

# Mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna en Colombia

Juan Mantilla<sup>1\*</sup>, Carlos Galeano<sup>1</sup>, Alejandro Muñoz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Modelado y Métodos Numéricos en Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Cra. 30 N° 45-03 Edificio 453, oficina 401, Bogotá D. C. Colombia. \*Autor para correspondencia: jmmantillag@unal.edu.co

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Energía y Eficiencia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Calle 21 N° 4-40, Bogotá D. C. Colombia.

## Gasoline-ethanol blends in internal combustion engines in Colombia

### ABSTRACT

In this work the change on the performance and emissions from spark ignited engines when gasoline is replaced by a mixture of gasoline and ethanol is analyzed. Initially, the difference between the physical and chemical properties of the fuel and its possible effects on the engine is investigated. Afterwards the documented effect of changing fuel performance and engine emissions is examined. To accomplish these objectives a deep literature review of these issues was performed to propose new questions according to the Colombian environment. The results of all the considered subjects indicate that fuel switching would be an effective policy if various modifications are made to the fuel and engines. The concerns raised, together with the results of the analysis carried out, can also be used as input to continue the development of research and innovation aimed at exploiting the potential of ethanol as fuel.

**Key words:** gasoline-ethanol blends, engines, combustion, performance, emissions.

**Editor:** Hernández Fernández, J.

**Citation:** Mantilla, J., Galeano, C. & Muñoz, A. (2016). Mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna en Colombia. *Revista Mutis* 6(1), 41-53, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1111>

**Received:** September 10, 2015. **Accepted:** March 31, 2016. **Published online:** May 31, 2016.

**Copyright:** ©2016 Mantilla, J., Galeano, C & Muñoz, A. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Competing Interests:** The authors have no conflict of interest.

### RESUMEN

En este trabajo se analiza el cambio sobre el desempeño y las emisiones de los motores encendidos por chispa cuando la gasolina es reemplazada por una mezcla de gasolina y etanol. Inicialmente se investiga la diferencia en las propiedades fisicoquímicas del combustible, y sus posibles efectos sobre el motor. Posteriormente se examina el efecto documentado del cambio de combustible en el desempeño y las emisiones del motor. Para llevar a cabo estos objetivos se realizó una revisión bibliográfica profunda de estos temas que sirve para proponer nuevas preguntas de acuerdo con el entorno colombiano. Los resultados de todos los puntos considerados indican que para que el cambio de combustible se convierta en una política efectiva, diferentes modificaciones deben



realizarse al combustible y a los motores. Las inquietudes planteadas, junto con los resultados del análisis llevado a cabo, pueden utilizarse además como insumo para continuar con el desarrollo de trabajos de investigación e innovación tendientes a aprovechar el potencial del etanol como combustible.

**Palabras clave:** mezclas gasolina-etanol, motores, combustión, desempeño, emisiones.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia desde el año 2001 con la Ley 693 se estableció el uso de etanol mezclado con gasolina, el cual fue posteriormente reglamentado en los años 2003, 2005 y 2007. Desde el año 2006 se ha venido utilizando una mezcla de gasolina con etanol producido a partir de caña de azúcar. La implementación ha sido progresiva a lo largo del país, garantizando a la fecha una mezcla de 92 % v/v de gasolina y un 8 % v/v de etanol en todo el territorio nacional, excluyendo algunos departamentos fronterizos. Como resultado de esta política, en diferentes publicaciones se analizan ciertos factores que van desde la seguridad energética, el desarrollo rural hasta el impacto ambiental. Muchas discusiones han surgido alrededor de estos temas, principalmente a nivel internacional, desde diferentes perspectivas. Una de las más sonadas trata del cambio en las condiciones de operación de los motores, temática en la cual se enfoca el presente trabajo.

Específicamente en la ciudad de Bogotá ocurre algo con respecto al parque automotor particular, el cual corresponde al 92 % de los vehículos matriculados en la ciudad. La proporción de vehículos antiguos, modelos de año inferior a 2003, constituye cerca del 42,9 %, mientras que el 23,23 % a modelos entre 2003 y 2007, y el restante a modelos de año posterior a 2008. Esta proporción se ha mantenido a pesar que el número de vehículos particulares ha crecido 146 % en el período 2002 a 2011, de los cuales cerca del 57 % corresponde a automóviles (Alcaldía de Bogotá, 2011). Esta situación presenta un escenario interesante para analizar desde el punto de vista de los variados tipos de motores y su relación con el combustible que utilizan actualmente, y con el combustible que se propone deban utilizar en un futuro según el decreto número 4892 del Ministerio de Minas y Energía. En este decreto se incentiva, a partir del

primero de enero de 2013, a utilizar mezclas de gasolina y etanol en proporciones mayores al 10 % v/v de este último. Recientes estudios realizados por la Universidad Tecnológica de Pereira utilizando combustible E20 en cuatro vehículos de diferente configuración de tren motriz, concluyeron que el cambio de combustible no genera ningún efecto adverso a los mismos (Universidad Tecnológica de Pereira *et al.*, s.f. ).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea en este trabajo una discusión técnica, basada en la revisión profunda de estudios variados, desde el punto de vista de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas gasolina-etanol y su efecto sobre algunos parámetros de operación y emisiones de los motores.

## PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE MEZCLAS GASOLINA-ETANOL

### Número de octano

Para esta propiedad existe acuerdo total en que aumenta, entre 1 y 1,5 % por cada 10 % v/v de aumento en el contenido de etanol en la mezcla, tanto el número de octano de investigación (RON de sus siglas en inglés) como el número de octano de motor (MON de sus siglas en inglés) con respecto a la gasolina (tabla 1). Esto ocurre debido a que el etanol tiene mayores valores que la gasolina para estos dos indicadores; luego, al realizar la mezcla, se incrementa un poco el valor en el número de octano, el cual se calcula como el promedio aritmético de RON y MON.

**Tabla 1. Cambio de propiedades fisicoquímicas, emisiones y parámetros de operación de las mezclas gasolina-etanol con respecto a gasolina pura de acuerdo con la bibliografía consultada.**

<b>Parámetro</b>	<b>Aumento (&gt;) o disminución (&lt;)</b>	<b>Referencias</b>
Número de octano	> 1 a 1,5 %	Torres, Behrentz, Fuels, Shapiro, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He.
Calor de vaporización	> 15 - 18 %	MacLean & Lave, Hsieh, Hansen, Yüksel & Yüksel, Shapiro, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül.
Temperatura de autoencendido	> Hasta un 60 %	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, Wright, Harley & Kean.
Densidad	> Dependiendo de la mezcla	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean.
Poder calorífico inferior	Disminuye dependiendo de la mezcla	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean, Kortum.
Solubilidad en agua	100 %	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean, Kortum.
Monóxido de carbono	< 10 y 40 %	Acevedo, Al-Hasan, Li, Wu, Li, Al-Baghdadi, Yüksel & Yüksel, Ocampo, Behrentz, Fuels, Horta, Environment Australia, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, Vitale, Ragazzi & Nelson, Crary, Durbin, Patzek, Apace Research Ltd, Karman, Knepper, Mayote, Masum, Whitten & Reyes, Schifter, Calvert.
Hidrocarburos totales sin quemar	< 5 - 20 %	American Coalition for Ethanol, Liska, Skidmore, Viju & Kerr, Alcaldía de Bogotá, Universidad Tecnológica de Pereira.
Aldehídos	> 5 - 200 %	He, Hsieh, Pouloupoulos, Yüksel & Yüksel, Ocampo, Behrentz, Fuels, Horta, Environment Australia, Niven, Faiz & Weaver, He, Vitale, Durbin, Patzek, Apace Research Ltd, Guerrieri, Karman, Leong.
Etanol sin quemar	> Depende de la mezcla	He, Pouloupoulos, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He, Vitale, Zervas.
Consumo de combustible	> 1 - 6 %	MacLean & Lave, Acevedo, Al-Hasan, Wu, Li, Hansen, Behrentz, Fuels, Shapiro, Environment Australia, Orbital Engine, Niven, Yücesu & Topgül, He, DOE, Ragazzi & Nelson, Durbin, Patzek, Kortum, Apace Research, American Coalition for Ethanol, Coelho.
Potencia	Igual	Acevedo, Al-Hasan, Li, Asfar & Hamed, Hsieh, Wu, Li, Hansen, Al-Baghdadi, Yüksel & Yüksel.

Algunos autores reportan el aumento en el número de octano como algo que es sobresaliente de las mezclas gasolina-etanol, sin embargo la pregunta que debe hacerse aquí es: ¿cuál es el efecto real del aumento en el número de octano para motores que no se modifican y que utilizan mezclas gasolina-etanol? La respuesta es que no se obtiene ningún efecto. El aumento en el número de octano y su capacidad antidetonante asociada se hacen evidentes en la medida en que se pueda modificar el motor disminuyendo el volumen de la cámara de combustión, alcanzando así una relación de compresión óptima para la nueva mezcla. Esto en teoría puede permitir una salida de potencia igual a la que se obtiene con gasolina pura y un consumo de combustible similar. Otro aspecto importante para discutir tiene que ver con la relación directa que tiene esta propiedad con la temperatura máxima del proceso de combustión. Al aumentar la capacidad de autoencendido del combustible, implícitamente se dice que la temperatura necesaria para que el combustible inicie su proceso de oxidación debe ser mayor, debido principalmente a que el calor de vaporización de la mezcla también es mayor, como se explica más adelante. Todo esto indica que el punto desde el cual se inicia la combustión tiene un valor de temperatura mayor, y si disminuye la emisión de CO debido a una mejor combustión, la temperatura máxima del proceso de combustión necesariamente debe ser más alta.

### Calor de vaporización

Al igual que con el número de octano, todos los trabajos consultados coinciden en que el calor de vaporización de la mezcla es mayor entre 15 y 18 % (tabla 1). Lo anterior significa que la energía necesaria para pasar un kilogramo de mezcla gasolina-etanol a fase de vapor es mayor que la requerida para pasar un kilogramo de gasolina pura a fase de vapor. Si se tiene en cuenta que un combustible solo se puede quemar cuando está en fase gaseosa y mezclado con el oxidante, dos cosas pueden suceder: la primera tiene que ver con que se necesita un tiempo mayor de la mezcla dentro de la cámara de combustión para que se queme una cantidad de combustible similar a la que se quema con gasolina pura. Esto significa cambios en la distribución o en el tiempo de salto de la chispa. Sin embargo, si la velocidad de llama es mayor para las mezclas, lo cual es cierto y puede tener una relación directa con el calor de vaporización, se

compensa en algo el tiempo perdido por la vaporización del combustible. Como segundo punto, el simple hecho de tener un calor de vaporización mayor significa que la temperatura de autoencendido debe ser mayor, con lo que se puede suponer que la temperatura máxima del proceso de combustión es mayor. Si bien el párrafo anterior plantea dos situaciones importantes es necesario preguntarse: ¿la velocidad de llama es siempre mayor para todas las condiciones de operación del motor?, si no es así, ¿cuál es la razón?, ¿cuál es la relación entre la velocidad de llama con el calor de vaporización?, ¿las emisiones resultantes tienen alguna relación con la velocidad de llama?, ¿queda más combustible sin quemar?, ¿la mayor velocidad de llama está relacionada con un mejor proceso de combustión (menos emisiones y mayor salida de potencia)? Las respuestas a estas preguntas se deben obtener de pruebas experimentales en motores que utilizan mezclas de gasolina-etanol con el fin de encontrar las relaciones propuestas.

### Presión de vapor Reid (RVP)

Es una medida de la volatilidad que tiene un combustible. Esto quiere decir que a mayor RVP mayor es la capacidad del combustible para evaporarse dentro de una cantidad de aire determinada. Los datos consultados en las referencias coinciden en que para E10 la RVP es mayor en 14 % que para gasolina. El valor de la diferencia depende en gran medida de la calidad de la gasolina base para la mezcla. A medida que se ajustan las curvas de destilación y se disminuye el butano en la gasolina, se pueden obtener valores similares de RVP para la mezcla. Varios autores reportan que aún sin hacerse el "ajuste" en la calidad de la gasolina y a medida que aumenta el etanol en la mezcla, el valor de RVP se hace similar al de la gasolina pura. Se puede hacer igual para composiciones entre 17 % v/v y 30 % v/v. A partir de estos puntos y al aumentar la cantidad de etanol el valor de RVP disminuye con respecto a la gasolina. A simple vista parece contradictorio el comportamiento de las propiedades descritas anteriormente, calor de vaporización y RVP. Sin embargo, se puede explicar de la siguiente forma: el combustible mezclado necesita mayor cantidad de energía para evaporarse por lo que el fenómeno de difusión está dominado por esta propiedad cuando la mezcla se inyecta en una corriente de aire. Luego el combustible le quita energía disponible al aire, vaporizándose más fácilmente que la gasolina y disminuyendo de forma

considerable la temperatura del aire, aumentando su densidad. A esto se refiere la volatilidad también. La mayor volatilidad tiene tres efectos considerables: el primero es que mejora el arranque en frío de los motores, permitiendo de esta forma que las emisiones disminuyan durante este proceso; el segundo efecto aparece cuando se vaporiza más combustible del necesario, por una temperatura del sistema de alimentación de combustible muy alta, formando “burbujas” de vapor que bloquean el paso de combustible hacia el motor; y el tercer efecto tiene que ver con el potencial para el aumento de emisiones evaporativas desde el cánister o desde los mismos conductos que llevan el combustible al motor, este aspecto se analiza más adelante. Siguiendo con lo planteado en el punto anterior, parece ilógico que para el calor de vaporización se mencione la posibilidad de necesitar más tiempo en la cámara de combustión para permitir que todo el combustible se evapore y a la vez se indique que el combustible mezclado se evapora más fácilmente. En realidad la contradicción no existe. Si se continúa con el ejemplo anterior se puede deducir que al llegar la mezcla al cilindro, si no se dispone de energía suficiente para mantener la mezcla en estado de vapor, lo cual sucede, va a volver rápidamente a un estado líquido. Se demuestra que lo mencionado para el calor de vaporización no es tan incoherente, ya que puede ser posible que la energía necesaria incluso sea mucho mayor de la que se cree debido a que una mayor cantidad de combustible se convierte en gotas de líquido de más tamaño, afectando seriamente la vaporización del combustible para su posterior encendido. En este punto tiene aplicación una pregunta realizada previamente: ¿tiene alguna relación el calor de vaporización con las emisiones producidas en el motor?, ¿cómo se puede verificar esto? Las respuestas no son sencillas, pero una relación *a priori* se puede deducir al verificar la cantidad de combustible sin quemar que sale del ducto de escape. Si esta cantidad es mayor que para el funcionamiento con gasolina, se tiene un indicio claro de que falta tiempo para completar la combustión o que el proceso es afectado por otro fenómeno físico.

### Temperatura de autoencendido

Esta temperatura es mayor en 60 % para el etanol puro con respecto a la gasolina (tabla 1). Es bastante difícil encontrar este dato para mezclas gasolina-etanol. Lo anterior simplemente hace suponer que como la temperatura de autoencendido de uno de los com-

ponentes de la mezcla es mayor, entonces la temperatura de autoencendido de la mezcla va a ser ligeramente más alta. La suposición hecha no es ilógica si se piensa nuevamente desde el punto de vista de la energía necesaria para vaporizar el combustible. A mayor cantidad de energía mayor va a ser la temperatura al final del proceso de cambio de estado líquido a vapor, conocido como punto de evaporación, lo cual se corrobora en las referencias consultadas. Entonces, si después de la evaporación de la mezcla esta tiene una temperatura mayor, se puede inferir que la temperatura de autoencendido sea mayor porque el nivel de excitación de las moléculas en el estado inicial (evaporación) es también mayor. El efecto que tiene una mayor temperatura de autoencendido, consiste en que el nivel energético desde donde comienza el proceso de combustión es más alto. Por ello se puede esperar, si no existen problemas con la combustión (mezcla, extinción de llama, etc.), una temperatura máxima del proceso mayor con respecto al funcionamiento con gasolina.

### Densidad

La densidad de las mezclas gasolina-etanol aumenta con respecto a la gasolina pura (tabla 1). El efecto principal que tiene el aumento de la densidad es que la corriente de aire “arrastra” una mayor cantidad de combustible cuando pasa por el carburador debido a que en este la cabeza de presión estática es mayor. El mismo efecto ocurre en los sistemas de inyección, donde para una misma diferencia de presión entre el inyector y la cámara de combustión, se introduce una mayor cantidad de combustible. Es importante señalar acá que esta es una de las razones, pero no la única, por la cual el consumo de combustible aumenta cuando se utilizan mezclas en motores no modificados. Una pregunta para contestar con respecto a esta propiedad es: ¿cómo se puede compensar el efecto de la mayor densidad? La respuesta puede ser simplemente empobreciendo la mezcla, esto es, disminuyendo la cantidad de combustible que entra al motor con la corriente de aire. Lo anterior es fácilmente realizable en un motor con sistema de alimentación con carburador, pero muy difícil en un motor con control electrónico. Ahora bien, si esto se realiza se debe tener en cuenta que la potencia de salida puede disminuir.

### Poder Calorífico Inferior (LHV)

Esta propiedad disminuye para las mezclas gasolina-etanol entre 2 y 4 %, con mayor tendencia en el intervalo de 3 a 3,4 %. La propiedad LHV es importante porque presenta una medida indirecta del potencial máximo que tiene el combustible de entregar energía cuando los productos de la reacción son los estequiométricos y el agua se encuentra en estado de vapor. Sin embargo, lo que se reporta en la bibliografía consultada es que no debe ser visto esto como la única propiedad que puede reflejar la potencia de salida. Lo anterior se explica con la siguiente situación: si el LHV disminuye en 3 %, el consumo de combustible aumenta en 1,5 % y la potencia se mantiene constante (Acevedo *et al.*, 2008). Debe existir alguna mejora adicional en el proceso de admisión y combustión que se esté compensando por ese LHV perdido. Las razones para afirmarlo se han mencionado anteriormente. La primera tiene que ver con el aumento en la densidad del aire gracias a la mayor volatilidad de la mezcla (mayor RVP). La segunda tiene que ver con la mayor temperatura de autoencendido (mayor calor de vaporización) que causa que la velocidad de llama sea mayor quemando de mejor forma los reactantes.

### Solubilidad en agua

El etanol es polar por naturaleza, por lo que tiene alta tendencia a ser higroscópico. Las referencias consultadas reportan solubilidad de etanol en agua y viceversa de 100 % (tabla 1). Debido a la alta solubilidad del etanol en agua, se puede presentar algo que se conoce como separación de fase de combustible líquido. La separación de fase puede ocurrir para las mezclas cuando reciben una cantidad de agua suficiente que causa que el agua, el etanol y la gasolina formen tres fases diferentes perfectamente identificables. Posteriormente a esta separación, es imposible recombinar la gasolina con el etanol (Rondón *et al.*, 2015). Los autores consultados difieren en la forma en que ven la separación de fases. Varios autores coinciden en que esta puede ocurrir en el tanque de almacenamiento de combustible, o en cualquier otra parte del sistema de alimentación o distribución, si se logra un efecto combinado entre la cantidad de agua absorbida y la temperatura de la mezcla. Los valores reportados se encuentran entre 0,15 y 0,5 % v/v para la cantidad máxima de agua permitida y entre 1,11 y 15,55 °C para la temperatura de la mezcla. Por otro lado las referencias Horta (2003) y Hammel-Smith *et*

*al.* (2002), mencionan que es imposible que la mezcla se separe dentro de los sistemas de alimentación debido a que los mismos poseen dispositivos especiales de recirculación de combustible y a que la cantidad de agua señalada nunca puede alcanzarse en el tanque. Como se observa, la separación de fases es un fenómeno aún poco entendido. Surgen alrededor de esto varias preguntas: ¿se pueden separar las fases por culpa de la baja presión en el ducto de admisión cuando la mezcla se encuentra viajando con el aire?; ¿se puede separar la mezcla en el tanque por el simple efecto de “respiración” del mismo?; ¿se puede separar la mezcla por culpa del proceso mismo de combustión debido a que las energías de activación para la gasolina y el etanol son diferentes? Las respuestas son complicadas y en la literatura consultada solo se encuentra que es muy difícil que la mezcla reciba agua del aire en una cantidad tal que se separe en el ducto de admisión. Sin embargo, no se han realizado pruebas simulando esta condición de baja presión. Las pruebas que se conocen son las que se hacen a la mezcla líquida cambiando su temperatura y la cantidad de agua, y esta condición difiere mucho de la condición en el ducto de admisión. La presión puede ser un factor fundamental ya que se alcanzan valores de relación de presión de entre 0,3 y 0,6. Respecto a la pregunta sobre la energía de activación, vale la pena destacar que está muy relacionada con la emisión de etanol sin quemar de la cual se habla más adelante. Lo que se supone en esta parte es que gracias al mayor calor de vaporización y al tiempo necesario para alcanzar el estado de vapor, se puede pensar que se alcanza un nivel de energía tal que la gasolina se quema en mayor proporción que el etanol, separando desde el inicio de la combustión la mezcla y dejando a una parte del etanol sin quemar.

## EMISIONES

### Monóxido de carbono (CO)

La mayoría de autores consultados, coinciden en que la emisión de CO disminuye en un porcentaje variable, dependiendo del combustible y del tipo de motor (tabla 1). Es así como, en general, para motores con sistema de control de flujo de combustible en lazo abierto es menor la emisión de CO que para motores modernos con control en lazo cerrado. La formación de CO está directamente ligada a la eficiencia de la combustión, es decir, a mayor o menor cantidad de

carbono procedente del combustible, se quemé completamente o no. Esta reducción se encuentra entre el 10 y el 40 %. Dentro de los puntos más importantes que se esbozan, se encuentra el hecho de que se produce esta disminución por efectos de dilución y presencia de oxígeno que aumenta la velocidad de la llama. También muestran algunos autores que a medida que la T90<sup>1</sup> de las mezclas aumenta, disminuyen las emisiones de CO debido a que se disminuye la volatilidad. Y se observa una reducción mayor en la emisión para vehículos que poseen motores con control de lazo abierto, porque el control en lazo cerrado aumenta mucho más el consumo de combustible enriqueciendo la mezcla y afectando directamente el proceso de combustión. Durbin *et al.* (2006), mencionan que la emisión de CO permanece igual cuando los niveles de etanol se encuentran entre 5,7 y 10 % v/v y la T50 entre 90,55 y 101,67 °C. También recalcan que la emisión puede aumentar si la concentración de etanol es la mencionada, pero la T50<sup>2</sup> está por encima de 112,78 °C. Lo que se observa en este punto es que la emisión de CO depende de la calidad del combustible, de la relación aire-combustible real (más o menos oxígeno) y del tipo de control de sistema de alimentación que posea el vehículo. Esto hace particularmente complicada la comparación de resultados obtenidos en diferentes países, donde las tecnologías de producción de combustibles y los motores son diferentes.

### Hidrocarburos totales sin quemar (HC)

Al igual que la emisión de CO, todos los autores coinciden en que los HC disminuyen cuando se utilizan mezclas de gasolina-etanol. La disminución está entre el 5 y el 20 % (tabla 1). Se debe hacer una anotación en esta parte para mencionar que normalmente la disminución depende mucho del grupo de hidrocarburos que se está midiendo. Es así como la gran parte de los autores mencionados miden hidrocarburos pesados, normalmente compuestos orgánicos con más de 3 o 4 carbonos en fase gaseosa. Esto es algo para analizar ya que la emisión de otros hidrocarburos más livianos, y en algunos casos igual de peligrosos para el medio

- 1 T90: temperatura a la cual en el proceso de destilación realizado en la fabricación del combustible se ha evaporado el 90%
- 2 T50: temperatura a la cual en el proceso de destilación realizado en la fabricación del combustible se ha evaporado el 50%

ambiente y la salud humana, se están produciendo, pero no se miden porque no son regulados. Nuevamente Durbin *et al.* (2006) mencionan que la emisión de HC puede aumentar para niveles medios y altos de T90 entre 165,55 y 179,44 °C. Además aumenta si la T50 aumenta.

De la misma forma que para la emisión de CO, la emisión de HC parece depender de los mismos parámetros, teniendo siempre en cuenta que la disminución es relativa ya que se generan otros hidrocarburos más livianos que no se miden generalmente.

### Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

Los óxidos de nitrógeno que se miden comprenden principalmente las especies NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O. Los efectos son variados, con tendencia a aumentar entre 1 y 18 %. La mayoría de la emisión de NO<sub>x</sub> es producida como consecuencia de una disociación directa del nitrógeno atmosférico por la alta temperatura en la cámara de combustión, lo cual es predecible por el mayor calor de vaporización y temperatura de autoencendido de las mezclas gasolina-etanol. Existen dos mecanismos adicionales de formación de NO<sub>x</sub> que son: desde el nitrógeno molecular en el combustible y desde reacciones de hidrocarburos intermedios con el nitrógeno. Otra situación que describe Fuels (2007), es que para valores de T50 iguales a los de la gasolina pura la emisión de NO<sub>x</sub> permanece invariable hasta un contenido de etanol de 5,7 % v/v. Si el contenido de etanol aumenta a partir de este punto la emisión crece considerablemente. Por su parte se menciona que para niveles bajos de T50 (90,55 °C) a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla aumentan los NO<sub>x</sub> (Durbin *et al.*, 2006). Nuevamente se observa una influencia directa de la calidad del combustible sobre las emisiones. De la misma forma se menciona que las emisiones de NO<sub>x</sub> para los diferentes estudios analizados presentan incrementos y decrementos marginales que no tienen relevancia (Karman, 2003). Otros estudios reportan disminuciones entre 1 y 13 % en la emisión de NO<sub>x</sub> y se atribuye a uso de mezclas con etanol de entre 15 y 24 % v/v en motores sin modificar. La discusión para esta emisión se torna difícil. Sin embargo, en lo que coinciden muchos de estos autores con los estudios de Hsieh *et al.* (2002) y Pouloupoulos *et al.* (2001), es que para varios tipos de motores, si bien se observa una tendencia de los NO<sub>x</sub> a aumentar, esto no es estadísticamente significativo. Lo anterior indica que la producción de NO<sub>x</sub>

está ligada a las condiciones propias de operación del motor (carga y velocidad), el tipo de control del motor (lazo cerrado o abierto), la calidad del combustible y sobre todo a la concentración de etanol en la mezcla (Masum *et al.*, 2013; Mantilla *et al.*, 2015). Nuevamente la comparación de resultados con tecnologías de refinación y de motores de otros países resulta en un proceso casi imposible.

### Aldehídos (formaldehído y acetaldehído)

Siempre que se utilizan mezclas de gasolina-etanol la formación de aldehídos puede aumentar entre 5 y 200 % según varios autores (tabla 1). La formación de una mayor concentración de aldehídos está ligada a la combustión incompleta de alcoholes y depende directamente de la concentración de etanol en la mezcla. Los aldehídos son una emisión no regulada que tiene efectos graves sobre la salud humana (Leikauf, 2002). Las preguntas para este punto se centran en: ¿qué tan buen registro de combustión incompleta es la concentración de aldehídos en el escape?; si aumentan con el mayor contenido de etanol, y se asume que la respuesta a la pregunta anterior es positiva, ¿por qué la emisión de CO disminuye a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla? Las respuestas a estas preguntas no se conocen a partir de la literatura consultada. Se supone que efectivamente el mayor número de aldehídos en el escape representan la combustión incompleta del alcohol únicamente. Esto es clave debido a que de una forma u otra puede significar que en la cámara de combustión estaría ocurriendo separación de fases por el fenómeno descrito anteriormente. La gasolina pura se quema en gran proporción porque de alguna manera, se alcanza la temperatura de autoencendido del etanol (respuesta a la segunda pregunta de este párrafo), pero las evidencias de mayor concentración de aldehídos y de etanol sin quemar en el escape reflejan que la combustión del alcohol es incompleta y que no alcanza el tiempo disponible en la cámara de combustión para quemar el alcohol restante que se había separado.

### Etanol sin quemar

En las referencias consultadas (tabla 1), se muestra que a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla aumenta la emisión de este sin quemar. Esto no solamente es un indicio claro de que hay un problema durante el proceso de combustión, también es fuente de un problema ambiental de grandes propor-

ciones debido a que se libera al ambiente el hidrocarburo puro. Para explicar la aparición del etanol sin quemar en el escape, la mejor definición de lo que sucede la da Zervas *et al.* (2002): “El etanol sin quemar en el escape es precisamente eso, etanol sin quemar. No se puede formar a partir de los radicales libres que se crean durante el proceso de combustión. Solo se presenta cuando hay mezclas con alcoholes. La concentración en el escape depende de la relación aire-combustible actual, para mezclas ricas aumenta el etanol en el escape mientras que para mezclas pobres disminuye pero siempre es mayor que con gasolina pura”. Con esto se refuerza aún más lo explicado (y supuesto) en puntos anteriores. El etanol sin quemar no es un subproducto de la combustión, es el resultado de un combustible que entra a la cámara de combustión como una mezcla y sale separado de ella. Este hecho es el mayor indicio de que puede existir separación de mezcla en la cámara de combustión, ya que como lo revelan las referencias consultadas, no importa el tipo de sistema de alimentación que posea el motor, ni la carga. Únicamente importa que se estén quemando mezclas de combustibles que contienen alcohol. A esta discusión se suma el hecho de que nunca se queman completamente los combustibles que entran a un motor. Ante esto surge la pregunta: si la cantidad de etanol en el escape mantiene la misma proporción con la gasolina base sin quemar en el escape que tenía antes de la combustión, ¿se puede suponer que no hubo separación y que la mezcla fue completamente soluble?, ¿qué sucede cuando la situación descrita no se cumple?, ¿se puede afirmar que hay separación? Las respuestas a estas preguntas solo se pueden averiguar mediante experimentación en motores junto con análisis en cromatógrafo de los gases de escape. Lo más difícil del trabajo experimental propuesto consiste en saber cuáles componentes, de los muchos hidrocarburos que se detectan, provienen de la gasolina y cuáles no.

## PARÁMETROS DE OPERACIÓN

### Consumo de combustible

El consumo de combustible aumenta, según los autores consultados (tabla 1), en motores sin modificar que utilizan mezclas de gasolina y etanol. El porcentaje de aumento varía entre 1 y 6 % dependiendo principalmente del tipo de control que posea el motor (lazo cerrado o lazo abierto). El mayor consumo se registra

en motores con control en lazo cerrado debido a que el sensor de oxígeno en el escape detecta una mezcla pobre (mucho oxígeno en el escape) y ordena inyectar más combustible. El consumo de combustible aumenta proporcionalmente al incremento en la concentración de etanol en la mezcla. El aumento se produce por un efecto combinado provocado por la mayor densidad de la mezcla y por el aumento en la relación aire-combustible real por la más alta volatilidad del combustible (solo en motores con carburador). En la referencia Durbin *et al.* (2006) se asegura que el consumo de combustible puede disminuir entre 0,6 y 1,2 % si se aumentan T50 y T90 respectivamente. Además, Horta (2003) menciona que el aumento en el consumo de combustible es irrelevante si se tienen en cuenta los beneficios asociados con el uso de mezclas gasolina-etanol.

### Potencia

De acuerdo con las referencias consultadas (ver tabla 1), la potencia permanece constante cuando se utilizan mezclas de gasolina-etanol. Teniendo presente que la mezcla tiene un LHV menor que el de la gasolina pura, se compensan las pérdidas de potencia con el mayor consumo de combustible sumado a la mayor temperatura del proceso de combustión que puede producir una presión más alta sobre el pistón. La eficiencia térmica que relaciona la potencia de salida con el producto de la masa de combustible por el LHV, se mantiene constante al igual que la potencia. El numerador permanece constante como se ha explicado en este punto. El denominador que es el producto del consumo de combustible (el cual aumenta) con el LHV (el cual disminuye) crea un efecto de compensación, ya que la proporción en que aumenta uno disminuye el otro. Algunos autores reportan aumento en la potencia de salida (Yücesu & Topgül, 2006; DOE *et al.*, 2013), sin embargo el consumo de combustible sobrepasa el 6 % mencionado previamente y se trata de motores diseñados para manejar mezclas de gasolina-etanol o motores modificados.

## CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentan diferentes resultados e inquietudes que prueban que existe una cantidad considerable de condiciones a cumplir para poder tener el efecto esperado desde el punto de vista de desempeño y emisiones de los motores de combus-

tión interna, cuando utilizan mezclas de gasolina con etanol. Es posible observar también que existen resultados contradictorios en muchos casos, los cuales incentivan a que la meta de mejorar desempeño y emisiones se puede ajustar al caso colombiano, realizando un trabajo conjunto de investigación e innovación que apunte a resolver algunas de las inquietudes planteadas y muchas otras que seguramente surgirán con el devenir propio de la investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Colombia – Colciencias ([www.colciencias.gov.co](http://www.colciencias.gov.co)) con proyecto N° 202010013830.

## REFERENCIAS

- Acevedo, H. & Mantilla, J. (2008). Viabilidad ambiental del uso de biocombustibles para motores a gasolina y diésel en Colombia. *Boletín Observatorio Colombiano de Energía*, abril-junio, 3-14.
- Al-Baghdadi, M. A. (2001). The safe operation zone of the spark ignition engine working with dual renewable supplemented fuels (hydrogen+ethyl alcohol). *Renewable Energy*, 22, 579-583.
- Al-Baghdadi, M. A. (2000). Performance study of a four-stroke spark ignition engine working with both of hydrogen and ethyl alcohol as supplementary fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 25, 1005-1009.
- Albino, D., Bertrand, K. & Bar-Yam, Y. (2012). Food for fuel: The price of ethanol. Disponible en: arXiv:1210.6080, accedido el 04 de octubre de 2014.
- Alcaldía de Bogotá. Movilidad en cifras (2011). Informe Alcaldía de Bogotá boletín cifras movilidad 2011. Disponible en: [http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx\\_archivos/audio\\_y\\_video/boletin%20cifras.pdf](http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/boletin%20cifras.pdf), accedido el 24 de septiembre de 2014.
- Al-Hasan, M. (2003). Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*, 44, 1547-1561.

- American Coalition For Ethanol. (2005). Fuel economy study: comparing performance and costs of various ethanol blends and standard unleaded gasoline. Disponible en: [http://www.growthenergy.org/images/reports/ACEFuelEconomyStudy\\_001.pdf](http://www.growthenergy.org/images/reports/ACEFuelEconomyStudy_001.pdf), accesado en 04 de octubre de 2014.
- Apace Research Ltd. (1998). Intensive field trial of ethanol/petrol blend in vehicles. ERDC Project N° 2511. Disponible en: [http://journeytoforever.org/biofuel\\_library/EthanolApace.PDF](http://journeytoforever.org/biofuel_library/EthanolApace.PDF), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Asfar, K. & Hamed, H. (2004). Combustion of fuel blends. *Energy Conversion and Management*, 39(10), 1081-1093.
- Bayraktar, H. (2005). Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy*, 30, 1733-1747.
- Behrentz, E. (2006). *Beneficios ambientales asociados con el uso de combustibles alternativos*. XIII Conferencia Energética Colombiana. (Bogotá). Disponible en: <http://en.calameo.com/read/0014789784a92b65a18ee>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Bresenham, D. & Reisel, J. (1999). The effect of high ethanol blends on emissions from small utility engines. (USA). *SAE Paper* 1999-01-3345.
- Calvert, J., Heywood, J., Sawyer, R. & Seinfeld, J. (1993). Achieving acceptable air quality: some reflections on controlling vehicle emissions. *Science, New series* 261(5117), 37-45.
- Coelho, S., Goldemberg, J., Lucon, O. & Guardabassi, P. (2005). Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. Disponible en: [http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/STC\\_Ethanol\\_SEPT2005.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/STC_Ethanol_SEPT2005.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Crary, B. (2000). Effects of ethanol on emissions of gasoline LDVs. Toyota Technical Center. Disponible en: [http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/carfg3/toyota\\_prstn.pdf](http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/carfg3/toyota_prstn.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- D'Avila, L. (2003). A qualidade do combustíveis no Brasil. Disponible en: [http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/combustiveis/Aula-2\\_qualidade\\_de\\_combustiveis.ppt](http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/combustiveis/Aula-2_qualidade_de_combustiveis.ppt), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Davis, G. & Heil, E. (2000). The development and performance of a high blend ethanol fueled vehicle. *SAE Paper* 2000-01-1602.
- DOE, NREL & NEVC. (2013). Handbook for handling, storing, and dispensing E85. Department of Energy. Disponible en: [http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ethanol\\_handbook.pdf](http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ethanol_handbook.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Durbin, T., Miller, J., Younglove, T., Huai, T. & Cocker, K. (2006). Effects of ethanol and volatility parameters on exhaust emissions. Final Report CRC Project N° E-67. C.R.C. Disponible en: <http://www.crcao.org/reports/recentstudies2006/E-67%20Final%20Report.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Environment Australia. (2002). Setting the ethanol limits in petrol. Commonwealth of Australia. Disponible en: <http://www.environment.gov.au/archive/fuelquality/publications/ethanol-limit/pubs/ethanoljan02.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Faiz, A. & Weaver, C. (1996). Air pollution from motor vehicles: Standards and technology for controlling emissions. The World Bank. Disponible en: <http://www.un.org/esa/gite/iandm/faizpaper.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Freudenberger, R. (2009). A guide to small scale ethanol. Alcohol fuel. Industry low-sulfur test program. New Society Publishers, 256 p.
- Fuels. (2007). Backgrounder on low level gasoline blends containing ethanol (Blends containing ethanol at concentrations up to 10% by volume). Disponible en: <http://www.2006fuels.org/ethanol.htm>, accesado el 24 de septiembre de 2014.
- Giroldo, M., Makant, W., Werninghaus, E. & Coelho, E. (2005). Development of 1.6 L flex fuel engine for Brazilian market. *SAE Paper* 2005-01-4130.
- Guerrieri, D., Caffrey, P. & Rao, V. (1995). Investigation into the vehicle exhaust emissions of high percentage ethanol blends. *SAE technical paper* 950777.

- Hammel-Smith, C., Fang, J., Powders, M. & Aabakken, J. (2002). Issues associated with the use of higher ethanol blends. National Renewable Energy Laboratory. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32206.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Hansen, A. C., Zhang, Q. & Lyne, P. W. (2005). Ethanol-diesel fuel blends a review. *Bioresource Technology*, 96(3): 277-285.
- Harley, R. & Kean, A. (2004). Chemical composition of vehicle-related volatile organic compound emissions in Central California. California Air Resources Board (California). Disponible en: [http://www.arb.ca.gov/airways/ccos/docs/II5\\_0014\\_Aug04\\_fr.pdf](http://www.arb.ca.gov/airways/ccos/docs/II5_0014_Aug04_fr.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Haskew, H. & Liberty, T. (2006). Fuel permeation from automotive systems: E0, E6, E10 and E85. C.R.C. Inc. Disponible en: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/premodel/e653.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- He, B., Wang, J., Hao, J., Yan, X. & Xiao, J. (2003). A study on emissions characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment*. 37(7), 949-957.
- Horta, L. (2003). Perspectivas de un Programa de Biocombustibles en América Central. Cepal.
- Hsieh, W., Chen, R., Wu, T. & Lin, T. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*. 36(3), 403-410.
- Karman, D. (2003). Ethanol fuelled motor vehicle emissions: A literature review. Air Health Effects Division.
- Knepper, J., Koehl, W., Benson, J., Burns, V. & Gorse, J. (1993). Fuel effects in Auto/Oil High emitting vehicles. *SAE Technical paper* 930137.
- Korotney, D. (1995). Water phase separation in oxygenated gasoline. EPA. Disponible en: <http://epa.gov/oms/regs/fuels/rfg/waterphs.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Kortum, D., Haslett, L., Beard, L., Liechty, K., Coryell, M. & Bruner, C. (1997). Interagency Assessment on Oxygenated Fuels. *Nat. Sc. and Tech. Coun. Com. Environment and Natural Resources*. Ed Diane Pub. 260 p.
- Landstreet, T. (2014). High food prices: an investor dilemma. *Forbes*. Disponible en: <http://www.forbes.com/sites/thomaslandstreet/2014/06/03/high-food-prices-an-investors-dilemma/>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Leikauf, G. (2002). Hazardous air pollutants and asthma. *Environmental Health Perspectives* 110(4), 505-526.
- Leong, S., Muttamara, S. & Laortanakul, P. (2002). Applicability of gasoline containing ethanol as Thailand's alternative fuel to curb toxic VOC pollutants from automobile emission. *Atmospheric Environment*, 36(21), 3495-3503.
- Li, D., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-Gao, Z., & Jian-Guang, Y. (2005). Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy*, 30(6), 967-976.
- Li, X., Qiao, X., Zhang, L., Fang, J., Huang, Z. & Xia, H. (2005). Combustion and emission characteristics of a two-stroke diesel engine operating on alcohol. *Renewable Energy*, 30(13), 2075-2084.
- Liska, A., Yang, H., Bremer, B., Klopfenstein, T., Walters, D., Erickson, G. & Cassman, K. (2009). Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 58-74.
- Maclean, H. & Lave, L. (2013). Evaluating automobile fuel/propulsión system technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(1), 1-69.
- Mantilla, J., Garzón, D. & Galeano, C. (2015). Multivariate analysis of performance and emissions for internal combustion engines running with gasoline-ethanol blends. *Rev. Ingeniería Energética*, 36(3), 232-242.
- Masum, B., Masjuki, H., Kalam, M., Rizwanul, I., Palash, S. & Abedin, M. (2013). Effect of ethanol-gasoline blend on NOx emission in SI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 209-222.

- Mayote, S., Lindhjem, C., Rao, V. & Sklar, M. (1994). Reformulated gasoline effects on exhaust emissions: phase 1: initial investigation of oxygenate, volatility distillation and sulfur effect. *SAE technical paper* 941973.
- Mayote, S., Lindhjem, C., Rao, V. & Sklar, M. (1994). Reformulated gasoline effects on exhaust emissions: phase 2: Continued investigation of the effects of fuel oxygenate content, oxygenate type, sulfur, olefins and distillation parameters. *SAE technical paper* 941974.
- Ministerio de Minas y Energía. Decreto 4892 de diciembre 23 de 2011. Disponible en: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivos-SoportRevistas/8302.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Niven, R. (2005). Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and sustainable energy Review*, 9(6), 535-555.
- Ocampo, W. (2006). ¿Es la biogasolina una alternativa ambiental en Colombia? *Rev. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 7-19.
- Orbital Engine. (2002). A literature review based assessment on the impacts of a 10 % and 20 % ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines. *Environment Australia*. Disponible en: [http://www.nmma.org/assets/cabinets/Cabinet103/Impacts\\_of\\_a\\_10%25\\_and\\_20%25.pdf](http://www.nmma.org/assets/cabinets/Cabinet103/Impacts_of_a_10%25_and_20%25.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Patzek, T. (2003). Ethanol from corn: clean renewable fuel for the future, or drain our resources and pockets? *Environment, Development and Sustainability*, 7, 319-336
- Poulopoulos, S., Samaras, D. & Philippopoulos, C. (2001). Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels. *Atmospheric Environment*, 35(26), 4399-4406.
- Ragazzi, R. & Nelson, K. (1999). The impacts of a 10 % ethanol blended fuel on the exhaust emissions of Tier 0 and Tier 1 Light Duty Gasoline vehicles at 35 °F. Air Pollution Control Division. Disponible en: <http://cospl.coalliance.org/fedora/repository/co%3A1742/he17102et31999internet.pdf/>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Renewable Fuels Association (2010). Fuel Ethanol Industry Guidelines, Specifications And Procedures. Disponible en: <http://ethanolrfa.org/page//RFA%20Fuel%20Ethanol%20Industry%20Guideline%201210.pdf?nocdn=1>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Reuter, R., Hochhauser, A., Benson, J., Koehl, W., Burns, V. & Painter, L. (1992). Effects of oxygenated fuels on RVP on automotive emissions-Auto/Oil air quality improvement program. *SAE technical paper* 920326.
- Rondón, M., Mantilla, J. & Muñoz, A. (2015). Análisis de la solubilidad de la mezcla gasolina-etanol-agua a diferentes presiones y temperaturas. *Rev. Universidad Militar Nueva Granada. Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 61-75.
- Schifter, I., Vera, M., Díaz, L., Guzmán, E. & Ramos, F. (2001). Environmental implications on the oxygenation of gasoline with ethanol in the metropolitan area of Mexico city. *Environmental Science and Technology*, 35(10), 1893-1901.
- Shapiro, E. (2006). Roundtable on ethanol fuel: automaker view. Disponible en: <http://www.pdfdrive.net/roundtable-on-ethanol-fuel-automaker-view-south-coast-aqmd-e4823147.html>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Skidmore, M., Cotti, C. & Alm, J. (2013). The political economy of state government subsidy adoption: the case of ethanol. *Economics & Politics*, 25, 162-190.
- Stationary Sources Division-Legal Office. (1998). Proposed determination pursuant to health and safety code section 42830(g) of the ozone forming potential of elevated RVP gasoline containing 10 percent ethanol. Air Resources Board. Disponible en: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/ethanol/ofprpt.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Torres, J., Molina, D., Pinto, C. & Rueda, F. (2002). Estudio de la mezcla de gasolina con 10 % de etanol anhidro. Evaluación de propiedades fisicoquímicas. *Rev. Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(3), 71-82.

- Turns, S. (2011). *An introduction to combustion: concepts and applications*. USA: McGraw- Hill. 752 p.
- Universidad Tecnológica de Pereira, Ecopetrol S. A. & Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). Efecto de la mezcla de combustible E20 en el parque automotor colombiano. Disponible en: [http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a-889ca266ee6533c26f970cb14a/efecto\\_E20\\_en\\_parque\\_automotor.pdf](http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a-889ca266ee6533c26f970cb14a/efecto_E20_en_parque_automotor.pdf), accesado el 24 de septiembre de 2014.
- Viju, C. & Kerr, W. (2013). Taking an option on the future: subsidizing biofuels for energy security or reducing global warming. *Energy Policy*, 56, 543-548.
- Vitale, R., Boulton, J., Lepage, M., Gauthier, M., Qiu, X. & Lami, S. (s.f.) Modelling the effects of E10 fuels in Canada. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei13/modeling/boulton.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Whitten, G. & Reyes, S. (2004). Air quality and ethanol in gasoline. Disponible en: <http://www.ethanol-gec.org/pub.htm>, accesado el 14 de septiembre de 2014.
- Wright, L., Boundy, B., Perlack, B. & Davis, S. (2006). Biomass energy data book. U.S. Department of Energy. Disponible en: [http://cta.ornl.gov/bedb/pdf/BEDB4\\_Full\\_Doc.pdf](http://cta.ornl.gov/bedb/pdf/BEDB4_Full_Doc.pdf), accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Wu, C., Chen, R., Pu, J. & Lin, T. (2004). The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*, 38(40), 7093-7100.
- Yücesu, H. & Topgül, T. (2006). Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18), 2272-2278.
- Yüksel, F. & Yüksel, B. (2004). The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine. *Renewable Energy*, 29(7), 1181-1191.
- Zervas, E., Montagne, X. & Lahaye, J. (2002). Emission of alcohol and carbonyl compounds from a spark ignition engine. Influence of fuel and air/fuel equivalence ratio. *Environmental Science and Technology*, 36(11), 2414-2421.