

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MEZCLAS DE GASOLINA
CON EL 20% DE ETANOL (E20)**

**Trabajo elaborado dentro del
Convenio de Cooperación Tecnológica No. 001 de 2003**

**KAROL KRISTINA CÁCERES OLIVEROS
JENNIFER GALEZO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MEZCLAS DE GASOLINA
CON EL 20% DE ETANOL (E20)**

**KAROL KRISTINA CÁCERES OLIVEROS
JENNIFER GALEZO QUINTERO**

Tesis de grado para optar título de Ingeniero Químico

Director UIS

RAMIRO MARTÍNEZ REY Ph.D

Codirector ICP

GUSTAVO NAVAS GUZMÁN M.Sc

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007



HOJA DE RESUMEN
- Entregables de Convenios -

1. **ENTIDADE(S) Y NÚMERO DEL CONVENIO:** UIS – ECP – ICP No. 001 de 2003
2. **TÍTULO DEL PROYECTO DEL ICP QUE APOYA:** OPTIMIZACIÓN PRODUCCIÓN DE GASOLINAS (2330020003)
3. **CÓDIGO DEL PROYECTO:** 002 de 2006
4. **TÍTULO DE LA TESIS O INFORME TÉCNICO:** CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MEZCLAS DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL
5. **AUTOR(ES):** KAROL KRISTINA CÁCERES OLIVEROS - JENNIFER GALEZO QUINTERO
6. **DEPENDENCIA DEL ICP:** UIN___ UDE___ UST_X CGT___ OTRO___
7. **NIVEL DE CONFIDENCIALIDAD:**
Para consulta de: ECP___ ICP___ Coordinación___ Unidad_x_
Dirección___ Sin confidencialidad___
Autoriza la consulta: Líder del Proyecto_x_ Coordinador___
Jefe Unidad___ Director___
8. **TIEMPO QUE EL INFORME CONSERVARÁ LA CONFIDENCIALIDAD:**
Años_5___ Meses___
9. **TIPO DE DOCUMENTO:** Informe impreso___ CD-ROM___ Videocinta___
Anexos (Cantidad)___ Mapa (Cantidad)___ Planos (Cantidad)___
Registros de Pozo (Cantidad)___ Otros cuáles_____
10. **QUÉ RESULTADOS SE OBTUVIERON:** Se obtuvieron curvas de presión de vapor Reid e índice antidetonante de mezclas gasolina-etanol con las cuales es posible determinar el valor de estas propiedades en la gasolina base para que al adicionarle etanol anhidro se obtenga el valor deseado para la mezcla. Se determinó la tolerancia al agua de las mezclas gasolina-etanol a 0 y -10°C. Se evaluó el comportamiento de la gasolina extra y mezclas de ésta con etanol en concentraciones de 10 y 20% v/v.
11. **CÓMO SE APLICARON ESPECÍFICAMENTE AL PROYECTO DEL ICP (SI NO SE HAN APLICADO, CUÁNDO SE APLICARÍAN):** Se estableció el impacto para las refinerías de la entrada al mercado de combustibles de la

mezcla E20. Se recomendaron esquemas de producción de gasolina y de manejo de excedentes de octano.

12. **BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS AL PROYECTO DEL ICP (IMPACTO):** ECOPETROL podrá soportar técnica y económicamente cualquier solicitud de cambio de especificaciones de la gasolina colombiana, incluidas las gasolinas oxigenadas con etanol anhidro.
13. **PALABRAS CLAVES:** Debutanización, Presión de Vapor Reid, Índice Antidetonante, Emisiones, Gasolinas Oxigenadas, Etanol Anhidro, Tolerancia al agua.

Mis esfuerzos y sus
frutos están dedicados
por siempre a
Ustedes:

A Dios que me
bendice cada día.

A la luz que
me guía y me cuida
desde el cielo,
la luz de mi papá.

A mi mamá y mis
hermanos que me
entregan la mayor
enseñanza de todas.

A mi Fernando que me
enseña siempre que el
amor existe de mil
formas diferentes.

Karol Kristina

A Dios que me llena
de bendiciones.

A mi madre, ser
maravilloso, por su
comprensión y apoyo
incondicional.

A mi padre, por sus
consejos y apoyo.

A Paúl, por su amor
incondicional y su
compañía.

A Sofía, el ángel de mi
vida y motor de mi
existencia.

Jennifer

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro mayor agradecimiento y aprecio a:

José Luis Sarmiento Vesga, Líder del Laboratorio de Motores ICP, por su constante apoyo, por transmitirnos su experiencia y por brindarnos su amistad.

Ramiro Martínez Rey, Ph.D y Gustavo Navas Guzmán M.Sc, Director y Codirector de esta Investigación, por esta oportunidad, por su tiempo, por sus indicaciones y por todo lo que nos permitieron aprender de Ustedes.

ECOPETROL por financiar la ejecución de la presente investigación.

Jaime Torres M.Sc, Profesional de Proyectos y Daniel Molina M.Sc, Docente UIS, por sus valiosos aportes y por enseñarnos el valor del conocimiento.

Freddy Melo, Analista de Octanos Laboratorio de Motores, Carlos Picón, Personal de Apoyo Plantas Piloto, Fabio Ochoa, Operador Banco de Potencia Laboratorio de Motores, Jaime Yamid Lamus, Químico ICP, Francia Carreño, Soporte HSEQ, por su colaboración, su compañía y su amistad.

Maria Eugenia Niño, Interventora Laboratorio de Crudos, Roberto Quintero, Analista Laboratorio de Crudos, Ferney Barreto, Personal de Apoyo Plantas Piloto, Alexis Bueno, Químico ICP, Orlando Amado, Analista Laboratorio de Crudos, Javier Remolina, Hersilia Patiño, Analista Laboratorio de Crudos, por su disposición, enseñanzas y oportuna colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 REGULACIÓN DE LAS MEZCLAS GASOLINA-ETANOL	2
1.2 PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LA MEZCLA GASOLINA-ETANOL	3
1.2.1 Presión de Vapor Reid (RVP).	3
1.2.2 Destilación.	3
1.2.3 Índice de Cierre de Vapor.....	4
1.2.4 Índice Antidetonante (IAD).	4
1.3 TOLERANCIA AL AGUA EN LA MEZCLA	5
1.4 EMISIONES Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN VEHICULOS.....	5
1.4.1 Motor de Combustión Interna	5
1.4.2 Relación Estequiométrica Aire Combustible (A/C).	6
1.4.3 Emisiones de Exhosto.	7
1.4.4 Torque y Potencia en Vehículos.....	8
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	10
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS GASOLINAS BASE, ETANOL ANHIDRO, NAFTA VIRGEN Y ALQUILATO DE ALTO OCTANO	10
2.2 DEBUTANIZACIÓN DE LAS GASOLINAS BASE Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS GASOLINA-ETANOL AL 0%, 15%, 20%, 25% Y 30%.....	11
2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE VAPOR REID	12
2.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ANTIDETONANTE.....	12
2.5 DETERMINACIÓN DEL MÁXIMO CONTENIDO DE AGUA DE LAS MEZCLAS GASOLINA ETANOL.....	14
2.6 DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE EXHOSTO Y COMPORTAMIENTO EN AUTOMÓVILES CON MEZCLAS DE GASOLINA EXTRA - ETANOL ANHIDRO EN CONCENTRACIONES DE 0%, 10% Y 20% v/v.	14
2.7 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL	16
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	17
3.1 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE VAPOR REID DE LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.....	17
3.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ANTIDETONANTE DE LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.....	20

3.3 DETERMINACIÓN DE LA TOLERANCIA DE AGUA EN LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.....	23
3.4 DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE EXHOSTO Y COMPORTAMIENTO EN AUTOMÓVILES DE MEZCLAS DE GASOLINA EXTRA CON ETANOL ANHIDRO EN CONCENTRACIONES DE 0%, 10% Y 20% v/v.	24
3.4.1 Determinación de las Emisiones.	24
3.4.2 Determinación del Consumo de Combustible.....	31
3.4.3 Determinación del Torque y la Potencia de los Automóviles con la Gasolina Base y Gasolina Reformulada.	
3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL.....	33
4. CONCLUSIONES.....	35
5. RECOMENDACIONES	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Análisis de la Caracterización de las Corrientes	10
Tabla 2: Caracterización Gasolina Regular GCB, Gasolina Extra GCB, Etanol Anhidro, Nafta Virgen y Alquilato de Alto Octano	11
Tabla 3: RON Gasolinas Base Debutanizadas	13
Tabla 4: RBN de las Gasolinas Base GCB	13
Tabla 5: IAD Mezclas Gasolina Regular GCB y Gasolina Extra GCB con Nafta Virgen y Alquilato de Alto Octano.	14
Tabla 6: Caracterización mezclas Gasolina Extra con Etanol utilizadas en pruebas en vehículos	15
Tabla 7: Presión de Vapor Reid de la Gasolina Regular GCB y de las mezclas con Etanol Anhidro	17
Tabla 8: Presión de Vapor Reid de la Gasolina Extra GCB y de las mezclas con Etanol Anhidro	17
Tabla 9: IAD de las Mezclas de Gasolina Regular GCB con Etanol Anhidro	20
Tabla 10: IAD de las Mezclas de Gasolina Extra GCB con Etanol Anhidro	21
Tabla 11: Máxima Cantidad de Agua que toleran las Mezclas de Gasolina Regular y Extra GCB con Etanol Anhidro	23
Tabla 12: Emisiones Vehiculares de HC, NO _x , CO, CO ₂ , antes del Convertidor	25
Tabla 13: Emisiones Vehiculares de HC, NO _x , CO, CO ₂ , después del Convertidor	25
Tabla 14: Emisiones Vehiculares de aldehídos antes del convertidor catalítico [g/km]	29
Tabla 15: Emisiones Vehiculares de aldehídos después del convertidor catalítico [g/km]	29

Tabla 16: Efecto del Convertidor Catalítico en la reducción de las Emisiones Vehiculares Anhidro al 10% y 20% v/v [km/gal]	31
Tabla 17: Rendimiento de la Gasolina Extra GCB y mezclas de Gasolina Extra GCB con Etanol	31
Tabla 18: Torque y potencia de los vehículos utilizando gasolina extra con etanol anhidro en concentraciones de 0%, 10% y 20% v/v	33
Tabla19: Propiedades fisicoquímicas de las mezclas de gasolina regular y gasolina extra con 20% v/v de etanol anhidro	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva típica de destilación ASTM D86	3
Figura 2: Ciclo del motor de Otto de combustión interna	6
Figura 3: Efecto relación aire-combustible en las emisiones de CO, HC, NOx	7
Figura 4: Curvas de torque y potencia	9
Figura 5: Montaje para la debutanización de gasolina	12
Figura 6: Incidencia de la adición del etanol en la presión de vapor Reid de la gasolina regular GCB	18
Figura 7: Incidencia de la adición del etanol en la presión de vapor Reid de la gasolina extra GCB	18
Figura 8: Efecto en la RVP de la concentración de oxigenados en la mezcla	19
Figura 9: Incidencia de la adición de etanol anhidro en el IAD de la gasolina regular GCB	21
Figura 10: Incidencia de la adición de etanol anhidro en el IAD de la gasolina extra GCB	22
Figura 11: Tolerancia al agua de las mezclas de gasolinas base con etanol a 0°C y -10°C	23
Figura 12: Contenido de HC en las emisiones vehiculares	26
Figura 13: Contenido de NOx en las emisiones vehiculares	26
Figura 14: Contenido de CO en las emisiones vehiculares	27
Figura 15: Contenido de CO ₂ en las emisiones vehiculares	27
Figura 16: Contenido de carbonilos en las emisiones vehiculares	30

Figura 17: Rendimiento de la gasolina extra GCB y mezclas con 10% y 20% v/v de etanol anhidro

32

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Requisitos de calidad del etanol anhidro combustible utilizado como componente oxigenante de gasolinas	40
Anexo B. Requisitos de calidad de las gasolinas básicas y Requisitos de calidad de las gasolinas oxigenadas con etanol anhidro combustible para uso como combustible de motores de encendido por chispa	41
Anexo D. Motor CFR Wakesha	43
Anexo E. Manual de manejo para el debutanizador de gasolinas	44
Anexo F. Medidor semiautomático de presión de vapor Herzog Lauda	50
Anexo G. RBN	51
Anexo H. Dependencia de la solubilidad del agua en la mezcla gasolina – etanol con la temperatura	52
Anexos I: Chasis Dinamométrico.	53

LISTA DE SIGLAS

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
E10	Gasolina con 10% v/v de etanol
E20	Gasolina con 20% v/v de etanol
GE GCB	Gasolina Extra Gerencia Complejo de Barrancabermeja
GR GCB	Gasolina Regular Gerencia Complejo de Barrancabermeja
HC	Hidrocarburos
IAD	Índice Antidetonante: (RON+MON)/2
ICV	Índice de Cierre de Vapor
MON	Número de Octano Motor
NO _x	Óxidos de nitrógeno
PIANO	Parafinas, Isoparafinas, Aromáticos, Nafténicos, Olefinas
PFE	Punto Final de Ebullición
PIE	Punto Inicial de Ebullición.
RBN _{CORRIENTE}	RBN de la corriente de mezcla (Alquilato de alto octano, Nafta Virgen)
RBN _{GASOLINA}	RBN para la gasolina base
RBN _{MEZCLA}	RBN de la mezcla a obtener
RON	Número de Octano Research o de investigación
rpm	Revoluciones por minuto
RVP	Presión de Vapor Reid
% Vol _{CORRIENTE}	Porcentaje en volumen de la corriente (Alquilato de alto octano, Nafta Virgen)
% Vol _{GASOLINA}	Porcentaje en volumen de la gasolina base
X _{GASOLINA}	Fracción volumétrica de la gasolina base en la mezcla.

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE MEZCLAS DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL (E20)*.

AUTORES: CÁCERES, Oliveros Karol Kristina y GALEZO, Quintero Jennifer** .

PALABRAS CLAVES: RVP, IAD, mezcla, etanol, emisiones.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

En el presente trabajo se determinaron las propiedades fisicoquímicas que deben tener las gasolinas regular y extra de la Gerencia Complejo Barrancabermeja para que al adicionarle el 20% v/v de etanol anhidro cumplan con las especificaciones establecidas en la Resolución 1180 del 21 de Julio de 2006. También se evaluó el efecto de la adición de etanol en el comportamiento de los vehículos realizando pruebas de torque, potencia, consumo de combustible y emisiones de exhosto, utilizando gasolina extra y mezclas de ésta con 10% y 20% v/v de etanol.

El ajuste de la presión de vapor Reid se realizó mediante un proceso de despojamiento de butanos; el ajuste del índice antidetonante se llevó a cabo con la adición de nafta virgen. Se determinó la tolerancia al agua de las mezclas gasolina base-etanol a temperaturas de -10 y 0°C. Las pruebas para evaluar el comportamiento de los vehículos utilizando gasolina extra y mezclas de ésta con 10% y 20% v/v de etanol anhidro, se realizaron en el chasis dinamométrico del laboratorio de motores del ICP.

Con base en los estudios realizados se puede concluir que la adición del 20% v/v de etanol ocasiona un incremento de 1 psi aproximadamente en la presión de vapor Reid de las gasolinas base; el índice antidetonante de las gasolinas regular y extra debe ser de 72 y 84 respectivamente, para que con la adición del 20% v/v de etanol alcance los valores establecidos por la ley; para las mezclas con 20% v/v de etanol, el convertidor catalítico reduce las emisiones de acetaldehído alrededor del 50% y las de formaldehído en más del 90% y en una cuantía significativa las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería Química. Ramiro Martínez Rey Ph.D

TITLE: CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF BLENDS OF GASOLINE WITH 20% v/v OF ETHANOL (E20)*.

AUTHORS: CÁCERES, Oliveros Karol Kristina y GALEZO, Quintero Jennifer** .

KEYWORDS: RVP, IAD, blend, ethanol, gasoline.

ABSTRACT

Physicochemical properties of the regular and premium gasoline produced in Barrancabermeja's Industrial Complex, are shown, for to add 20vol% of anhydrous ethanol to comply whit the quality standards stipulated in the Resolution No 1180 of July 21 of 2006 for Colombian fuels. The evaluation of the effect of anhydrous ethanol in the functioning of vehicles was made determining torque, power, consumption of fuel and exhaust gas CO, CO₂, NO_x, hydrocarbon and aldehydes with premium gasoline and blends of this gasoline with 10vol% and 20vol% of anhydrous ethanol.

The adjustment of Reid vapor pressure (RVP) was made removing light-vapors of the fuels base; the adjustment of antiknock index (IAD), were made blending fuels base with straight naphtha. Water tolerance for the blends gasoline-ethanol was estimated at 263 and 273 K. Tests to evaluate the functioning of vehicles were made in the mustang dynamometer of ICP's motors laboratory.

Studies show that the addition of 20vol% of anhydrous ethanol increase 1 psig Reid Vapor Pressure of gasoline base of 7psig; the antiknock index of regular gasoline must be 72 and premium gasoline 84 to add 20vol% of ethanol anhydrous reach values required for Colombian fuels; water tolerance of the blends gasoline-ethanol is increased with temperature and ethanol content.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Química. Ramiro Martínez Rey Ph.D

INTRODUCCIÓN

La utilización de combustibles que reemplacen los productos derivados del petróleo se ha convertido en un reto para nuestro país, el cual se ha iniciado en la era de los biocombustibles implementando el uso de mezclas gasolina-etanol 90-10 v/v con el fin de mejorar la calidad del aire y satisfacer la demanda de combustibles. El etanol se ha convertido en el oxigenado más viable para mezclar con la gasolina debido a la disponibilidad de materia prima con que cuenta nuestro país para su producción.

La adición de compuestos oxigenados a las gasolinas reduce las emisiones vehiculares de gases tóxicos como el monóxido de carbono: CO y los hidrocarburos totales: THC, los cuales son nocivos para la salud humana; además, se obtiene un incremento significativo en el octanaje de las gasolinas, lo cual mejora la potencia y el funcionamiento de los vehículos.

El presente estudio se realizó con el fin de establecer la caracterización fisicoquímica de la mezcla óptima de gasolina con el 20% v/v de etanol para cumplir con las especificaciones de ley y se determinó el efecto del etanol en las emisiones de los gases de exhosto. Esta mezcla se prepara con el fin de disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera y para solventar las deficiencias de hidrocarburos, que paulatinamente evidencian síntomas desabastecimiento de petróleo, lo que pone al país en expectativas de convertirse en importador del bien.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 REGULACIÓN DE LAS MEZCLAS GASOLINA-ETANOL

La Ley 1083 de 31 de Julio de 2006¹ dice: “a partir del 1 de Enero del año 2010, toda reposición que se haga de vehículos vinculados a la prestación del servicio público de transporte de pasajeros, deberá hacerse por vehículos que funcionen con combustibles limpios”, de acuerdo con esto la Resolución No. 180158 del 02 de Febrero de 2007² determina que “se consideran como combustibles limpios, aquellos que al ser usados en sistemas de combustión, como los motores vehiculares, generan emisiones de contaminantes menores a los límites máximos que establezca la Autoridad Competente”. Hacen parte de estos combustibles limpios³ las gasolinas oxigenadas y el etanol anhidro desnaturalizado definidos por la misma Resolución de la siguiente forma:

Alcohol Carburante o Etanol Anhidro Desnaturalizado: es un compuesto orgánico líquido, de naturaleza diferente a los hidrocarburos, que tiene en su molécula un grupo hidroxilo (OH) enlazado a un átomo de carbono, que puede producirse de los vegetales que contienen sacarosa (remolacha, caña de azúcar, etc.) o almidón (trigo, maíz, etc.) y al cual se le agrega una sustancia desnaturalizante para convertirlo en no potable. Adicionalmente debe cumplir con los requisitos de calidad señalados por los Ministerios de Minas y Energía y Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a través de la resolución 1565 de 2004 (Anexo A), o las normas que la modifiquen, adicionen o deroguen.

Gasolina Reformulada: Es una gasolina cuya composición incluye derivados oxigenados agregados y presenta una menor emisión de monóxido de carbono. La nueva reformulación de las gasolinas incluye la limitación de hidrocarburos aromáticos, de hidrocarburos olefínicos, de benceno y de azufre (máximo 50 ppm)⁴.

Las especificaciones de las gasolinas base y de las mezclas gasolina-etanol están reguladas por la Resolución No. 1180 del 21 de Junio de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Minas y Energía. (Anexo B).

¹ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA.

² COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA.

³ *Ibid.*, p. 3

⁴ *Ibid.*, p. 2

La adición del 20% en volumen de etanol anhidro a las gasolinas base implica el ajuste de propiedades como la presión de vapor Reid, el índice antidetonante y la tolerancia al agua, de acuerdo con los límites permitidos en la Resolución 1180 de 2006, tal como se hizo con la adición del 10% en volumen a la gasolina base, la cual está actualmente disponible en gran parte del territorio nacional. Al aumentar el porcentaje de etanol anhidro en la mezcla se disminuye la demanda de derivados del petróleo, que es un recurso no renovable, y se implementa el uso de combustibles limpios que emiten menos compuestos tóxicos al ambiente.

1.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LA MEZCLA GASOLINA-ETANOL

1.2.1 Presión de Vapor Reid (RVP). Es una medida de la tendencia de un hidrocarburo líquido a volatilizarse. Esta prueba se desarrolló para determinar la presión de vapor de productos derivados del petróleo al evaporarse a 37.8°C, la RVP se determina mediante las normas ASTM D-323 para productos derivados del petróleo y ASTM D-4953 para gasolinas oxigenadas.

El valor óptimo de esta propiedad depende de las condiciones climáticas y del tipo de vehículo, cuando la RVP es muy alta aumentan las emisiones evaporativas y retarda el encendido en caliente del vehículo. Cuando la RVP es muy baja afecta la facilidad de arranque en frío.

1.2.2 Destilación. La volatilidad es la propiedad de un combustible para evaporarse y se representa mediante la curva de destilación como la mostrada en la Figura 1.

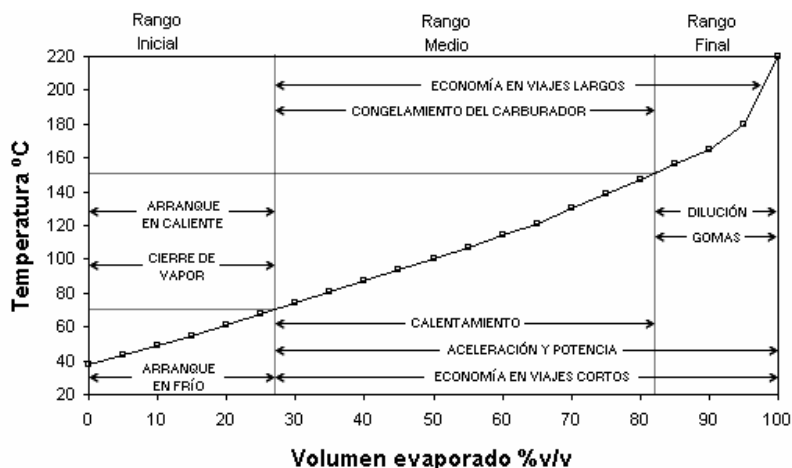


Figura 1: Curva típica de destilación ASTM D86

La curva de destilación de los hidrocarburos puros son líneas rectas, ya que éstos evaporan a una temperatura definida, en cambio los combustibles, por tratarse de mezclas, tienen una curva en forma de S. Esta propiedad tiene importancia en el comportamiento del motor en el arranque y la aceleración. Para facilitar el arranque es conveniente que la parte de la gasolina evapore a temperatura

ambiente, es decir, que el trozo de la curva de destilación relativo al porcentaje vaporizado entre el 0 y 10% se verifique a una temperatura relativamente baja. También, una vaporización a baja temperatura favorece la distribución de combustibles entre los cilindros y permite una mejor aceleración.

Si las temperaturas de destilación son demasiado bajas, la gasolina tiende a formar burbujas de vapor en los conductos que llevan al carburador y en el carburador mismo que pueden interrumpir el flujo de combustible⁵, además, si el PFE es muy alto se pueden condensar gotas de los componentes menos volátiles del combustible en las paredes de los cilindros con lo que el aceite lubricante se diluye excesivamente y disminuye sus cualidades.

1.2.3 Índice de Cierre de Vapor. Ocurre cuando una gasolina muy volátil sometida a temperaturas elevadas o presiones bajas, se evapora rápidamente formando burbujas en puntos críticos del sistema de suministro de combustible que ocasionarán fallas en el funcionamiento del motor como dificultad de arranque en caliente, marcha irregular, ralentí inestable en caliente, pérdida de eficiencia en la aceleración, pérdida de potencia a alta velocidad y hasta parada del motor. Se calcula con la siguiente ecuación⁶:

$$\text{ICV} = 1.13 \times (\% \text{ volumen evaporado a } 70^\circ\text{C}) + \text{RVP} [\text{kPa}]$$

1.2.4 Índice Antidetonante (IAD). El índice antidetonante se expresa como el promedio entre el Número de Octano Research (RON) y el Número de Octano Motor (MON) y es una medida de la capacidad del combustible de permitir ser comprimido sin encenderse en el motor. El fenómeno de ignición de la mezcla aire-combustible antes de ser alcanzado por el frente de llama se conoce como golpeteo. El resultado de este proceso es un aumento de la presión y la temperatura, seguido de vibraciones de la masa gaseosa que golpean la cabeza del pistón y ocasionan una pérdida de trabajo.

$$\text{IAD} = \frac{\text{RON} + \text{MON}}{2}$$

El número de octano se determina utilizando un motor CFR carburado de relación de compresión variable, de cuatro tiempos, cilindro sencillo estandarizado operado de acuerdo con un paquete de condiciones de operación definido (Anexo C). La escala del número octano es definida por la composición volumétrica de las mezclas de combustibles de referencia primarios (isooctano al cual se le asigna un índice de 100 y n-heptano un índice de 0). La intensidad de golpeteo para el combustible de muestra se compara con aquella de una o más mezclas de combustibles de referencia primarios. El RON y el MON se determinan por

⁵ www.escharlamotor.org/info/combustibles/

⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 1180 del 21 de Junio de 2006.

interpolación lineal entre mezclas combustibles de Número de octano conocido. El análisis RON se realiza en condiciones estándar de operación, según la norma ASTM D-2699, e indica una relación del comportamiento de la gasolina en ralentí, el motor CFR trabaja a 600 rpm y con una temperatura del aire de admisión que depende de la presión barométrica en el momento de la prueba. (Método de ciudad). El análisis MON se realiza en condiciones severas de operación, según la norma ASTM D-2700, representa el comportamiento de la gasolina en condiciones más exigentes de trabajo, simula la condición de aceleración del vehículo, por lo tanto, esta condición es más real. El motor estandarizado trabaja a 900 rpm y a una temperatura de mezcla aire-combustible de admisión de 300 °F. (Método de carretera).

1.3 TOLERANCIA AL AGUA EN LA MEZCLA

La termodinámica ofrece un criterio que debe satisfacer cualquier fase líquida si va a ser estable respecto a la alternativa que se divida en dos fases líquidas. Este criterio establece que la energía libre de Gibbs de un estado de equilibrio debe tener el mínimo valor posible respecto a todos los cambios posibles a la Temperatura (T) y Presión (P) dadas. Cuando se tiene una mezcla de dos líquidos a T y P constantes, la energía libre de Gibbs total debe disminuir, porque el estado de mezcla debe ser el de la más baja energía respecto al estado sin mezclar⁷.

Existen muchos sistemas que si se mezclan para formar una sola fase líquida no satisfacen el criterio de estabilidad, estos sistemas se dividen en dos fases líquidas. La desviación del comportamiento de la solución respecto a la idealidad es muy grande y constituye el resultado de una situación en la que las fuerzas de atracción entre moléculas parecidas son muy poderosas respecto a las de las moléculas diferentes. En el límite de un sistema inmiscible, se puede suponer que los componentes son completamente incompatibles⁸.

En las mezclas gasolina base-etanol-agua las fuerzas de atracción entre el etanol y el agua son más fuertes que las existentes entre el etanol y los compuestos aromáticos de la gasolina, es por esto que la cantidad de agua limita la estabilidad del sistema de mezcla y una vez separadas las fases, éstas no vuelven a homogenizarse a la misma temperatura de separación.

1.4 EMISIONES Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA EN VEHICULOS

1.4.1 Motor de Combustión Interna

El motor de combustión interna más común, debido a su uso en automóviles, es el

⁷ SMITH, J.M., VAN NESS, H.C. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. McGraw-Hill: México 1988. p. 376

⁸ Ibid., p. 381

de ciclo Otto. Este ciclo consta de cuatro recorridos, como se muestra en la Figura 2, se inicia con el recorrido de admisión a presión esencialmente constante, durante el cual un pistón en movimiento hacia afuera arrastra una mezcla aire-combustible hacia adentro de un cilindro, línea 0-1, durante el segundo recorrido 1-2-3 todas las válvulas se cierran y se comprime la mezcla aire-combustible, aproximadamente de manera adiabática a lo largo del segmento de la línea 1-2; enseguida la mezcla se enciende y sucede la combustión tan rápidamente que el volumen permanece casi constante mientras que la presión se incrementa a lo largo del segmento de la línea 2-3. Es durante el tercer recorrido 3-4-1 que se produce trabajo. Los productos de la combustión a temperatura y presión altas se expanden, aproximadamente de manera adiabática a lo largo del segmento de la línea 3-4; a continuación se abre la válvula de descarga y la presión baja rápidamente a volumen casi constante a lo largo del segmento de la línea 4-1. Durante el cuarto recorrido o descarga línea 1-0, el pistón empuja los gases de la combustión restante (excepto para el contenido del volumen del espacio muerto) del cilindro.

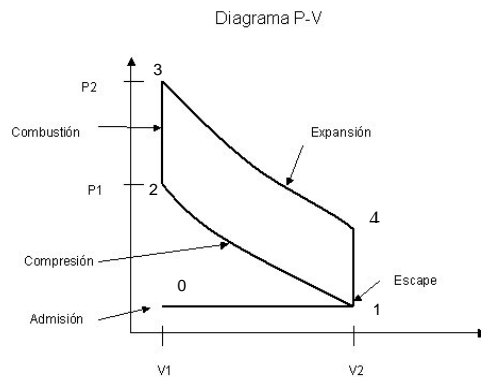
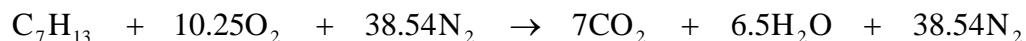


Figura 2: Ciclo del motor de Otto de combustión interna

El volumen que se representa en la Figura 2 es el volumen total de gas contenido en el motor entre el pistón y el fondo del cilindro⁹.

1.4.2 Relación Estequiométrica Aire Combustible (A/C). Para estimar la cantidad teórica de aire requerida para quemar completamente el combustible se utiliza la reacción estequiométrica de combustión¹⁰ empleando un combustible teórico para representar la mezcla real de los hidrocarburos.

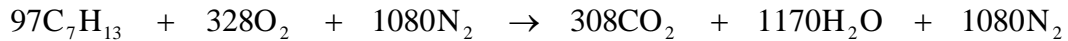
Sobre una base molar:



Y sobre una base de masa en kg:

⁹ SMITH, J.M., VAN NESS, H.C y ABBOTT, M.M. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. McGraw-Hill: México 2001. p. 321

¹⁰ WARK, KENNET y WARNER, CECIL F. Contaminación del Aire, Origen y Control. p. 338.



La relación aire-combustible (A/C) es la relación de la masa de aire requerida por masa unitaria del combustible para que la combustión sea completa. Cuando se suministra más aire del requerido o existe un exceso de aire la mezcla se conoce como mezcla pobre, por el contrario cuando la masa de aire suministrado es menor que la requerida se dice que la mezcla es rica (un exceso de combustible).

$$(A/C) = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} = \frac{328 + 1080}{97} = 14.5$$

1.4.3 Emisiones de Exhosto. Las emisiones de gases en el exhosto son el resultado de la combustión incompleta de los hidrocarburos presentes en la gasolina, ocasionadas por factores como la presión y la temperatura existentes en el momento considerado y el tiempo de residencia insuficiente para la total combustión de algunas de las especies de hidrocarburos. El monóxido de carbono, como los hidrocarburos no quemados, es el resultado de la combustión incompleta del combustible; el aumento de los hidrocarburos no consumidos se atribuye a lo que se conoce como falla de encendido (la mezcla es tan pobre que la combustión no siempre se mantiene por la chispa de encendido); los óxidos de nitrógeno se forman básicamente por reacciones entre el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos admitidos al motor.

Como se observa en la Figura 3, no se pueden obtener simultáneamente las cantidades mínimas de HC, NO_x y CO efectuando solamente cambios en la relación aire-combustible.

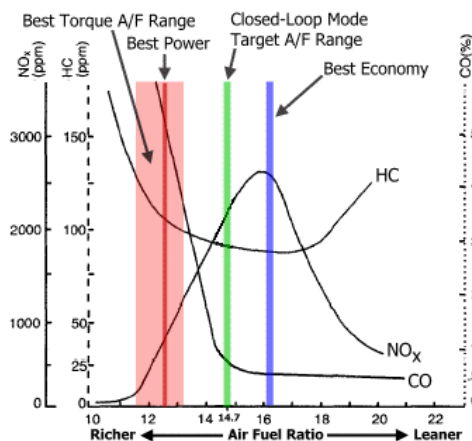


Figura 3: Efecto relación aire-combustible en las emisiones de CO, HC, NO_x

Un medio para reducir las emisiones de los gases de exhosto es el convertidor catalítico, el más utilizado es el de tres vías, el cual es un reactor instalado luego del múltiple de escape que minimiza las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos totales y óxidos de nitrógeno. Se compone de una carcasa de acero inoxidable que contiene en su interior al catalizador soportado por una colmena cerámica. Esta colmena está formada por millares de celdas por donde pasan los gases de escape. El catalizador de reducción es la primera etapa del convertidor catalítico, utiliza platino y rodio para disminuir las emisiones de NOx, cuando una molécula de monóxido o dióxido de nitrógeno entra en contacto con el catalizador, éste atrapa el átomo de nitrógeno y libera el oxígeno, posteriormente el átomo de nitrógeno se une con otro átomo de nitrógeno y se libera, es decir, descompone los óxidos de nitrógeno en oxígeno y nitrógeno que son los componentes del aire y por lo tanto no son contaminantes. El catalizador de oxidación es la segunda etapa del convertidor catalítico, este catalizador de platino y paladio toma los hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) que salen del motor y los hace reaccionar con el oxígeno que también viene del motor generando dióxido de carbono (CO₂).

1.4.4 Torque y Potencia en Vehículos¹¹. *El torque* se explica como la fuerza aplicada sobre una palanca que sirve para hacer girar un eje. Científicamente, el torque es la fuerza aplicada que se multiplica por el largo de la palanca. La fuerza se mide en Newtons y la distancia se mide en metros, por lo tanto, las unidades del torque son N·m:

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$$

En las cámaras de combustión del motor a explosión se genera presión por la ignición del combustible, la fuerza de tal presión desplaza los pistones hacia abajo, de tal modo que se mueve el cigüeñal y éste hace girar el eje del motor en el extremo del cigüeñal para transmitir el movimiento a la transmisión y se produce el movimiento en el vehículo.

Desde el punto de vista del conductor, el torque es el responsable de empujar el vehículo o bien de acelerarlo. El torque es esa sensación en el respaldo al pisar el acelerador. El torque máximo se alcanza en aquel punto del tacómetro en donde la sensación de aceleración es máxima. Si usted quiere remolcar una carga o subir una cuesta, se recomienda mantener el motor en su régimen de giro de máximo torque.

¹¹ www.lubrimax.com
www.tunning.deautomoviles.com.ar

La *potencia* es la rapidez con que se efectúa un trabajo, es decir, el trabajo por unidad de tiempo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

El trabajo se define como fuerza por distancia, la fuerza medida en Newton y la distancia medida en metros, que son las mismas unidades del torque. La velocidad rotacional de un motor se mide en revoluciones por minuto, rpm, con la unidad 1/min. Al multiplicar el torque por las rpm del motor se obtiene la potencia. La potencia no está ligada directamente con la aceleración del vehículo, más bien, es una medida de cuánto dura la aceleración o esa sensación de empuje.

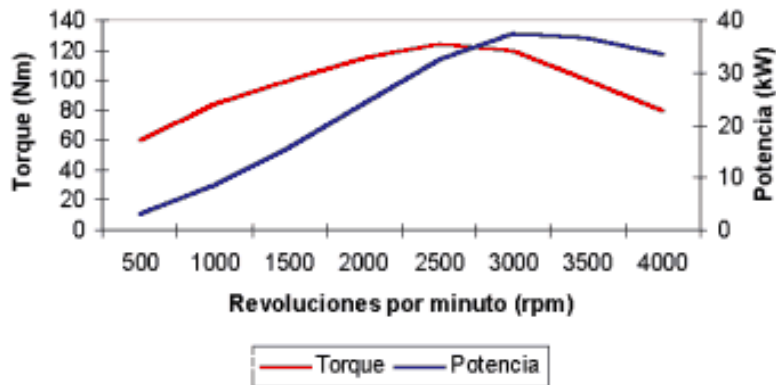


Figura 4: Curvas de torque y potencia

Como se muestra en la Figura 4 generalmente se arranca con un torque bajo, aumenta hasta alcanzar un valor máximo y luego decae. Una vez que se ha alcanzado el torque máximo, el vehículo empieza a acelerar contundentemente hasta cierto punto en el tacómetro en donde el vehículo ya no acelera con la misma intensidad. El punto en el tacómetro hasta el cual el vehículo logra acelerar contundentemente es el de máxima potencia.

Cada motor se diseña según el uso que se le pretende dar. Si se requiere un vehículo de carga con un motor fuerte o bien un vehículo que responda bien en ciudad a bajas rpm, se deberá buscar un alto torque aunque la potencia no sea muy alta. Por el contrario, si se requiere un vehículo con capacidad de ser revolucionado para responder en autopista a altas velocidades, se deberá buscar potencia aunque el torque no sea muy alto.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las etapas en las cuales se realizó el estudio de las mezclas de gasolina con el 20% de etanol se describen a continuación:

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS GASOLINAS BASE, ETANOL ANHIDRO, NAFTA VIRGEN Y ALQUILATO DE ALTO OCTANO

Para este estudio se utilizaron las gasolinas que se distribuyen en Colombia, es decir, las gasolinas regular y extra, que en el transcurso de este libro también se conocerán como gasolinas base. Sólo se utilizaron las gasolinas provenientes de la refinería de Barrancabermeja (GCB) debido a que las gasolinas de la refinería de Cartagena (GRC) no se encontraban disponibles. El etanol utilizado es de tipo anhidro y fue obtenido del Ingenio Providencia¹². Las gasolinas y el etanol anhidro fueron almacenadas a una temperatura de 4°C para evitar la pérdida de volátiles por evaporación. A los componentes de la mezcla y las corrientes se le realizaron las siguientes pruebas:

Tabla 1: Análisis de la caracterización de las corrientes

ANÁLISIS	NORMA
Densidad y Gravedad API	ASTM D-4052
Índice de Refracción	ASTM D-1218
Presión de Vapor Reid	ASTM D-323 y ASTM D-4953
Porcentaje de Azufre	ASTM D-4294
Corrosión en lámina de cobre	ASTM D-130
Número de Octano Research	ASTM D-2699
Número de Octano Motor	ASTM D-2700
Destilación Atmosférica	ASTM D-86
Herrumbre	ASTM D-655
Cromatografía Gaseosa PIANO	ASTM D-6729

La caracterización de las corrientes se realizó para conocer sus propiedades físico-químicas y verificar que éstas se encontraran dentro de las especificaciones de la resolución 1180 de 2006. Estos resultados, que se muestran en la Tabla 2, se utilizaron como base de partida en el ajuste de las propiedades de las mezclas gasolina-etanol.

¹² www.ingprovidencia.com

Tabla 2: Caracterización gasolina regular GCB, gasolina extra GCB, etanol anhidro, nafta virgen y alquilato de alto octano

ANÁLISIS	ASTM	UNIDADES	ETANOL	GR GCB	GE GCB	NAFTA VIRGEN	ALQUILATO DE ALTO OCTANO
Densidad (15 °C)	D-4052	g/ml	0.7943	0.7402	0.7450	0.7352	0.6984
Gravedad API (15.6°C)	D-4052		46.6	59.6	58.4	60.9	71.1
Índice de Refracción (20°C)	D-1218		13.617	14.181	14.230	14.110	13.930
Contenido de Agua	D-6304	ppm		100	130	60	80
% v/v Etanol	D-6729	%	99.5	-	-	-	-
RVP (37.8°C)	D-323	psi	2.33	7.26	8.14	8.60	7.36
%p/p de Azufre	D-4294	%	<0.015	0.045	0.074	0.018	<0.015
Corrosión en Lámina de Cobre (50°C)	D-130	Clasificación	1a	1a	1a	1a	1a
RON	D-2699		107,60	85,67	93,53	65,86	96,9
MON	D-2700		89,40	78,56	81,63	66,4	95,63
IAD*			98,50	82,12	87,58	66,13	96,27
ICV*		kPa	-	76.55	89.12	72.50	63.40
Herrumbre	D-665	Clasificación					
Calor de Combustión	D-240	MJ/kg	29.054	46.175	45.947	46.235	47.821
Destilación							
PIE	D-86	°C	77.1	39.0	38.0	36.6	38.5
10%		°C	77.9	58.3	54.5	67.2	67.9
50%		°C	78.0	100.4	97.5	112.0	103.1
90%		°C	78.0	167.9	170.5	152.0	117.8
PFE		°C	81.1	208.2	206.4	184.9	200.1
Residuo		ml	0.2	0.5	0.8	0.7	1.2
Cromatografía (PIANO)							
Parafinas		% v/v	0.029	13.428	6.200	21.977	7.101
I-Parafinas		% v/v	0.032	32.548	27.367	35.115	90.010
Aromáticos		% v/v	0.022	20.010	22.474	11.379	1.627
Naftenos		% v/v	0.019	13.943	9.088	28.004	0.754
Olefinas		% v/v	0.010	17.175	30.631	2.405	0.073
No identificados		% v/v	-	1.780	2.754	1.060	0.332
C12+		% v/v	-	1.117	1.485	0.059	0.103
Oxigenados		% v/v	99.888	-	-	-	-

* El Índice Antidetonante se calcula mediante la siguiente fórmula $IAD = (RON + MON) / 2$

**El Índice de Cierre de Vapor se calcula de la siguiente forma:

$$ICV = RVP [kPa] + 1,13*(\%volumen evaporado a 70^{\circ}C)$$

2.2 DEBUTANIZACIÓN DE LAS GASOLINAS BASE Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS GASOLINA-ETANOL AL 0%, 15%, 20%, 25% Y 30%

La adición de etanol anhidro a la gasolina base incrementa la presión de vapor Reid, lo que hace necesario el despojamiento de los componentes más volátiles de las gasolinas base para disminuir el valor de esta propiedad de manera que al agregarle el etanol anhidro se obtenga una RVP de 8 psi aproximadamente. Para el despojamiento de los butanos y los componentes más volátiles de la gasolina se realizó un burbujeo de Nitrógeno a 3 psi en sesiones diferentes, aumentando el tiempo de debutanización en 5 minutos cada vez. Este procedimiento se llevó a cabo en un tanque debutanizador hermético que se llenó entre 7 y 8 litros con gasolina base fría para disminuir pérdidas de volátiles durante la carga. La gasolina en el desorbedor se dejó alcanzar 20°C, temperatura de operación que se determinó con una termocupla. La toma de muestras de la gasolina base debutanizada se realizó en el rango de temperatura de -5°C a -1°C mezclándola con etanol anhidro en concentraciones de 0%, 15%, 20%, 25% y 30% v/v. Los

volátiles fueron recogidos en trampas aisladas térmicamente, medido su volumen y peso y caracterizada su composición por cromatografía gaseosa PIANO. El montaje para este procedimiento se muestra en la Figura 5.

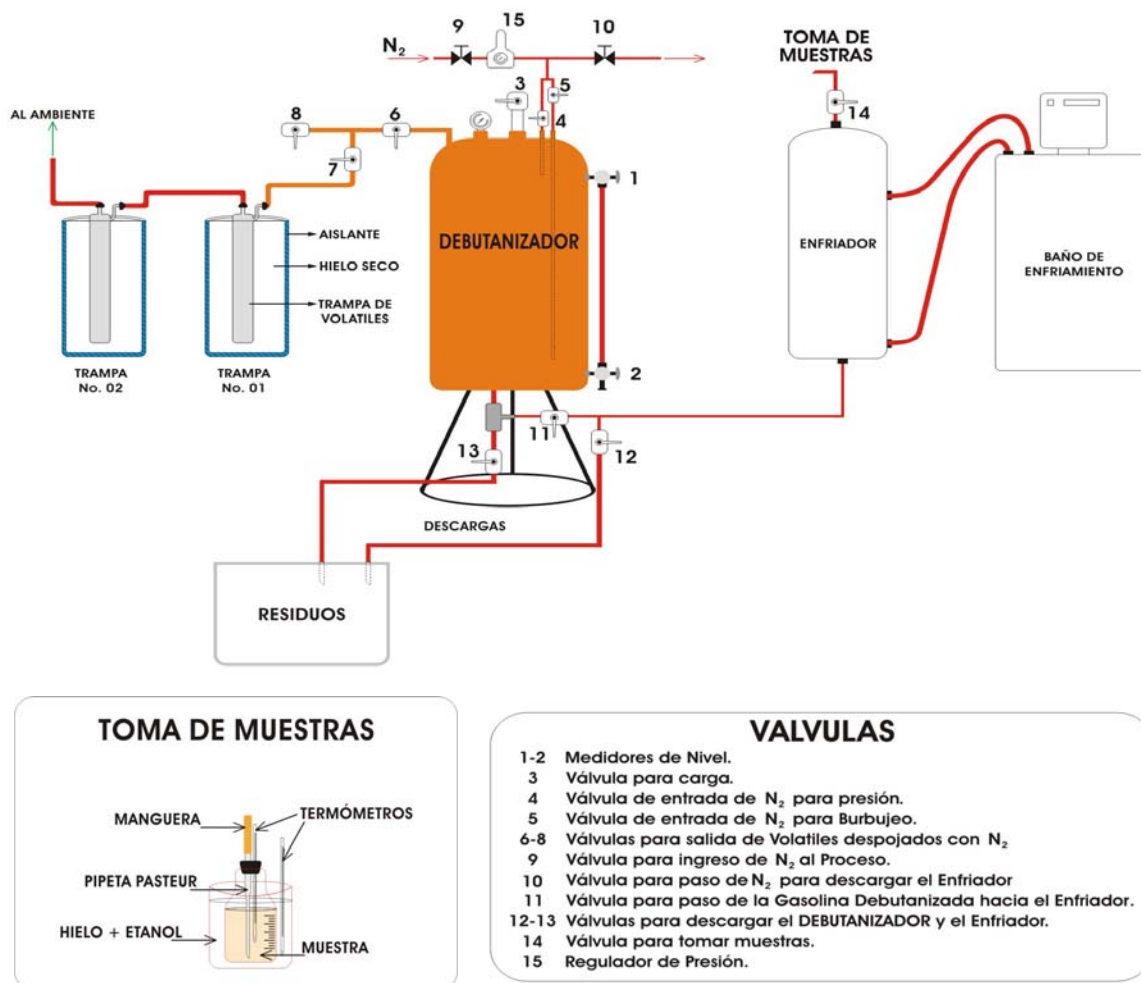


Figura 5: Montaje para la debutanización de gasolina

2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE VAPOR REID

Las gasolinas base y las mezclas con etanol anhidro se analizaron en un equipo semiautomático de Presión de Vapor marca Herzog Lauda (Anexo E) según las normas ASTM D-323 y ASTM D-4953 respectivamente.

2.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ANTIDETONANTE

Con el fin de apreciar la incidencia de la disminución de la RVP en el IAD en la construcción vas, antes de la adición del etanol las gasolinas base fueron debutanizadas en intervalos de 5 minutos y se les analizó el RON. Los resultados

se muestran en la tabla 3. Los resultados muestran que el IAD no varía significativamente para los tiempos de debutanización establecidos, se omitió la debutanización de las mezclas para ajuste de IAD.

Tabla 3: RON gasolinas base debutanizadas

GASOLINA REGULAR		GASOLINA EXTRA	
TIEMPO [min]	RON	TIEMPO [min]	RON
0	85,6	0	93,5
5	84,8	5	93,1
10	84,7	10	92,9
15	84,5	15	93,0
20	84,3	20	93,0
25	84,2	25	93,1
30	83,9	30	93,0

Se prepararon mezclas de gasolina base – nafta virgen y gasolina base – alquilato de alto octano para obtener gasolinas con diferentes valores de IAD. Para determinar los porcentajes de gasolina y corrientes que se debían mezclar para obtener el IAD deseado se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$RBN_{MEZCLA} = (RBN_{GASOLINA} \times X_{GASOLINA}) + (RBN_{CORRIENTE} \times (1 - X_{GASOLINA}))$$

$$X_{GASOLINA} = \frac{RBN_{MEZCLA} - RBN_{CORRIENTE}}{RBN_{GASOLINA} - RBN_{CORRIENTE}}$$

$$\% Vol_{GASOLINA} = \frac{(RBN_{MEZCLA} - RBN_{CORRIENTE}) \times 100\%}{RBN_{GASOLINA} - RBN_{CORRIENTE}}$$

$$\% Vol_{CORRIENTE} = (100\% - \% Vol_{GASOLINA})$$

Con base en la sensibilidad de las gasolinas base y las corrientes (Tabla 3), se estima la sensibilidad de la mezcla (diferencia entre el RON y el MON) y con el IAD deseado se calcula el RON de la mezcla con el que se determina el RBN (Anexo F) de la gasolina base, las corrientes y la mezcla. Los resultados de estos cálculos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4: RBN de las gasolinas base GCB

Muestra	RON	MON	IAD	Sensibilidad	RBN
GR GCB	85,7	78,6	82,1	7,1	59,9
GE GCB	93,5	81,6	87,6	11,9	64,33
Nafta virgen	65,9	66,4	66,1	0,5	53,3
Alquilato	96,9	95,6	96,3	1,3	67,3

Tabla 5: IAD mezclas gasolina regular GCB y gasolina extra GCB con nafta virgen y alquilato de alto octano.

CALCULADO						EXPERIMENTAL		
IAD	RON	RBN	GR GCB [%v/v]	Nafta Virgen [%v/v]	Alquilato [%v/v]	RON	MON	IAD
76,0	79,1	57,2	59	41	-	77,2	73,6	75,4
79,0	82,1	58,3	76	24	-	80,8	75,3	78,1
82,1	85,7	59,9	100	0	0	-	-	-
85,0	88,2	61,1	84	-	16	87,3	80,7	84,0
88,0	91,2	62,8	61	-	39	90,8	84,7	87,8
IAD	Ron teórico	RBN	GE GCB [%v/v]	Nafta Virgen [%v/v]	Alquilato [%v/v]	RON	MON	IAD
81,0	85,5	59,8	59	41	-	84,5	76,9	80,7
84,0	88,5	61,3	73	27	-	88,0	78,5	83,3
87,6	93,5	64,3	100	0	0	-	-	-
89,0	94,0	64,7	88	-	12	94,5	83,2	88,8
91,0	96,0	66,4	30	-	70	96,8	88,9	92,9

A cada una de las mezclas se les adicionó etanol anhidro en concentraciones de 15%, 20%, 25% y 30% v/v y se les determinó el RON y MON (Tabla 10) en un motor CFR Wakesha (Anexo C) según las normas ASTM D-2699 y ASTM D-2700 respectivamente.

2.5 DETERMINACIÓN DEL MÁXIMO CONTENIDO DE AGUA DE LAS MEZCLAS GASOLINA ETANOL

Se prepararon mezclas de gasolinas regular y extra GCB con etanol anhidro en concentraciones de 15%, 20%, 25% y 30% v/v y se les adicionó agua hasta que se notó turbidez que indica la separación de fases. Esta determinación se hizo a -10°C y 0°C, ya que a temperaturas superiores la tolerancia al agua aumenta, como se muestra en el Anexo G. Para la determinación del contenido de agua de saturación de la mezcla se utilizó el método Karl Fischer Columétrico, según la Norma ASTM D-6304. Este análisis se realizó en la Gerencia Complejo Barrancabermeja, ya que el ICP no cuenta con el equipo necesario para su realización.

2.6 DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE EXHOSTO Y COMPORTAMIENTO EN AUTOMÓVILES CON MEZCLAS DE GASOLINA EXTRA - ETANOL ANHIDRO EN CONCENTRACIONES DE 0%, 10% Y 20% v/v.

A las mezclas de gasolina extra con 0%, 10% y 20% v/v de etanol que se utilizaron en las pruebas se les hizo una caracterización para conocer sus propiedades y los resultados se presentan en la Tabla 2 para la gasolina extra y en la Tabla 6 para

las mezclas de gasolina extra con el 10% y 20% v/v de etanol. Con esto se establece que las mezclas cumplen con las especificaciones de calidad de los combustibles y por lo tanto, son aptas para la realización y obtención de datos confiables en las pruebas.

Tabla 6: Caracterización mezclas gasolina extra con etanol utilizadas en pruebas en vehículos

ANÁLISIS	NORMA ASTM	UNIDADES	GASOLINA EXTRA GCB 10% v/v	GASOLINA EXTRA GCB 20% v/v
Densidad (15 °C)	D-4052	g/ml	0,7521	0,7560
Gravedad API (15.6°C)	D-4052		56,6	55,6
% v/v de Etanol	D-6729	%	9,88	19,82
Presión de Vapor Reid (37.8°C)	D-323	psi	8,38	8,20
RON	D-2699		95,3	97,2
MON	D-2700		82,5	83,2
Índice Antidetonante*			88,9	90,2
Índice de Cierre de Vapor (ICV)**		kPa	105,76	106,41
Calor de Combustión	D-240	MJ/Kg	44.02	42.62
Destilación				
Punto Inicial de Ebullición	D-86	°C	42,4	43,4
10%		°C	52,1	53,4
50%		°C	82,7	72,1
90%		°C	170,0	165,1
Punto Final de Ebullición		°C	207,0	204,6
Residuo		ml	1,0	0,7
Cromatografía (PIANO)				
Parafinas	D-6729	% Volumen	5,391	4,787
I-Parafinas		% Volumen	22,872	20,375
Aromáticos		% Volumen	21,648	19,204
Naftenos		% Volumen	7,674	6,813
Olefinas		% Volumen	29,161	25,750
Oxigenados		% Volumen	9,885	19,821
No identificados		% Volumen	1,240	1,328
C12+		% Volumen	2,130	1,923

* El Índice Antidetonante se calcula mediante la siguiente fórmula $IAD = (RON + MON) / 2$

**El Índice de Cierre de Vapor se calcula de la siguiente forma:

$$ICV = RVP [kPa] + 1,13 * (\% \text{volumen evaporado a } 70^{\circ}C)$$

Las pruebas se realizaron en el Chasis Dinamométrico del Laboratorio de Motores del ICP usando mezclas de Gasolina Extra GCB - Etanol Anhidro en concentraciones de 0%, 10% y 20% v/v siguiendo el ciclo de manejo CCM-ICP-01 en una flota de cuatro vehículos del ICP. Para la toma de muestra de emisiones se utilizó un equipo muestreador a volumen constante de flujo parcial DOES2, la concentración de Emisiones Reguladas CO, CO₂, NO_x, THC se determinó en un analizador Galio Smart 1504. La caracterización de emisiones de carbonilos se determinó mediante el método carbonílicos emisiones vehiculares HPLC¹³. Para

¹³ HPLC: Cromatografía líquida de alta pre

la determinación del Consumo de Combustible se utilizó un medidor de flujo volumétrico Onozoki. Para la determinación del Torque y la Potencia del Vehículo se utilizó el método descrito en el manual del Chasis Dinamométrico Mustang MD100.

2.7 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL

De acuerdo con la Tabla 5 se prepararon volumétricamente mezclas de gasolinas base - nafta virgen con el fin de disminuir el IAD de la gasolina base para que al ser adicionado el etanol anhidro se obtuviera un IAD de 84 para la gasolina regular GCB y un IAD de 89 para la gasolina extra GCB. Las mezclas de gasolinas base - nafta virgen se debutanizaron para retirar los compuestos más volátiles y obtener una RVP de 8.00 psi con la adición del etanol anhidro. A estas mezclas se les practicaron los análisis indicados en la Tabla 1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el ajuste de las propiedades de la mezcla gasolina-etanol se muestran a continuación:

3.2 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE VAPOR REID DE LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.

En las Tablas 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para el ajuste de la RVP de las mezclas de gasolina con etanol en diferentes concentraciones.

Tabla 7: Presión de vapor Reid de la gasolina regular GCB y de las mezclas con etanol anhidro

PRESION DE VAPOR REID GASOLINA REGULAR GCB				
0% v/v Etanol	15% v/v Etanol	20% v/v Etanol	25% v/v Etanol	30% v/v Etanol
7,33	8,31	8,23	8,16	8,02
6,74	7,78	7,66	7,57	7,52
6,16	7,26	7,22	7,16	7,05
6,04	7,17	7,12	7,02	6,98
5,54	6,77	6,66	6,57	6,52

Tabla 8: Presión de vapor Reid de la gasolina extra GCB y de las mezclas con etanol anhidro

PRESION DE VAPOR REID GASOLINA EXTRA GCB				
0% v/v Etanol	15% v/v Etanol	20% v/v Etanol	25% v/v Etanol	30% v/v Etanol
7,98	8,76	8,69	8,65	8,52
7,38	8,36	8,24	8,16	8,08
6,98	7,94	7,91	7,78	7,68
6,65	7,96	7,80	7,62	7,46
6,51	7,65	7,57	7,45	7,38
6,13	7,19	7,09	7,01	6,94
5,69	6,86	6,77	6,68	6,60

Estos resultados se muestran en las figuras 6 y 7 respectivamente.

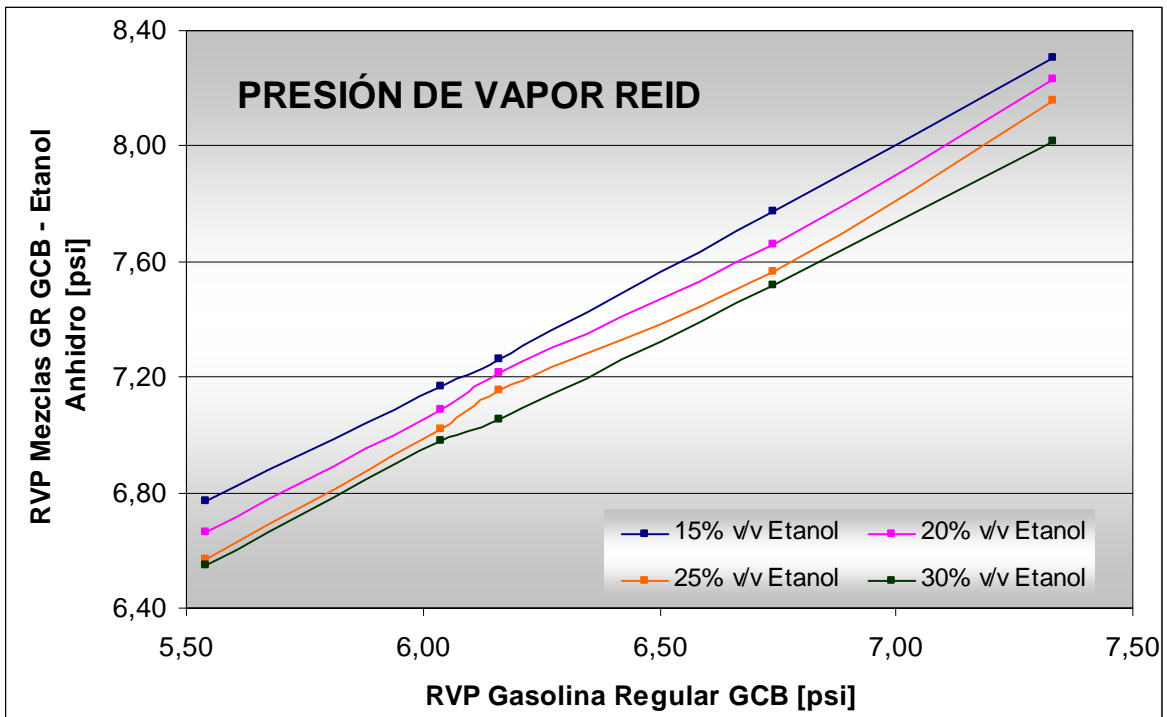


Figura 6: Incidencia de la adición del etanol en la presión de vapor Reid de la gasolina regular GCB

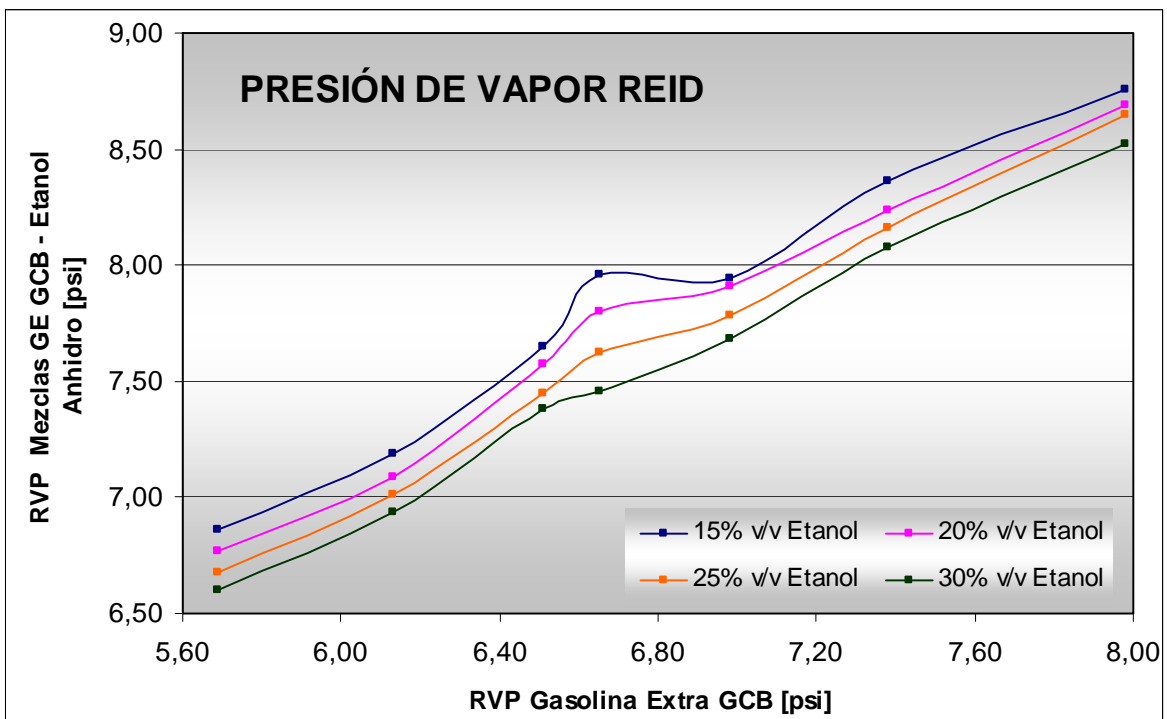


Figura 7: Incidencia de la adición del etanol en la presión de vapor Reid de la gasolina extra GCB

En las Figuras 6 y 7 se observa que la adición del etanol anhidro a las gasolinas incrementa la Presión de Vapor Reid a pesar de que esta propiedad en el etanol puro tiene un valor de 2.66 psi, mucho más baja que la RVP de la gasolina, esto obedece a que al mezclar el etanol con compuestos no polares los puentes de hidrógeno del etanol se debilitan y éste se comporta como una molécula de bajo peso molecular, dando como resultado un incremento en la volatilidad de la mezcla. Este incremento también se debe a la formación de azeótropos de bajo punto de ebullición entre el etanol y algunos compuestos de la gasolina. Esta volatilidad disminuye con el aumento en el porcentaje de etanol en la mezcla.

La especificación para la presión de vapor Reid en la Resolución 1180 de 2006 es 9.3 psi para gasolinas oxigenadas y 8.0 psi para las gasolinas base. El valor de la presión de vapor Reid de la mezcla de gasolina con el 20% v/v de etanol se ajustó al valor de la especificación de las gasolinas base, debido a que con este valor se obtienen menores pérdidas por evaporación en el tanque del vehículo, este valor se obtiene ubicando en la ordenada de las gráficas el valor de 8 psi, interceptando la curva correspondiente al 20% v/v de etanol y leyendo el valor que corta en la abscisa.

En las Figuras 6 y 7 se observa que el etanol incrementa la presión de vapor de la gasolina alrededor de 1 psi. Para que la presión de vapor Reid de las mezclas de gasolina con el 20% de etanol alcance un valor de 8.0 psi, la gasolina base debe tener una RVP de 7.0 psi aproximadamente. En la Figura 8¹⁴ se observa que la diferencia entre los valores de RVP para los diferentes porcentajes de etanol anhidro es de aproximadamente 0.2 psi.

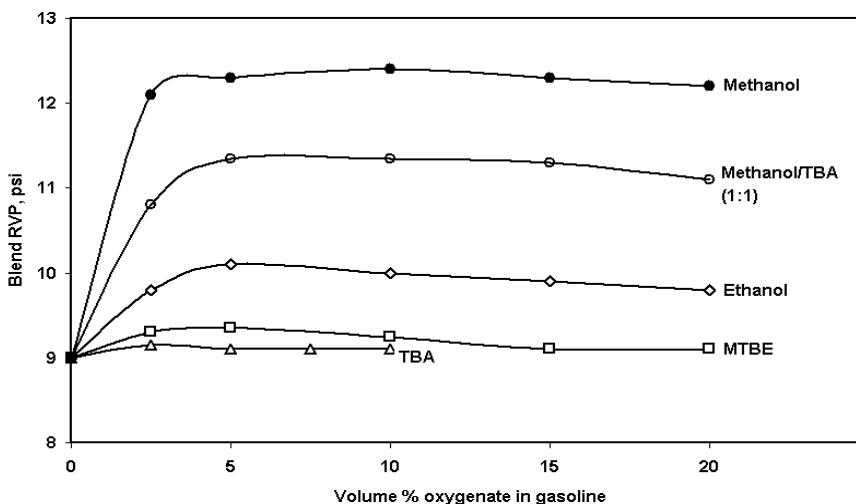


Figura 8: Efecto en la RVP de la concentración de oxigenados en la mezcla

¹⁴ PINTO MORENO, Carlos Alberto y RUEDA ACEVEDO, Uriel Fernando. Estudio de la Mezcla Gasolina con 10% de Etanol Anhidro y Evaluación de sus propiedades fisicoquímicas. Bucaramanga, 2002. p.68. Tesis de pregrado UIS.

La repetibilidad del método utilizado en la medición de la presión de vapor Reid de las mezclas es 0.31 psi. Por esta razón las muestras se prepararon por triplicado y se maximizaron los cuidados con las muestras para evitar alteraciones antes de realizar el análisis. Los resultados obtenidos tuvieron desviaciones menores a 0.05 psi, lo que los hace confiables. Los datos que se muestran en las Figuras 6 y 7 corresponden a un promedio de las tres muestras tomadas para cada punto.

3.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ANTIDETONANTE DE LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.

Se prepararon mezclas de gasolina base con corrientes de nafta virgen y alquilato de alto octano en los valores que se indican en la Tabla 5. A estas mezclas se les adicionó etanol anhidro en concentraciones de 15%, 20%, 25% y 30% v/v y se les determinó el índice antidetonante. Los resultados que se obtuvieron se muestran en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9: IAD de las mezclas de gasolina regular GCB con etanol anhidro

IADgasolina	% v/v Etanol	RON	MON	IAD mezcla
71,3	0,00	72,0	70,5	71,3
	15,00	83,0	78,6	80,8
	20,00	86,8	80,6	83,7
	25,00	90,1	82,0	86,1
	30,00	93,1	83,4	88,3
75,4	0,00	77,2	73,6	75,4
	15,00	86,9	80,4	83,7
	20,00	89,6	81,7	85,7
	25,00	92,4	82,8	87,6
	30,00	95,2	83,7	89,5
78,1	0,00	80,8	75,3	78,1
	15,00	88,8	80,4	84,6
	20,00	91,3	81,7	86,5
	25,00	94,2	82,7	88,5
	30,00	96,0	83,7	89,9
82,1	0,00	85,7	78,6	82,1
	15,00	92,1	81,7	86,9
	20,00	94,0	82,8	88,4
	25,00	96,0	83,6	89,8
	30,00	97,5	84,3	90,9
84,0	0,00	85,3	80,7	84,0
	15,00	93,7	83,4	88,6
	20,00	95,7	84,5	90,1
	25,00	97,5	85,0	91,3
	30,00	98,8	85,7	92,3
87,8	0,00	90,8	84,7	87,8
	15,00	96,4	86,0	91,2
	20,00	98,1	86,6	92,4
	25,00	99,5	87,0	93,3
	30,00	101,0	87,5	94,3

Tabla 10: IAD de las mezclas de gasolina extra GCB con etanol anhidro

IADgasolina	% v/v Etanol	RON	MON	IAD mezcla
80,7	0,00	84,5	76,9	80,7
	15,00	91,1	81,2	86,2
	20,00	93,3	82,1	87,7
	25,00	95,3	82,8	89,1
	30,00	97,0	83,7	90,4
83,3	0,00	88,0	78,5	83,3
	15,00	93,3	81,8	87,6
	20,00	95,0	82,4	88,7
	25,00	96,6	82,9	89,8
	30,00	98,0	84,0	91,0
87,6	0,00	93,5	81,6	87,6
	15,00	96,4	82,5	89,5
	20,00	97,4	83,1	90,3
	25,00	98,3	83,5	90,9
	30,00	99,2	84,0	91,6
88,5	0,00	94,5	83,2	88,5
	15,00	97,3	83,4	90,4
	20,00	98,2	83,7	91,0
	25,00	99,0	84,2	91,6
	30,00	99,7	84,8	92,3
92,9	0,00	96,8	88,9	92,9
	15,00	101,6	89,6	95,6
	20,00	103,3	89,8	96,6
	25,00	104,2	89,9	97,1
	30,00	105,1	89,8	97,5

Los resultados de las tablas 9 y 10 se representan en las figuras 9 y 10 respectivamente.

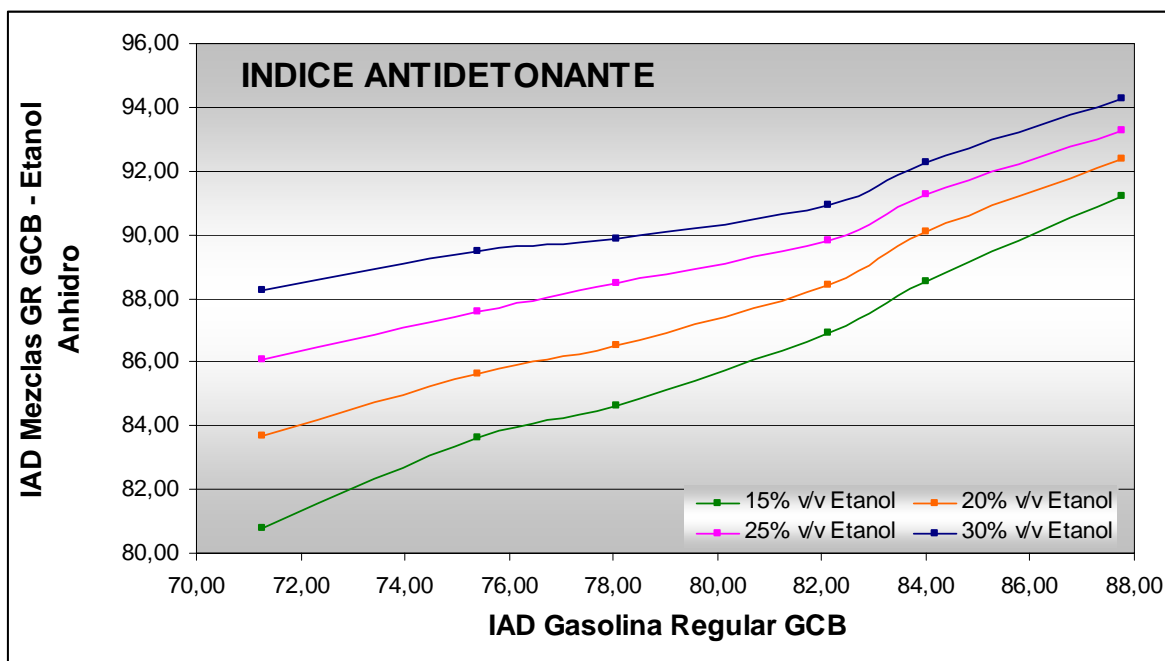


Figura 9: Incidencia de la adición de etanol anhidro en el IAD de la gasolina regular GCB

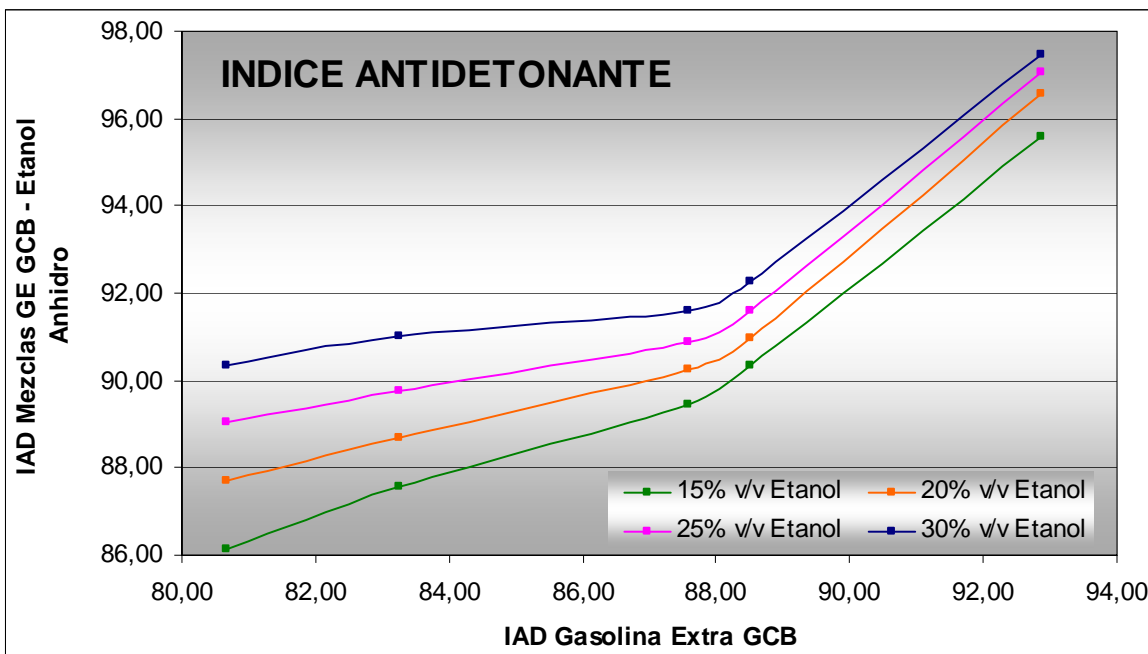


Figura 10: Incidencia de la adición de etanol anhidro en el IAD de la gasolina extra GCB

El etanol posee un índice antidetonante de 98.5 que es mayor al de las gasolinas base, como se muestra en la Tabla 2. Cuando el etanol es adicionado a las gasolinas, el octanaje de las mezclas se incrementa significativamente.

Como se observa en las Figuras 9 y 10, la adición del 15% v/v de etanol ocasiona un incremento alrededor de 5 octanos para la GR GCB y 2 octanos para la GE GCB; la adición del 20% v/v de etanol, 6 octanos para la GR GCB y 3 octanos para la GE GCB; la adición del 25% v/v de etanol, 8 octanos para la GR GCB y 3 octanos para la GE GCB; la adición del 30% v/v de etanol, 9 octanos para la GR GCB y 3 octanos para la GE GCB.

De los valores que se presentan en las Tablas 9 y 10 se deduce que al incrementar el contenido de etanol en la mezcla se nota mayor variación en el número de octano de investigación (RON) que la mostrada en el número de octano motor (MON) debido a que las condiciones de operación del método para determinar el MON son más severas. También se observa que a mayor IAD de las mezclas de Gasolinas Base GCB con Nafta y Alquilato se presenta un menor incremento en el IAD de las mezclas Gasolina-Etanol debido a la menor diferencia existente entre el octanaje de la gasolina y el etanol.

La repetibilidad de los métodos para la determinación del número de octano motor y el número de octano de investigación es 0.2.

Las especificaciones para el índice antidetonante en la Resolución 1180 de 2006 es de 84 para gasolina regular oxigenada y 89 para gasolina extra oxigenada. El índice antidetonante de la gasolina regular base debe ser de 72 y el de la gasolina extra base de 84, para que al adicionarle el 20% de etanol anhidro cumpla con los valores mencionados. Esto se puede leer en las gráficas encontrando el valor deseado en la ordenada, cortando la curva correspondiente al 20% v/v de etanol, y encontrando el valor en que corta la abscisa.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA TOLERANCIA DE AGUA EN LAS MEZCLAS GASOLINA - ETANOL.

En la Tabla 11 se muestran los resultados del análisis de la tolerancia al agua de las mezclas gasolina-etanol en concentraciones de 15%, 20%, 25% y 30% v/v de etanol. Estas muestras se prepararon a dos temperaturas diferentes y bajas, para conocer la máxima tolerancia al agua que se podría presentar en las regiones más frías de nuestro país. Los datos se representan en la Figura 11.

Tabla 11: Máxima Cantidad de Agua que toleran las Mezclas de Gasolina Regular y Extra GCB con Etanol Anhidro

% v/v Etanol	Tolerancia al agua de la mezcla Gasolina Regular GCB – Etanol [ppm]		Tolerancia al agua de la mezcla Gasolina Extra GCB – Etanol [ppm]	
	-10°C	0°C	-10°C	0°C
15	7688,5	9015,9	8659,8	11628,0
20	10938,0	14742,0	13097,0	17184,0
25	13878,0	19094,0	15923,0	21845,0
30	17710,0	24006,0	17517,0	27677,0

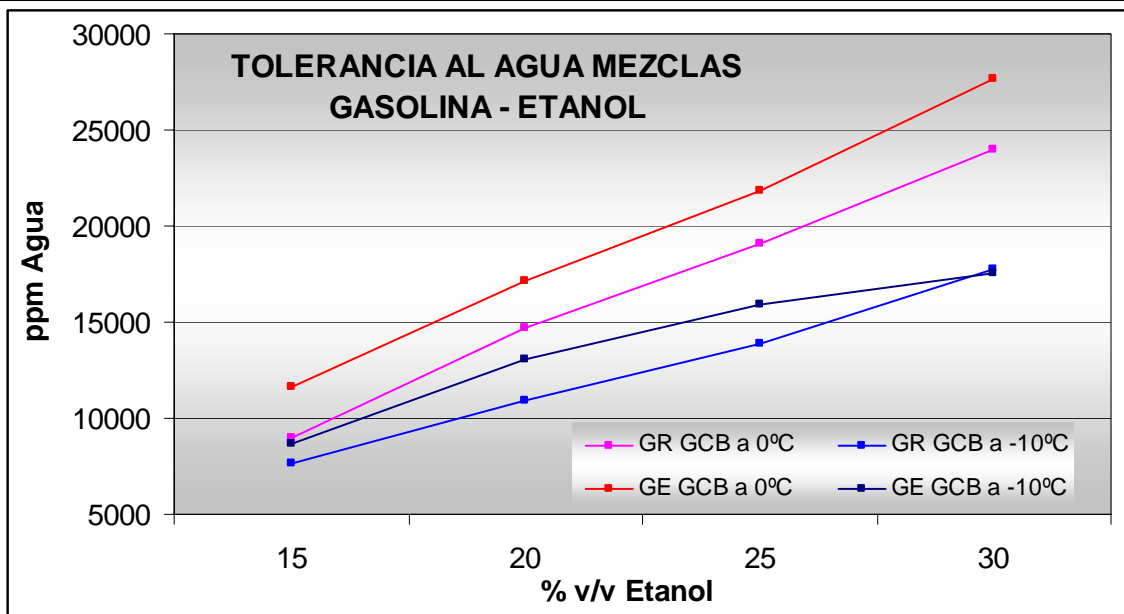


Figura 11: Tolerancia al Agua de las mezclas de Gasolinas Base con Etanol a 0°C y -10°C

En la Figura 11 se observa que al incrementarse la temperatura se incrementa la tolerancia al agua de la mezcla gasolina – etanol, porque se produce una mayor interacción entre las moléculas de la mezcla, evento que se traduce en un aumento en la solubilidad del agua en la mezcla. Por ejemplo, para una mezcla del 20% v/v de etanol a -10°C la tolerancia al agua es de 10938 ppm y para 0°C es de 14742 ppm. Esto se puede verificar para un rango de temperaturas de 0°C a 40°C para mezclas de gasolina regular y extra GCB con 5%, 10 y 15% v/v de etanol, en el Anexo G. Se observa también que para una misma temperatura, la tolerancia al agua aumenta con el contenido de etanol en la mezcla, gracias a la afinidad entre el etanol y el agua.

Los hidrocarburos aromáticos poseen una mayor afinidad con la fase etanol-agua debido a la polaridad que le otorgan los anillos bencénicos, por esta razón la gasolina extra con una concentración de aromáticos de 22.47% v/v soporta cantidades mayores de agua que la gasolina regular, cuya concentración de aromáticos es de 20.01% v/v. La aromaticidad de las gasolinas base se comporta como una limitante en la tolerancia al agua de las mezclas con etanol.

La cantidad de agua máxima limita la estabilidad del sistema de mezcla y una vez separadas las fases, éstas no vuelven a homogenizarse a la misma temperatura en que ocurrió la separación. Este límite se podría establecer en el 50% de la cantidad máxima de agua tolerada que sería la correspondiente a la temperatura de -10°C, es decir, 5000 ppm.

Cuando la concentración de agua en la mezcla alcanza el límite de tolerancia, se presenta turbidez y las fases se separan. En la parte inferior se forma una fase acuosa hidroalcohólica con restos de hidrocarburos; en la parte superior se forma una fase hidrocarbonada con restos de mezcla hidroalcohólica.

3.4 DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE EXHOSTO Y COMPORTAMIENTO EN AUTOMÓVILES DE MEZCLAS DE GASOLINA EXTRA CON ETANOL ANHIDRO EN CONCENTRACIONES DE 0%, 10% Y 20% v/v.

Estas pruebas fueron realizadas con gasolina extra de la Gerencia Complejo de Barrancabermeja solamente debido a que los requerimientos de los automóviles de prueba respecto al octanaje eran cubiertos por esta gasolina, que es la gasolina base de mayor octanaje que se distribuye en Colombia.

3.4.1 Determinación de las Emisiones. Las pruebas se realizaron utilizando cuatro automóviles pertenecientes a la flota del Instituto Colombiano del Petróleo en Piedecuesta (Santander). Las pruebas tuvieron lugar en el Chasis Dinamométrico del Laboratorio de Motores del ICP. Estas pruebas se realizaron cuatro veces con cada combustible, los equipos se calibraron cada vez y las condiciones de prueba se controlaron y midieron cada segundo durante la prueba. Los resultados que se presentan en las Tablas 12, 13 y 14 se ajustaron con

software, teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y flujo del aire, humedad, presión, distancia recorrida y consumo de combustible. Ninguno de los métodos utilizados para determinar las emisiones en el Chasis Dinamométrico y los carbonilos por HPLC conceden una repetibilidad en los datos de emisiones. A estos datos se les determinó una desviación y el promedio de los datos seleccionados es el que se presenta en las Tablas 12, 13 y 14. El software y el protocolo de pruebas utilizado para la determinación de emisiones son un modelo adaptado traído de Canadá. Los porcentajes en las Tablas y en las Figuras se refieren a %v/v, es decir, porcentaje en volumen.

Tabla 12: Emisiones Vehiculares de HC, NOx, CO, CO₂, antes del Convertidor Catalítico [g/km]

EMISIONES [g/km]	ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO											
	DAEWOO LANOS SX/1500 1			DAEWOO LANOS SX/1500 2			DAEWOO LANOS SX/1500 3			MAZDA 626L ASAHI/2000		
	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%
HC	1,40	0,22	1,27	1,90	1,54	2,14	2,12	0,44	0,55	2,17	1,83	1,94
NOx	2,27	2,29	2,35	2,25	2,51	4,80	3,15	3,10	3,12	2,01	2,22	2,39
CO	7,77	13,02	9,06	9,71	8,65	7,75	7,68	7,70	5,77	67,67	46,78	33,06
CO ₂	299,67	312,01	271,47	284,84	289,17	331,64	307,45	329,65	325,84	343,86	366,16	333,97

Tabla 13: Emisiones Vehiculares de HC, NOx, CO, CO₂, después del Convertidor Catalítico [g/km]

EMISIONES [g/km]	DESPUÉS DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO								
	DAEWOO LANOS SX/1500 1			DAEWOO LANOS SX/1500 2			DAEWOO LANOS SX/1500 3		
	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%
HC	0,00	0,19	0,11	0,00	0,47	0,55	0,00	0,34	0,24
NOx	0,62	1,36	0,85	0,45	1,03	1,19	0,79	1,78	1,34
CO	1,42	3,65	2,78	3,71	4,47	4,80	4,98	6,99	4,94
CO ₂	303,90	350,67	337,15	319,47	311,88	375,79	400,27	388,55	406,53

Los resultados que se presentan en las Tablas 12 y 13, se muestran de manera gráfica en las gráficas 12, 13, 14 y 15 donde se analizan los resultados para cada una de las emisiones estudiadas para el conjunto de cuatro vehículos pertenecientes a la flota de vehículos del ICP. El Mazda 626L Asahi/2000, es un vehículo con carburador, cuya tecnología no posee convertidor catalítico. Por esta razón no se presentan resultados en el lugar correspondiente en las Figuras de emisiones. Los otros tres vehículos Daewoo Lanos SX/1500 poseen tecnología de inyección para el combustible.

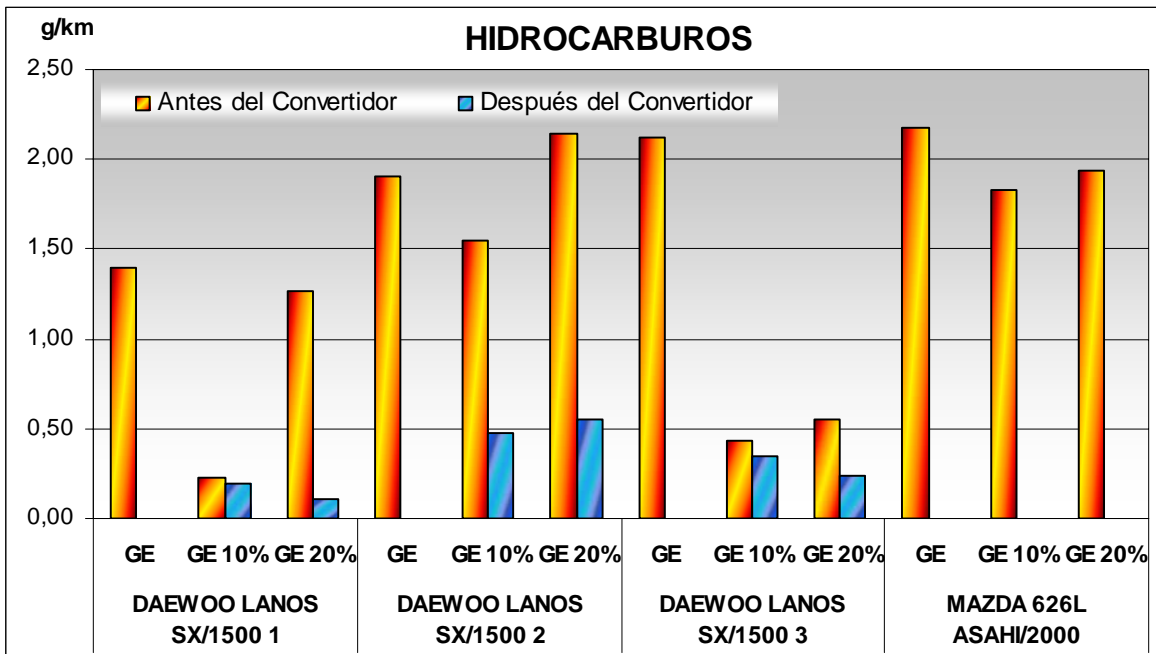


Figura 12: Contenido de HC en las Emisiones Vehiculares

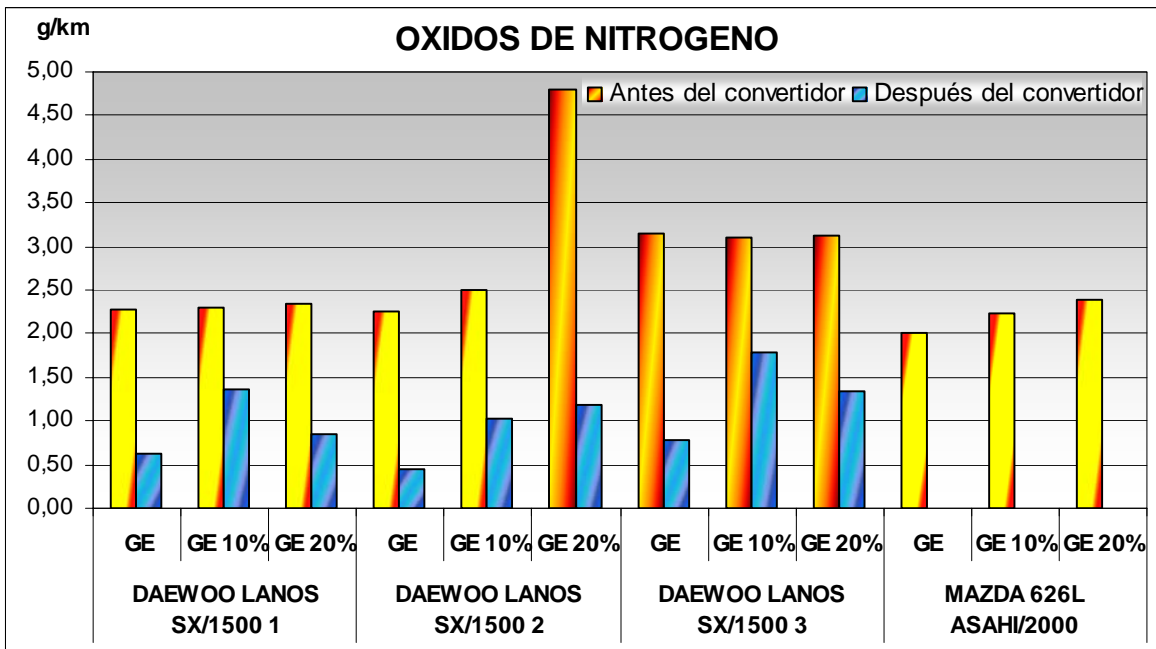


Figura 13: Contenido de NOx en las Emisiones Vehiculares

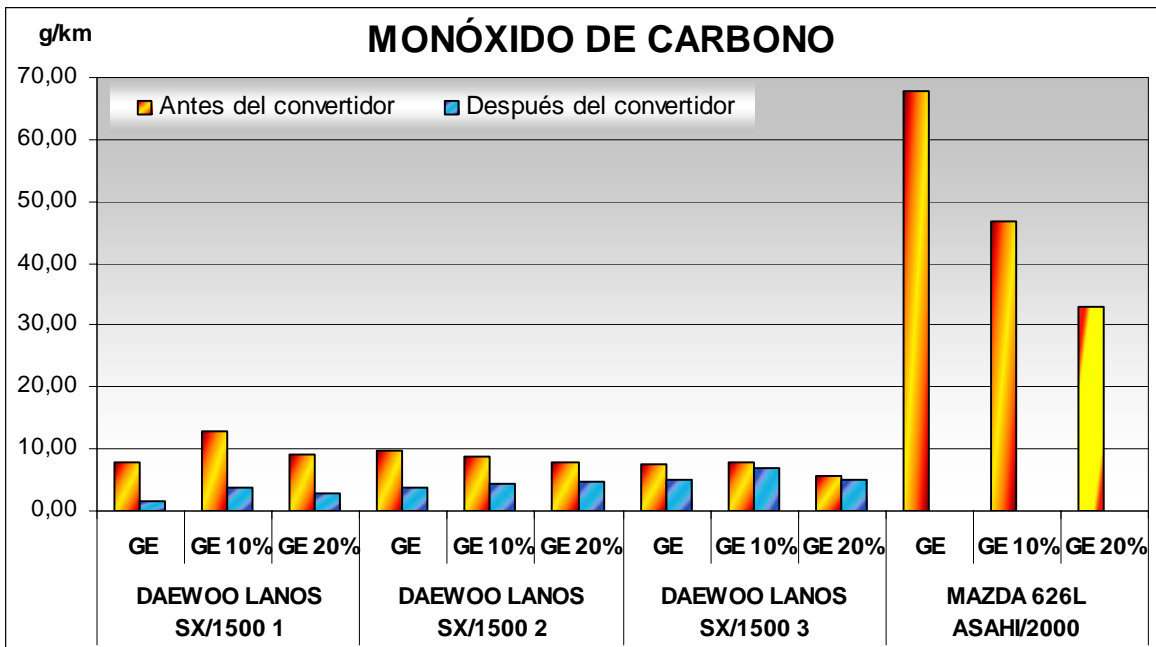


Figura 14: Contenido de CO en las Emisiones Vehiculares

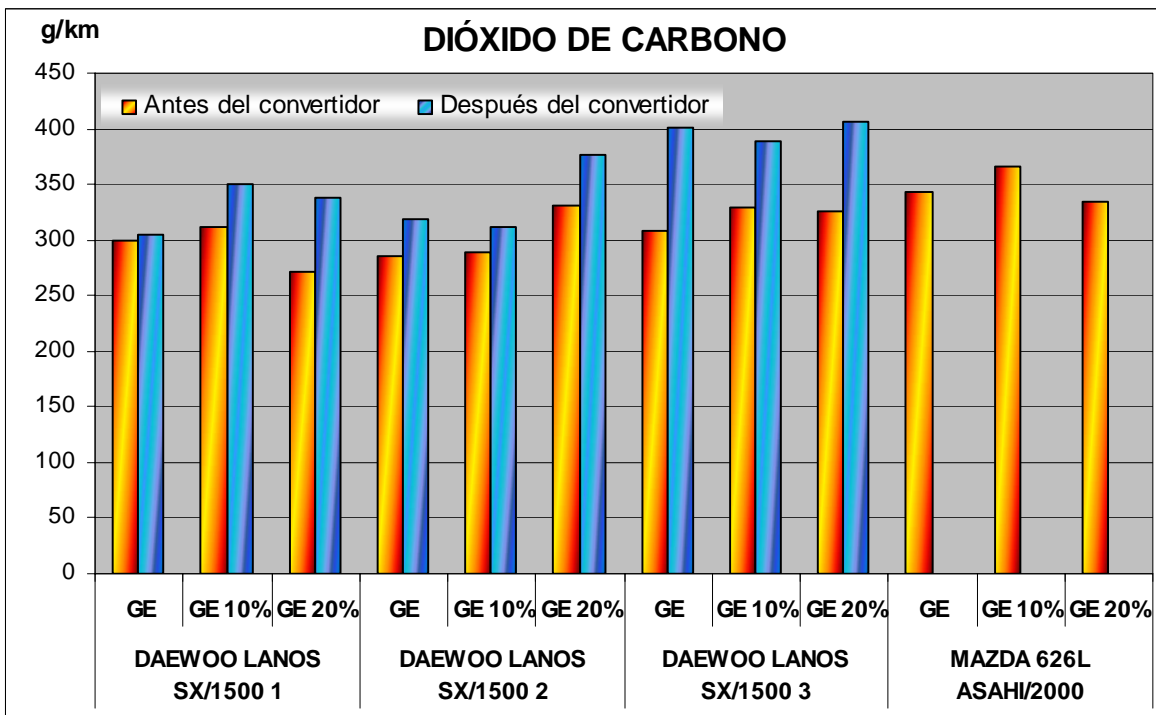


Figura 15: Contenido de CO₂ en las Emisiones Vehiculares

Se nota que las emisiones vehiculares producto de la combustión de una mezcla de gasolina con el 20% v/v de etanol en un motor, mostradas en las Figuras 12, 13 y 14 correspondientes a emisiones de HC, NO_x y CO, no presentan un incremento

representativo con respecto a las emisiones en las mismas condiciones de una gasolina con el 10% v/v de etanol. En la Figura 15 se muestran las emisiones de CO₂ medidas en el exhosto. Se observa un pequeño incremento generado por dos factores, primero, la mejor combustión que se logra con la oxigenación de la gasolina y segundo, porque en la segunda sección del convertidor catalítico, como se menciona en el marco teórico, se realiza una oxidación para reducir los hidrocarburos y el monóxido de carbono. El incremento en las emisiones del exhosto de los vehículos es compensado al hacer un balance global de CO₂, puesto que se utiliza un 20% menos de gasolina en la mezcla y dado que el proceso de producción de etanol no reviste emisiones de este compuesto, las emisiones netas de dióxido de carbono son menores.

En cuanto a las emisiones de hidrocarburos totales, HC, se observa en la Figura 12 que las gasolinas oxigenadas generan emisiones menores a las que se producen con el uso de la gasolina base. Esto tiene relación con la mejor combustión que se logra al agregar oxígeno con el etanol en la mezcla.

En la Figura 13 se presentan los resultados de las emisiones de óxidos de nitrógeno, NO_x, donde se puede apreciar que la adición de etanol a las gasolinas base en una proporción de 10% o 20% v/v, no tiene una incidencia alarmante en el incremento de dichas emisiones, puesto que se mantienen casi constantes, respecto a las que se generan con la gasolina base. Las emisiones que se obtienen del exhosto de un carro con carburador no son diferentes a las obtenidas con carros con tecnología de inyección.

La oxigenación de la gasolina base con el etanol, tiene efectos diferentes en las emisiones de monóxido de carbono, CO, dependiendo de la tecnología de los automóviles. Como se observa en la Figura 14, para un carro con carburador se generan emisiones mucho mayores que las que se producen para carros de inyección. Esto gracias a que esta tecnología mantiene la relación estequiométrica aire/combustible controlando los flujos de aire y gasolina que se inyectan a la cámara de combustión. Las gasolinas oxigenadas generan una disminución importante en las emisiones de CO en los carros de carburador.

La adición de etanol al combustible base no produce cambios abruptos en las emisiones de CO₂ y como se muestra en la Figura 15 éstas son las únicas emisiones incrementadas por la oxidación que ocurre en el convertidor catalítico como se indicó en la sección 1.4.3. Este incremento se compensa al analizar las emisiones netas, puesto que la producción de etanol no reviste emisiones de este compuesto.

La muestra tomada para la determinación de las emisiones de carbonilos se recogió en cartuchos LDV, que son los apropiados para emisiones de combustibles livianos, como la gasolina.

Tabla 14: Emisiones Vehiculares de aldehídos antes del convertidor catalítico [g/km]

EMISIONES [g/km]	ANTES DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO											
	DAEWOO LANOS SX/1500 1			DAEWOO LANOS SX/1500 2			DAEWOO LANOS SX/1500 3			MAZDA 626L ASAHI/2000		
	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%
Formaldehído	11,14	12,04	10,66	11,71	11,12	11,08	10,62	7,95	10,99	7,29	8,97	11,51
Acetaldehído	3,40	6,61	9,22	3,87	7,17	11,88	3,62	6,59	9,58	3,96	7,54	10,57
Otros*	9,46	6,27	9,66	11,28	12,17	12,33	10,21	4,45	5,94	8,89	4,45	13,60
Acroleína	2,31	2,20	2,18	2,53	2,37	2,29	2,16	2,00	1,95	1,58	1,84	2,22
Acetona	1,40	1,19	1,11	1,61	1,63	1,57	1,75	0,94	1,38	1,28	1,12	1,34
Propionaldehído	0,86	0,78	0,72	1,04	0,99	0,90	0,93	0,85	0,77	0,85	0,82	0,86
Crotonaldehído	0,45	NC**	0,40	0,61	0,72	0,78	0,53	NC	NC	0,47	NC	0,74
Metil-Vinil-Cetona	0,54	NC	0,51	0,62	0,68	0,70	0,67	NC	0,47	0,69	NC	0,82
Metacroleína	1,14	0,83	0,92	1,22	1,29	1,31	1,26	NC	0,33	0,90	0,67	1,09
Isobutiraldehído	0,46	0,52	NC	0,58	0,53	NC	NC	0,66	1,03	NC	NC	NC
Butiraldehído	0,46	0,52	NC	0,58	0,53	NC	NC	0,66	1,03	NC	NC	NC
Benzaldehído	1,39	0,76	2,26	1,97	2,36	2,84	1,76	NC	NC	1,60	NC	3,66
m-tolualdehído	0,91	NC	1,57	1,10	1,59	1,95	1,13	NC	NC	1,52	NC	2,87
p-tolualdehído	0,91	NC	1,57	1,10	1,59	1,95	1,13	NC	NC	1,52	NC	2,87

*Suma de los carbonilos presentes en las emisiones diferentes a formaldehído y acetaldehído.

**No cuantificable

Tabla 15: Emisiones Vehiculares de aldehídos después del convertidor catalítico [g/km]

EMISIONES [g/km]	DESPUÉS DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO									
	DAEWOO LANOS SX/1500 1			DAEWOO LANOS SX/1500 2			DAEWOO LANOS SX/1500 3			
	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	
Formaldehído	0,35	1,02	0,61	0,21	0,94	0,70	0,35	1,35	0,93	
Acetaldehído	0,90	2,62	3,03	0,57	8,27	6,28	0,90	10,12	5,32	
Otros*	0,68	2,08	0,56	0,54	3,83	0,95	0,68	3,40	2,09	
Acroleína	NC**	NC	NC	NC	0,41	NC	NC	0,66	NC	
Acetona	0,68	0,94	0,56	0,54	1,84	0,95	0,68	1,90	0,75	
Propionaldehído	NC	0,37	NC	NC	0,48	NC	NC	0,83	0,39	
Crotonaldehído	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Metil-Vinil-Cetona	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Metacroleína	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Isobutiraldehído	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Butiraldehído	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Benzaldehído	NC	0,77	NC	NC	1,11	NC	NC	NC	0,96	
m-tolualdehído	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
p-tolualdehído	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	

*Suma de los carbonilos presentes en las emisiones diferentes a formaldehído y acetaldehído.

**No cuantificable

Los datos de las Tablas 14 y 15 se presentan en la Figura 15.

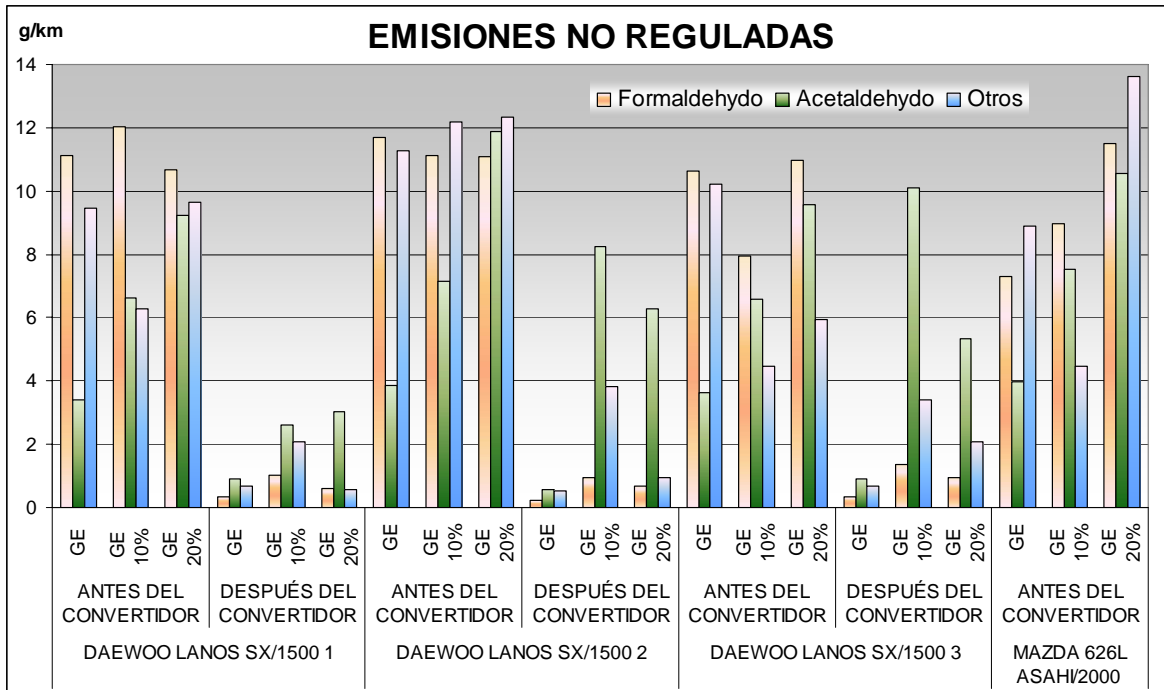


Figura 16: Contenido de Carbonilos en las Emisiones Vehiculares

Los aldehídos son el producto de la oxidación de hidrocarburos alifáticos inferiores, alcoholes y gas natural. La concentración máxima permisible de estos compuestos en el aire es de 0.1 ppm. En la Figura 16 se observa que antes del convertidor catalítico, las emisiones de formaldehído no presentan tendencia en los vehículos de inyección y en el vehículo de carburador se incrementan en un 28% al pasar del 10% al 20% v/v de etanol en la mezcla. Las emisiones de acetaldehído presentan un incremento del 50% aproximadamente al incrementar la concentración de etanol de 10% v/v a 20% v/v de etanol en la mezcla. A pesar del incremento que reportan los datos en las emisiones de acetaldehído, estas emisiones son menores a las de formaldehído que se presentan. Así mismo se comprueba la importancia del convertidor catalítico para la reducción de las emisiones. La mayoría de los compuestos carbonilos presentes en las emisiones de exhosto, representados en la Figura 16 como otros, no se alcanzan a cuantificar.

Tabla 16: Efecto del Convertidor Catalítico en la reducción de las Emisiones Vehiculares

EMISIONES	DAEWOO LANOS SX/1500 1			DAEWOO LANOS SX/1500 2			DAEWOO LANOS SX/1500 3		
	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%	GE	GE 10%	GE 20%
HC	100,00%	13,73%	91,13%	100,00%	69,44%	74,17%	100,00%	21,70%	57,30%
NOx	72,89%	40,66%	63,68%	79,87%	58,95%	75,13%	74,99%	42,35%	56,95%
CO	81,69%	71,95%	69,35%	61,83%	48,29%	38,06%	35,13%	9,23%	14,38%
CO ₂	-1,41%	-12,39%	-24,19%	-12,16%	-7,86%	-13,31%	-30,19%	-17,87%	-24,77%
Formaldehído	96,85%	91,56%	94,32%	98,22%	91,54%	93,68%	96,69%	83,02%	91,52%
Acetaldehído	73,47%	60,39%	67,13%	85,32%	-15,33%	47,11%	75,08%	-53,47%	44,43%

En la Tabla 16 se puede apreciar el porcentaje en que el convertidor catalítico reduce las emisiones de exhosto. Para las mezclas con 20% v/v de etanol se aprecia una disminución alrededor del 50% en las emisiones de acetaldehído y en más del 90% para las de formaldehído. Estos porcentajes varían dependiendo de la vida útil del convertidor catalítico y del cuidado que se haya tenido con éste, por ejemplo, el uso de gasolina con plomo da como resultado la saturación del convertidor catalítico del automóvil.

3.4.2 Determinación del Consumo de Combustible. Se determinó la incidencia de la adición de etanol en el consumo de combustible y los resultados se muestran a continuación en la Tabla 17. El rendimiento se presenta en kilómetros recorridos por cada galón de combustible consumido.

Tabla 17: Rendimiento de la Gasolina Extra GCB y mezclas de Gasolina Extra GCB con Etanol Anhidro al 10% y 20% v/v [km/gal]

Vehículo	GE GCB	GE GCB 10% v/v etanol	GE GCB 20% v/v etanol
Daewoo Lanos SX/1500 - 01	28,83	26,67	25,50
Daewoo Lanos SX/1500 - 02	25,66	24,44	24,02
Daewoo Lanos SX/1500 -03	24,66	23,25	23,38
Mazda 626L Asahi/2000	20,29	20,41	20,52

En la Figura 17 se presentan los datos obtenidos para el consumo de combustible que se reportan en la Tabla 17.

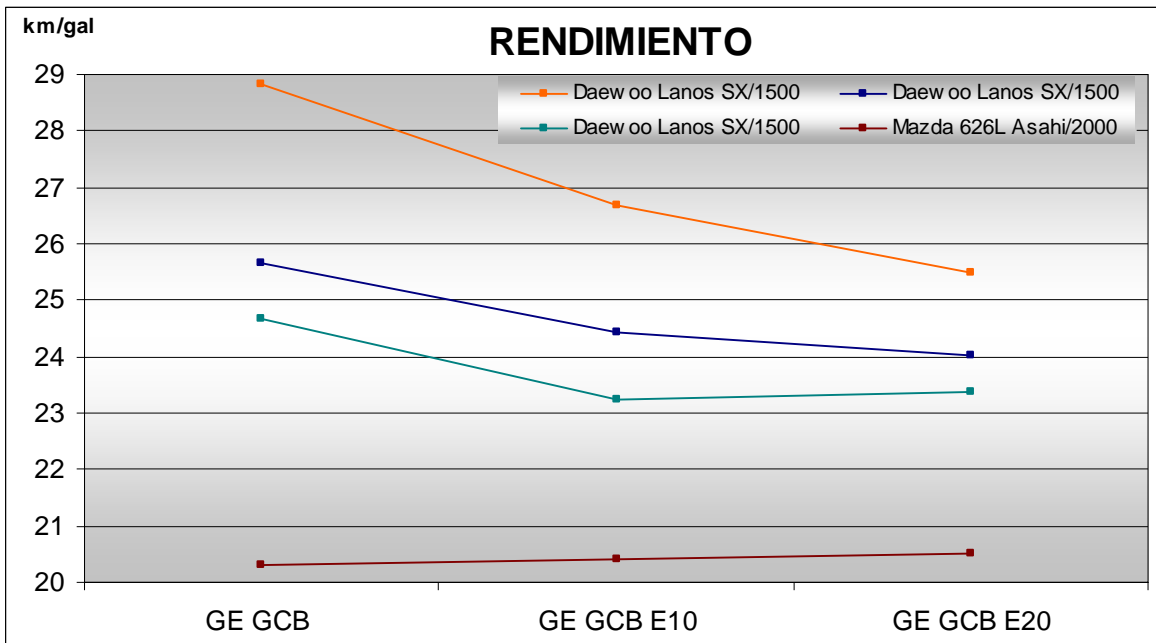


Figura 17: Rendimiento de la Gasolina Extra GCB y Mezclas con 10% y 20% v/v de Etanol Anhidro

Con la utilización de combustibles oxigenados se consigue tener una mejor combustión por la adición de oxígeno con el etanol a la mezcla, sin embargo, esta adición significa la disminución del valor calórico total de la mezcla combustible, ya que el calor de combustión del etanol es más bajo que el de la gasolina, cuyos valores son 29.05 MJ/kg para el etanol y 45.95 MJ/kg para la gasolina extra, como se puede ver en la Tabla 2. Esta disminución provoca un aumento en el consumo de combustible, lo que quiere decir, un menor rendimiento de las mezclas oxigenadas respecto a la gasolina extra como se evidencia en la Figura 17.

3.4.3 Determinación del Torque y la Potencia de los Automóviles con la Gasolina Base y Gasolina Reformulada. Los resultados que se presentan en la Tabla 18 corresponden al promedio de tres pruebas realizadas con cada combustible en cada uno de los vehículos utilizados.

Tabla 18: Torque y potencia de los vehículos utilizando gasolina extra con etanol anhidro en concentraciones de 0%, 10% y 20% v/v

Vehículo	Combustible	TORQUE [N·m]	RPM	POTENCIA [kW]	RPM
Daewoo Lanos SX/1500_01	Gasolina Extra	80,2	2500	25,5	3250
	Gasolina Extra + 10% Etanol	80,5	2500	25,5	3250
	Gasolina Extra + 20% Etanol	81,7	2500	25,9	3250
Daewoo Lanos SX/1500_02	Gasolina Extra	77,6	3000	24,0	3000
	Gasolina Extra + 10% Etanol	78,2	2500	24,0	3000
	Gasolina Extra + 20% Etanol	84,3	2500	26,0	3000
Daewoo Lanos SX/1500_03	Gasolina Extra	78,0	2500	24,1	3000
	Gasolina Extra + 10% Etanol	78,2	2500	24,2	3000
	Gasolina Extra + 20% Etanol	78,6	3000	24,3	3000

No se aprecian diferencias considerables en la potencia y el torque generado por el motor de los vehículos, esto obedece a que la pérdida de poder calorífico ocasionada por la oxigenación de las gasolinas se compensa con el incremento en el consumo de combustible.

El octanaje requerido por los vehículos es inferior al octanaje de las mezclas, por lo tanto, no influye en el funcionamiento de los mismos.

Los datos que se presentan en la Tabla 18 concuerdan con las curvas que se muestran en la Figura 4. El torque máximo se alcanza a unas rpm menores que las rpm máximas del motor a las cuales se llega a la potencia máxima.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA DE GASOLINA CON EL 20% DE ETANOL.

En la Tabla 19, se presentan los resultados de los análisis relacionados en la Tabla 1, que se utilizaron para caracterizar la mezcla de gasolinas base con el 20% v/v de etanol. Las propiedades cumplen con los parámetros de calidad establecidos por la resolución 1180 de 2006.

Las propiedades de presión de vapor Reid e índice antidetonante se ajustaron con base en los resultados obtenidos en las secciones 3.1 y 3.2 para las mezclas con 20% v/v de etanol anhidro.

Tabla19: Propiedades fisicoquímicas de las mezclas de gasolina regular y gasolina extra con 20% v/v de etanol anhidro

ANÁLISIS	NORMA ASTM	UNIDADES	GASOLINA REGULAR E20 GCB	GASOLINA EXTRA E20 GCB
Densidad (15 °C)	D-4052	g/ml	0,7477	0,7559
Gravedad API (15.6°C)	D-4052		57,7	55,6
% v/v de Etanol	D-6729	%	19,38	19,42
Presión de Vapor Reid (37.8°C)	D-323	psi	7,90	8,24
%p/p de Azufre	D-4294	%	0,023	0,056
Corrosión en Lámina de Cobre (50°C)	D-130	Clasificación	1 ^a	1a
RON	D-2699		87,6	95,8
MON	D-2700		80,7	82,6
Índice Antidetonante*			84,1	89,2
Índice de Cierre de Vapor (ICV)**		kPa	88,37	98,7
Calor de Combustión	D-240	MJ/Kg	43,03	42,16
Destilación				
Punto Inicial de Ebullición	D-86	°C	44,4	42,2
10%		°C	61,1	56,2
50%		°C	74,4	73,9
90%		°C	151,7	166,6
Punto Final de Ebullición		°C	183,9	205,2
Residuo		ml	1,1	1,0
Cromatografía (PIANO)				
Parafinas	D-6729	% Volumen	15,161	7,993
I-Parafinas		% Volumen	28,374	24,117
Aromáticos		% Volumen	9,575	17,807
Naftenos		% Volumen	18,092	10,342
Olefinas		% Volumen	9,024	19,209
Oxigenados		% Volumen	19,362	19,494
No identificados		% Volumen	0,156	0,398
C12+		% Volumen	0,256	0,640

* El Índice Antidetonante se calcula mediante la siguiente fórmula $IAD = (RON + MON) / 2$

**El Índice de Cierre de Vapor se calcula de la siguiente forma:

$$ICV = RVP [kPa] + 1,13 * (\% \text{volumen evaporado a } 70^{\circ}C)$$

Estos resultados muestran que es posible reformular la gasolina con un 20% v/v de etanol anhidro sin causar alteraciones en el torque y la potencia de los vehículos. La desviación en el resultado de la concentración de etanol en la mezcla E20 se produjo por la precisión de los instrumentos de medición volumétricos utilizados para la preparación de estas mezclas. El volumen que se requería para la caracterización era mucho mayor que el volumen preparado durante los estudios para el ajuste de las propiedades. Para la realización de la caracterización, las muestras fueron fraccionadas del volumen total de muestra preparado para evitar alteraciones en los resultados de los análisis, que pudieran producirse al preparar diferentes muestras de menor volumen.

La tolerancia de las mezclas que se prepararon no se pudo determinar porque, como se mencionó en la sección 2.5, el Instituto Colombiano del Petróleo no cuenta con el equipo para la realización de esta prueba.

4. CONCLUSIONES

- La RVP de la gasolina base máximo debe ser 7.08 psi para que al adicionarle etanol anhidro en una proporción en volumen de 20% no sobrepase de 8.00 psi.
- El IAD de la Gasolina Regular GCB base debe ser 72 y el IAD de la Gasolina Extra GCB base de 84 para que al adicionarle 20% v/v de etanol anhidro se obtenga un IAD de 84 y 89 respectivamente.
- Al aumentar la temperatura la tolerancia al agua de las mezclas gasolina-etanol aumenta. La mezclas de gasolina con 20% v/v de etanol toleran más agua que las mezclas de gasolina con 10% v/v de etanol. Para evitar la separación de fases la concentración máxima de agua en la mezcla debe estar alrededor de 5000 ppm.
- La implementación de la mezcla E20 no produce cambios abruptos en las emisiones de HC, NO_x, CO y CO₂ respecto a las generadas por la gasolina con 10% v/v de etanol.
- Antes del convertidor catalítico, las emisiones de formaldehído no presentan tendencia en los vehículos de inyección y en el vehículo de carburador se incrementan en un 28% al pasar del 10% al 20% v/v de etanol en la mezcla.
- Las emisiones de acetaldehído presentan un incremento del 50% aproximadamente al incrementar la concentración de etanol de 10% v/v a 20% v/v de etanol en la mezcla.
- Para las mezclas con 20% v/v de etanol, el convertidor catalítico reduce las emisiones de acetaldehído alrededor del 50% y las de formaldehído en más del 90%.
- El consumo de combustible de las mezclas gasolina - etanol aumenta con el contenido de etanol debido a que el poder calorífico del etanol es 2/3 el de la gasolina.
- La potencia y el torque de los vehículos evaluados no se afectan al utilizar mezclas E10 y E20.

5. RECOMENDACIONES

Para complementar los resultados que se obtuvieron en este estudio, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Determinar las emisiones de exhosto para los combustibles bases y oxigenados con 10% y 20% v/v de etanol anhidro, en vehículos diferentes al Daewoo Lanos SX/1500 y Mazda 626L Asahi/2000, con el fin de configurar una base de datos más extensa que permita ampliar los resultados que se presentaron en este estudio.
- Para determinar la expansión volumétrica de las mezclas de gasolinas base con etanol anhidro en concentraciones de 10% y 20% v/v de etanol anhidro, se hace necesario diseñar un equipo mediante el cual se logren controlar de manera efectiva condiciones como temperatura, presión, medición de volúmenes de los componentes de la mezcla y el volumen de la mezcla final.
- Implementar campañas educativas en relación con la importancia del uso del convertidor catalítico para la reducción de las emisiones de exhosto y los cuidados que deben tenerse para prolongar su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. ASTM D130-04.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter. ASTM D4052-96 R-02.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Determination of Individual Components in Spark Ignition Engine Fuels by 100 Meter Capillary High Resolution Gas Chromatography. ASTM D6729-04.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Determination of Individual Components in Spark Ignition Engine Fuels by 100 Meter Capillary (with Precolumn) High Resolution Gas Chromatography. ASTM D6730-01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Determination of Individual Components in Spark Ignition Engine Fuels by 50-Meter Capillary High Resolution Gas Chromatography. ASTM D6733-01

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Determination of MTBE, ETBE, TAME, DIPE, Methanol, Ethanol and tert-Butanol in Gasoline by Infrared Spectroscopy. ASTM D5845-01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure. ASTM D86-05.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel. ASTM D2700-06.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids. ASTM D1218-02.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel. ASTM D 2699-06a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Rust-Preventing Characteristics of Inhibited Mineral Oil in the Presence of Water. ASTM D665-06.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. ASTM D4294-03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Vapor Pressure of Gasoline and Gasoline-Oxygenate Blends (Dry Method). ASTM D4953-06.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Reid Method). ASTM D323-06.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1083 de 31 de Julio de 2006.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 1180 del 21 de Junio de 2006.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución No. 180158 del 02 de Febrero de 2007.

EASTWOOD, Peter. Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment. Jhon Wiley & Sons Ltd.: Great Britain, 2000. p. 7-27, 125-123, 271-274.-

MARTÍNEZ, J. Andrés. Bioalcohol y Gasolina. En: INGENIERIA QUIMICA. Volumen 36 Número 413. España, 2004. p. 69-73.

PEREZ DE BRICIO, C. Los Combustibles del Futuro. En: INGENIERIA QUIMICA. Volumen 36 Número 413. España, 2004. p. 63-67.

PINTO MORENO, Carlos Alberto y RUEDA ACEVEDO, Uriel Fernando. Estudio de la Mezcla Gasolina con 10% de Etanol Anhidro y Evaluación de sus propiedades fisicoquímicas. Bucaramanga, 2002. Tesis de pregrado UIS.

TORRES, Jaime *et al.* Estudio de la Mezcla Gasolina con 10% de Etanol Anhidro y Evaluación de sus Propiedades Fisicoquímicas. En: ECOPETROL. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Volumen 2 Número 3. Piedecuesta, 2002. p. 79, 80.

SALAZAR ARIAS, Álvaro. Manual de Contaminación Atmosférica. AINSA: Medellín – Colombia 1985. p. 1 - 1.40.

SMITH, J.M., VAN NESS, H.C. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. McGraw-Hill: México 1988. p. 321, 376, 381.

WARK, KENNET y WARNER, CECIL F. Contaminación del Aire, Origen y Control. p. 338.

<http://www.escharlamotor.org/info/combustibles/>

<http://www.ingprovidencia.com>

<http://www.lubrimax.com>

<http://www.stealth316.com/2-safcii-adjust.htm>

<http://www.tunning.deautomoviles.com.ar>

Anexo A. Requisitos de calidad del etanol anhidro combustible utilizado como componente oxigenante de gasolinas

Característica	Unidad	Especificación	Métodos de Prueba
		Fecha de Vigencia	
		Julio 1 de 2005	
Color	-	Incoloro	Incoloro Visual
Aspecto	-	(1)	Visual
Acidez Total	56	mg/l	ASTM D 1613 ó ABNT/NBR 10547 ó MB2788
	0.007	% masa	
Conductividad eléctrica, máxima	500	S/m	ASTM D 1125 ó (2)ABNT/NBR 10547 ó MB2788
Densidad a 20°C, máximo	791,5	kg/m ³	ASTM D 4052 ó ASTM D 891 ó MB1533
% de etanol, mínimo ⁽³⁾	99,5	% Vol.	ASTM D 5501
% alcohólico a 20°C, mínimo	99,5	°INPM	ABNT/NBR5992 ó MB1533
Material no volátil a 105°C, máximo	30	mg/l	ABNT/NBR 2123
Alcalinidad	-	Negativo	ABNT/NBR 9866

(1) Limpio, claro, sin color y libre de impurezas y de materiales en suspensión y precipitados

(2) ABNT/NBR: Métodos de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas / Normas Brasileiras

(3) Requerido cuando el alcohol no ha sido producido por vía fermentación a partir de caña de azúcar.

Anexo B. Requisitos de calidad de las gasolinas básicas

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN				MÉTODOS DE PRUEBA
		FECHA DE VIGENCIA				
		Abril 1º 2001		Dic 31 2010		
1. Índice Antidetonante, mínimo ⁽¹⁾						
Gasolina Corriente	Adimensional	81	81	ASTM D2699 y ASTM D2700 ó IR ⁽²⁾		
Gasolina Extra	Adimensional	87	87			
2. Plomo Máximo	g/l	0,013	0,013	ASTM D3237 ó ASTM D5059		
3. Índice de Cierre de Vapor (ICV), máximo ⁽³⁾	Kpa	98	98	----		
4. Aromáticos, máximo						
Gasolina Corriente	% vol.	28	28	ASTM D5580 ó D1319 ó Método PIANO (ASTM D6729)		
Gasolina Extra	% vol.	35	35			
5. Benceno, máximo						
Gasolina Corriente	% vol.	1,0	1,0	ASTM D5580 ó ASTM D3606 ó ASTM D6729		
Gasolina Extra	% vol.	2,0	2,0			
6. Azufre, máximo	% masa	0,10	0,03	ASTM D4294 ó ASTM D2622		
7. Corrosión al Cobre, 3h a 50°C, máximo	Clasificación	1	1	ASTM D130		
8. Contenido de Gomas, máximo	mg/100 ml	5	5	ASTM D381		
9. Estabilidad a la Oxidación, mínimo	Minutos	240	240	ASTM D525		
10. Destilación		Mín	Máx	Mín	Máx	ASTM D86
10% vol. Evaporado	°C		70		70	
50% vol. Evaporado		77	121	77	121	
90% vol. Evaporado			190		190	
Punto Final de Ebullición			225		225	
11. Contenido de Aditivos ⁽⁴⁾		mg/l	----	----	----	
12. RVP, máximo ⁽⁵⁾		Psia	8,5	8,0	8,0	ASTM D4953 ó ASTM D5191 ó ASTM D323
		KPa	58	55	55	

⁽¹⁾ Índice Antidetonante: IAD = (RON+MON)/2

⁽²⁾ Método alternativo: Infrarrojo

⁽³⁾ ICV = P+1,13(A); en donde: P = presión de vapor en kiloPascales (kPa); A = % volumen evaporado a 70°C

⁽⁴⁾ El paquete de aditivos deberá cumplir como mínimo las funciones de detergente dispersante-controlador de formación de depósitos en el sistema de admisión de combustibles de los motores, incluyendo acción de limpieza como mínimo hasta los asientos de las válvulas de admisión, estabilizador del combustible e inhibidor de oxidación. El Ministerio de Minas y Energía determinará la dosis y calidad de los aditivos, al igual que el método de prueba, de acuerdo con lo establecido en la Resolución No. 81055 de septiembre 20 de 1999 o la que lo modifique o sustituya.

⁽⁵⁾ RVP, Máx.: Presión de Vapor Reid, a 37,8 °C.

Requisitos de calidad de las gasolinas oxigenadas con etanol anhidro combustible para uso como combustible de motores de encendido por chispa

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN				MÉTODOS DE PRUEBA
		FECHA DE VIGENCIA				
		Nov 1 2005		Dic 31 2010		
1. Índice Antidetonante, mínimo ⁽¹⁾						
Gasolina Corriente	Adimensional	84		81		ASTM D2699 y ASTM D2700 ó IR ⁽²⁾
Gasolina Extra	Adimensional	89		87		
2. Plomo Máximo	g/l	0,013		0,013		ASTM D3237 ó ASTM D5059
3. RVP, máximo ⁽⁵⁾	Psia	9,3		9,3		ASTM D4953 ó ASTM D5191 ó ASTM D323
	KPa	65		65		
4. Índice de Cierre de Vapor (ICV), máximo ⁽³⁾	Kpa	124		124		----
5. Aromáticos, máximo						
Gasolina Corriente Oxigenada	% vol.	25		25		ASTM D5580 ó D1319 ó Método PIANO (ASTM D6729)
Gasolina Extra Oxigenada	% vol.	31,5		31,5		
6. Benceno, máximo						
Gasolina Corriente Oxigenada	% vol.	0,9		0,9		ASTM D5580 ó ASTM D3606 ó ASTM D6729
Gasolina Extra Oxigenada	% vol.	1,8		1,8		
7. Azufre, máximo	% masa	0,09		0,027		ASTM D4294 ó ASTM D2622
8. Corrosión al Cobre, 3h a 50°C, máximo	Clasificación	1		1		ASTM D130
9. Contenido de agua, máximo	% vol.	0,2		0,2		ASTM D130
10. Contenido de Gomas, máximo	mg/100 ml	5		5		ASTM D381
11. Oxígeno, máximo	% masa	3,50		3,5		ASTM D4815
12. % de etanol	% vol.	10 ± 0,5		10 ± 0,5		ASTM D5501
13. Contenido de Aditivos	mg/l	----		----		----
14. Estabilidad a la Oxidación, mínimo	Minutos	240		240		ASTM D525
10. Destilación		Mín	Máx	Mín	Máx	ASTM D86
10% vol. Evaporado	°C		70		70	
50% vol. Evaporado		77	121	77	121	
90% vol. Evaporado			190		190	
Punto Final de Ebullición			225		225	
Residuo de la destilación, máximo	% vol.		2		2	

Las referencias son iguales que en la Tabla anterior.

Anexo C. Motor CFR Wakesha



Anexo D. Manual de Manejo para el Debutanizador de Gasolinas

1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

En la Figura 1 se muestra el esquema del equipo utilizado para la debutanización de la gasolina. Este equipo posee siete partes fundamentales, el tanque debutanizador, el enfriador, el baño de enfriamiento, el regulador de presión, el sistema para tomar la muestra, el sistema para recoger los volátiles que se despojan en el proceso y el tanque para recoger los residuos.

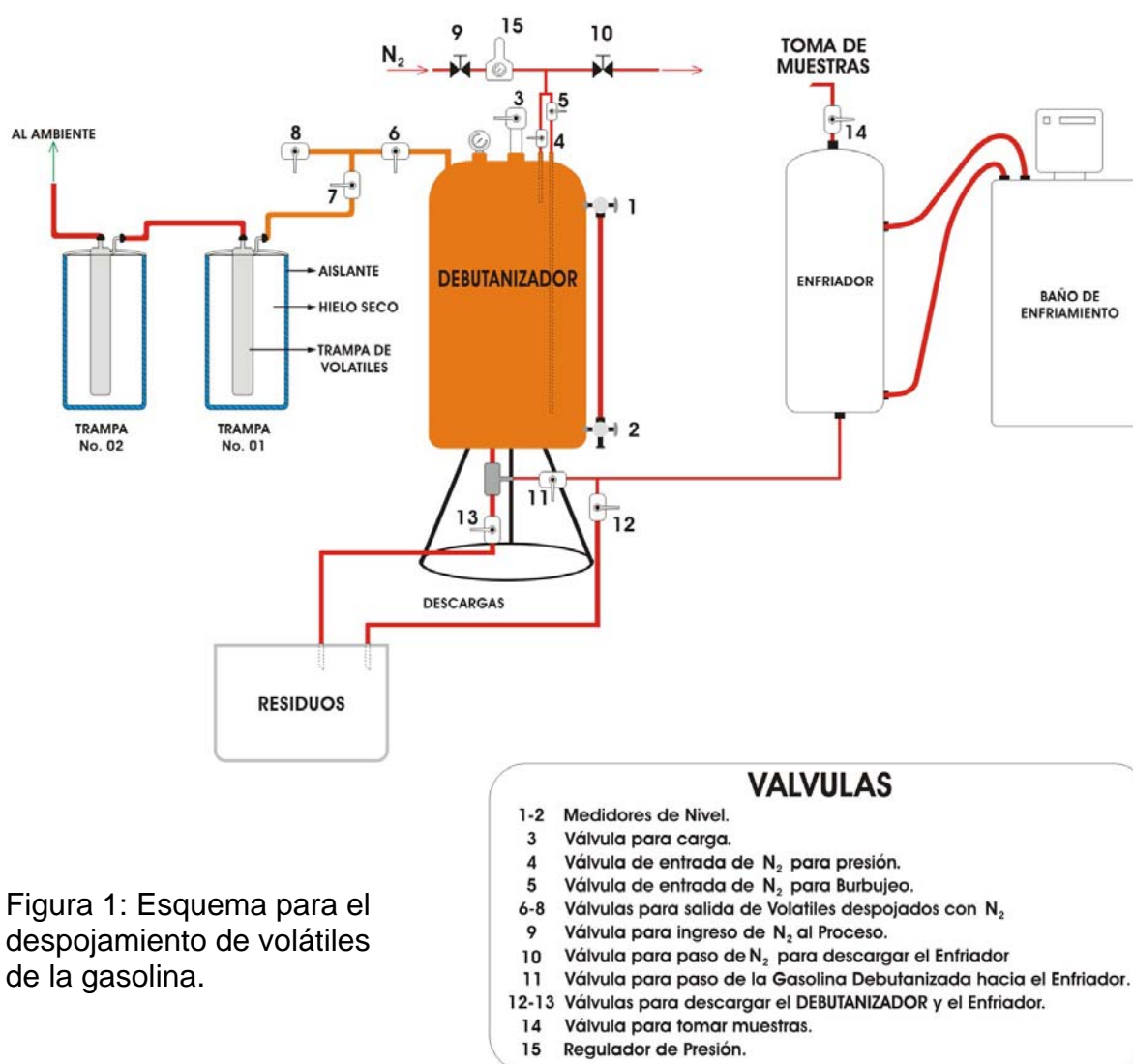


Figura 1: Esquema para el despojamiento de volátiles de la gasolina.

TANQUE DEBUTANIZADOR

Es un tanque de acero hermético con capacidad de 10 L donde se deposita la muestra. Para la debutanización, el tanque debe ser llenado en un 70 a 80% de su capacidad, proporcionando así espacio suficiente para la liberación de los volátiles.

El tanque consta también de un medidor de nivel de vidrio con escala volumétrica.

ENFRIADOR

Es un cilindro de PVC sellado lleno de etanol que contiene un serpentín por donde circula la muestra de gasolina debutanizada y que está aislado térmicamente. El etanol proviene del baño de enfriamiento y se recircula constantemente durante todo el proceso de debutanización. La recirculación del etanol ocurre en contracorriente con el flujo de gasolina que proviene del tanque debutanizador.

BAÑO DE ENFRIAMIENTO

Es el encargado de suministrar la corriente fría al intercambiador de calor para refrigerar la muestra y evitar la pérdida de volátiles durante su recolección. Funciona con etanol y tiene capacidad de enfriamiento hasta -30°C .

SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE VOLÁTILES

Bolsa: cuando los volátiles requieren ser recogidos en su estado gaseoso. Los tamaños de las bolsas dependen del tiempo de debutanización, en la Tabla 1 se sugieren algunas medidas, tamaños mayores son complicados de pesar. Este tipo de recolección es el de menor eficiencia.

Tabla 1: Bolsas para la recolección de volátiles

TIEMPO DE DEBUTANIZACIÓN	MEDIDA DE LAS BOLSAS TEDLAR
5 minutos	95 cm. x 55 cm.
10 minutos	95 cm. x 65 cm.
15 minutos	95 cm. x 75 cm.

Trampa: cuando los volátiles requieren ser condensados para su recolección en estado líquido. Para este procedimiento se requiere de la utilización de hielo seco y aislamiento del recipiente que porta la trampa. Este tipo de recolección es el más eficiente debido a que la baja temperatura que se alcanza con el montaje para la trampa crea una especie de vacío que incrementa la masa de volátiles

totales recogidos, así mismo con dos trampas se consigue atrapar el doble de volátiles despojados de las gasolinas base con la debutanización.

REGULADOR DE PRESIÓN

Está conectado a la línea de nitrógeno y se encarga de mantener la presión del tanque debutanizador según las condiciones de operación. La línea de nitrógeno se conecta al tanque debutanizador por su parte superior y es introducido por dos conductos, uno largo que llega hasta el fondo del tanque para el burbujeo de la muestra y uno corto que llega hasta el tope del tanque para presionar.

PORTAMUESTRAS

Es el recipiente donde se recoge la muestra. Consta de un frasco de vidrio de 312 mL refrigerado en un baño de hielo con etanol cuya temperatura debe estar entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un corcho adaptado en la boca que posee una pipeta pasteur que llega casi hasta el fondo del frasco para evitar la formación de burbujas durante la recolección de la muestra y un termómetro para medir la temperatura de la mezcla durante la recolección, ésta debe verificarse entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, el corcho también debe tener un hueco pequeño por donde circule aire. Este montaje se muestra en la Figura 2.

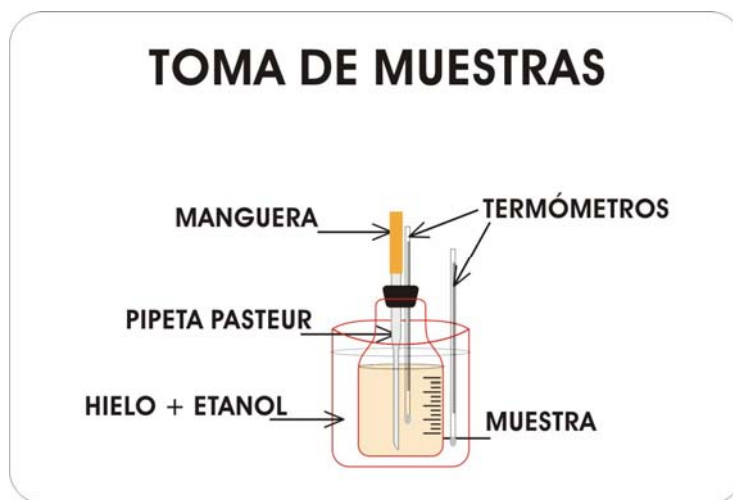


Figura 2: Sistema para tomar la muestra.

RECOLECTOR DE DESECHOS

Es el recipiente donde se vacían los residuos del tanque debutanizador después de la toma de muestras.

2. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación que se trabajaron para la realización de la debutanización de las gasolinas base se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Condiciones de Operación del Equipo Debutanizador

CONDICIÓN EN EL EQUIPO	VALOR
Presión del tanque debutanizador	3 psi
Temperatura del tanque debutanizador	20 °C
Volumen del tanque debutanizador	7 - 8 L
Temperatura del baño de enfriamiento	-22 °C
Temperatura de toma de la muestra	-5 a -1 °C
Intervalo de tiempo de debutanización	5 min.

3. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN

El procedimiento para realización del despojamiento de volátiles de las gasolinas base, se describe detalladamente en 32 pasos. El paso 8 de recolección de volátiles se explica en la parte final. Esta recolección depende de la fase en que se requieran atrapar los volátiles durante el proceso. El procedimiento A se utiliza cuando se recolecten volátiles en estado gaseoso y el procedimiento B cuando se recolecten volátiles en estado líquido.

1. Revisar que todas las válvulas del sistema debutanizador estén cerradas.
2. Encender el baño de enfriamiento.
3. Abrir la válvula de aguja de entrada al regulador de nitrógeno y subir la presión del regulador hasta 3 psi.
4. Abrir la válvula de presión del tanque, verificar la presión del manómetro en 3 psi, cerrar la válvula de presión del tanque.
5. Abrir lentamente la válvula de carga del tanque debutanizador y esperar que la presión del manómetro llegue a 0 psi.
6. Abrir las dos válvulas del medidor de nivel y cargar el tanque debutanizador con 8L de muestra.
7. Cerrar las válvulas del medidor de nivel y de carga.
8. **Recolección de volátiles:** siga procedimiento A o procedimiento B.
9. Presionar el tanque debutanizador.
10. Abrir la válvula de salida de muestra y la válvula de salida del serpentín, dejar salir una pequeña cantidad de muestra para confirmar que el serpentín está lleno y purgar.
11. Cerrar la válvula de salida del serpentín.
12. Mantener la muestra en el serpentín durante dos minutos aproximadamente para que alcance la temperatura de salida.

13. **Toma de Muestra:** Colocar el corcho en la boca del frasco del sistema portamuestra, abrir la válvula del serpentín, tomar la muestra verificando temperatura de la mezcla y regulando el flujo de gasolina para que no se formen burbujas dentro del frasco, cuando se llegue al aforo cerrar la válvula del serpentín, inmediatamente tapar bien el frasco de 312 mL y mantenerlo refrigerado, hasta los análisis.
14. Purgar la manguera entre toma y toma de muestra con el fin de evacuar las burbujas que se formen en la manguera.
15. Si la presión del manómetro disminuye, cerrar las válvulas de salida de la muestra y la de salida del serpentín y volver a presionar el tanque debutanizador.
16. Después de tomar todas las muestras, cerrar la válvula de salida de muestra.
17. Abrir la válvula de purga.
18. Abrir la válvula de aguja del regulador de presión conectada a la manguera negra y abrir la válvula del serpentín.
19. Acoplar la manguera negra con la manguera de salida de muestra del serpentín para evacuar la gasolina residual.
20. Cerrar la válvula de aguja del regulador de presión.
21. Cerrar la válvula de salida del serpentín.
22. Cerrar la válvula de purga.
23. Presionar el tanque debutanizador.
24. Abrir lentamente la válvula de descargue del tanque debutanizador y evacuar la gasolina remanente.
25. Cerrar la válvula de descargue del tanque debutanizador.
26. Abrir las válvulas del medidor de nivel para evacuar la gasolina que hay en él.
27. Cerrar las válvulas del medidor de nivel.
28. Presionar el tanque debutanizador.
29. Abrir la válvula de descargue del tanque debutanizador y evacuar de nuevo la gasolina.
30. Cerrar la válvula de descargue del tanque debutanizador.
31. Verificar que todas las válvulas del equipo estén cerradas.
32. Conectar una manguera con salida al ambiente en la línea de salida de volátiles y dejar esta válvula abierta.

PROCEDIMIENTO A: RECOLECCIÓN DE VOLÁTILES GASEOSOS.

- Hacer vacío a la bolsa recolectora de volátiles y pesarla.
- Conectar la bolsa a la línea de salida de volátiles.
- Abrir la válvula de salida de volátiles.
- Dejar estabilizar el tanque hasta que alcance la temperatura de operación, aproximadamente 2 horas.
- Comprobar condiciones de operación.
- Abrir la válvula de burbujeo y cronometrar el tiempo de Debutanización.
- Cerrar la válvula de burbujeo.

- Dejar evacuar la totalidad de los volátiles que se encuentran en el tanque y cerrar la válvula de salida de volátiles.
- Desconectar la(s) bolsa(s) recolectora(s) de volátiles. Si se requiere caracterización pesarla(s) y llevarla(s) inmediatamente al laboratorio para análisis de cromatografía.

PROCEDIMIENTO B: RECOLECCIÓN DE VOLÁTILES LÍQUIDOS.

- Colocar la trampa de volátiles en un recipiente con hielo seco y que se encuentre aislado.
- Conectar la trampa a la línea de salida de volátiles.
- Conectar una manguera con salida al ambiente en la parte superior de la trampa, para evitar la creación de una atmósfera explosiva evacuando los volátiles que no pueden ser condensados.
- Dejar estabilizar el tanque hasta que alcance la temperatura de operación, aproximadamente 2 horas.
- Comprobar condiciones de operación.
- Abrir la válvula de burbujeo y cronometrar el tiempo de Debutanización.
- Cerrar la válvula de burbujeo.
- Dejar evacuar la totalidad de los volátiles que se encuentran en el tanque y cerrar la válvula de salida de volátiles.
- Desconectar la trampa.
- Si se requiere caracterización, medir en una probeta el volumen de volátiles recolectados, pesarlos, tomar una muestra para análisis de cromatografía, envasarlos en un recipiente cerrado y mantenerlo en hielo seco.

Anexo E. Medidor semiautomático de Presión de Vapor Herzog Lauda



Anexo F. RBN

RON	RESEARCH BLENDING NUMBER									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
11	39,4	39,4	39,4	39,5	39,5	39,5	39,6	39,6	39,6	39,6
15	39,7	39,7	39,7	39,7	39,8	39,8	39,8	39,8	39,9	39,9
20	41,7	41,7	41,8	41,8	41,8	41,8	41,9	41,9	41,9	41,9
25	43,0	43,0	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,2	43,2	43,2
30	44,3	44,3	44,3	44,4	44,4	44,4	44,5	44,5	44,5	44,5
35	45,6	45,6	45,7	45,7	45,7	45,8	45,8	45,8	45,8	45,9
40	47,0	47,0	47,0	47,0	47,1	47,1	47,1	47,2	47,2	47,2
45	48,3	48,3	48,3	48,4	48,4	48,4	48,4	48,5	48,5	48,5
50	49,6	49,6	49,7	49,7	49,7	49,7	49,8	49,8	49,8	49,8
55	50,8	50,8	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9	51,0	51,0	51,0
60	52,0	52,0	52,0	52,0	52,0	52,1	52,1	52,1	52,1	52,1

65	53,1	53,1	53,1	53,2	53,2	53,2	53,2	53,3	53,3	53,3
70	54,4	54,4	54,4	54,5	54,5	54,5	54,6	54,6	54,6	54,6
75	55,9	55,9	55,9	55,9	56,0	56,0	56,0	56,1	56,1	56,1
80	57,5	57,6	57,6	57,6	57,7	57,7	57,8	57,8	57,8	57,9
85	59,6	59,6	59,7	59,7	59,8	59,8	59,9	59,9	60,0	60,0
90	62,1	62,2	62,2	62,3	62,4	62,4	62,5	62,5	62,6	62,6
95	65,5	65,6	65,7	65,8	65,9	66,0	66,0	66,1	66,2	66,3
100	70,6	70,7	70,7	70,8	70,9	71,0	71,0	71,1	71,1	71,2
105	74,4	74,5	74,6	74,7	74,8	74,8	74,9	75,0	75,0	75,1
110	77,5	77,6	77,6	77,7	77,7	77,8	77,8	77,8	77,9	77,9
115	80,1	80,1	80,2	80,3	80,3	80,4	80,5	80,5	80,6	80,7
120	84,7	84,8	84,9	85,1	85,2	85,3	85,5	85,6	85,8	85,9

Anexo G. Dependencia de la Solubilidad del Agua en la Mezcla Gasolina – Etanol con la Temperatura

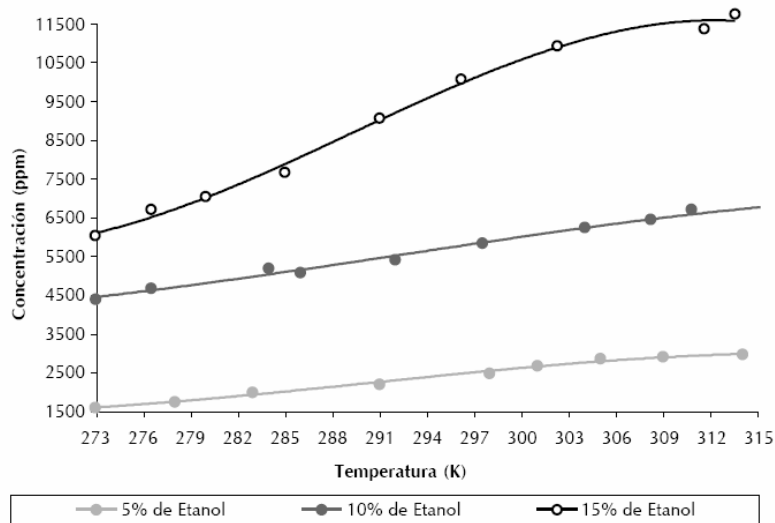


Figura 6. Solubilidad del agua en la mezcla etanol-gasolina regular con la temperatura

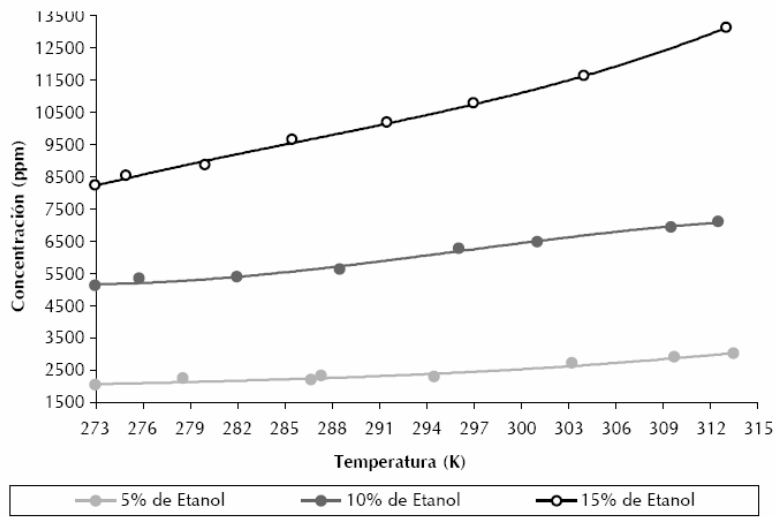


Figura 7. Solubilidad del agua en la mezcla etanol-gasolina extra con la temperatura

Fuente: TORRES, Jaime *et al.* Estudio de la Mezcla Gasolina con 10% de Etanol Anhidro y Evaluación de sus Propiedades Fisicoquímicas. En: ECOPETROL. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro. Volumen 2 Número 3. Piedecuesta, 2002. p. 79, 80.

Anexo H. Chasis Dinamométrico Laboratorio de Motores ICP

