

Formulaciones nacionales de gasolinas de alto octano. Caso estudio

National formulations of high-octane gasoline. Case study

Ing. Norma Elena Mora-Men

Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba

normae@ceinpet.cupet.cu

Resumen

Las gasolinas de alta capacidad antidetonante (Número de Octano Investigativo, RON \geq 98) no abundan en el mercado mundial. Generalmente son gasolinas “hechas a mano” para fines específicos, con componentes hidrocarbonados, oxigenados y aditivos químicos, cuidadosamente seleccionados. El presente artículo tuvo como objetivo la formulación de una o más variantes de gasolina \geq 98 RON (G98), sobre la base de naftas de producción nacional y de gasolina importada (en forma segregada); y adición de sustancias mejoradoras de octano no metálicas: hidrocarburos puros y compuestos oxigenados. Las naftas de alto octano se obtuvieron de refinerías con tecnologías de Craqueo Catalítico y Reformación Catalítica, respectivamente. Los contenidos volumétricos de naftas se seleccionaron tomando en cuenta los balances de productos habituales en dichas refinerías. Se eligieron proporciones de hidrocarburos y de oxigenados que constituyen una práctica mundial. La determinación experimental del RON se realizó en motor CFR-48 estandarizado, con un cilindro, según establece la norma ASTM D2699. La formulación de G98, a partir de naftas, se logró mediante la adición de 10%v/v de etanol anhidro a una mezcla base reforzada con una iso-parafina y un aromático. La G98, con gasolina importada, se obtuvo solo con 10 %v/v de etanol. La capacidad antidetonante del resto de las formulaciones confirmó el complejo comportamiento de la gasolina durante la combustión en motores de combustión interna, entre ellos: la proporcionalidad inversa entre el número de átomos de carbono de los alcoholes y la velocidad de inicio de las reacciones en cadena de radicales libres durante la combustión.

Palabras clave: gasolina, formulaciones de gasolina, octano, capacidad antidetonante, resistencia a la detonación.

Abstract

High-capacity anti-knock gasolines (Research Octane Number, RON \geq 98) do not abound in the world market. They are generally “hand-made” gasoline for specific purposes, with hydrocarbon, oxygenated compounds and chemical additives, carefully selected. The objective of this work was the formulation one or more variants of gasoline \geq 98 RON (G98), based on nationally produced gasoline and imported gasoline (in segregated form); with addition of non-metallic octane enhancing substances: pure hydrocarbons and oxygenated compounds. High-octane gasoline was obtained from refineries with Catalytic Cracking and Catalytic Reforming technologies, respectively. The volumetric contents of gasoline were selected taking into account the usual balances of products in these refineries. Proportions of hydrocarbons and oxygenates that

constitute a worldwide practice were chosen. The experimental determination of the RON was carried out in a standardized CFR-48 engine, with a single cylinder, as established by ASTM D2699. The formulation of G98, from naphtha, was achieved by adding 10 %v/v anhydrous ethanol to a base mixture reinforced with an iso-paraffin and an aromatic. G98, with imported gasoline, was obtained only with 10 %v/v ethanol. The anti-knock capacity of the rest of the formulations confirmed the complex behavior of gasoline during combustion in internal combustion engines, including the inverse proportionality between the number of carbon atoms in alcohols and the speed of initiation of chain reactions of free radicals during combustion.

Keywords: gasoline, gasoline formulations, octane, antidetonating capacity, detonation resistance.

Introducción

La *Carta Mundial de los Combustibles (Worldwide Fuel Charter - WWFC)*, organismo internacional que armoniza la calidad de los combustibles con los requerimientos de la tecnología automotriz sobre la base de investigaciones científico-técnicas, recomienda gasolinas con alta *resistencia a la detonación* (también denominado: “capacidad antidetonante” o “poder antidetonante”; el fenómeno de la “detonación” es denominado por algunos autores como “picado de bielas” [1], para cumplir con las normas de emisiones vehiculares Euro 5 y Euro 6. El incremento de los valores de esta propiedad ha permitido, además, el aumento de la relación de compresión de los motores de combustión interna de encendido por chispa (MCI), entre otras mejoras [1].

La capacidad antidetonante de las gasolinas –y de cada uno de sus componentes– representa la propiedad química más importante de este tipo de combustible. Hay autores que afirman: “[...] toda la actividad de desarrollo de refinación y formulación de gasolinas gira en torno a [...] los números de octano” [2].

De la capacidad antidetonante depende, en primera instancia, el comportamiento de la gasolina durante la combustión en motores de combustión interna. Desde el punto de vista de composición molecular, la resistencia a la detonación caracteriza el grado de plenitud de la conversión de la energía química, contenida en cada molécula hidrocarbonada, en energía térmica. La estabilidad de los radicales libres que se forman a partir de los hidrocarburos individuales y de su interacción con el resto de las especies, determinan que la combustión sea: normal (deflagración) o anormal (detonante), en las condiciones de temperatura y presión que existen en la cámara de combustión. En la figura 1 se muestran imágenes de los procesos mencionados [3].

La resistencia a la detonación se representa numéricamente por el Número de Octano (NdO), que en sus modalidades más extendidas: Número de Octano Investigativo (*Research Octane Number*, RON) y Número de Octano Motor, (*Motor Octane Number*, MON), se determina experimentalmente mediante normas de métodos de ensayos en motores estandarizados.

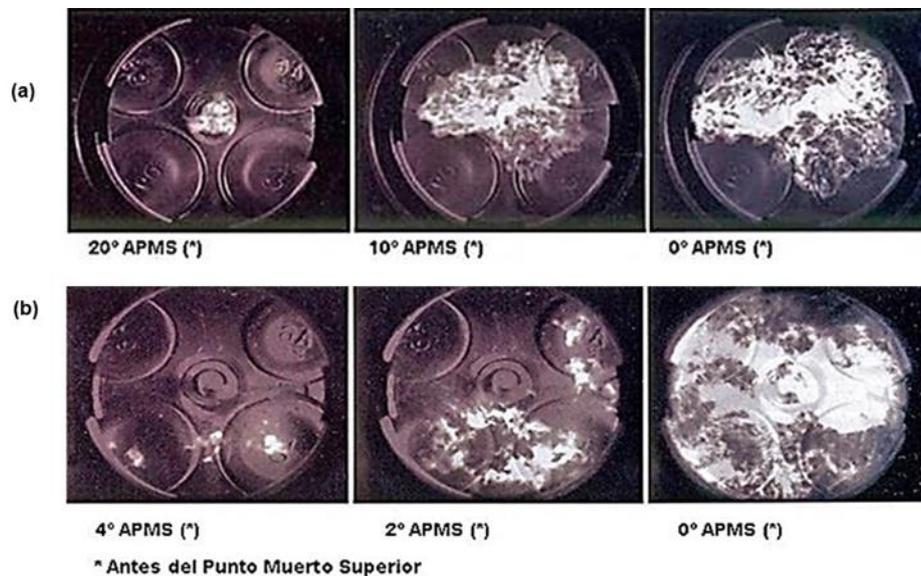


Fig.1. Combustión: (a) normal-deflagración; (b) anormal-detonante

Décadas atrás, el vocablo “octano” generalmente indicaba el RON; en la actualidad, habitualmente hace alusión al Índice de Octano, que es igual a la media aritmética de la suma de RON y MON.

El valor del NdO caracteriza la tendencia a la combustión normal –o a la reducción de la combustión detonante– de las gasolinas en un motor Otto, cuando corresponde con el requerimiento de la relación de compresión de diseño. Mayores relaciones de compresión exigen mayor octanaje, lo que permite retrasar el encendido y lograr mayor potencia.

Los NdO determinados en condiciones normalizadas de ensayo no representan exactamente el desempeño del motor en todo el diapasón de regímenes reales de explotación. El RON pronostica mejor sobre el régimen de detonación a bajas velocidades (1500 – 2500 rpm), típicos del tráfico dentro de las ciudades. El MON es una indicación de la tendencia de la gasolina a proveer una combustión normal en regímenes de alta velocidad (≥ 4000 rpm), en motores que deben soportar altas cargas y desarrollar valores elevados de potencia. La combustión

detonante en estas condiciones son las más peligrosas desde el punto de vista mecánico, pues conducen a roturas irreversibles de válvulas, pistones o de la junta de la culata [2]. La figura 2 presenta la imagen de un pistón sometido al fenómeno de la detonación [4].



Fig.2. Efecto de la detonación en émbolo de MCI de gasolina

En el mercado mundial, actualmente, no es usual la comercialización de gasolinas con altos valores de RON (98, min.) y MON (88, min.). En general, estas gasolinas son “hechas a mano”, es decir, se formulan para fines específicos, a partir de componentes hidrocarbonados, oxigenados y aditivos químicos seleccionados cuidadosamente, en las proporciones adecuadas. Las mezclas no solo deben alcanzar los valores especificados de octano, sino también cumplir con los restantes indicadores de las propiedades físico-químicas establecidas en las normas de especificaciones de calidad para las gasolinas.

Por lo general, cada grado de calidad de gasolina es una mezcla de cuatro a diez componentes, producidos en la refinería o comprados en el mercado externo. Todos los grados se formulan a partir de los mismos componentes, aunque la estructura de las mezclas finales –llamado comúnmente *pool*– es muy diversa. Ejemplo para gasolina regular se muestra en la tabla1 [5].

Tabla 1

Componentes y formulaciones de gasolina en EEUU y Europa (2002)

| Tipo de Naftas | Pool Gasolina, USA (%v) | Pool Gasolina, Europa Occidental (%v) |
|------------------|----------------------------|--|
| Craqueadas | 36 | 27 |
| Reformadas | 34 | 40 |
| Alquilatos | 12 | 9 |
| NVL | 3 | 7,5 |
| De Coquificación | 1 | ~ 0 |
| De Hidrocraqueo | 2 | ~ 0 |
| Isomerizada | 5 | 10 |
| Butanos | 5 | 5,5 |
| MTBE | 2 | 1,0 |
| Total | 100 | 100 |

La razón fundamental de la conveniencia del uso de varios componentes en las formulaciones de gasolina es la necesidad de garantizar los requerimientos del motor, en cada segundo de su operación en regímenes reales de conducción. Cuanto mayor es el número de componentes valiosos en la gasolina, mayor es la capacidad de funcionamiento del motor en condiciones adecuadas de volatilidad y de resistencia a la detonación. Técnicamente, un solo componente no constituye una gasolina.

En la tabla 2 se enumeran componentes tradicionales de la gasolina y valores típicos de algunas de sus características más importantes, así como de productos *mejoradores de octano* (también denominados “mejoradores de la combustión”) [6].

Los valores reales de cada propiedad de componentes de gasolina, producidos en otras refinerías, pueden no corresponder con los relacionados en la tabla 1 porque la magnitud de cada uno de ellos depende de: 1) características del petróleo crudo de inyectar; 2) tecnologías disponibles para procesarlo; 3) condiciones de operación de cada proceso; y 4) intereses comerciales.

Para asegurar que la gasolina garantice el desempeño de vehículos automotores para aplicaciones especiales (de gran peso que necesitan de altas: maniobrabilidad y potencia), este estudio tuvo como objetivo la formulación de una o más variantes de *gasolina con 98 RON* (en lo adelante: “G-98” o “G98”),

sobre la base de naftas de producción nacional y de gasolina importada, en forma segregada. Atendiendo a los límites de octano de estos componentes, se consideró la adición de sustancias mejoradoras de octano no metálicas: hidrocarburos puros y compuestos oxigenados.

A continuación, se presenta la tabla 2.

Tabla 2

Componentes típicos de gasolina y algunas de sus características promedio

| Fuente (Tipo de proceso tecnológico) | Componente de mezcla | Contenido típico %v | Numero de Octano | | S ppm | RVP psi | Ar %v | Benceno % | Olefinas % |
|--|---|---------------------------|---------------------|-----|----------|------------|----------|--------------|---------------|
| | | | RON | MON | | | | | |
| Destilación de crudo | <input type="checkbox"/> Nafta Virgen | 5 - 10 | 71 | 70 | ≈ 120 | 12 | - | - | - |
| Upgrading | <input type="checkbox"/> Nafta Reformada | 20 - 30 | 97 | 88 | < 41 | 5 | 60 | 5 | - |
| | <input type="checkbox"/> Nafta Isomerizada | 0 - 10 | 82 | 80 | < 10 | 13 | - | - | - |
| | <input type="checkbox"/> Nafta Alquilada | 5 - 10 | 94 | 92 | | 3 | - | - | - |
| Conversión | <input type="checkbox"/> Nafta Craqueada (FCC) | 30 - 35 | 92 | 80 | 500-1500 | 5 | 25 | 1 | 30 |
| | <input type="checkbox"/> Nafta Hidrocraqueada (HCC) | 5 - 15 | 78 | 76 | < 4 | 11 | 2 | 2 | - |
| | <input type="checkbox"/> Nafta de Coquificación | 0 - 5 | 88 | 80 | ≈ 500 | 19 | 0,5 | 0,5 | 50 |
| Adquiridos | <input type="checkbox"/> Condensado de Gas Natural | 0 - 5 | 73 | 71 | ≈ 150 | 13 | 3 | 1 | 1 |
| | <input type="checkbox"/> MTBE (u otros éteres) | 0 - 15 | 118 | 102 | < 5 | 8 | - | - | - |
| | <input type="checkbox"/> Etanol (u otros alcoholes) | 0 - 10 | 123 | 103 | < 5 | 18 | - | - | - |

Leyenda: S – contenido de azufre total; RVP – Presión de Vapores Red (Reid Vapor Pressure); Ar – contenido de hidrocarburos aromáticos

Métodos utilizados

Para el presente caso estudio se seleccionaron dos refinerías: A y B (Fig.3). En la Refinería A se producen afta virgen ligera (NVL) y naftas de alto octano, a partir del Craqueo Catalítico (FCC): nafta craqueada ligera (NCL); nafta craqueada pesada (NCP); o un corte amplio de nafta craqueada (NCA).

Los grados de octano establecidos en las especificaciones cubana: 84; 90 y 94 RON, se obtienen básicamente de la mezcla de NVL con: NCA o (NCL + NCP) para los grados 83 y 90 RON; y con gasolina importada (GI) para 94 RON (figura 3a). En la Refinería B, además de NVL, se producen naftas de octano variable, generalmente en el intervalo 88 – 94 RON, mediante Reformación Catalítica (RC) (figura 3b).

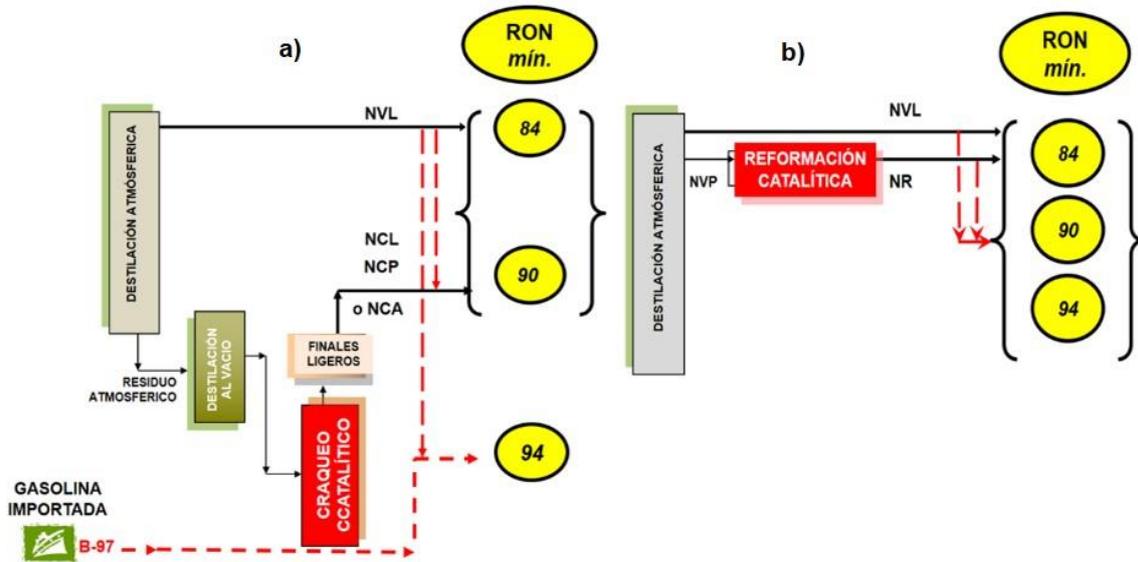


Fig.3. Tecnologías de producción nacional de gasolinas:
a) Refinería A; b) Refinería B

Componentes hidrocarbonados y oxigenados

En la tabla 3 se relacionan los tipos y procedencia de las naftas de producción nacional, la gasolina importada y los hidrocarburos puros, utilizados en las formulaciones. En la tabla 4 aparecen los compuestos oxigenados empleados.

Tabla 3
Componentes hidrocarbonados para formulación de G-98

| | | |
|---|------------------------------|---------------|
| 1 | Nafta Virgen Ligera (NVL) | Refinería A |
| 2 | Nafta Craqueada Ligera (NCL) | |
| 3 | Nafta Craqueada Pesada (NCP) | |
| 4 | Gasolina Importada (GI) | |
| 5 | Nafta Reformada (NR) | Refinería B |
| 6 | Iso-octano (> 99% pureza) | MERCK |
| 7 | Tolueno (99,79% pureza) | Grado técnico |

Tabla 4
Compuestos oxigenados para formulación de G-98

| | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | Etanol anhidro, EtOH (99,7% pureza) | De producción nacional |
| 2 | Iso-butanol (iso-C ₄) | Grado p.a. ⁸ |
| 3 | 2-Pentanol (2-C ₅ OH) | Grado p.a. |

Las formulaciones de gasolina se realizaron tomando como criterio el valor de RON experimental, obtenido en motor estandarizado de un cilindro, modelo CFR-48, según norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D2699, utilizada mundialmente [7]. Otras consideraciones tomadas en cuenta para la formulación de la G-98 se relacionan a continuación:

1. La mezcla base formulada con naftas de producción nacional se confeccionó sobre la base de balances habituales de las refinerías objeto de estudio, como se muestra a continuación:

| Nafta | Contenido, %v/v |
|-------|-----------------|
| NCL | 40-50 |
| NCP | 0-2 |
| NVL | 0-3 |
| NR | 25-45 |

En atención a razones de disponibilidad se utilizó un contenido volumétrico de ≥ 78 % para elaborar la mezcla base a partir de la GI.

2. No se consideraron mezclas entre las naftas de producción nacional y la GI.
3. A continuación, se muestran los contenidos seleccionados de hidrocarburos puros y compuestos oxigenados evaluados en numerosos estudios anteriores, liderados por la *US Energy Information Administration*, el *US National Petroleum Council* y el *US National Petrochemical and Refiners Association*, entre otros [8, 9].

| Compuesto | Contenido, %v/v |
|--------------------------------------|-----------------|
| Etanol anhidro, EtOH | 10 |
| Iso-butanol, (iso-C ₄ OH) | 12 |
| Iso-octano, (iso-C ₈) | 10 |
| Tolueno | 10 |
| 2-pentanol (2-C ₅ OH) | 10 |

Los efectos de sustancias mejoradoras de la combustión fundamentan su acción general en la capacidad de controlar la acumulación de peróxidos alquílicos e hidroperóxidos en el lado frío de la mezcla aire/combustible, durante la combustión. Este comportamiento está asociado a la velocidad de inicio de la reacción en cadena de radicales libres y a la propagación suave y progresiva del frente de llama a través de dicha mezcla.

Resultados y discusión

Componentes para la formulación de la “gasolina base”

Se considera “gasolina base” a la mezcla de componentes hidrocarbonados (naftas y/o gasolinas), a la cual se adicionan otras sustancias en proporciones variadas, para mejorar uno o varios indicadores de sus propiedades físico-químicas.

La capacidad antidetonante de los componentes hidrocarbonados disponibles en el caso estudio, se muestra en la figura 4.

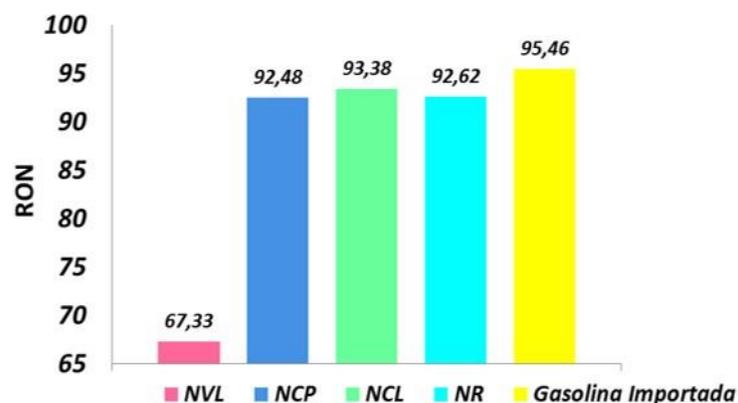


Fig.4. RON de naftas y gasolina importada

Del análisis de los datos se concluye que ninguna combinación de mezcla entre ellos, permite alcanzar el nivel de octano deseado.

Componentes no hidrocarbonados mejoradores de octano

Con el fin de incrementar el octano de la GI y de las mezclas de naftas hasta los valores de interés, se seleccionaron productos con números de RON que garanticen incrementos sustanciales, por encima de los niveles de las mezclas base y de los que se tenga información confiable sobre su efecto en el aumento de octano MON (tabla 5). También se tuvo en cuenta la disponibilidad actual y futura de los volúmenes requeridos por la economía nacional [10, 11].

Tabla 5
Mejoradores de octano. Valores de RON y MON

| COMPONENTE | Número de Octano (puro) | | Número de Octano de mezcla † | |
|------------------------------------|-------------------------|-------|------------------------------|----------|
| | RON | MON | RON | MON |
| 2,2,4-Trimetilpentano (iso-octano) | 100†† | 100†† | 100†† | 100†† |
| Tolueno | 115 | 103 | 124 | 112 |
| Iso-butanol ¹¹ | 113 | - | 105-110 | 95-100 |
| 2-Pentanol | 118 | 98 | - | - |
| Etanol | 129 | 96 | 120-130 | 98 - 103 |

† Octano determinado en una disolución que contiene 20% v/v del hidrocarburo individual en una mezcla de 60/40 iso-octano/n-heptano. †† Valor atribuido por convención

Naftas de producción nacional

La estructura de la mezcla base formulada solamente a partir de naftas de producción nacional (muestra “M-1-G98”) y su correspondiente valor de RON se presenta en la figura 5.

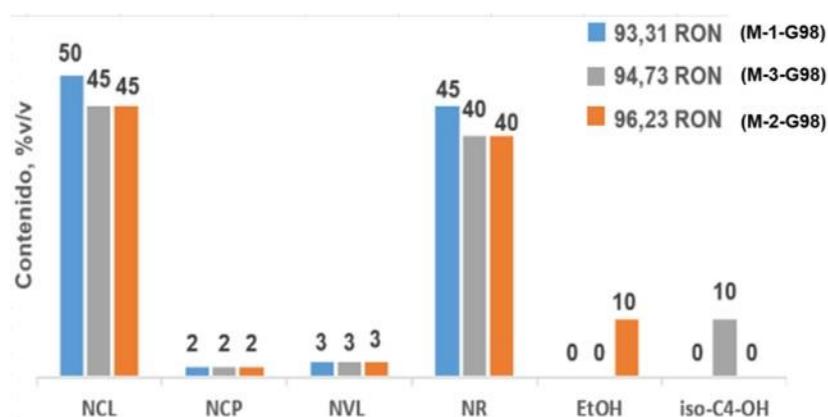


Fig.5. Efecto de alcoholes sobre RON de mezcla base de naftas

Esta mezcla es un ejemplo de gasolina formulada correctamente, es decir, con más de un componente de alto octano. Los efectos adversos más generales de la nafta reformada usada como único componente, se manifiestan en déficits de volatilidad durante el arranque en frío y en la formación de depósitos carbonosos en válvulas e inyectores, entre otros numerosos inconvenientes. Gasolinas formuladas solo sobre la base de naftas de Craqueo Catalítico trae aparejado una alta inestabilidad del combustible, con la consecuente degradación rápida de sus moléculas hidrocarbonadas con tendencia a la formación de promotores

de gomas y lacas, que son causa de roturas y averías; de reducción sustancial de conversión de la energía química e incrementos del consumo de combustible.

En la figura 6 se presenta, además, el efecto de la adición de 10 % v/v de dos tipos de alcoholes: etanol anhidro (muestra “M-2-G98”) e iso-butanol (muestra “M-3-G98”), en la capacidad antidetonante de la mezcla base. Es posible observar la proporcionalidad inversa –universalmente establecida– entre el número de átomos de carbono de los alcoholes y la velocidad de inicio de las reacciones en cadena de radicales libres durante la combustión. Otro ejemplo de ello se expone en la figura 6.

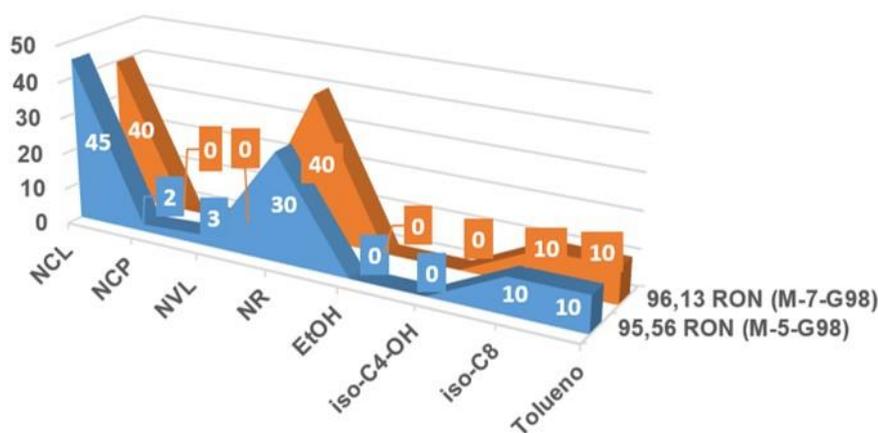


Fig.6. Influencia de la composición hidrocarbonada en RON de mezclas base

La “muestra M-7-G98” presenta mayor resistencia a la detonación (la repetibilidad de la norma del método de ensayo es de 0,2 [9] respecto a la “muestra M-5-G98”, aunque ambas contienen 10 %v/v de iso-octano y tolueno. La complejidad de las reacciones de combustión es de tal naturaleza, que la gasolina con mayor cantidad de NCL (45%v/v) y NCP (2 % v/v), no logra superar el efecto de la reducción de la NR (92,62 RON), en 10 % v/v; ni la adición de 3%v/v de NVL, producto con la menor resistencia a la detonación (67,33 RON).

La formulación de gasolina con RON \geq 98, a partir de mezcla de naftas de producción nacional, se hizo posible solo mediante la adición de 10 % v/v de etanol anhidro a una mezcla base reforzada con hidrocarburos puros: una isoparafina (iso-C₈) y un aromático (tolueno), en contenidos de 10 % v/v de cada uno (muestra “M-6-G98”). En ella se redujo la proporción de NR en 5 % v/v,

respecto a la formulación de la muestra “M-4-G98”, a expensas de la proporción de aromáticos que provee la mayor adición de tolueno como se observa en la figura 7. Ambas formulaciones aumentan el valor agregado de las naftas de menor octano, lo que favorece el margen de refino.

Por otro lado, ambas ofrecen la ventaja de la ausencia de aditivos organometálicos mejoradores de octano –como el tetraetilo de plomo, el ferroceno y el tricarbonilo metilciclopentadienilo de manganeso– cuya presencia está prohibida (los dos primeros) o se controla cada vez con mayor rigor (el tercero), en las actuales normas ambientales y en las especificaciones de calidad de las gasolinas.

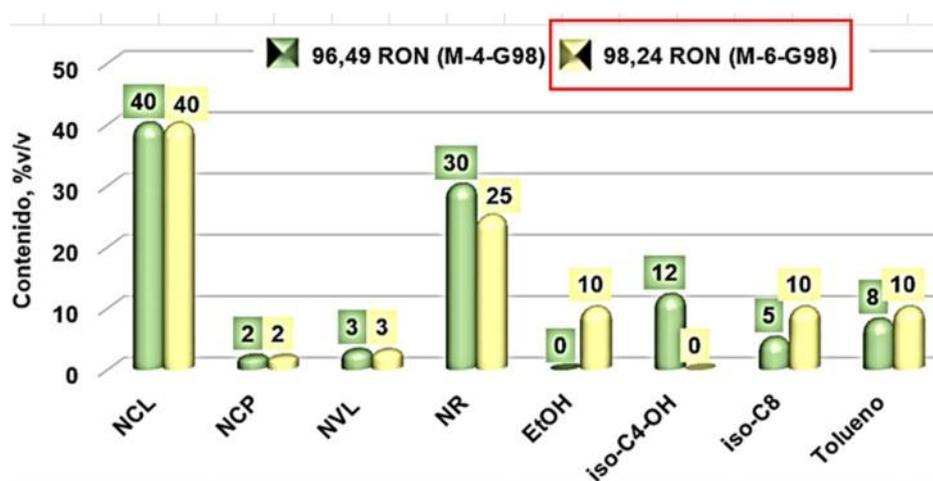


Fig.7. Efecto combinado de alcoholes e hidrocarburos puros

Gasolina importada

Considerándola como gasolina base (RON=95,46), en contenidos ≥ 78 % v/v, es posible alcanzar ≥ 98 RON mediante la adición de 10 % v/v de alcohol etílico anhidro. La adición de 12 % v/v de iso-butanol, como único componente oxigenado, solo consigue aumentar el RON de la gasolina base en 1,42 puntos. Ello constituye otro ejemplo de la relación inversa entre el número de átomos de carbono en los alcoholes y su capacidad antidetonante. Para obtener una formulación con iso-butanol que alcance o se acerque al octano de interés es necesaria la adición de 5%v/v de iso-octano y tolueno, respectivamente (RON=97,70). Las formulaciones, su estructura y el correspondiente octano RON, se exponen en la figura 8.

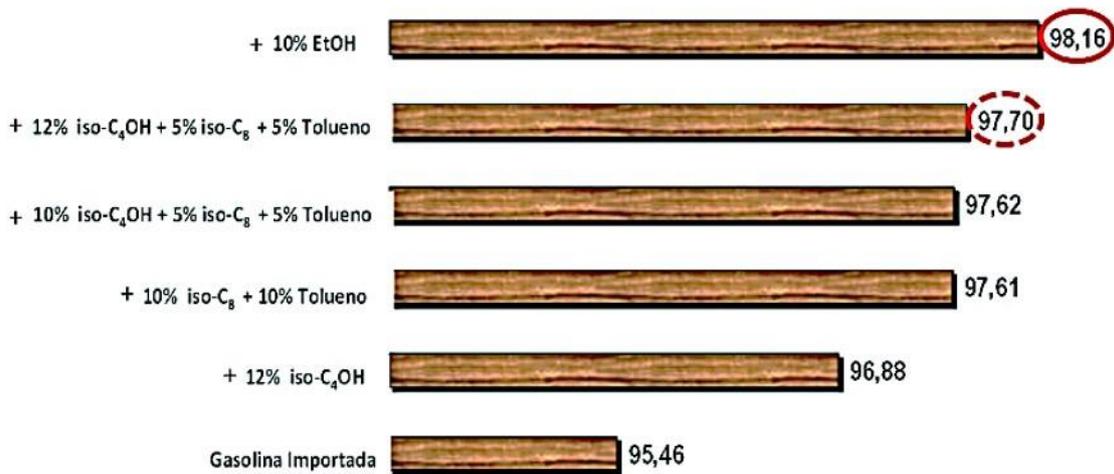


Fig.8. Efecto de componentes mejoradores de octano en el RON de la GI

Es posible observar la equivalencia relativa del efecto de hidrocarburos individuales de alta resistencia a la detonación y los alcoholes, en la capacidad antidetonante de la gasolina importada, en la comparación de los valores de RON que se muestran en la figura 9. Para un mismo resultado, la mayor concentración volumétrica de los primeros, en la muestra “M-11-G98”, suple la ausencia del alcohol presente en la muestra “M-10-G98”. De igual manera, la reducción del volumen de GI, en 2 % v/v, es compensado por el aumento de la concentración de iso-butanol hasta 12 % v/v y la adición de iso-C₈ y tolueno para alcanzar 97,70 RON (“M-12-G98”). Tal estructura de mezcla ofrece una alternativa plausible en el caso de que, por una parte, la mezcla con etanol no se ajuste a intereses de explotación de la gasolina en condiciones que no aseguren la imposibilidad de separación de fases; y por otra, porque se precise disponer de mayor volumen de GI para otros fines.

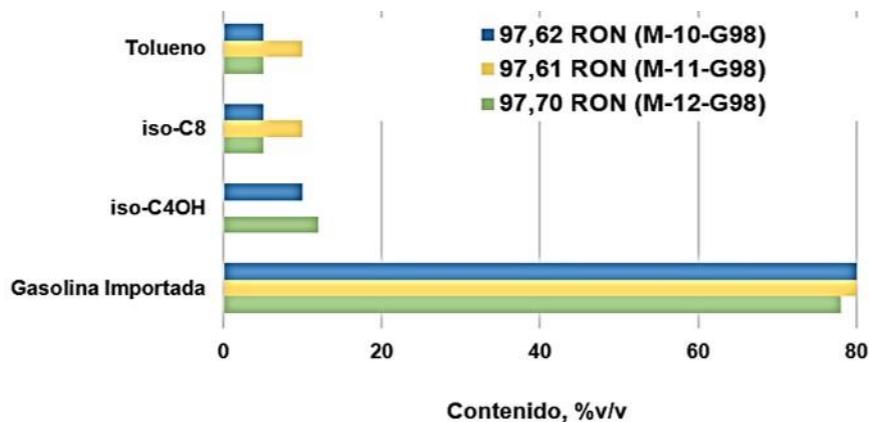


Fig.9. Influencia de alcoholes e hidrocarburos puros en el octano de la GI

Se estima que las formulaciones con 98 RON obtenidas alcancen los 88 MON, atendiendo a los altos valores de MON de los mejoradores de octano utilizados.

Fenómenos como los descritos son la razón fundamental por la cual los estudios de octano se realizan a partir de formulaciones controladas con conocimiento de las características de cada uno de sus componentes, en condiciones de ensayo normalizadas. Es un ejemplo, además, del comportamiento no lineal de este indicador de la capacidad antidetonante de las gasolinas.

Conclusiones

- 1. La formulación de gasolina con $RON \geq 98$, a partir de una mezcla base con todos los tipos de naftas de producción nacional, se obtuvo mediante la adición de 10%v/v de etanol anhidro, iso-C₈ y tolueno, respectivamente.**
- 2. Se obtuvo gasolina de alto octano G98 a partir de la sustitución de 10%v/v de gasolina importada por alcohol etílico anhidro.**

Referencias bibliográficas

1. ARPEM. *Picado y Sensor de Detonación* [en línea]. [Consultado 12 mayo 2014]. Disponible en: <http://www.arpem.com>
2. WAUQUIER, J. P. *El refino de petróleo*. Madrid: Edición en español: Fundación Repsol YPF, 2004. ISBN: 84-7978.
3. *Km77* [en línea]. [Consultado 7 enero 2011]. Disponible en: <http://www.km77.com>
4. Enciclopedia de Aviación y Astronáutica, tomo 3, página 2, según aparece en pág. web www.despegamos.com.
5. SHOREY, S. W., Lomas, D. A. and Keesom, W. H. Use FCC Feed Pretreating methods to Reduce Sulfur. *Hydrocarbon Processing*. USA: Hydrocarbon Publishing Company. 1999, **78**(11), pp. 43-51.
6. MATHPROINC. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. πMathPro. Inc. Informe elaborado para ICCT. 24 de octubre de 2011. Maryland. USA.

7. ASTM. *Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel*. ASTM D 2699. ASTM International, PA 19428-2959, United States: ASTM, 2016.
8. EPA 420-F-95-003, Fuel Economy Impact Analysis of RFG, EPA Office of Mobile Sources, USA, August 1995
9. HADDER, G. R. Ethanol Demand in United States Regional Production of Oxygenate- limited Gasoline, ORNL/TM-2000/165, USA, Agosto 2000.
10. ZABRIANSKY, E. I.; Zarubin, A.P. Capacidad Antidetonante y Volatilidad de combustibles motores. 1ra ed., Moscú: Ediciones Ximia, 1965, 212 p.
11. HAMILTON, B. *FAQ: Automotive Gasoline* [en línea]. Internet FAQ Archive. [Consultada 22 junio 2013]. Disponible en: <http://www.faqs.org>