad. Los vehículos pesados consumen principalmente combustible diesel con alto contenido de azufre (0,43% masa), los

vehículos particulares gasolina sin plomo y los taxis consumen principalmente gasolina con plomo (0,34 g/litro). El recorrido promedio de los vehículo particulares es de 8 mil kilómetros por año, mientras que los taxis recorren aproximadamente 100 mil kilómetros por año y los buses entre 50 y 80 mil kilómetros por año.

La Tabla XIII, muestra los estimados de las emisiones de PTS, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, COV y plomo del parque automotor de Lima-Callao. En esta tabla se indican las emisiones totales por contaminante y los aportes de las diferentes categorías del parque automotor.

**TABLA XIII: Estimados de las emisiones de PTS, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, COV y plomo del parque automotor de Lima-Callao.**

<b>Categorías</b>	<b>Porcentaje de emisiones</b>					
	<b>PTS</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CO</b>	<b>Plomo</b>	<b>COV</b>
Automóvil y station wagon	5	4	6	13	31	21
Taxis y moto taxis	16	12	21	68	51	46
Pick up, rural y panel	21	19	11	13	16	16
Camiones, buses y remolcadores	58	65	62	6	2	17
Emisiones (toneladas/año)	6,205	11,261	70,501	329,814	203	72,512

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental

Para reducir las emisiones es necesario elaborar un plan de acción con medidas de corto, mediano y largo plazo. Entre las posibles medidas se debería incluir aquéllas relativas a los combustibles, vehículos e infraestructura del transporte. Por ejemplo:

- La eliminación del plomo de la gasolina.
- La implementación de revisiones técnicas.

- El uso de vehículos con convertidores catalíticos para unidades posteriores a 1994.
- La conversión del 50% de los taxis de gasolina a gas natural.
- El retiro de las unidades de transporte público con más de 20 años de antigüedad.
- La reducción del contenido de azufre en el combustible diesel, de 0,43% a 0,2% masa.
- La construcción de corredores viales.
- La disminución de 10% del transporte público.

La Tabla XIV muestra los estimados de las emisiones si cada una de estas medidas fuera implementada.

**TABLA XIV: Porcentaje de reducción de las emisiones de PTS, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, COV y plomo del parque automotor de Lima-Callao, si se toman medidas para reducir las emisiones.**

Medidas	Porcentaje de reducción de las emisiones					
	PTS	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	Plomo	COV
Eliminación del plomo de la gasolina	0	0	0	0	96	0
Implementación de revisiones técnicas	10	0	10	20	0	20
Vehículos con convertidores catalíticos	0	0	5	7	0	4
Conversión de taxis de gasolina a gas	8	6	8	28	26	18
Retiro de unidades antiguas	7	5	13	44	25	22
Reducción del contenido de azufre	0	49	0	0	0	0
Construcción de corredores viales	5	5	-2	10	13	5
Disminución del transporte público	5	5	4	1	1	2

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental

Si todas estas medidas fueran implementadas, las emisiones de PTS y NO<sub>x</sub> se reducirían en 30%, las de SO<sub>2</sub> en un 60%, las de CO se reducirían en casi 70%, las de COV en un 45% y las emisiones de plomo casi se eliminarían por completo.

## **9. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES CETÁNICAS**

### **9.1. NÚMERO DE CETANO EN DIESEL ASTM D-613.**

#### **9.1.1. DEFINICIÓN**

El número de Cetano en el Diesel determina la calidad de ignición de este combustible comparado con combustibles de referencia en un motor estandarizado Waukesha.

La calidad de ignición está dada por el retardo de ignición del combustible y está expresada en grados de rotación del ángulo del cigüeñal. Si el tiempo expresado en grados de avance es pequeño, el número de cetano es bueno y su número va a ser alto, por el contrario, si el tiempo expresado en grados es grande, el número de cetano es bajo y por lo tanto, malo.

***Retardo de ignición = tiempo (expresado en ángulo de cigüeñal) entre el comienzo de la inyección y el comienzo de la combustión.***

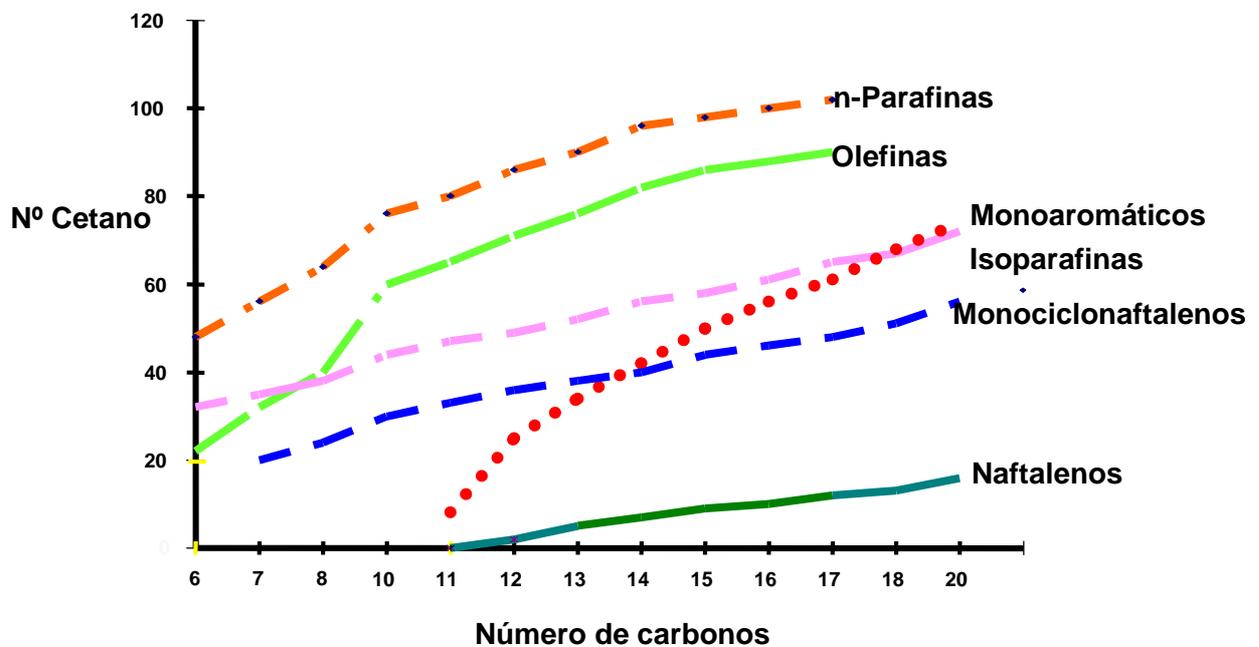
**En la actualidad, hay una tendencia a subir la especificación del número de cetano, para mejorar la combustión en los motores y evitar la contaminación en las grandes ciudades.**

#### **9.1.2. COMPORTAMIENTO DEL COMBUSTIBLE DIESEL CON RESPECTO AL NÚMERO DE CETANO**

**El comportamiento del combustible diesel, con respecto al número de cetano, va a estar dado por su matriz química, es decir por el crudo origen del cual se obtuvo (véase figura 9, página 61) y es así como:**

- Cuando se obtiene diesel de origen parafínico, que son cadenas lineales, el número de cetano va a ser muy alto, valores típicos de 55 ó mayores.

- Cuando se obtiene diesel de origen isoparafínico, que son cadenas lineales con algunas ramificaciones, el número de cetano va a ser bajo, al igual que el diesel de origen olefínico, que son cadenas que presentan dobles enlaces.
- Cuando se obtiene diesel de origen nafténico, que son cadenas cerradas, el número de cetano va a ser medio.
- Cuando se obtiene diesel de origen aromático, que son anillos bencénicos, el número de cetano va a ser muy bajo.



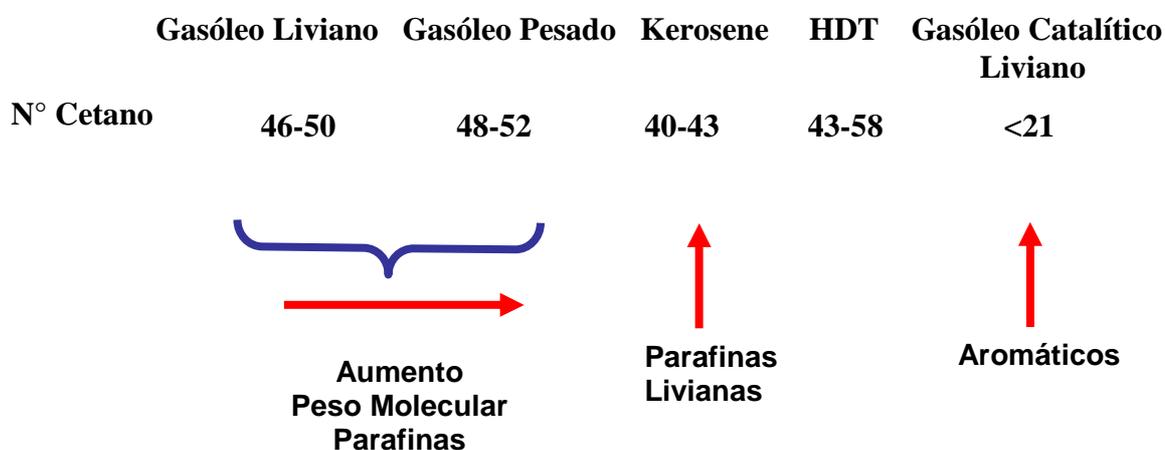
**FIGURA 9: Relación Composición-Nº Cetano**

La matriz del combustible diesel también dependerá del proceso a través del cual se ha obtenido. Los procesos incluyen:

- Destilación Primaria del crudo
- Craqueo Catalítico
- Craqueo Térmico

Es así como el producto proveniente de unidades de Hidrocraqueo y Coquificación, luego de ser hidro-desulfurizados pasan a ser combustibles de alta calidad. Por otro lado, el diesel obtenido en las unidades de Craqueo Catalítico y Craqueo Térmico, como combustible es malo; sin embargo, es adicionado en los tanques de mezcla de destilados medios.

Se considera que un combustible tiene un número de cetano bajo, cuando este valor está entre 38 a 42 y se considera alto sobre 50, alcanzando valores de 58 para diesel de plantas de Hidrocraqueo.



**FIGURA 10: Número de Cetano de Componentes**

### 9.1.3. PROCEDIMIENTO

El motor de prueba para los combustibles diesel no es muy diferente del usado para las gasolinas. Se conoce como la unidad C.F.R., probadora de combustibles Diesel, y es un motor de un cilindro con una cámara de pre-combustión provista de ajustes regulables con micrómetro. Estos ajustes permiten cambiar el tamaño de la cámara. Los cambios de tamaño alteran la relación de compresión, que puede llegar a ser de 14 a 1.

Existen dos señales (luces) en el volante del motor. Una se enciende intermitentemente cuando se inyecta el combustible y sirve para indicar el tiempo de inyección. La otra, cuando el combustible detona dentro del cilindro.

Como en la prueba ASTM para la determinación del número de octano, se determina encontrando dos combustibles de referencia, de número de cetano conocido, de calidad de ignición mayor y menor que la muestra que se ensaya. Los valores de cetano de los combustibles que se usan como referencia no deben diferir en más de 8 unidades.

Un combustible se evalúa operando con el en el motor Diesel C.F.R. de prueba bajo condiciones bien definidas. Con el motor en funcionamiento, se va ajustando micrométricamente la cámara de precombustión hasta que el motor haga explosión precisamente en el punto máximo superior de la carrera. Esto ocurre cuando la luz intermitente indicadora de la combustión se enciende de continuo en esa posición. Esto indica una demora normal de ignición de 13 grados del cigüeñal adoptado para fines de prueba. Lo que el micrómetro marque en ese punto se relaciona con la calidad de ignición del combustible y sirve como base para comparación entre combustibles.

El procedimiento arriba descrito se lleva a cabo tres veces, una vez con la muestra y una vez con cada uno de los dos combustibles de referencia. La lectura micrométrica correspondiente a la muestra debe quedar entre las lecturas correspondientes a los dos combustibles de referencia.

Si esto no ocurre, es necesario repetir la prueba con distintos combustibles de referencia. El número de cetano de la muestra está entre los números de cetano de los dos combustibles de referencia, y su valor exacto se determina por interpolación.



**FIGURA Nº 11: Motor C.F.R. F-5 Waukesha**

#### **9.1.4. LIMITANTES DEL USO DEL MOTOR WAUKESHA ASTM D-613**

- Primero, su costo como equipo analítico. Estamos hablando de US\$ 350 000 a 400 000 aproximado.
- Mantener operando el motor requiere de estándares primarios y secundarios para la normalización del motor; es decir, chequear que el motor cumple con los requisitos mecánicos para certificar.
- El costo de estos estándares es elevado para los países latinos, ya que son productos de importación y como todo estándar, tiene vencimiento.
- Se requiere de personal con experiencia teórica y práctica para manejar y mantener el equipo analizador Waukesha en buen estado de manutención para certificar.

- Al igual que los analizadores de octano Waukesha, este equipo es un instrumento de medición y no basta que el motor gire, sino que tiene que cumplir y aprobar la normalización de norma.
- Requiere además infraestructura adecuada para su funcionamiento y preparación de estándares en buretas y válvulas de acuerdo a norma.
- La repetibilidad y reproducibilidad de la norma ASTM D-613 , para el número de cetano en el motor Waukesha no es buena, por lo complejo del ensayo y es la siguiente:

<i>Número de Cetano</i>	<i>Repetibilidad</i>	<i>Reproducibilidad</i>
48	0,9	3,8
52	0,9	4,3
56	1,0	4,8

## **9.2. INDICE DE CETANO**

### **9.2.1. DEFINICION**

Es un modelo de predicción de número de cetano (ASTM D-613), basado en propiedades del combustible: Destilación y Densidad o °API.

Existen dos métodos:

- ASTM D-976, dos variables, usando el 50% de la destilación ASTM D-86 y la gravedad API, ASTM D-1298.
- ASTM D-4737, cuatro variables, usando el 10%, el 50% y el 90% de la curva de destilación ASTM D-86 y la gravedad API, ASTM D-1298.

**La gravedad API**, es la razón entre el peso de una sustancia y el peso de igual volumen de agua a la misma temperatura. La densidad era la principal y a veces la única especificación de los crudos y destilados y principalmente porque es la unidad de más fácil medida.

La gravedad API es un factor que determina si el petróleo crudo es liviano o es pesado y permite calcular las toneladas de este desembarcadas. Un crudo liviano tiene un API entre 40-50, mientras que uno pesado tiene entre 10-24 API.

Tiene importancia fundamental en el control de la producción y venta de los productos terminados, fletes y pesos transportados, así como en el movimiento de los fluidos y potencia requerida para bombearlos.

Típicamente, el Diesel tiene una densidad relativa entre 0,83 y 0,87 (entre 38,7 el máximo y 35,0 el mínimo °API) esta lectura se hace por método del hidrómetro o con un densímetro digital automático.

**Punto medio de ebullición**, en la destilación ASTM está dada por el 50% de la curva y esta nos da una relación de la volatilidad o facilidad con que se evaporan los destilados.

En el caso particular del diesel, un punto inicial muy alto puede presentar problemas en la partida del motor, así como un punto final muy alto produce problemas de depósito de residuos carbonosos.

### **9.2.2. CORRELACION DE LA NORMA ASTM D-976. INDICE DE CETANO CALCULADO POR DOS VARIABLES**

**El índice de cetano calculado (ICC) por dos variables** es determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{ICC} = -420,34 + 0,016 G^2 + 0,192 G \log M + 65,01 (\log M)^2 - 0,0001809 M^2$$

Donde:

G = es la gravedad API

M = corresponde al 50% de la temperatura del destilado en grados Fahrenheit, determinada por el método ASTM D-86

#### **9.2.2.1. LIMITACIONES DE LA ECUACIÓN**

La ecuación para el índice de cetano calculado posee ciertas limitaciones inherentes que deben ser reconocidas en su aplicación. Estas son:

- No es aplicable a combustibles que contienen aditivos para el incremento del número de cetano.
- No es aplicable para hidrocarburos puros ni combustibles sintéticos
- Podrían ocurrir sustanciales inexactitudes en la correlación si es usado para crudos, residuales, o productos volátiles cuyo punto final esté debajo de los 500 °F (260 °C).

#### **9.2.2.2. PRECISIÓN**

La correlación de los valores de los índices con el número de cetano ASTM es dependiente en una gran extensión en la exactitud de la determinación de la gravedad API y el punto medio de ebullición.

Dentro del rango de número de cetano de 30 a 60, la correlación esperada del índice de cetano calculado con el Número de Cetano de ASTM será un poco menos que, aproximadamente, 2 números de cetano para el 75% de los combustibles destilados evaluados.

Los errores en la correlación podrían ser más grandes para aquellos combustibles en los que su número de cetano está fuera del rango. La correlación es mucho mejor para cortes de destilación primaria de crudo y destilados craqueados

catalíticamente y para mezclas de los dos, y menos satisfactorios para mezclas que contienen proporciones sustanciales de muestras craqueadas térmicamente.

### 9.2.3. CORRELACION DE LA NORMA ASTM D-4737. INDICE DE CETANO CALCULADO POR CUATRO VARIABLES

La determinación de ICC por cuatro variables esta amparado en la norma ASTM D-4737 y su fórmula de cálculo es:

**Para Combustibles > 500 ppm de Azufre**

$$\begin{aligned} \text{ICC} = & 45,2 + (0,0892) (T_{10N}) \\ & + [0,131 + (0,901) (B)] [T_{50N}] \\ & + [0,0523 - (0,420) (B)] [T_{90N}] \\ & + [0,00049] [(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] \\ & + (107) (B) + (60) (B)^2 \end{aligned}$$

**Para Combustibles < 500 ppm de Azufre**

$$\text{ICC} = -386,26(D) + (0,1740) (T_{10N}) + 0,1215(T_{50N}) + 0,01850(T_{90N}) + 297,42$$

Donde :

D = Densidad a 15 °C, por ASTM D-1298

DN = D - 0,85

B =  $[e^{(-3,5)(DN)}] - 1$

T<sub>10</sub> = 10% recuperado en °C

T<sub>10N</sub> = T<sub>10</sub> - 215

T<sub>50</sub> = 50% recuperado en °C

T<sub>50N</sub> = T<sub>50</sub> - 260

T<sub>90</sub> = 90% recuperado en °C

T<sub>90N</sub> = T<sub>90</sub> - 310

### **9.2-3.1. LIMITACIONES DE LA ECUACIÓN**

El índice de cetano calculado por la ecuación de las cuatro variables no es un método opcional para expresar el número de cetano ASTM. Esta es una herramienta suplementaria para estimar el número de cetano cuando un resultado por el Método D 613 no está disponible y si un mejorador de cetano no es usado. Como una herramienta suplementaria, el índice de cetano calculado por la ecuación de cuatro variables debe ser usado con debida consideración por estas limitaciones.

### **9.2.3.2. PRECISIÓN**

Dentro del rango de 32,5 a 56,5 de número de cetano, el error esperado en la predicción del índice de cetano calculado por la ecuación de las cuatro variables deberá ser menor que  $\pm 2$  números de cetano para el 65% de los combustibles destilados evaluados. Los errores pueden ser mayores para combustibles cuyas propiedades caen fuera del rango recomendado de aplicación.

## **9.5. OTRAS TECNOLOGÍAS**

Otras tecnologías que han aparecido en el mercado analítico petrolero son: Analizador PetroSpec GS-1000, que determina el número de cetano haciendo uso de Infrarrojo Medio, el cual requiere del motor Waukesha para ser calibrado, de acuerdo a la matriz del diesel de cada país.

Otro analizador es un equipo analizador portátil, el Zeltex ZX-101XL, que usa la tecnología confiable y altamente precisa del Infrarrojo Cercano para análisis de niveles de octano y cetano en gasolina, gasolina mezclada con etanol (e-gas) y diesel; también requiere del motor Waukesha para ser calibrado. Actualmente, está siendo usado por el OSINERG sólo para análisis de RON a gasolinas de estaciones de servicio y/o grifos fiscalizadas a nivel nacional

## **10. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE LA CALIDAD DEL DIESEL 2 RESPECTO DE SU PROPIEDAD CETANICA. ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2**

Como se mencionó anteriormente, la calidad del combustible está afectada por:

- Los requisitos reglamentarios de diseño y certificación de motores
- La satisfacción del cliente

Dentro de los requisitos reglamentarios de diseño y certificación de motores, el número de cetano es la propiedad del combustible que afecta la economía del combustible, el ruido y las emisiones; asimismo, afecta el comportamiento funcional a baja temperatura en lo que respecta al primer encendido y el desalojo de los humos, y, la durabilidad del motor.

Es por estas razones, que se hace necesario realizar un estudio sobre la variabilidad de la calidad del Diesel 2 producido y/o comercializado en el país, respecto de su propiedad cetánica; ante la falta del motor CFR-F5 (método ASTM D 613) en el país, dado que ninguna refinería lo tiene, se calcula el valor del índice de cetano a partir de las correlaciones indicadas en las normas ASTM D 976 y D 4737 (método de las cuatro variables). En el presente estudio, se hace el cálculo además utilizando la correlación desarrollada por la ETHYL Corporation.

Para la evaluación de la propiedad cetánica de las muestras de Diesel 2 se han tomado datos de especímenes de diferente procedencia (tomando en cuenta la diferencia de los crudos utilizados y los procesos de refinación disponibles en cada centro de producción), disponibles en el mercado peruano, a los que se les determinó la gravedad específica (ASTM D 1298) y destilación (ASTM D 86) durante los años 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003, tratando de establecer una correlación entre el Número de Cetano y los Índices de Cetano calculado. A partir de estos resultados se podrá observar si el Perú está en capacidad de cumplir con los requerimientos de cetano para sus motores, traducido en el estándar propuesto para la región de América Latina y el Caribe de 47 para el Número de Cetano, para el año 2005.

Las correlaciones utilizadas son las siguientes:

### **Correlación de la norma ASTM D 976**

$$\text{Índice de Cetano Calculado} = 454,74 - 1641,416 D + 774,74 D^2 - 0,554 B + 97,803 (\log B)^2$$

donde,

D = Densidad a 15 °C, g/mL, determinado por el Método de Prueba D 1298,

B = Temperatura media de ebullición, °C, determinado por el Método de Prueba D 86 y corregido a la presión barométrica estándar.

### **Correlación de la norma ASTM D 4737**

$$\begin{aligned} \text{CCI} = & 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0,131 + (0,901)(B)][T_{50N}] + [0,0523 - (0,420)(B)][T_{90N}] \\ & + [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2 \end{aligned}$$

donde,

CCI = Índice de Cetano Calculado mediante la ecuación de las cuatro variables,

D = Densidad a 15 °C, g/mL, determinado por el Método de Prueba D 1298,

DN = D - 0,85,

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1,$$

T<sub>10</sub> = Temperatura de 10 % recuperado, °C, determinado por el Método de Prueba D 86 y corregido a la presión barométrica estándar,

$$T_{10N} = T_{10} - 215,$$

T<sub>50</sub> = Temperatura de 50 % recuperado, °C, determinado por el Método de Prueba D 86 y corregido a la presión barométrica estándar,

$$T_{50N} = T_{50} - 260,$$

T<sub>90</sub> = Temperatura de 90 % recuperado, °C, determinado por el Método de Prueba D 86 y corregido a la presión barométrica estándar,

$$T_{90N} = T_{90} - 310.$$

## Correlación de la ETHYL Corporation

$$CN = 5,28 + 0,371(CI) + 0,0112(CI)^2$$

Donde,

CN = Número de Cetano calculado

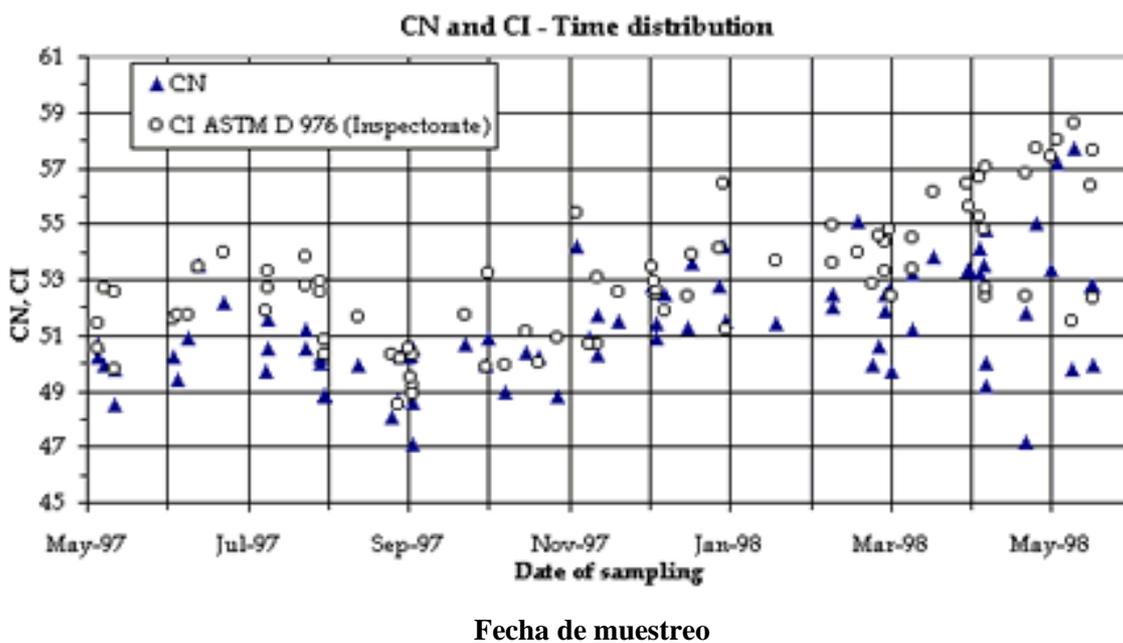
CI = Índice de Cetano calculado mediante la norma ASTM D 976

Cabe mencionar que el presente trabajo se basa en una investigación en relación al número de cetano y el índice de cetano que se hizo en Nueva Zelanda en el periodo del 1º de Mayo del 97 al 1º de Mayo del 98, para el control de calidad de su combustible Diesel en el cual se tomaron 83 muestras de estaciones de servicio seleccionadas de acuerdo con un plan de muestreo y fueron enviadas a ser analizadas en laboratorios calificados. Las muestras fueron recogidas por un contratista usando un método de muestreo basado en los estándares de muestreo especificados por sus regulaciones.

Aunque las regulaciones en Nueva Zelanda antes de hacer el estudio especificaba solamente la norma ASTM D-976 para la determinación del índice de cetano, decidieron realizar el estudio utilizando además la ASTM D-4737 y así determinar cual de los métodos era la más adecuada para su diesel.

La Figura 12 (véase página 73), muestra la variabilidad de la calidad del diesel de Nueva Zelanda luego de ser analizados:

## Número de Cetano e Índice de Cetano – Distribución del Tiempo



**FIGURA 12**

Se observa que el número de cetano es más bajo que el índice de cetano sobre el promedio de todas sus muestras, cumpliendo con sus límites según sus regulaciones de número de cetano (mínimo 45) y de Índice de Cetano ASTM D-976 (mínimo 47).

En la Tabla XV, se muestra el resumen de los resultados de sus análisis y en la Figura 13, se compara el número de cetano con el índice de cetano (véase página 74).

TABLA XV

Numero de Muestras		Número de Cetano	Densidad [g/mL]	% Temperatura Destilación [°C]			Indice de Cetano ASTM D-976	Indice de Cetano ASTM D-4737
				10%	50%	90%		
81	Más bajo	47,1	0,8201		263		48,6	
	Más alto	57,7	0,8584		302		58,6	
	Promedio	51,3	0,8423		283,3		53,0	
79	Más bajo	47,1	0,8201	197	263	319	48,6	48,3
	Más alto	57,7	0,8584	250	302	358	58,6	59,5
	Promedio	51,4	0,8423	226,8	283,1	338,5	53,0	53,7

Indice Cetano vs Número de Cetano (Inspeccionados)

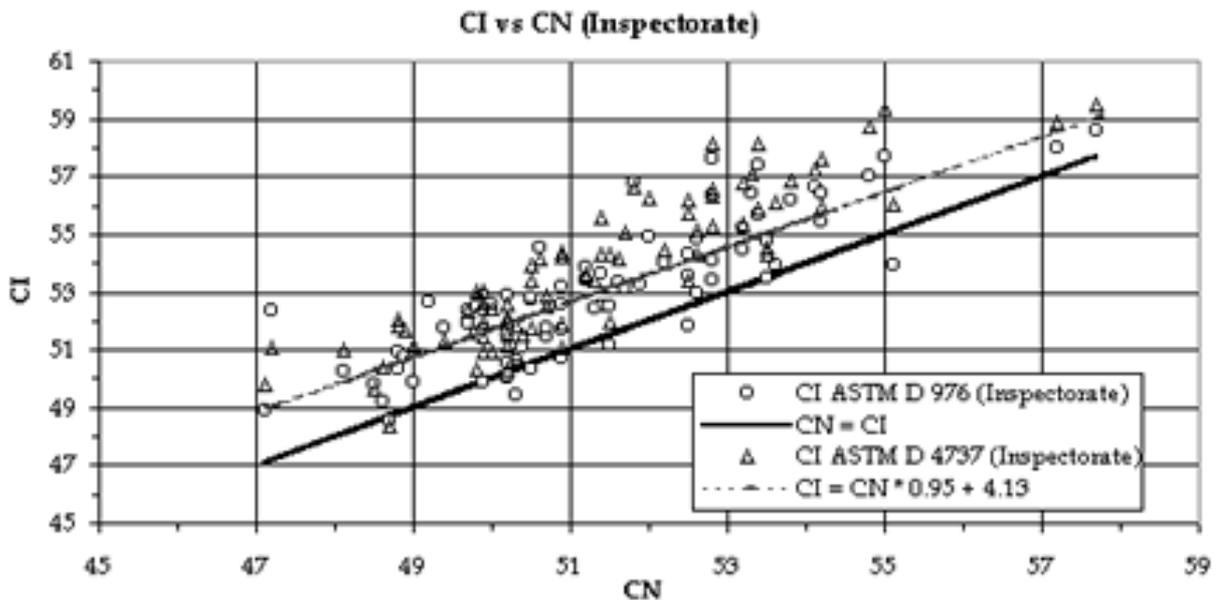


FIGURA 13

Además los resultados principales de este estudio fueron los siguientes:

- El índice de cetano bajo la norma ASTM D-976 era mayor que el número de cetano por 1,5 a 2 unidades, para la mayoría de las muestras analizadas aunque el combustible provenía de una variedad de fuentes.
- La diferencia entre el promedio de los índices de cetano calculado con la norma ASTM D-4737 y el promedio de los números de cetano medidos era mayor que la diferencia entre el promedio de los índices de cetano calculado con la norma ASTM D-976 y el promedio de los números de cetano medidos.
- El método ASTM D-976 tiene sus limitaciones, pero en general dio un ajuste más cercano que ASTM D-4737. Por lo tanto no fue necesario cambiar el método de prueba en sus regulaciones para el índice de cetano según ASTM D-976.
- Del gráfico anterior se observa que la línea punteada proporciona la ecuación que correlaciona el Número de cetano con el índice de cetano, siendo esta:

$$IC_{976} = 0,951922 * NC + 4,12858$$

IC<sub>976</sub>: Índice de Cetano según norma ASTM D-976

NC: Número de Cetano

A continuación se muestran los resultados del análisis de las muestras de Diesel 2 estándar, obtenidos en el Laboratorio de Normalización de Petróleo de la UNI, en la Ciudad de Lima – Perú, desde el año 1999 al 2003:

**TABLA XVI**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 1999**

<b>Muestra</b>	<b>1999-1</b>	<b>1999-2</b>	<b>1999-3</b>	<b>1999-4</b>	<b>1999-5</b>	<b>1999-6</b>	<b>1999-7</b>
Gravedad API	35	33,3	49,1	48,3	34,2	32,1	32,6
Densidad a 15 °C	0,8494	0,8582	0,7832	0,7866	0,8535	0,8645	0,8618
Destilación ASTM, °C							
PI	150	155	156	157	157	160	162
10 % vol	209	208	197	197	197	220	224
50 % vol	292	287	240	243	278	288	293
90 % vol	347	352	300	305	348	350	350
Punto final	379	372	339	349	378	380	380
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>52,2</b>	<b>48,5</b>	<b>65,5</b>	<b>65,0</b>	<b>48,4</b>	<b>46,8</b>	<b>48,4</b>
DN	-0,0006	0,0082	-0,0668	-0,0634	0,0035	0,0145	0,0118
(-3,5)*(DN)	0,0021	-0,0287	0,2338	0,2219	-0,0123	-0,0508	-0,0413
B	0,0021	-0,0283	0,2634	0,2484	-0,0122	-0,0495	-0,0405
T10N	-6	-7	-18	-18	-18	5	9
T50N	32	27	-20	-17	18	28	33
T90N	37	42	-10	-5	38	40	40
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>50,4</b>	<b>46,3</b>	<b>69,3</b>	<b>68,3</b>	<b>46,1</b>	<b>45,1</b>	<b>46,9</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>55,1</b>	<b>49,7</b>	<b>77,7</b>	<b>76,6</b>	<b>49,4</b>	<b>47,1</b>	<b>49,5</b>

TABLA XVI (Continuación)

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 1999

Muestra	1999-8	1999-9	1999-10	1999-11	1999-12	1999-13	1999-14
Gravedad API	32,2	35,5	33,4	33,3	33,6	33,4	33,4
Densidad a 15 °C	0,8639	0,8571	0,8577	0,8582	0,8566	0,8577	0,8577
Destilación ASTM, °C							
PI	170	162	162	163	164	164	164
10 % vol	234	212	237	213	204	214	214
50 % vol	298	292	290	292	288	292	292
90 % vol	355	352	354	353	348	354	354
Punto final	378	380	383	382	378	383	383
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>48,6</b>	<b>49,7</b>	<b>49,2</b>	<b>49,4</b>	<b>49,2</b>	<b>49,5</b>	<b>49,5</b>
DN	0,0139	0,0071	0,0077	0,0082	0,0066	0,0077	0,0077
(-3,5)*(DN)	-0,0487	-0,0249	-0,0270	-0,0287	-0,0231	-0,0270	-0,0270
B	-0,0475	-0,0245	-0,0266	-0,0283	-0,0228	-0,0266	-0,0266
T10N	19	-3	22	-2	-11	-1	-1
T50N	38	32	30	32	28	32	32
T90N	45	42	44	43	38	44	44
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>47,7</b>	<b>47,6</b>	<b>49,7</b>	<b>47,3</b>	<b>46,6</b>	<b>47,6</b>	<b>47,6</b>
<b>CN (Ethyl Corporator</b>	<b>49,7</b>	<b>51,4</b>	<b>50,6</b>	<b>50,9</b>	<b>50,6</b>	<b>51,1</b>	<b>51,1</b>

**FIGURA 14**

**GRAFICO DE VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CETANO SEGÚN NORMA ASTM**

**AÑO 1999**

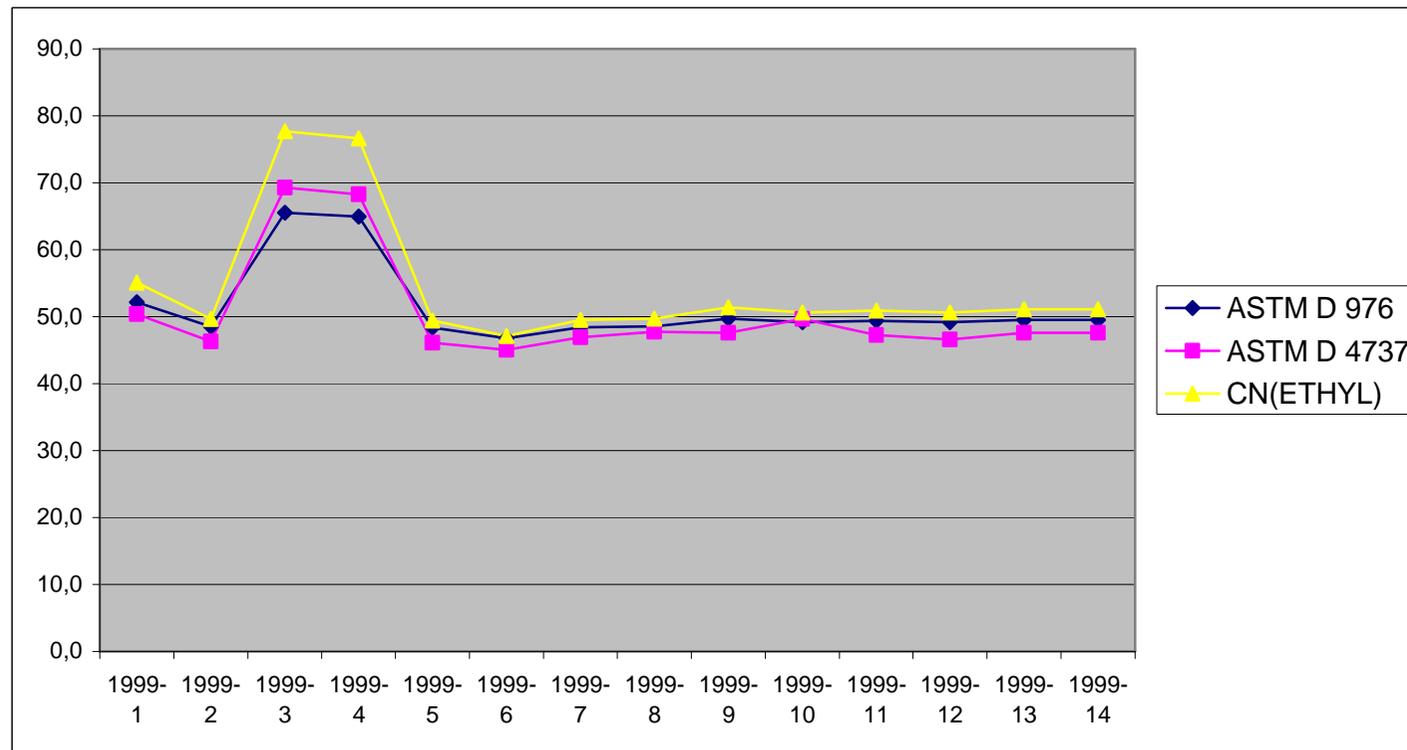


TABLA XVII

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2000

<b>Muestra</b>	<b>2000-1</b>	<b>2000-2</b>	<b>2000-3</b>	<b>2000-4</b>	<b>2000-5</b>	<b>2000-6</b>	<b>2000-7</b>	<b>2000-8</b>
Gravedad API	37,2	36,3	35,1	34,6	32,5	34,6	34,5	32,6
Densidad a 15 °C	0,8383	0,8428	0,8489	0,8515	0,8624	0,8515	0,8520	0,8618
Destilación ASTM, °C								
PI	169	173	170	172	172	157	151	147
10 % vol	197	202	203	206	220	200	211	203
50 % vol	242	249	257	264	294	295	298	300
90 % vol	327	334	338	343	352	353	354	354
Punto final	363	372	371	378	380	383	383	378
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>44,9</b>	<b>45,3</b>	<b>45,3</b>	<b>46,1</b>	<b>48,4</b>	<b>52,0</b>	<b>52,3</b>	<b>49,5</b>
DN	-0,0117	-0,0072	-0,0011	0,0015	0,0124	0,0015	0,0020	0,0118
(-3,5)*(DN)	0,0409	0,0252	0,0038	-0,0053	-0,0434	-0,0053	-0,0070	-0,0413
B	0,0418	0,0255	0,0039	-0,0052	-0,0425	-0,0052	-0,0070	-0,0405
T10N	-18	-13	-12	-9	5	-15	-4	-12
T50N	-18	-11	-3	4	34	35	38	40
T90N	17	24	28	33	42	43	44	44
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>45,7</b>	<b>45,9</b>	<b>45,2</b>	<b>45,6</b>	<b>46,5</b>	<b>49,3</b>	<b>50,3</b>	<b>45,9</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>44,5</b>	<b>45,0</b>	<b>45,0</b>	<b>46,2</b>	<b>49,5</b>	<b>54,8</b>	<b>55,3</b>	<b>51,1</b>

TABLA XVII (Continuación)

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2000

Muestra	2000-9	2000-10	2000-11	2000-12	2000-13	2000-14	2000-15	2000-16
Gravedad API	42,3	32,8	32,9	32,9	33,1	34	33,4	35,5
Densidad a 15 °C	0,8138	0,8608	0,8603	0,8603	0,8592	0,8545	0,8577	0,8469
Destilación ASTM, °C								
PI	162	142	135	162	176	144	125	172
10 % vol	180	206	200	224	225	186	179	208
50 % vol	211	309	311	305	290	300	284	267
90 % vol	254	357	357	363	348	352	352	342
Punto final	275	379	381	384	379	361	384	378
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>43,5</b>	<b>51,1</b>	<b>51,5</b>	<b>50,7</b>	<b>48,7</b>	<b>51,8</b>	<b>48,2</b>	<b>48,2</b>
DN	-0,0362	0,0108	0,0103	0,0103	0,0092	0,0045	0,0077	-0,0031
(-3,5)*(DN)	0,1267	-0,0378	-0,0360	-0,0360	-0,0322	-0,0158	-0,0270	0,0109
B	0,1351	-0,0371	-0,0354	-0,0354	-0,0317	-0,0156	-0,0266	0,0109
T10N	-35	-9	-15	9	10	-29	-36	-7
T50N	-49	49	51	45	30	40	24	7
T90N	-56	47	47	53	38	42	42	32
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>44,6</b>	<b>47,4</b>	<b>47,4</b>	<b>49,0</b>	<b>47,7</b>	<b>47,7</b>	<b>44,2</b>	<b>47,8</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>42,6</b>	<b>53,4</b>	<b>54,0</b>	<b>52,8</b>	<b>49,9</b>	<b>54,5</b>	<b>49,1</b>	<b>49,2</b>

**TABLA XVII (Continuación)**  
**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2000**

<b>Muestra</b>	<b>2000-17</b>	<b>2000-18</b>	<b>2000-19</b>	<b>2000-20</b>	<b>2000-21</b>	<b>2000-22</b>	<b>2000-23</b>
Gravedad API	42,4	39,5	34	37,4	34,4	31,7	34,6
Densidad a 15 °C	0,8133	0,8271	0,8545	0,8374	0,8525	0,8666	0,8515
Destilación ASTM, °C							
PI	155		144	168	178	140	170
10 % vol	175	185	186	208	252	202	211
50 % vol	213	230	300	275	305	306	284
90 % vol	262	296	352	340	357	355	353
Punto final	304		361	376	376	378	381
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>44,5</b>	<b>45,2</b>	<b>51,8</b>	<b>53,1</b>	<b>53,1</b>	<b>48,9</b>	<b>50,1</b>
DN	-0,0367	-0,0229	0,0045	-0,0126	0,0025	0,0166	0,0015
(-3,5)*(DN)	0,1285	0,0802	-0,0158	0,0441	-0,0088	-0,0581	-0,0053
B	0,1371	0,0834	-0,0156	0,0451	-0,0087	-0,0564	-0,0052
T10N	-40	-30	-29	-7	37	-13	-4
T50N	-47	-30	40	15	45	46	24
T90N	-48	-14	42	30	47	45	43
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>45,4</b>	<b>45,8</b>	<b>47,7</b>	<b>52,7</b>	<b>55,3</b>	<b>44,4</b>	<b>48,8</b>
<b>CN (Ethyl Corporator</b>	<b>43,9</b>	<b>45,0</b>	<b>54,5</b>	<b>56,6</b>	<b>56,6</b>	<b>50,2</b>	<b>52,0</b>

**FIGURA 15**  
**GRAFICO DE VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CETANO SEGÚN NORMA ASTM**  
**AÑO 2000**

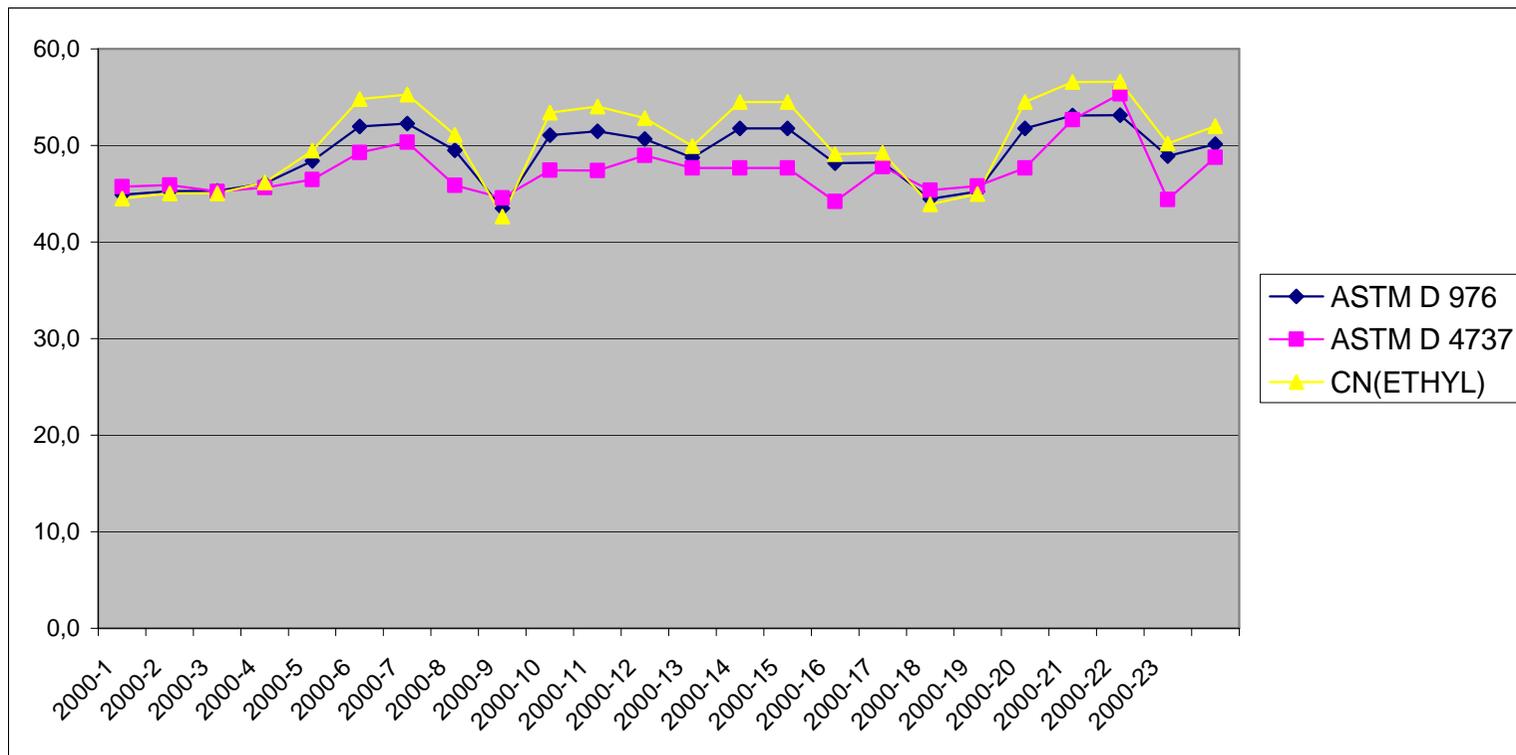


TABLA XVIII

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2001

Muestra	2001-1	2001-2	2001-3	2001-4	2001-5	2001-6	2001-7	2001-8
Gravedad API	33	39,8	34,7	36	36,1	33,1	35,5	33,6
Densidad a 15 °C	0,8597	0,8256	0,8509	0,8443	0,8438	0,8592	0,8469	0,8566
Destilación ASTM, °C								
PI	172	164	171	163	177	144	169	156
10 % vol	215	190	206	202	204	210	212	218
50 % vol	280	238	271	283	257	308	292	308
90 % vol	344	329	339	350	328	356	356	354
Punto final	372	367	373	375	366	379	384	385
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>46,8</b>	<b>48,2</b>	<b>47,8</b>	<b>52,3</b>	<b>47,0</b>	<b>51,4</b>	<b>53,0</b>	<b>52,2</b>
DN	0,0097	-0,0244	0,0009	-0,0057	-0,0062	0,0092	-0,0031	0,0066
(-3,5)*(DN)	-0,0340	0,0854	-0,0032	0,0199	0,0217	-0,0322	0,0109	-0,0231
B	-0,0334	0,0892	-0,0031	0,0202	0,0219	-0,0317	0,0109	-0,0228
T10N	0	-25	-9	-13	-11	-5	-3	3
T50N	20	-22	11	23	-3	48	32	48
T90N	34	19	29	40	18	46	46	44
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>45,4</b>	<b>48,7</b>	<b>46,7</b>	<b>50,7</b>	<b>46,8</b>	<b>48,3</b>	<b>51,8</b>	<b>50,1</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>47,2</b>	<b>49,2</b>	<b>48,6</b>	<b>55,3</b>	<b>47,4</b>	<b>54,0</b>	<b>56,4</b>	<b>55,2</b>

**TABLA XVIII (Continuación)**  
**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2001**

<b>Muestra</b>	<b>2001-9</b>	<b>2001-10</b>	<b>2001-11</b>	<b>2001-12</b>	<b>2001-13</b>	<b>2001-14</b>	<b>2001-15</b>	<b>2001-16</b>
Gravedad API	38,3	30,3	36,1	33,5	34,5	36,6	36,1	31,5
Densidad a 15 °C	0,8328	0,8741	0,8438	0,8469	0,8520	0,8413	0,8438	0,8676
Destilación ASTM, °C								
PI	147	199	176	160	163	166	173	150
10 % vol	174	250	226	221	199	199	222	226
50 % vol	226	301	295	297	268	259	285	301
90 % vol	295	348	354	356	332	301	338	348
Punto final	324	377	376	380	358	329	353	372
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>41,9</b>	<b>46,0</b>	<b>54,5</b>	<b>53,8</b>	<b>46,8</b>	<b>48,3</b>	<b>52,8</b>	<b>47,9</b>
DN	-0,0172	0,0241	-0,0062	-0,0031	0,0020	-0,0087	-0,0062	0,0176
(-3,5)*(DN)	0,0602	-0,0844	0,0217	0,0109	-0,0070	0,0304	0,0217	-0,0616
B	0,0620	-0,0809	0,0219	0,0109	-0,0070	0,0309	0,0219	-0,0597
T10N	-41	35	11	6	-16	-16	7	11
T50N	-34	41	35	37	8	-1	25	41
T90N	-15	38	44	46	22	-9	28	38
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>42,4</b>	<b>45,6</b>	<b>54,8</b>	<b>53,3</b>	<b>45,1</b>	<b>46,7</b>	<b>52,8</b>	<b>45,5</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>40,5</b>	<b>46,0</b>	<b>58,8</b>	<b>57,6</b>	<b>47,2</b>	<b>49,3</b>	<b>56,1</b>	<b>48,7</b>

**TABLA XVIII (Continuación)**  
**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2001**

<b>Muestra</b>	<b>2001-17</b>	<b>2001-18</b>	<b>2001-19</b>	<b>2001-20</b>	<b>2001-21</b>	<b>2001-22</b>	<b>2001-23</b>	<b>2001-24</b>
Gravedad API	33,2	31,3	35,4	35,5	36,9	34,2	33,5	33,4
Densidad a 15 °C	0,8587	0,8687	0,8474	0,8469	0,8398	0,8535	0,8571	0,8577
Destilación ASTM, °C								
PI	170	144	167	160	156	165	152	168
10 % vol	203	197	200	192	190	202	198	212
50 % vol	290	299	262	260	253	279	311	290
90 % vol	337	349	322	325	324	345	355	351
Punto final	355	364	350	353	359	368	377	372
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>48,9</b>	<b>47,3</b>	<b>47,0</b>	<b>46,7</b>	<b>47,3</b>	<b>48,6</b>	<b>52,5</b>	<b>49,2</b>
DN	0,0087	0,0187	-0,0026	-0,0031	-0,0102	0,0035	0,0071	0,0077
(-3,5)*(DN)	-0,0305	-0,0655	0,0091	0,0109	0,0357	-0,0123	-0,0249	-0,0270
B	-0,0300	-0,0634	0,0091	0,0109	0,0363	-0,0122	-0,0245	-0,0266
T10N	-12	-18	-15	-23	-25	-13	-17	-3
T50N	30	39	2	0	-7	19	51	30
T90N	27	39	12	15	14	35	45	41
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>45,6</b>	<b>42,4</b>	<b>45,7</b>	<b>45,2</b>	<b>46,5</b>	<b>46,5</b>	<b>48,6</b>	<b>47,1</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>50,2</b>	<b>47,9</b>	<b>47,4</b>	<b>47,0</b>	<b>47,9</b>	<b>49,7</b>	<b>55,6</b>	<b>50,6</b>

**TABLA XVIII (Continuación)**  
**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2001**

<b>Muestra</b>	<b>2001-25</b>	<b>2001-26</b>	<b>2001-27</b>	<b>2001-28</b>	<b>2001-29</b>	<b>2001-30</b>	<b>2001-31</b>	<b>2001-32</b>
Gravedad API	31,7	32,4	33,5	35,3	34,1	34,3	35,7	34,2
Densidad a 15 °C	0,8666	0,8629	0,8571	0,8479	0,8540	0,8530	0,8459	0,8535
Destilación ASTM, °C								
PI	198	164	168	160	154	167	177	149
10 % vol	244	195	213	196	197	205	218	205
50 % vol	299	273	292	262	283	273	283	298
90 % vol	338	348	341	326	342	332	348	352
Punto final	360	372	369	352	365	352	382	376
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>47,9</b>	<b>44,4</b>	<b>49,7</b>	<b>46,8</b>	<b>49,1</b>	<b>47,5</b>	<b>51,8</b>	<b>51,8</b>
DN	0,0166	0,0129	0,0071	-0,0021	0,0040	0,0030	-0,0041	0,0035
(-3,5)*(DN)	-0,0581	-0,0452	-0,0249	0,0073	-0,0140	-0,0105	0,0144	-0,0123
B	-0,0564	-0,0441	-0,0245	0,0074	-0,0139	-0,0104	0,0145	-0,0122
T10N	29	-20	-2	-19	-18	-10	3	-10
T50N	39	13	32	2	23	13	23	38
T90N	28	38	31	16	32	22	38	42
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>47,2</b>	<b>42,2</b>	<b>47,4</b>	<b>45,4</b>	<b>46,4</b>	<b>45,8</b>	<b>51,4</b>	<b>49,2</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>48,7</b>	<b>43,9</b>	<b>51,4</b>	<b>47,2</b>	<b>50,6</b>	<b>48,2</b>	<b>54,5</b>	<b>54,5</b>

**TABLA XVIII (Continuación)**  
**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2001**

<b>Muestra</b>	<b>2001-33</b>	<b>2001-34</b>	<b>2001-35</b>	<b>2001-36</b>	<b>2001-37</b>	<b>2001-38</b>	<b>2001-39</b>
Gravedad API	31,5	38,4	33,5	32,9	37,8	30,1	32,2
Densidad a 15 °C	0,8676	0,8324	0,8571	0,8603	0,8354	0,8752	0,8639
Destilación ASTM, °C							
PI	139	147	167	155	202	143	169
10 % vol	189	174	207	211	278	205	216
50 % vol	306	226	288	301	351	302	292
90 % vol	352	295	350	353	380	353	338
Punto final	372	324	370	363	384	376	359
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>48,6</b>	<b>42,0</b>	<b>49,0</b>	<b>50,1</b>	<b>63,4</b>	<b>45,8</b>	<b>47,6</b>
DN	0,0176	-0,0176	0,0071	0,0103	-0,0146	0,0252	0,0139
(-3,5)*(DN)	-0,0616	0,0616	-0,0249	-0,0360	0,0511	-0,0882	-0,0487
B	-0,0597	0,0635	-0,0245	-0,0354	0,0524	-0,0844	-0,0475
T10N	-26	-41	-8	-4	63	-10	1
T50N	46	-34	28	41	91	42	32
T90N	42	-15	40	43	70	43	28
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>43,0</b>	<b>42,5</b>	<b>46,7</b>	<b>47,2</b>	<b>74,5</b>	<b>40,9</b>	<b>44,8</b>
<b>CN (Ethyl Corporator</b>	<b>49,8</b>	<b>40,7</b>	<b>50,4</b>	<b>52,0</b>	<b>73,7</b>	<b>45,8</b>	<b>48,3</b>

**FIGURA 16**  
**GRAFICO DE VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CETANO SEGÚN NORMA ASTM**  
**AÑO 2001**

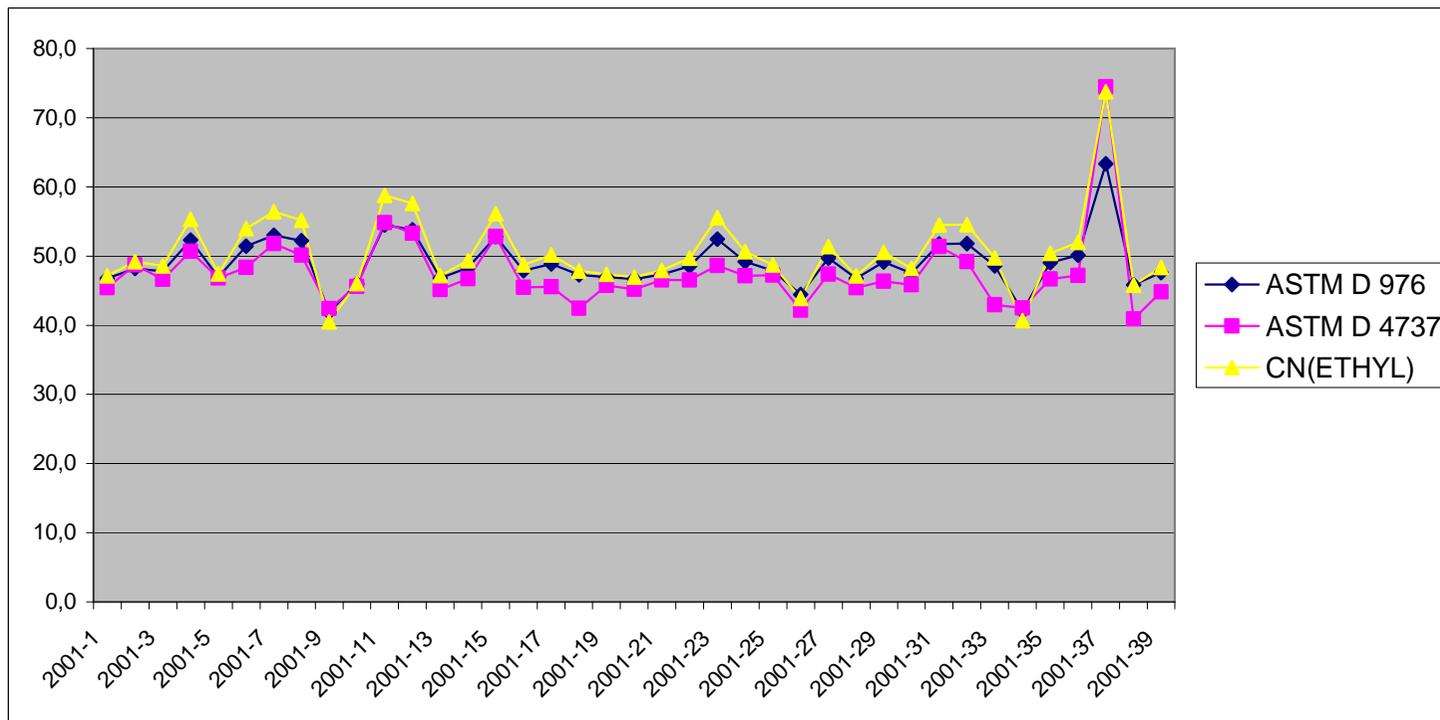


TABLA XIX

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2002

Muestra	2002-1	2002-2	2002-3	2002-4	2002-5	2002-6	2002-7	2002-8	2002-9
Gravedad API	34,4	37,2	36,2	36,3	36,2	38,6	35,2	34,9	36
Densidad a 15 °C	0,8525	0,8383	0,8433	0,8428	0,8433	0,8315	0,8484	0,8499	0,8443
Destilación ASTM, °C									
PI	164	154	144	187	148	152	168	150	157
10 % vol	208	184	180	233	179	186	206	186	191
50 % vol	292	244	255	291	265	237	282	284	259
90 % vol	347	322	332	339	340	306	335	350	329
Punto final	372	342	366	359	369	347	359	374	355
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>51,2</b>	<b>45,5</b>	<b>46,6</b>	<b>54,2</b>	<b>49,0</b>	<b>45,8</b>	<b>50,8</b>	<b>50,6</b>	<b>47,3</b>
DN	0,0025	-0,0117	-0,0067	-0,0072	-0,0067	-0,0185	-0,0016	-0,0001	-0,0057
(-3,5)*(DN)	-0,0088	0,0409	0,0234	0,0252	0,0234	0,0647	0,0056	0,0003	0,0199
B	-0,0087	0,0418	0,0237	0,0255	0,0237	0,0669	0,0056	0,0004	0,0202
T10N	-7	-31	-35	18	-36	-29	-9	-29	-24
T50N	32	-16	-5	31	5	-23	22	24	-1
T90N	37	12	22	29	30	-4	25	40	19
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>49,0</b>	<b>45,1</b>	<b>45,2</b>	<b>55,3</b>	<b>46,8</b>	<b>45,9</b>	<b>49,0</b>	<b>47,5</b>	<b>46,0</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>53,6</b>	<b>45,3</b>	<b>47,0</b>	<b>58,3</b>	<b>50,3</b>	<b>45,8</b>	<b>53,0</b>	<b>52,8</b>	<b>47,9</b>

**TABLA XIX (Continuación)**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2002**

<b>Muestra</b>	<b>2002-10</b>	<b>2002-11</b>	<b>2002-12</b>	<b>2002-13</b>	<b>2002-14</b>	<b>2002-15</b>	<b>2002-16</b>	<b>2002-17</b>	<b>2002-18</b>
Gravedad API	36,2	37,4	35	35,6	36	38	34,1	37,6	32,1
Densidad a 15 °C	0,8433	0,8374	0,8494	0,8464	0,8443	0,8344	0,8540	0,8364	0,8645
Destilación ASTM, °C									
PI	166	160	171	167	180	155	172	158	135
10 % vol	198	193	203	201	202	186	217	191	219
50 % vol	262	251	273	268	258	277	287	245	304
90 % vol	324	312	337	336	328	348	344	316	351
Punto final	351	342	368	366	359	372	370	342	367
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>48,3</b>	<b>47,6</b>	<b>48,7</b>	<b>48,6</b>	<b>47,0</b>	<b>54,5</b>	<b>49,8</b>	<b>46,4</b>	<b>49,3</b>
DN	-0,0067	-0,0126	-0,0006	-0,0036	-0,0057	-0,0156	0,0040	-0,0136	0,0145
(-3,5)*(DN)	0,0234	0,0441	0,0021	0,0126	0,0199	0,0546	-0,0140	0,0476	-0,0508
B	0,0237	0,0451	0,0021	0,0127	0,0202	0,0561	-0,0139	0,0488	-0,0495
T10N	-17	-22	-12	-14	-13	-29	2	-24	4
T50N	2	-9	13	8	-2	17	27	-15	44
T90N	14	2	27	26	18	38	34	6	41
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>47,2</b>	<b>46,9</b>	<b>47,2</b>	<b>47,4</b>	<b>46,6</b>	<b>52,7</b>	<b>48,5</b>	<b>46,2</b>	<b>46,4</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>49,4</b>	<b>48,4</b>	<b>49,9</b>	<b>49,8</b>	<b>47,5</b>	<b>58,8</b>	<b>51,6</b>	<b>46,6</b>	<b>50,7</b>

TABLA XIX (Continuación)

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2002

Muestra	2002-19	2002-20	2002-21	2002-22	2002-23	2002-24	2002-25	2002-26	2002-27
Gravedad API	32	32	35,4	33,2	39	37,9	38,5	37,4	35,5
Densidad a 15 °C	0,8650	0,8650	0,8474	0,8587	0,8295	0,8349	0,8319	0,8374	0,8469
Destilación ASTM, °C									
PI	137	136	152	182	155	164	153	153	161
10 % vol	233	218	251	223	187	195	181	182	195
50 % vol	310	309	305	290	234	253	235	233	272
90 % vol	356	355	356	341	323	338	336	333	337
Punto final	378	375	378	357	362	367	367	365	366
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>49,9</b>	<b>49,8</b>	<b>54,8</b>	<b>48,9</b>	<b>45,6</b>	<b>49,0</b>	<b>45,1</b>	<b>42,5</b>	<b>49,3</b>
DN	0,0150	0,0150	-0,0026	0,0087	-0,0205	-0,0151	-0,0181	-0,0126	-0,0031
(-3,5)*(DN)	-0,0525	-0,0525	0,0091	-0,0305	0,0717	0,0529	0,0634	0,0441	0,0109
B	-0,0511	-0,0511	0,0091	-0,0300	0,0744	0,0543	0,0654	0,0451	0,0109
T10N	18	3	36	8	-28	-20	-34	-33	-20
T50N	50	49	45	30	-26	-7	-25	-27	12
T90N	46	45	46	31	13	28	26	23	27
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>48,3</b>	<b>46,6</b>	<b>57,5</b>	<b>47,5</b>	<b>46,4</b>	<b>48,8</b>	<b>45,6</b>	<b>43,6</b>	<b>47,4</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>51,7</b>	<b>51,5</b>	<b>59,2</b>	<b>50,2</b>	<b>45,5</b>	<b>50,4</b>	<b>44,7</b>	<b>41,3</b>	<b>50,8</b>

**TABLA XIX (Continuación)**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2002**

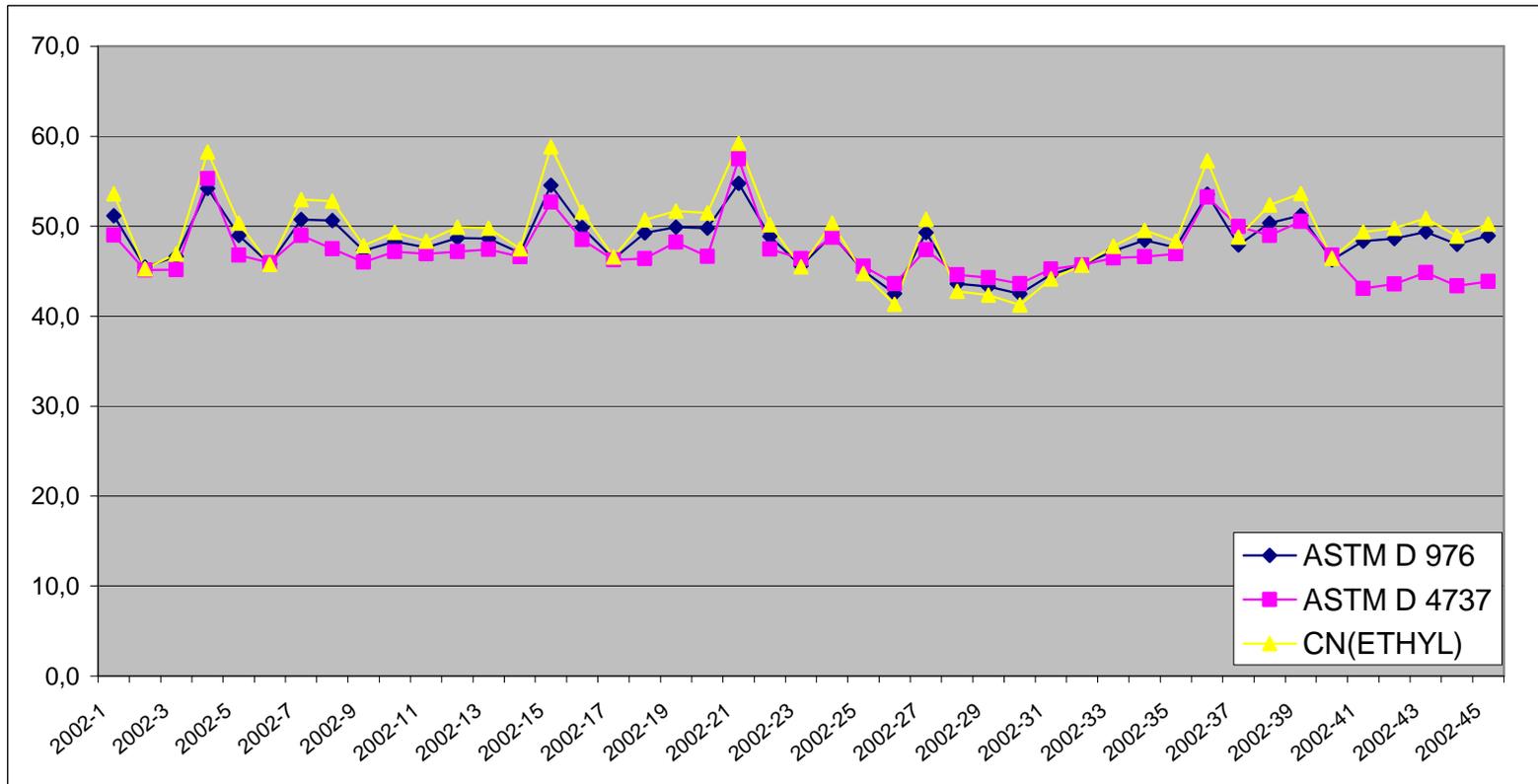
<b>Muestra</b>	<b>2002-28</b>	<b>2002-29</b>	<b>2002-30</b>	<b>2002-31</b>	<b>2002-32</b>	<b>2002-33</b>	<b>2002-34</b>	<b>2002-35</b>	<b>2002-36</b>
Gravedad API	39,7	40,3	41,3	38,8	37,7	37	35,5	37,4	34,5
Densidad a 15 °C	0,8261	0,8232	0,8185	0,8305	0,8359	0,8393	0,8469	0,8374	0,8520
Destilación ASTM, °C									
PI	158	160	159	159	161	162	165	160	133
10 % vol	182	182	181	184	187	189	194	193	230
50 % vol	224	220	213	232	242	252	268	251	307
90 % vol	292	279	262	307	319	324	331	312	354
Punto final	338	327	290	350	353	356	357	342	369
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>43,6</b>	<b>43,3</b>	<b>42,5</b>	<b>44,6</b>	<b>45,7</b>	<b>47,2</b>	<b>48,5</b>	<b>47,6</b>	<b>53,6</b>
DN	-0,0239	-0,0268	-0,0315	-0,0195	-0,0141	-0,0107	-0,0031	-0,0126	0,0020
(-3,5)*(DN)	0,0837	0,0938	0,1103	0,0682	0,0494	0,0374	0,0109	0,0441	-0,0070
B	0,0872	0,0983	0,1166	0,0706	0,0506	0,0382	0,0109	0,0451	-0,0070
T10N	-33	-33	-34	-31	-28	-26	-21	-22	15
T50N	-36	-40	-47	-28	-18	-8	8	-9	47
T90N	-18	-31	-48	-3	9	14	21	2	44
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>44,6</b>	<b>44,3</b>	<b>43,6</b>	<b>45,2</b>	<b>45,7</b>	<b>46,5</b>	<b>46,6</b>	<b>46,9</b>	<b>53,2</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>42,8</b>	<b>42,3</b>	<b>41,3</b>	<b>44,2</b>	<b>45,7</b>	<b>47,8</b>	<b>49,6</b>	<b>48,4</b>	<b>57,3</b>

**TABLA XIX (Continuación)**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2002**

<b>Muestra</b>	<b>2002-37</b>	<b>2002-38</b>	<b>2002-39</b>	<b>2002-40</b>	<b>2002-41</b>	<b>2002-42</b>	<b>2002-43</b>	<b>2002-44</b>	<b>2002-45</b>
Gravedad API	32,2	34	35,7	38,7	31,6	31,7	32,7	31,4	31,8
Densidad a 15 °C	0,8639	0,8545	0,8459	0,8310	0,8671	0,8666	0,8613	0,8682	0,8660
Destilación ASTM, °C									
PI	190	177	181	162	143	145	144	146	146
10 % vol	260	218	215	188	190	193	190	200	193
50 % vol	294	291	280	238	303	304	298	303	305
90 % vol	340	348	337	328	355	355	351	355	354
Punto final	360	373	361	362	377	377	375	370	374
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>47,9</b>	<b>50,4</b>	<b>51,2</b>	<b>46,3</b>	<b>48,3</b>	<b>48,6</b>	<b>49,4</b>	<b>48,0</b>	<b>48,9</b>
DN	0,0139	0,0045	-0,0041	-0,0190	0,0171	0,0166	0,0113	0,0182	0,0160
(-3,5)*(DN)	-0,0487	-0,0158	0,0144	0,0665	-0,0599	-0,0581	-0,0395	-0,0637	-0,0560
B	-0,0475	-0,0156	0,0145	0,0688	-0,0581	-0,0564	-0,0388	-0,0617	-0,0545
T10N	45	3	0	-27	-25	-22	-25	-15	-22
T50N	34	31	20	-22	43	44	38	43	45
T90N	30	38	27	18	45	45	41	45	44
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>50,0</b>	<b>49,0</b>	<b>50,5</b>	<b>46,8</b>	<b>43,1</b>	<b>43,6</b>	<b>44,9</b>	<b>43,4</b>	<b>43,9</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>48,8</b>	<b>52,4</b>	<b>53,7</b>	<b>46,4</b>	<b>49,4</b>	<b>49,8</b>	<b>50,9</b>	<b>48,9</b>	<b>50,3</b>

**FIGURA 17**  
**GRAFICO DE VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CETANO SEGÚN NORMA ASTM**  
**AÑO 2002**



**TABLA XX**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2003**

<b>Muestra</b>	<b>2003-1</b>	<b>2003-2</b>	<b>2003-3</b>	<b>2003-4</b>	<b>2003-5</b>	<b>2003-6</b>	<b>2003-7</b>	<b>2003-8</b>
Gravedad API	35,8	39,6	38,4	37,5	36,9	32,4	29,2	39,2
Densidad a 15 °C	0,8454	0,8266	0,8324	0,8369	0,8398	0,8629	0,8801	0,8285
Destilación ASTM, °C								
PI	154	149	149	157	166	150	154	161
10 % vol	181	175	176	180	195	209	196	185
50 % vol	246	217	225	227	254	300	298	234
90 % vol	340	325	334	334	328	353	352	326
Punto final	370	359	362	364	362	376	378	357
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>43,6</b>	<b>41,0</b>	<b>41,7</b>	<b>40,8</b>	<b>47,6</b>	<b>49,2</b>	<b>43,9</b>	<b>46,0</b>
DN	-0,0046	-0,0234	-0,0176	-0,0131	-0,0102	0,0129	0,0301	-0,0215
(-3,5)*(DN)	0,0161	0,0819	0,0616	0,0459	0,0357	-0,0452	-0,1054	0,0752
B	0,0162	0,0853	0,0635	0,0469	0,0363	-0,0441	-0,1000	0,0782
T10N	-34	-40	-39	-35	-20	-6	-19	-30
T50N	-14	-43	-35	-33	-6	40	38	-26
T90N	30	15	24	24	18	43	42	16
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>43,4</b>	<b>43,2</b>	<b>43,3</b>	<b>42,6</b>	<b>47,1</b>	<b>45,9</b>	<b>38,2</b>	<b>46,6</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>42,8</b>	<b>39,3</b>	<b>40,2</b>	<b>39,1</b>	<b>48,3</b>	<b>50,6</b>	<b>43,1</b>	<b>46,0</b>

TABLA XX (Continuación)

ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2003

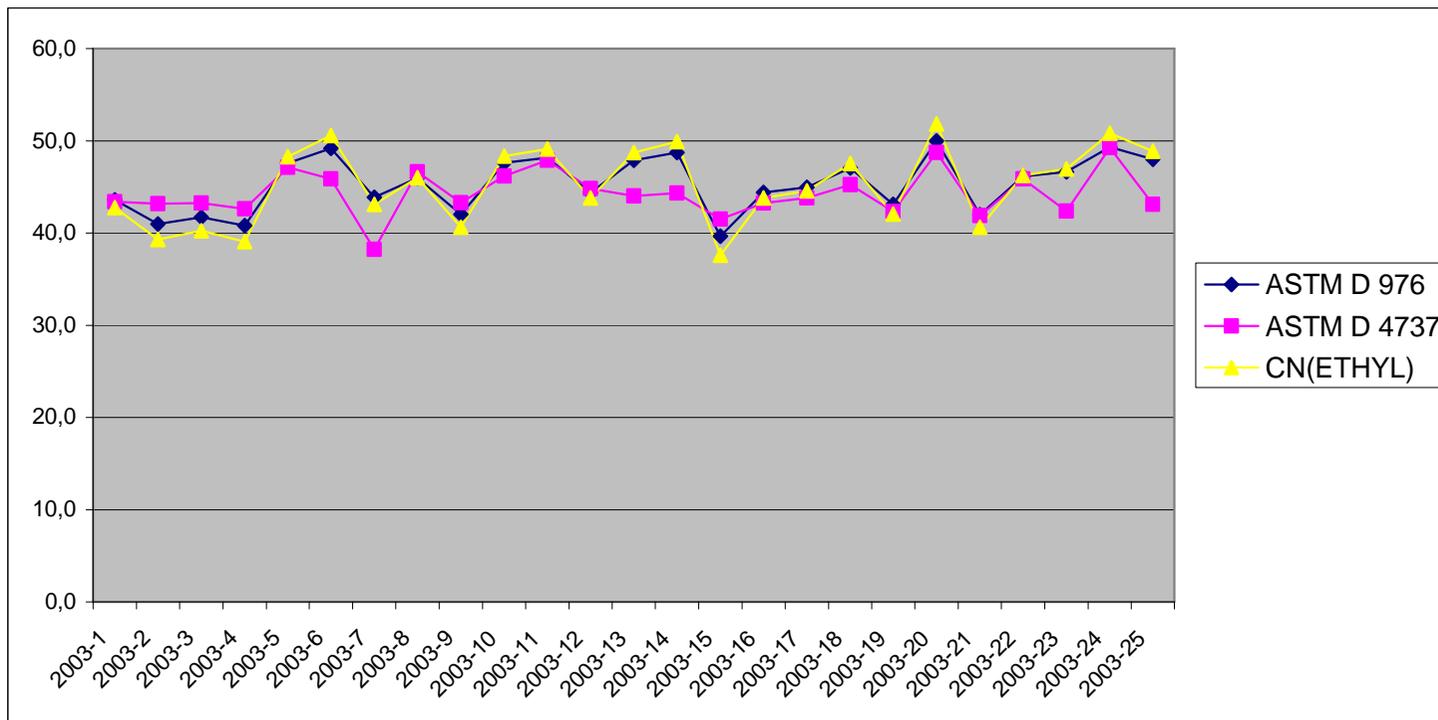
Muestra	2003-9	2003-10	2003-11	2003-12	2003-13	2003-14	2003-15	2003-16
Gravedad API	43,7	34,1	33,4	36,9	32,8	32,2	38,2	35
Densidad a 15 °C	0,8073	0,8540	0,8577	0,8398	0,8608	0,8639	0,8334	0,8494
Destilación ASTM, °C								
PI	155	169	194	167	149	148	151	153
10 % vol	174	206	230	190	189	195	172	179
50 % vol	201	275	284	242	288	299	220	254
90 % vol	235	345	340	329	351	354	311	344
Punto final	267	373	366	350	373	378	358	372
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>42,0</b>	<b>47,6</b>	<b>48,2</b>	<b>44,4</b>	<b>47,9</b>	<b>48,7</b>	<b>39,6</b>	<b>44,4</b>
DN	-0,0427	0,0040	0,0077	-0,0102	0,0108	0,0139	-0,0166	-0,0006
(-3,5)*(DN)	0,1495	-0,0140	-0,0270	0,0357	-0,0378	-0,0487	0,0581	0,0021
B	0,1612	-0,0139	-0,0266	0,0363	-0,0371	-0,0475	0,0598	0,0021
T10N	-41	-9	15	-25	-26	-20	-43	-36
T50N	-59	15	24	-18	28	39	-40	-6
T90N	-75	35	30	19	41	44	1	34
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>43,3</b>	<b>46,2</b>	<b>47,9</b>	<b>44,8</b>	<b>44,0</b>	<b>44,3</b>	<b>41,5</b>	<b>43,2</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>40,6</b>	<b>48,3</b>	<b>49,1</b>	<b>43,8</b>	<b>48,7</b>	<b>49,9</b>	<b>37,6</b>	<b>43,8</b>

**TABLA XX (Continuación)**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE DIESEL 2 EN EL AÑO 2003**

<b>Muestra</b>	<b>2003-17</b>	<b>2003-18</b>	<b>2003-19</b>	<b>2003-20</b>	<b>2003-21</b>	<b>2003-22</b>	<b>2003-23</b>	<b>2003-24</b>	<b>2003-25</b>
Gravedad API	35,5	35,6	35	34,3	35,5	36,5	30,7	36,4	31,2
Densidad a 15 °C	0,8469	0,8464	0,8494	0,8530	0,8469	0,8418	0,8719	0,8423	0,8692
Destilación ASTM, °C									
PI	151	149	146	175	150	163	153	174	138
10 % vol	179	182	178	216	176	194	207	212	200
50 % vol	253	261	249	286	242	251	301	265	305
90 % vol	341	338	336	345	331	329	356	328	355
Punto final	370	368	369	358	361	366	378	366	377
<b>CI (ASTM D 976)</b>	<b>44,9</b>	<b>47,1</b>	<b>43,1</b>	<b>50,0</b>	<b>42,0</b>	<b>46,1</b>	<b>46,6</b>	<b>49,3</b>	<b>48,0</b>
DN	-0,0031	-0,0036	-0,0006	0,0030	-0,0031	-0,0082	0,0219	-0,0077	0,0192
(-3,5)*(DN)	0,0109	0,0126	0,0021	-0,0105	0,0109	0,0287	-0,0767	0,0269	-0,0672
B	0,0109	0,0127	0,0021	-0,0104	0,0109	0,0291	-0,0738	0,0273	-0,0650
T10N	-36	-33	-37	1	-39	-21	-8	-3	-15
T50N	-7	1	-11	26	-18	-9	41	5	45
T90N	31	28	26	35	21	19	46	18	45
<b>CI (ASTM D 4737)</b>	<b>43,8</b>	<b>45,2</b>	<b>42,3</b>	<b>48,7</b>	<b>41,9</b>	<b>45,9</b>	<b>42,4</b>	<b>49,3</b>	<b>43,1</b>
<b>CN (Ethyl Corporation)</b>	<b>44,6</b>	<b>47,5</b>	<b>42,1</b>	<b>51,8</b>	<b>40,6</b>	<b>46,2</b>	<b>46,9</b>	<b>50,8</b>	<b>48,9</b>

**FIGURA 18**  
**GRAFICO DE VARIABILIDAD DE LOS INDICES DE CETANO SEGÚN NORMA ASTM**  
**AÑO 2003**



## **11. INTERPRETACION DE RESULTADOS DE ANALISIS**

### **11.1 ESTUDIO DE LAS CORRELACIONES Y EVALUACION DE RESULTADOS –GRAFICOS**

Las Tablas XVI, XVII, XVIII, XIX y XX, presentan resultados de los años 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003, de muestras analizadas en el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados, perteneciente a la Facultad de Petróleo de la Universidad Nacional de Ingeniería.

En el año 1999, se ha tomado una muestra de 14 especímenes analizados; para el año 2000, se ha tomado una muestra de 23; para el 2001, se ha considerado una muestra de 39; para el 2002, 45 y para el 2003, 25. La diferencia en el número de muestras consideradas para ser analizadas en cada año se debe a que no a todas las muestras que llegan al laboratorio se les determina las propiedades necesarias para el cálculo del índice de cetano, sólo a éstas cantidades se les pudo determinar sus propiedades cetánicas.

Como en el cálculo de las propiedades cetánicas, se hace uso de las propiedades de volatilidad, tales como la gravedad API y las temperaturas de destilación: T10, T50 y T90, el análisis se realizará en base a estos valores.

**Año 1999.** Se observa lo siguiente:

- 1.- Se observa una relación bastante ajustada entre los valores calculados por las tres correlaciones, presentando valores superiores con la correspondiente ecuación de número de cetano de la Cía ETHYL. Los valores determinados por la ecuación de las cuatro variables se encuentran por debajo de los obtenidos por la norma ASTM D 976 y los del número de cetano calculado por la ETHYL.
- 2.- De los 14 especímenes, se encuentra que sólo un espécimen presenta un valor mínimo del índice de cetano calculado mediante la norma ASTM D 976 de 46,8; dos resultados superan el valor de 60, y el resto se encuentra

en el intervalo de 49 a 52, asegurando una adecuada propiedad cetánica del diesel 2 comercializado en nuestro medio, durante el año 1999.

3.- Analizando las propiedades de volatilidad de las muestras cuyo índice de cetano superan el valor de 60 (muestras 3 y 4), se tiene que presentan un API° alto (49,1 y 48,3 respectivamente), que no corresponde a un Diesel N° 2 estándar típico; además, de la destilación, presentan:

- Temperatura T50 mucho menor que el resto de las muestras (240 y 243 °C respectivamente), y
- Temperatura T90 muy por debajo de los valores típicos (300 y 305 °C respectivamente)

Por lo tanto, al realizar el cálculo del índice de cetano por la norma ASTM D-4737, usando estos resultados, se obtienen valores muy altos (mayores que por ASTM D-976).

4.- De los resultados, se obtiene que:

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras.
- El Índice de Cetano ASTM D-4737, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-976, por 3,5 a 4 unidades; para las muestras con Índice de Cetano ASTM D-976, mayores de 60.
- El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3 a 3,5 unidades, para la mayoría de las muestras.

- 5.- Analizando el gráfico de la variabilidad de los índices de cetano, se tiene que no hubo mucha variabilidad en las propiedades cetánicas, sólo dos muestras (3 y 4) presentan valores altos de dichas propiedades.

**Año 2000.** Se observa lo siguiente:

- 1.- Se observa una relación mucho menos ajustada que en el año 1999 (hay mayor variabilidad), entre los valores calculados por las tres correlaciones, presentando valores superiores con la correspondiente ecuación de Número de Cetano de la Cía ETHYL. Los valores determinados por la ecuación de las cuatro variables se encuentran por debajo de los obtenidos por la norma ASTM D 976 y los del Número de Cetano calculado.
- 2.- De los 23 especímenes, se encuentra que un sólo espécimen presenta un valor mínimo del índice de cetano calculado mediante la norma ASTM D 976 de 43,5; dos presentan un valor máximo de 53,1; y el resto se encuentra en el intervalo de 45 a 52, asegurando una adecuada propiedad cetánica del Diesel 2 comercializado en nuestro medio, durante el año 2000; sin embargo se observa una disminución en la propiedad cetánica respecto del año anterior.
- 3.- Analizando las propiedades de volatilidad de las muestras 9 y 17, cuyos Índices de Cetano ASTM D-4737 son mayores que ASTM D-976, se tiene que presentan un API<sup>o</sup> alto (42,3 y 42,4 respectivamente), que no corresponde a un Diesel N<sup>o</sup> 2 estándar típico; además, de la destilación, presentan:
  - Temperatura T50 mucho menor que el resto de las muestras (211 y 213 °C respectivamente), y
  - Temperatura T90 muy por debajo de los valores típicos (254 y 262 °C respectivamente)

Por lo tanto, al realizar el cálculo del índice de cetano por la norma ASTM D-4737, usando estos resultados, éste es mayor que ASTM D-976; sin embargo, la diferencia no es mucha, presentando valores bajos.

4.- De los resultados, se obtiene que:

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3,5 unidades; para la mayoría de las muestras.
- El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 5 a 6 unidades, para la mayoría de las muestras.

5.- Analizando el gráfico de la variabilidad de los índices de cetano, se tiene que hubo una mayor variabilidad en las propiedades cetánicas, a diferencia del año anterior.

**Año 2001.** Se observa lo siguiente:

1.- Se observa una relación bastante ajustada entre los valores calculados por las tres correlaciones, pero también hay mayor variabilidad entre todos los especímenes analizados; presentando valores superiores con la correspondiente ecuación de número de cetano de la Cía ETHYL. Los valores determinados por la ecuación de las cuatro variables se encuentran por debajo de los obtenidos por la norma ASTM D 976 y los del número de cetano calculado por la ETHYL, como en el año 2000.

2.- De los 39 especímenes, se encuentra que un sólo espécimen presenta un valor mínimo del índice de cetano calculado mediante la norma ASTM D 976 de 41,9; ocho, se encuentran entre 51 y 55, y el resto se encuentra en el intervalo de 44 a 50, asegurando una adecuada propiedad cetánica del Diesel 2 comercializado en nuestro medio, durante el año 2001; sin embargo, se observa una mayor distribución entre los valores 46 y 49, por

lo tanto, una disminución en la propiedad cetánica respecto del año anterior.

3.- Analizando las propiedades de volatilidad de la muestras 9 y 34, cuyos Indices de Cetano ASTM D-4737 son mayores que ASTM D-976, se tiene que presentan un API<sup>o</sup> alto (38,3 y 38,4 respectivamente), que no corresponde a un Diesel N<sup>o</sup> 2 estándar típico; además, de la destilación, presentan:

- Temperaturas T10 mucho menor que el resto de las muestras (174 y 189 °C respectivamente)
- Temperatura T50 mucho menor que el resto de las muestras (ambas 226 °C) , y
- Temperatura T90 muy por debajo de los valores típicos (ambas 295 °C)

Por lo tanto, al realizar el cálculo del índice de cetano por la norma ASTM D-4737, usando estos resultados, éste es mayor que ASTM D-976; sin embargo la diferencia no es mucha, presentando valores muy bajos.

4.- Analizando además, las propiedades de volatilidad de la muestra 37, cuyo Índice de Cetano ASTM D-4737 es mucho mayor que ASTM D-976, se tiene que presenta un API<sup>o</sup> alto (37,8), que no corresponde a un Diesel N<sup>o</sup> 2 estándar típico; pero, de la destilación, se tiene que:

- Temperaturas T10 (278 °C) y T50 (351 °C) mucho mayores que el resto de las muestras, y
- Temperatura T90 (380 °C) muy por encima de los valores típicos.

- 5.- Además, la mayoría de las muestras, presentan temperaturas T10 y T50 muy por debajo de los valores típicos, lo que deriva en valores bajos de las propiedades cetánicas
- 6.- De los resultados, se obtiene que:
  - El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 a 3 unidades; para la mayoría de las muestras.
  - El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3 a 5 unidades, para la mayoría de las muestras.
- 7.- Analizando el gráfico de la variabilidad de los índices de cetano, se tiene que hubo una mayor variabilidad en las propiedades cetánicas, similar al año anterior.

**Año 2002.** Se observa lo siguiente:

- 1.- Se observa una relación bastante ajustada entre los valores calculados por las tres correlaciones, pero también hay mayor variabilidad entre todos los especímenes analizados; presentando valores superiores con la correspondiente ecuación de número de cetano de la Cía ETHYL. Los valores determinados por la ecuación de las cuatro variables se encuentran por debajo de los obtenidos por la norma ASTM D 976 y los del número de cetano calculado por la ETHYL, excepto en dos casos.
- 2.- De los 45 especímenes, se encuentra que dos especímenes presentan un valor mínimo del índice de cetano calculado mediante la norma ASTM D 976 de 42,5; tres, se encuentran entre 43 y 44; cinco, entre 51 y 54, y el resto se encuentra en el intervalo de 45 a 50, asegurando una adecuada propiedad cetánica del Diesel 2 comercializado en nuestro medio, durante el año 2002; sin embargo, se observa una mayor distribución entre los valores 47 y 49, por lo tanto, manteniéndose en la propiedad cetánica respecto del año anterior.

3.- Analizando las propiedades de volatilidad de las muestras 29 y 30 cuyos Índices de Cetano ASTM D-4737 son mayores que ASTM D-976, se tiene que presentan un APIº alto (40,3 y 41,3 respectivamente), que no corresponde a un Diesel Nº 2 estándar típico; además, de la destilación, presentan:

- Temperaturas T10 mucho menor que el resto de las muestras (182 y 181 °C respectivamente)
- Temperatura T50 mucho menor que el resto de las muestras (220 y 213 °C respectivamente) , y
- Temperatura T90 muy por debajo de los valores típicos (279 y 262 °C respectivamente)

Por lo tanto, al realizar el cálculo del índice de cetano por la norma ASTM D-4737, usando estos resultados, éste es mayor que ASTM D-976; sin embargo la diferencia no es mucha, presentando valores bajos.

4.- Analizando además, las propiedades de volatilidad de las muestras 41 a la 45, cuyo Índice de Cetano ASTM D-4737 es mucho menor que ASTM D-976 (la diferencia es de aproximadamente 5), se tiene que presentan un APIº de aprox. 32, y a su vez, de la destilación presentan temperaturas T50 y T90, que corresponden a los valores típicos de un Diesel Nº 2 estándar; sin embargo las temperaturas T10 son bajas al igual que los puntos iniciales de destilación.

5.- Además, la mayoría de las muestras, presentan temperaturas T10 y T50 muy por debajo de los valores típicos, lo que deriva en valores bajos de las propiedades cetánicas

6.- De los resultados, se obtiene que:

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 a 3 unidades; para la mayoría de las muestras.
  - El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3 a 5 unidades, para la mayoría de las muestras.
- 7.- Analizando el gráfico de la variabilidad de los índices de cetano, se tiene que hubo una mayor variabilidad en las propiedades cetánicas, similar al año anterior.

**Año 2003.** Se observa lo siguiente:

- 1.- Se observa una relación bastante ajustada entre los valores calculados por las tres correlaciones; presentando valores superiores con la correspondiente ecuación de número de cetano de la Cía ETHYL, en la mayoría de los casos. Los valores determinados por la ecuación de las cuatro variables se encuentran, salvo en tres casos, por debajo de los obtenidos por la norma ASTM D 976 y los del número de cetano calculado por la ETHYL.
- 2.- De los 25 especímenes, se encuentra que un sólo espécimen presenta un valor mínimo del índice de cetano calculado mediante la norma ASTM D 976 de 39,6; once, se encuentran entre 40 y 44; sólo un espécimen con índice igual a 50 y el resto se encuentra en el intervalo de 46 a 49, asegurando una adecuada propiedad cetánica del Diesel 2 comercializado en nuestro medio, durante el año 2003; sin embargo, se observa una clara disminución de la propiedad cetánica del diesel 2, con respecto a los años anteriores, lo que se puede derivar de una mayor variabilidad en el crudo procesado y/o en el diesel 2 importado.
- 3.- Analizando las propiedades de volatilidad de las muestras 9 y 15 cuyos Índices de Cetano ASTM D-4737 son mayores que ASTM D-976, se tiene que presentan un API<sup>o</sup> alto (43,7 y 38,2 respectivamente), que no

corresponde a un Diesel N° 2 estándar típico; además, de la destilación, presentan:

- Temperaturas T10 mucho menor que el resto de las muestras (174 y 172 °C respectivamente)
- Temperatura T50 mucho menor que el resto de las muestras (201 y 220 °C respectivamente) , y
- Temperatura T90 muy por debajo de los valores típicos (235 y 311 °C respectivamente)

Por lo tanto, al realizar el cálculo del índice de cetano por la norma ASTM D-4737, usando estos resultados, éste es mayor que ASTM D-976; sin embargo, la diferencia no es mucha, presentando valores bajos.

- 4.- Además, la mayoría de las muestras, presentan temperaturas T10 y T50 muy por debajo de los valores típicos, lo que deriva en valores bajos de las propiedades cetánicas
- 5.- De los resultados, se obtiene que:
  - El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 a 3 unidades; para la mayoría de las muestras.
  - El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3 a 5 unidades, para la mayoría de las muestras.
- 6.- Analizando el gráfico de la variabilidad de los índices de cetano, se tiene que hubo una mayor variabilidad en las propiedades cetánicas, similar al año anterior.

## 12. OBSERVACIONES

### Con respecto al Estudio de las Correlaciones:

#### Año 1999 - Item 3:

- Se observa, que las muestras que presentan índices de cetano que superan el valor de 60 (muestras 3 y 4), probablemente provengan de plantas de hidrotratamiento, es decir, corresponden a diesel importado.
- Además, según la norma para el cálculo de Índice de Cetano ASTM D-4737, el error al hacer la predicción con el índice de cetano es de  $\pm 2$  sólo si el número de cetano se encuentra entre 32,5 y 56,5; esto quiere decir, que esta correlación es sólo útil si los valores obtenidos de índice de cetano se encuentran entre 30,5 y 58,5 ; por lo tanto, si comparamos con nuestros resultados, los índices de cetano obtenidos con ASTM D-4737, se encuentran fuera de este rango (son muy altos), encontrándose una mayor desviación. Por lo tanto, la mejor correlación, para estas muestras, es la norma ASTM D-976.

#### Año 1999 – Item 4

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras; sin embargo, la norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si los valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la mayoría de las muestras que tienen un índice de cetano bajo esta norma, entre 49 y 52. Por lo tanto, la mejor correlación para la predicción del número de cetano, para la mayoría de las muestras, corresponde a Índice de Cetano ASTM D-4737.

#### Año 2000 - Item 3:

- Se observa, que las muestras 9 y 17, con un °API de aproximadamente 42, probablemente corresponde a Diesel que se elaboró con una mayor

proporción de Gasóleo (LVGO) y Kerosene, pues de la destilación, presentan temperaturas intermedias entre estas dos fracciones.

#### **Año 2000 – Item 4**

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras; sin embargo, la norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si los valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la mayoría de las muestras que tienen un índice de cetano bajo esta norma, entre 45 y 52. Por lo tanto, la mejor correlación para la predicción del número de cetano, para la mayoría de las muestras, corresponde a Índice de Cetano ASTM D-4737.

#### **Año 2001 - Item 3:**

- Se observa, que las muestras 9 y 34, con un °API de aproximadamente 38, probablemente corresponde a Diesel que se elaboró con una mayor proporción de Gasóleos (LVGO) y Kerosene, pues de la destilación, presentan temperaturas intermedias entre estas dos fracciones.

#### **Año 2001 – Item 4**

- Se observa, que las muestra que presenta índice de cetano que supera el valor de 63 (muestra 37), probablemente provenga de planta de hidrotratamiento, es decir, corresponde a un Diesel importado.
- Además, según la norma para el cálculo de Índice de Cetano ASTM D-4737, el error al hacer la predicción con el índice de cetano es de  $\pm 2$ , sólo si el número de cetano se encuentra entre 32,5 y 56,5; esto quiere decir, que esta correlación es sólo útil si los valores obtenidos de índice de cetano se encuentran entre 30,5 y 58,5 ; por lo tanto, si comparamos con nuestro resultado, el índice de cetano obtenido con ASTM D-4737, se encuentra fuera

de este rango (es muy alto), encontrándose una mayor desviación. Por lo tanto, la mejor correlación, para esta muestra, es la norma ASTM D-976.

### **2001 - Item 5 y 6**

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras; sin embargo, la norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si los valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la mayoría de las muestras que tienen un índice de cetano bajo esta norma, entre 44 y 50. Por lo tanto, la mejor correlación para la predicción del número de cetano, para la mayoría de las muestras, corresponde a Índice de Cetano ASTM D-4737.

### **Año 2002 - Item 3:**

- Se observa, que las muestras 29 y 30, con un °API de aproximadamente 40, probablemente corresponde a Diesel que se elaboró con una mayor proporción de Gasóleos (LVGO) y Kerosene, pues de la destilación, presentan temperaturas intermedias entre estas dos fracciones.

### **Año 2002 – Item 4**

- Se observa, que las muestras 41, 42, 43, 44 y 45, con un °API de aproximadamente 32, probablemente corresponde a Diesel que se elaboró con una mayor proporción de componentes provenientes de craqueo térmico, pues presentan valores bajos de índice de cetano ASTM D-4737.

### **Año 2002 – Item 5 y 6**

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras; sin embargo, la norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si los valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la

mayoría de las muestras que tienen un índice de cetano bajo esta norma, entre 45 y 50. Por lo tanto, la mejor correlación para la predicción del número de cetano, para la mayoría de las muestras, corresponde Índice de Cetano ASTM D-4737.

### **Año 2002 – Muestras 12 y 13**

- Estas muestras presentan propiedades de volatilidad similares, sin embargo, la muestra 13 posee una temperatura T90 menor que la muestra 12, por lo tanto, al hacer el cálculo del índice de cetano por ASTM D-4737, la muestra 13 proporciona un resultado mayor que la muestra 12.

### **Año 2003 – Item 3**

- Se observa, que las muestras 9 y 15, con un °API entre 38 y 43, probablemente corresponde a Diesel que se elaboró con una mayor proporción de Kerosene, pues de la destilación, presentan temperaturas que corresponden a esta fracción.

### **Año 2003 – Item 4 y 5**

- El Índice de Cetano ASTM D-976, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 2 unidades, para la mayoría de las muestras; sin embargo, la norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si los valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la mayoría de las muestras que tienen un índice de cetano bajo esta norma, entre 46 y 49. Por lo tanto la mejor correlación para la predicción del número de cetano, para la mayoría de las muestras, corresponde Índice de Cetano ASTM D-4737.

### 13. CONCLUSIONES

1. Del presente estudio se tiene que la diferencia entre el índice de cetano calculado con la norma ASTM D-4737 y el número de cetano calculado por la ETHYL es mayor que la diferencia entre el índice de cetano calculado con la norma ASTM D-976 y el número de cetano calculado por la ETHYL; para la mayoría de las muestras:
  - El índice de cetano bajo la norma ASTM D-976 es mayor que el índice de cetano bajo la norma ASTM D-4737, por 2 a 3 unidades.
  - El número de cetano calculado por la ETHYL, es mayor que el Índice de Cetano ASTM D-4737, por 3 a 5 unidades; sin embargo, esta correlación no es de mucha utilidad pues para su cálculo utiliza el Índice de Cetano ASTM D-976, el cual, según este estudio, no es la mejor correlación para la mayoría de las muestras que se analizaron.
2. La norma ASTM D-976 es útil para la predicción del número de cetano, sólo si sus valores de índice de cetano son mayores de 54,5; lo que no es el caso para la mayoría de las muestras analizadas que tienen un índice de cetano bajo. Por lo tanto, la mejor correlación para la predicción del número de cetano para la mayoría de las muestras, durante el periodo de 1999 al 2003, corresponde al Índice de Cetano ASTM D-4737. Esto concuerda con lo que establece la Norma Técnica Peruana NTP 321.003:2001, por lo que no es necesario cambiar el método de prueba, para el cálculo del índice de cetano, si no se cuenta con el equipo de número de cetano.
3. Además, se observa, que al realizar el cálculo del Índice de Cetano ASTM D-4737, de las muestras que poseían propiedades de volatilidad similares, el índice de cetano de la muestra con menor temperatura T90, era mayor que la muestra que tenía la mayor temperatura T90. Como se sabe, la correlación de la norma ASTM D-4737, toma en cuenta 4 variables: la gravedad API, la T10, T50 y T90, siendo esta última la que nos da una idea de la cantidad de residuos carbonosos que se genera del proceso de combustión del diesel; por

lo tanto, si la T90 es baja, entonces se obtiene mejor consumo de combustible, debido a un mejor control de la combustión, y por lo tanto, un mayor número de cetano.

4. Se observa, que si bien es cierto, la calidad cetánica se encuentra dentro del estándar propuesto para la región de América Latina y el Caribe, para el año 2005, las propiedades cetánicas han ido disminuyendo año tras año. Esto puede ser debido a una mayor variabilidad en el crudo procesado y/o el combustible diesel provenía de una variedad de fuentes (diesel elaborado con una mayor proporción de componentes provenientes de craqueo catalítico: gasoleó de FCC), pues el 40 por ciento del mercado de petróleo en nuestro país está compuesto por importaciones.
5. En general, para la mayoría de las muestras, el Índice de Cetano por ASTM D-4737 (que según este estudio sería la mejor correlación); se encuentra entre 43 a 50. Entonces, si la diferencia entre el Índice de Cetano por ASTM D-4737 y el número de cetano, según la ASTM, es de  $\pm 2$ , entonces el número de cetano se encuentra entre 45 y 52. Por lo tanto, el diesel que se comercializa en el mercado peruano, proviene de refinerías que elaboran su combustible, mezclando diesel de destilación primaria con gasóleos livianos y pesados de vacío. Se tiene conocimiento que tanto en la Refinería La Pampilla y Conchán, el gasóleo ligero de vacío (LVGO) es considerado para incrementar su producción de diesel.
6. Como el índice de cetano no puede detectar el efecto del aumento del número de cetano al agregar mejoradores de cetano, y como la tendencia es a disminuir año tras año entonces, para cumplir con las regulaciones de calidad, el uso de estos mejoradores irá en aumento. Estos mejoradores están siendo usados por Petroperú, pues tiene establecido que si el índice de cetano con ASTM D-976 es inferior a 48, entonces el diesel se aditiva.
7. Entonces, aquellas muestras que arrojaron valores de índice de cetano muy bajos, probablemente fueron aditivados con mejoradores de número de cetano, para cumplir con las especificaciones de calidad.

## 14. RECOMENDACIONES

1. No se han hecho estudios de número de cetano en el país porque no contamos con máquina de cetano, sin embargo, las especificaciones del diesel 2 estándar, con respecto a las propiedades cetánicas, se hicieron considerando lo siguiente :

- De acuerdo a estudios realizados por la compañía Shell, la ASTM D-4737 se aproximaba al número de cetano para diesel peruanos provenientes de crudos de bajo cetano.
- De acuerdo a los estudios comparativos de la compañía Maple Gas Corporation, la ASTM D-976 se aproximaba al número de cetano para diesel provenientes de los condensados de gas natural (alto cetano).
- ASTM recomienda en la norma ASTM D 975, que la norma D-4737 es la correlación a utilizar para predecir el número de cetano.

Por lo tanto, se recomienda realizar estudios de número de cetano de nuestros combustibles diesel tratando de establecer una correlación entre el número de cetano y los índices de cetano calculado. A partir de estos resultados se podrá observar si el Perú está en capacidad de cumplir con los requerimientos de cetano para sus motores, traducido en el estándar propuesto para la región de América Latina y el Caribe de 47 para el número de cetano; y de acuerdo a ello cambiar nuestras especificaciones.

2. Para hacer estudios de número de cetano, se deberá contar con financiamiento, privado o del estado, pues se requiere mandar analizar al exterior por lo menos unas 200 muestras, de tal manera que se obtenga un resultado estadístico válido. Se tiene conocimiento que el costo aproximado del análisis de número de cetano por muestra es US\$ 380.

3. En general, todos los mercados a nivel mundial, están proponiendo valores más altos de cetano, una temperatura T90 más baja ( < 360 °C ) y menores niveles de azufre; por lo tanto se recomienda:
- Que las refinerías inviertan en tecnologías necesarias para cumplir con los cambios de especificaciones de combustibles, esto incluye mayores unidades de hidrocraqueo, así como, mayores unidades de mejoramiento de productos, tales como unidades de hidrotratamiento, el cual permite la remoción de azufre.
  - Que las refinerías cambien sus operaciones de destilación si se requiere producir diesel con una temperatura menor de T90.
4. También, cabe mencionar, que la sensibilidad del diesel, al usar mejoradores de cetano, es mayor, si en su composición tiene una mayor cantidad de hidrocarburos parafínicos, que a su vez es mayor que uno con mayor cantidad de hidrocarburos olefínicos y éste mayor que uno con mayor cantidad de hidrocarburos nafténicos.

Además, de acuerdo al proceso de refino, la sensibilidad de componentes provenientes de destilación (gasóleos), es mayor que, de componentes provenientes de hidrotratamiento.

Entonces, como el diesel que se comercializa en el mercado nacional, tiene como componente a los gasóleos (esto por su número de cetano entre 45 y 52), entonces si se requiere que los niveles de número de cetano sean mayores de 50, se recomienda el uso de mejoradores de cetano.

## 15. BIBLIOGRAFIA

- Robert E. Maples, Petroleum Refinery Process Economics, 2 nd Edition, p. 62,63,64,65,66.
- Publicación Técnica Octel Núm 6, Combustibles, motores y medio ambiente, Octubre 1989.
- Programa PNUD/Banco Mundial de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP), Armonización de las Especificaciones de los Combustibles en América Latina y el Caribe, Enero 1998.
- Hacht and Matar, From Hydrocarbon to Petrochemical, Cap. I.
- Pierre Wuithier, El Petróleo: Refino y Tratamiento Químico, Tomo I, 1971.
- Norma Técnica Peruana NTP 321.003 2001, Petróleo y Derivados, 2da Edición
- [www.sagpya.mecon.gov.ar/0-0/index/biodisel/inf\\_INTA-UADE\\_biodiesel.PDF](http://www.sagpya.mecon.gov.ar/0-0/index/biodisel/inf_INTA-UADE_biodiesel.PDF)
- [www.dsostenible.com.ar/tecnologias/gases/memo-santiago-chile2.htm](http://www.dsostenible.com.ar/tecnologias/gases/memo-santiago-chile2.htm)
- [www.perumine.com/paper/Hidro.pdf](http://www.perumine.com/paper/Hidro.pdf)
- [www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/](http://www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/)
- [www.franquiciapemex.com/productos/cuatrdies.html](http://www.franquiciapemex.com/productos/cuatrdies.html)
- [www.mem.gob.pe/wmem/publica/ps/revista-en-cifras/2000/junio/TABLAS/TABLA9.HTM](http://www.mem.gob.pe/wmem/publica/ps/revista-en-cifras/2000/junio/TABLAS/TABLA9.HTM)
- [www.cideiber.com/infopaises/Peru/Peru-06-01.html](http://www.cideiber.com/infopaises/Peru/Peru-06-01.html)
- Versión traducida de [http://www.med.govt.nz-ers-oil\\_pet-cetane-](http://www.med.govt.nz-ers-oil_pet-cetane-)
- [www.prompex.gob.pe/prompex/menu\\_rigth/NormasTecnicasPeruanas2002.pdf](http://www.prompex.gob.pe/prompex/menu_rigth/NormasTecnicasPeruanas2002.pdf)
- [www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/ fulltext/3encuent/dghmem.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/ fulltext/3encuent/dghmem.pdf)
- [www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/impactos/vi-105.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/impactos/vi-105.pdf)
- [www.minem.gob.pe/proyecto\\_web/administracion/publicaciones/revista-en-cifras/2003/diciembre/Hidro.pdf](http://www.minem.gob.pe/proyecto_web/administracion/publicaciones/revista-en-cifras/2003/diciembre/Hidro.pdf)
- [www.editoraperu.com.pe/edc/03/02/23/inf.asp](http://www.editoraperu.com.pe/edc/03/02/23/inf.asp)

- [www.unep.org/pcfv/documents/InfSheEs.pdf](http://www.unep.org/pcfv/documents/InfSheEs.pdf).
- [www.airelimpio.org.pe/lpmarch.html](http://www.airelimpio.org.pe/lpmarch.html)
- [www.mef.gob.pe/propuesta/DGAES/btfiscal/N20BTFinforme.pdf](http://www.mef.gob.pe/propuesta/DGAES/btfiscal/N20BTFinforme.pdf)
- [www.mef.gob.pe/propuesta/DGAES/btfiscal/Informe\\_Especial\\_BTTF36\\_VFVF\\_07OCT2004.pdf](http://www.mef.gob.pe/propuesta/DGAES/btfiscal/Informe_Especial_BTTF36_VFVF_07OCT2004.pdf)
- [www.conam.gob.pe/documentos/N\\_biocombustibles/inf\\_final\\_gt\\_biocomb.pdf](http://www.conam.gob.pe/documentos/N_biocombustibles/inf_final_gt_biocomb.pdf)