

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/268871036>

Motores y Biocombustibles

Chapter · January 2006

CITATIONS

0

READS

318

1 author:



Ian Homer

University of Chile

33 PUBLICATIONS 152 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Centros de producción y acopio de biodiesel, y su posterior uso para generación de energía eléctrica en zonas rurales de la comuna de Cauquenes, VII Región. I Concurso de proyectos para el desarrollo de soluciones con ERNC a pequeña escala [View project](#)



Evaluación preliminar del posible uso de distintas especies vegetales y de desechos industriales en la producción de biodiesel y su comportamiento en motores agrícolas [View project](#)

Motores y Biocombustible

I HOMER

Facultad de Ciencias Agronómicas. Departamento de Ingeniería y Suelos. Universidad de Chile.
ihomer@uchile.cl

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los motores a combustión interna utilizados en las actividades silvo-agropecuarias usan combustibles fósiles, ya sea gasolina o diesel, sin embargo, existe un alto potencial para usar otras fuentes de energía como son los biocombustibles. Éstos son menos contaminantes, renovables y permiten dar uso a residuos que actualmente generan problemas ambientales. La disminución de la contaminación permitiría, además, acceder a bonos de carbono.

Los biocombustibles pueden ser utilizados en motores, a gasolina (denominados también de encendido por chispa o de ciclo Otto) y/o en motores diesel (denominados de autoencendido, de compresión, o ciclo diesel). En las actividades silvo-agropecuarias, la fuente energética más importante es el diesel, por lo que podría tener mayor importancia el biodiesel como biocombustible, no obstante, a través de este capítulo se verá que los motores diesel pueden funcionar, además, con otras fuentes de biocombustible. En otras actividades silvo-agropecuarias también se utilizan motores ciclo Otto, como son vehículos, motobombas, aserraderos, generadores, entre otros, los que pueden usar además biodiesel u otro tipo de biocombustible.

Los motores realizan un trabajo utilizando la energía aportada por el combustible. El motor de combustión interna es una máquina que transforma el calor desarrollado durante la combustión al interior de un cilindro en el movimiento de un pistón que está en su interior, el que, mediante una biela, transmite el movimiento rectilíneo a un eje cigüeñal que lo transforma en movimiento rotatorio (Villa, 2003).

En 1765, J. Watt encontró la forma de utilizar el calor y transformarlo en trabajo mecánico a través del motor a vapor (combustión externa). El rendimiento térmico del motor a vapor fue bajo y sólo el 26% de la energía térmica del vapor se transformaba en trabajo. En 1876, N. A. Otto construyó el primer motor de combustión interna, que fue posteriormente desarrollado por G. Daimler. En

éste, mediante el empleo de gasolina, se transforma la energía química en mecánica. Más adelante, en 1880, Rudolf Diesel diseñó un nuevo motor de combustión interna que utilizaba petróleo diesel. Su uso se generalizó en la década de 1930. Los nombres de Otto y Diesel han prevalecido en el tiempo, y se siguen utilizando hasta hoy para denominar a sus respectivos motores (De Juana, 2002).

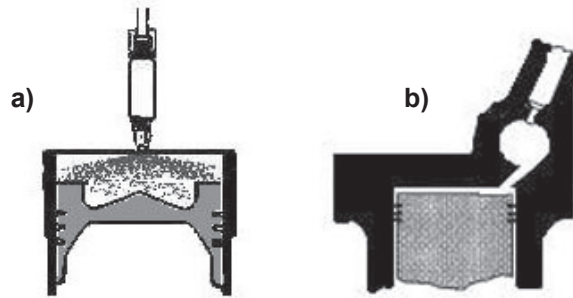
Se han desarrollado índices para cuantificar el comportamiento de los combustibles. Éstos son los índices Octano y Cetano, según se trate de gasolina o de diesel respectivamente. El Índice Octano mide la capacidad de una gasolina para resistirse a que se inicie el proceso de combustión de la misma (con O_2) a pesar de haber alcanzado la temperatura de auto combustión. Es una comparación entre la resistencia a la combustión que opone el Iso-Octano (2 dimetil-4-metil pentano), al que se le asigna un valor 100, o sea, mucha resistencia, y el Heptano (C_7H_{16}), que es muy poco resistente y se le asigna un valor 0. Así, una gasolina 97 octanos es equivalente a una mezcla de 97% de Iso-Octano y 3 % de Heptano.

El Índice Cetano se utiliza en el combustible diesel y es una medida de cuánto tiempo debe transcurrir desde que se inyecta el combustible hasta que se inflama, así, mientras mayor es el índice, menor es el intervalo. Al Cetano ($C_{16}H_{34}$) que tiene un intervalo muy pequeño, se le asigna un valor 100 y al Heptametilnonano que tiene un amplio intervalo se le asigna un valor 0.

De esa forma, un índice Cetano de 50, representa un retraso equivalente a un compuesto constituido por 50% de cada componente. Este índice normalmente va de 55 a 60. Los motores diesel pueden ser de inyección directa a la cámara de combustión en el pistón, o bien en forma indirecta o en precámara.

Inyección directa. Han sido los que han tenido mayor desarrollo en los últimos años, ya que permiten ahorrar combustible en un porcentaje que supera el 10%. En este sistema se inyecta el combustible en la cámara de combustión que se encuentra en una cavidad en la parte superior del pistón como se aprecia en la Figura 1a. El sistema de inyección directa se utiliza en motores de cilindrada alta, superior a 2500 cc, y velocidad de de giro más lenta. Estos motores se usan en tractores de tamaño medio y grande (Guadilla, 1989).

Inyección en precámara. Sistema utilizado en motores de cilindrada media a baja y alta velocidad de rotación (3.500 a 4.000 rpm en automóviles y 2.500 a 3.000 en tractores). A diferencia de de los motores de inyección directa, no se inyecta sobre una concavidad en el pistón, sino que el combustible es inyectado en una concavidad en la parte inferior de la culata, lugar donde se inicia la combustión. Se produce un "chorro" de gases incandescentes sobre una pequeña concavidad del pistón, dando origen a turbulencia (Guadilla, 1989), como se aprecia en la Figura 1.b. En la primera fase se realiza la combustión en la precámara en que se produce la inyección, con exceso de combustible y bajo oxígeno, lo que dificulta la formación de NO_x (óxidos de nitrógeno, que son importantes contribuyentes a fenómenos nocivos como la lluvia ácida y la eutricación en las zonas costeras). En la segunda fase, ya en la cámara principal en la que se encuentra el pistón, la combustión se realiza a baja presión y temperatura. El exceso de aire en la misma y el efecto de turbulencia generado, favorece una combustión completa con bajas emisiones de residuos tóxicos (Márquez, 1995). Los motores de precámara necesitan una bujía incandescente para partir en frío.



**Figura 1. a. Inyección directa (fig. izquierda).
b. Inyección en precámara (fig. derecha).**

La relación de compresión (p), es el cociente entre el volumen total aspirado (V_1) cuando el pistón está en el punto inferior del cilindro, y el volumen dentro de la cámara de combustión (V_2) que queda cuando el pistón está en la posición superior (Ortiz-Cañavate, 2005).

$$p = \frac{V_1 + V_2}{V_2}$$

En motores diesel este valor fluctúa entre 16 y 19, mientras que en los de gasolina es 7 y en algunos casos 9. Mientras mayor sea p , mayor será la potencia.

USO DE BIOCOMBUSTIBLES EN MOTORES.

En el Cuadro 1 se muestran algunas de las características de los biocombustibles analizados en los capítulos anteriores.

CUADRO 1. Características de algunos biocombustibles.

| Combustible | Composición típica | Viscosidad cSt 50°C | Índice Cetano | Índice Octano | Poder calorífico mezcla MJ m ⁻³ | Poder calorífico MJ kg ⁻¹ | Calor de combustión MJ l ⁻¹ |
|---------------------|--|---------------------|---------------|---------------|--|--------------------------------------|--|
| Bio gas | 60% CH ₄ ; 40%CO ₂ | | | >120 | 3,21 | | |
| Metano | CH ₄ | | | 115 | 3,41 | | |
| LPG | 90% C ₃ H ₈ ; 10%C ₄ H ₁₀ | | | 112 | 3,68 | | |
| Etanol | CH ₃ CH ₂ OH | | | 106 | 3,87 | 26,9 | |
| Metanol | CH ₃ OH | | | 105 | 3,9 | 21,3 | |
| Diesel | C ₁₆ H ₃₄ | 2,6 | >45 | | 3,97 | 42,7 | 38,4 |
| Gasolina | C ₈ H ₁₈ | | | > 90 | 3,77 | 4,37 | |
| Aceite maravilla | | 34,9 | 33 | | | | 36,5 |
| Biodiesel maravilla | | 4,22 | 45-51 | | | | 35,3 |
| Aceite colza | | 25,7 | 44-51 | | | | 37,2 |
| Bio diesel colza | | 3,8 | 52-56 | | | | 35 |

Fuente: Ortiz-Cañavate, 1994a; Ortiz-Cañavate 1994b; Camps, 1994.

Nota: se mantuvieron nombres de las columnas y unidades de las fuentes.

El uso de biocombustibles es anterior al uso de los combustibles fósiles utilizados mayoritariamente en la actualidad. En los primeros motores se utilizaron biocombustibles, siendo remplazados posteriormente por gasolina y diesel, fundamentalmente por razones económicas al ser estos últimos de menor costo en esa época. Así, un motor puede ser utilizado con biocombustibles sin mayor cambio si éstos se usan en mezcla con el combustible fósil, y el porcentaje del biocombustible es bajo, según se verá en el transcurso de este capítulo. Si el porcentaje de biocombustible incorporado se aumenta, es necesario tomar algunas precauciones para el correcto funcionamiento del motor (cambio de reglaje, sustitución de conductores del combustible por materiales más resistentes). Finalmente, cuando el porcentaje de biocombustible alcanza niveles de importancia (según sea el biocombustible) es necesario que los motores sean modificados en profundidad (ej. rebaje de culata).

Márquez (1995) señala que para poder utilizar válidamente un biocarburante, independientemente del tipo de motor, es necesario que éste implique pequeñas modificaciones en el motor; que no ocasione una significativa reducción de la potencia o limitaciones en las condiciones de uso; que se requieran bajas inversiones en el proceso de sustitución; que pueda estar disponible a corto o mediano plazo; que garantice un balance energético con saldo positivo; que llegue al mercado con un precio que sea competitivo con el del combustible al que sustituye.

A continuación se describirán algunas modificaciones que se debe hacer a los motores para ser usados con diferentes tipos de biocombustibles, como pueden ser aceites vegetales o animales, alcoholes y gas.

Aceites vegetales o animales. La utilización de aceite como combustible en motores nació junto a los motores diesel, el mismo inventor de este tipo de motor, Rudolf Diesel, propuso el uso de aceite de maní durante su presentación en la Exposición de París a principios del siglo pasado (Márquez, 1995; Dorado et al., 2003).

Para que el bioaceite tenga éxito, se debe lograr que los motores no sufran grandes modificaciones, la potencia y el consumo no sean muy afectados y no presente problemas a largo plazo. Uno de los grandes problemas para la utilización de aceites en motores diesel es su elevada viscosidad (16 veces mayor que la del petróleo), lo que afecta la fluidez de éste (sobre todo en frío), su inyección y por lo tanto su combustión. Además, en motores de inyección directa se forman depósitos de carbón después de algunas horas de uso, lo que se puede disminuir con la adición de pequeñas cantidades de aceite. Aún así, con el tiempo habría un aumento en los depósitos. Estos depósitos son mayores en los inyectores, válvulas y cámaras de combustión, y varían según el tipo de aceite utilizado. Con aceite de linaza, el motor tiene una disminución en sus prestaciones después de 10 horas de uso, mientras que con aceite de maravilla deben pasar más de 100 horas antes de que haya una disminución de sus prestaciones (Ortiz-Cañavate, 1994a).

No todos los aceites son buenos, sobre todos los que presentan un alto índice de yodo (índice que indica cantidad de enlaces dobles y posibilidad que el aceite se polimerice), como es el caso del aceite de linaza, que puede formar restos

epóxicos duros, malos para los motores (Anónimo, 2005b). Para solucionar este tipo de problemas, sobre todo el de viscosidad, se tienen dos aproximaciones (Martínez, 2001; Ortiz-Cañavate, 1994a), adaptar el motor para trabajar con aceite o bien adaptar el aceite para trabajar con los motores actuales.

En el primer caso, la adaptación del motor puede tener tres opciones, la creación de un motor específico (motores Elsbett), la utilización de un motor con precámara, que es menos exigente en cuanto a regulaciones (Guadilla, 1989), o bien adaptar un motor con precalentamiento del combustible a 60 °C antes de la bomba inyectora, lo que disminuye la viscosidad del aceite, como lo ha desarrollado Deutz-Fahr (Márquez, 1995).

Modificación del aceite. Se realiza principalmente por transesterificación (Rojop y Acevedo, este volumen), que da origen al biocombustible denominado biodiesel. Existe un segundo método para adaptar el aceite al motor, éste consiste en cortar las cadenas de aceite añadiendo parafina en proporción de 10-40%, siendo lo recomendado un 20%, además el motor funciona mejor si es encendido y apagado con biodiesel o diesel, facilitando su encendido y limpieza. La viscosidad del aceite se puede disminuir al mezclarle con diesel, pero a niveles de 25% de aceite en la mezcla es necesario disponer de un sistema de inyección especial que pueda operar con combustible de mayor densidad (Márquez, 1995). Otra alternativa interesante, sobre la que se experimenta, son las mezclas de aceites vegetales con gasolina ($\approx 14\%$) y etanol ($\approx 5\%$); estas mezclas se pueden utilizar como carburante de los motores diesel de manera directa, con resultados similares al que se obtiene con el gasóleo comercial y sin que se lleguen a producir depósitos anormales en las cámaras de combustión.

Adaptaciones de los motores para trabajar directamente con aceite. Los combustibles de origen vegetal se pueden utilizar directamente en motores, o bien en mezclas con petróleo diesel. La principal limitante para su uso ocurre al momento de la inyección debido a la diferencia de viscosidad cinemática que existe entre el biodiesel (65,8 cSt a 20°C) y el diesel (5,1 cSt a 20°C) (cSt = Centistoke es la fracción centesimal de la unidad de viscosidad cinemática, la cual es el cociente de la viscosidad dinámica y el peso específico del lubricante a la temperatura de determinación), siendo este problema más notorio en motores de inyección directa (Boto, 2000). Las mezclas del producto vegetal con diesel permiten, modificando la proporción de los componentes, mantener la viscosidad, el índice de cetano y el punto de congelación dentro de límites aceptables (Marquez, 1995).

Es posible modificar el motor incluyendo sistemas de precalentamiento del combustible (hasta 60°C) antes que éste llegue a la bomba inyectora. Una opción es encender el motor con diesel y calefaccionar el estanque de combustible que tiene el aceite, utilizando los gases de escape hasta lograr la temperatura adecuada, para que luego el motor pase a funcionar con aceite. Otra opción es la utilización de un motor con inyección indirecta o en pre-cámara (Figura 1.b) que es más tolerante a la utilización de un combustible poco fluido. Una tercera opción, de mayor envergadura, es la construcción de un motor específico, como es el caso de los motores Elsbett (Elsbett Konstruktion) y el

motor W de Deutz-Fahr. El motor Elsbett, puede funcionar con aceites vegetales, diesel mineral, biodiesel, o cualquier mezcla de los tres. Consiste en un motor adiabático, es decir, que intercambia muy poco calor con el medio, evitándose entre 25 y el 50% de las pérdidas de energía que ocurren a través del un sistema de refrigeración. El motor tiene un bajo número de piezas, peso y volumen; trabaja a una temperatura alta, con un mayor rendimiento termodinámico y tiene la característica de quemar la totalidad del combustible, considerándosele un motor prácticamente limpio. Su eficiencia térmica es superior al 40% (un motor de gasolina convencional o diesel no supera el 30%), lo que le permite proporcionar más energía mecánica útil (Bär, 2005).

El motor Elsbett se caracteriza por tener un pistón articulado con la parte superior, aislada térmica y acústicamente, situado dentro de una cámara de combustión de forma esferoidal (Bär, 2005). Uno o dos inyectores por cilindro, de un solo agujero y autolimpiables, inyectan el aceite vegetal a la cámara de combustión tangencialmente, de manera que fluya con un movimiento en espiral de fuera hacia adentro, lo que provoca un exceso de aire en el exterior respecto a la parte central. La parte externa, más "fría", ayuda a aislar el foco de calor interno, en el que se produce la combustión con menos aire, lo que hace que se reduzcan las emisiones de NO_x (Bär, 2005; Márquez, 1995). La tapa de los cilindros dispone de una pequeña cámara anular por la cual circula el aceite lubricante que se emplea como refrigerante. Como el sistema de refrigeración no es con agua, la tapa del cilindro no lleva junta. Un pequeño radiador permite cerrar el circuito del aceite lubricante refrigerante (Bär, 2005). Sistema de alimentación de combustible integrado en el motor, lo que hace que la mayor temperatura reduzca su viscosidad y facilite su pulverización por los inyectores (Márquez, 1995).

Un motor diesel puede ser transformado en un motor Elsbett, para lo cual se debe anular la cámara de agua del block, se debe cambiar la tapa de los cilindros y los pistones, y se debe añadir un pequeño radiador para el aceite refrigerante. Actualmente se ofrecen en el mercado "kits" especiales para adaptar el motor diesel tradicional a uno Elsbett, recomendándose para motores con bombas inyectoras lineales, no así para las bombas rotatorias Lucas-CAV (Anónimo, 2005b) y debe tenerse presente que el motor a transformar no debe tener elementos cerámicos (Bär, 2005).

El motor tipo W de Deutz-Fahr esta compuesto de un motor con precámara que cuenta además con un sistema dual de funcionamiento (primero parte con diesel hasta estar a temperatura, para luego pasar a utilizar aceite), una bomba de émbolos para impulsar el aceite más denso, una cámara de turbulencia, un sistema para calentar el aceite y un intercambiador de calor. A pesar que tiene un consumo de 6% mayor que un motor diesel, es un motor robusto (Márquez, 1995; Ortiz-Cañavate, 1994a).

Adaptaciones del motor para biodiesel. El empleo de biodiesel tiene ventajas como mejorar la lubricación, las condiciones de anti-explósión y encendido, alcanzando rendimientos similares a las bencinas. Comparado con el diesel,

contiene un 12% menos de energía, lo que se ve compensado con un aumento del 7% de la eficiencia de combustión (Ugolini, 2001). Otra ventaja es que disminuye las emisiones de partículas en suspensión y las emisiones. La reducción de emisiones fluctúa entre 16 y 65% con un valor promedio de 59%, pero, hay un aumento en la emisión de NO_x . Los metilesteres de los aceites vegetales tienen características físicas y físico-químicas parecidas al diesel, con el que pueden mezclarse en cualquier proporción y utilizarse en vehículos diesel convencionales, sin necesidad de introducir modificaciones en el diseño básico del motor. Sin embargo, cuando se emplean mezclas de biodiesel en proporción superior al 5%, es preciso reemplazar los conductos de goma del circuito del combustible por otros como el teflón blindado, caucho fluorado o poliamidas, debido a que el biodiesel es más corrosivo que el diesel. Además, como tiene capacidad de limpieza, puede producir al inicio de su utilización un desprendimiento de incrustaciones tanto en el tanque de combustible como en los conductos, lo que implica que se deban cambiar con mayor frecuencia los filtros de combustible para que no se afecte la bomba de inyección o el propio motor (Otegui, 2005).

El aumento del índice cetano hace que el motor no tenga un accionar suave, por lo que se recomienda un retardo de la sincronización de la inyección en 2-3°, con lo que el motor tiene un mejor funcionamiento, disminuye la temperatura y las emisiones de NO_x , aún cuando hay una disminución de energía.

El uso de biodiesel puede producir olor desagradable, lo que ha sido eliminado total o parcialmente mediante la incorporación de un convertidor catalítico, a pesar de que éste actúa cuando el motor está caliente. Por otra parte, cuando la temperatura ambiente desciende a -6 a -8 °C, los motores en que se usa biodiesel tienen dificultades para partir y se detienen por falta de carburante, producto de la obstrucción de los filtros que impiden el paso del combustible por aumento de su viscosidad (Márquez, 1995). Las pinturas deben ser cambiadas a tipos más resistentes, como las acrílicas, cuando se usa biodiesel.

Dorado et al. (2003), realizaron ensayos con un motor Perkins conectado a un freno dinamométrico, utilizando restos de aceite de oliva de frituras. El motor se hizo funcionar por 50 h, variando constantemente las condiciones de funcionamiento para simular una situación de trabajo. El motor tuvo un 2% menos de potencia y aumentó el consumo de combustible en 26%, manteniendo la conversión energética. Reyes et al. (2006), realizaron un ensayo similar ocupando aceite de salmón en un motor diesel Mercedes Benz, Modelo OM-366 año 1992. Se probaron diferentes combinaciones de diesel-biodiesel y también de diesel-biodiesel destilado o metilester. Observaron una pérdida de potencia máxima de 3,5% con respecto al diesel, cuando se utilizó 100% de metilester, con una disminución en la emisión de material particulado (PM) cercana a un 100%. (Figuras 2 y 3).

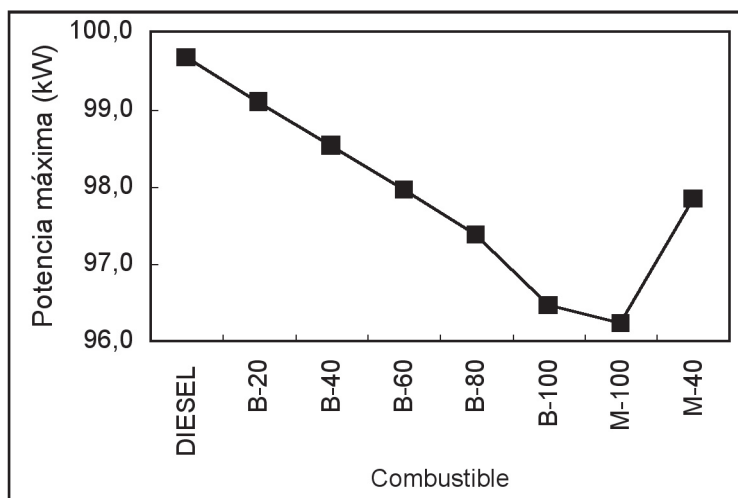


Figura.2 Potencia máxima a 2200 r.p.m. B=biodiesel, M=metilester,. El número corresponde al porcentaje de aceite de la mezcla de biodiesel (Reyes et al., 2006).

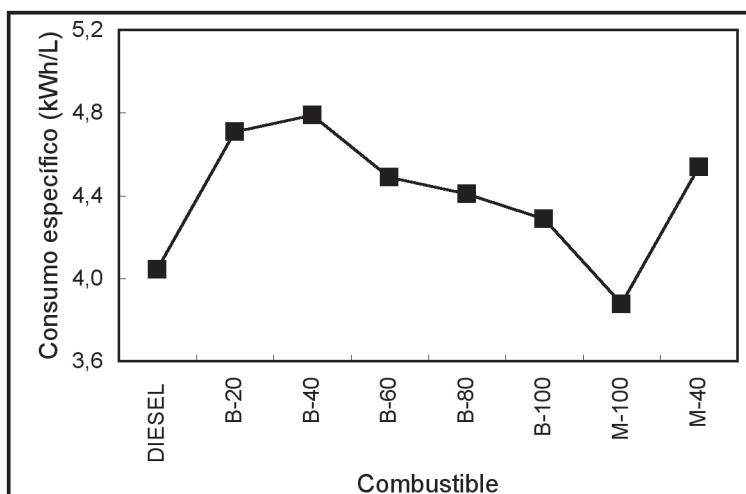


Figura.3 Consumo específico de combustible a máxima potencia y 2200 r.p.m B=biodiesel, M=metilester. El número corresponde al porcentaje de aceite de la mezcla de biodiesel (Reyes et al., 2006)

En Chile, el biodiesel no está grabado por el impuesto específico al petróleo diesel establecido en el Artículo 6°, letra b, de la Ley N° 19.030, que creó el Fondo de Estabilización de Precios del Petróleo, aspecto que es aplicable sólo si el biodiesel es usado puro, sin mezclar con petróleo diesel o incorporado como aditivo a éste (Servicio Impuestos Internos, 2004).

BIOALCOHOL.

Utilizar alcohol como combustible en los motores de encendido por chispa no es una idea moderna. Otto patentó su motor en 1861 para que funcionase con alcohol. Con la disponibilidad de petróleo abundante y barato, el alcohol fue rápidamente remplazado por la gasolina (Márquez, 1995). Las exploraciones petroleras actuales se iniciaron en 1859, cuando Edwin Drake inició una nueva época al encontrar petróleo en Pensilvania, a una profundidad de sólo 20-25 m.

A diferencia de los otros biocombustibles, el alcohol no cambia sus características en función de la materia prima de la cual provenga y el alcohol etílico de caña es igual al alcohol etílico de remolacha. Mezclar alcohol con gasolina tiene ventajas, el alcohol tiende a aumentar el índice de octano y a reducir las emisiones del monóxido de carbono de la gasolina (Smith y Workman, 2005). Además, el alcohol se quema totalmente, lo que aumenta la eficiencia de la combustión.

Es importante considerar para la utilización de alcohol, si es anhídrico (concentración mayor a 99,6%) o es hidratado, ya que la presencia de agua y el grado de acidez (máximo recomendado 3 mg / 100 ml de alcohol (Márquez, 1995)) pueden afectar a diferentes piezas del motor (empaquetaduras, apoyo de válvulas, válvulas entre otros), y conductos, debiéndose remplazar estos componentes por materiales más resistentes. El alcohol más corrosivo es el metílico, en cambio el butírico tiene menor efecto corrosivo (Smith y Workman, 2005).

La utilización de bioalcohol es casi específica para motores a gasolina o de ciclo Otto (aunque al final de este capítulo se verán las posibilidades del uso del bioalcohol en motores diesel). Al igual que con los otros biocombustibles, la cantidad de alcohol etílico a utilizar, y su grado de humedad implican, desde cambios mínimos hasta profundas modificaciones en el motor. Las mezclas mas recomendadas sin realizar modificaciones son mezclas de hasta un 25% de etanol (Boto, 2000), aunque otros autores dan valores entre 10-15% de etanol (Anónimo, 2005a). Esta diferencia en el porcentaje de etanol a adicionar puede estar relacionada con el clima donde se utiliza, siendo el 25% más apropiado para climas calidos, y los porcentajes menores para climas mas templados. Aunque no es necesario realizar modificaciones en los motores con estos porcentajes de mezcla, pequeñas modificaciones en la relación de compresión y la relación aire / combustible mejoran la potencia y hacen disminuir el consumo de etanol con respecto a la gasolina (Bär, 2005). A medida que se va aumentando el porcentaje de alcohol o hay presencia de agua, se hace necesario realizar modificaciones de reglaje en el motor, utilización de materiales resistentes a la corrosión y a las características disolventes del alcohol (tubos, empaquetaduras y otros), y cambios mayores como la variación de la relación de compresión.

El motor a gasolina puede modificarse fácilmente para trabajar con alcohol, pero cambia notablemente el consumo. La relación estequiométrica del alcohol etílico (aire / combustible) es de 9,0 / 1 y la del metílico de 6,45 / 1, mientras que la de la gasolina es de 15,2 / 1. Para enriquecer la mezcla basta modificar los surtidores del carburador, especialmente el correspondiente a marcha lenta. Con estas modificaciones el motor funciona, pero el consumo aumenta entre un 60 a un 100 %, según se utilice alcohol etílico o metílico. Al modificar el motor para el

nuevo combustible, el consumo desciende ostensiblemente. Márquez (1995) detalla las modificaciones necesarias a realizar en un motor que trabaja con gasolina para que trabaje con alcohol:

- Mayor relación de compresión, que puede llegar a ser hasta de 12 a 1, cuando el límite aconsejable para la gasolina de 93 octanos es de 8 a 1.
- Adelanto del punto de ignición, ya que mientras a mayor aire en la mezcla de alcohol mayor velocidad de combustión.
- Utilización de una bujía más fría (grado térmico superior, ya que la temperatura en la cámara de combustión será mas elevada) y capaz de soportar la mayor presión media efectiva que se produce.
- Calibración del carburador, o instalación de un carburador diferente, adaptado a la relación estequiométrica del aire más alcohol. Esto obliga a modificar los surtidores, e incluso el nivel de combustible en la cuba.
- Modificación en el diseño del múltiple de admisión de manera que se eleve su temperatura de funcionamiento para compensar el enfriamiento suplementario producido por la evaporación del alcohol, en caso contrario, con un calor latente de vaporización de 200, frente a 78 kcal kg⁻¹ de la gasolina, se llegaría a la condensación de la mezcla. La mezcla de la gasolina con el aire en el venturi del carburador produce un descenso de 20°C en la temperatura, mientras que con el alcohol este descenso llega a ser de 50°C. El alcohol hidratado absorbe 130% más de energía en su paso a través del colector en comparación con la gasolina, lo que hace conveniente aumentar la velocidad de flujo (reduciendo la sección) en las conducciones.
- Utilización de aleaciones resistentes en los asientos de las válvulas de escape, ya que la ausencia de plomo tetraetilo en el combustible acorta su durabilidad.
- Incorporación de un sistema para facilitar el arranque en frío, a temperatura ambiente inferior a 10 °C, esta operación resulta difícil como consecuencia del elevado calor latente de vaporización del alcohol. A diferencia de la gasolina, la curva de destilación del alcohol (porcentaje de producto que se evapora a cada temperatura) es casi recta, porque se trata de un compuesto simple, mientras que en la gasolina, para una temperatura baja, próxima a la del ambiente, se evapora hasta un 10%, sin que la evaporación sea completa hasta cerca de los 200 °C. Este porcentaje del 10% evaporado se mezcla casi instantáneamente con el aire y es suficiente para que se produzca el arranque.
- El alcohol etílico se evapora en condiciones normales de presión a una temperatura de 77 °C. Para un porcentaje de evaporación del alcohol mayor del 10% éste se comporta mejor que la gasolina, ya que la temperatura de vaporización es más baja, lo que favorece el llenado de los cilindros. Pero se necesita para ello que la temperatura del colector se aproxime a 35 °C. Por esto, resulta necesario recurrir a la gasolina en el arranque, sobre la base de un circuito auxiliar combinado con el dispositivo de puesta en marcha, o bien utilizar un sistema de calefacción eléctrico del colector, similar a los que se instalan para el arranque de motores diesel.
- Adaptación de determinados componentes para que resistan el ataque del alcohol. Esto es especialmente necesario en el depósito, que debe fabricarse con acero inoxidable, o revestido de materiales plásticos como el polipropileno; las conducciones, que pueden ser de PVC, para las que se encuentran a

temperatura por debajo de 70 °C; y materiales del carburador que deben estar tratados superficialmente a base de estaño o bicromato de sodio.

Según Camps (1994), hay aproximadamente 300 piezas diferentes en un motor que funciona con alcohol, algunas de las cuales no se mencionaron anteriormente, tales como nuevos pistones y forma de cámara de combustión; bomba de combustible resistente a la corrosión (cadmio o cromo); empaquetadura y recubrimiento para evitar corrosión; válvulas adecuadas; uniones capaces de soportar el aumento de la relación de compresión; batería de mayor capacidad y un alternador para permitir una partida mas larga.

Al utilizar una mezcla de alcohol con gasolina, es necesario que se use un alcohol anhidro, debido a que la presencia de agua provoca una separación de la mezcla. Debido al cociente estequiométrico, aire-combustible, el alcohol butílico se puede mezclar en mayor porcentaje sin afectar el funcionamiento del motor, en cambio, el alcohol metílico sólo puede mezclarse en cantidades menores, en una mezcla de gasolina con 20% de alcohol, sólo se hace necesario ajustar los inyectores del carburador (Smith y Workman, 2005).

Otro uso interesante del alcohol en motores es el Etil Tercio Butil Eter (ETBE), que es empleado como aditivo para aumentar el número octano de las gasolinas en lugar del plomo (Boto, 2000).

El bioalcohol está pensado para ser utilizado en motores de encendido por chispa, no es posible utilizarlo en un motor diesel, debido a que éste precisa en el combustible un índice de cetano próximo a 45 y el alcohol alcanza valores de 9 como máximo. No obstante Márquez (1995) menciona que en este caso, puede recurrirse en un motor diesel a un sistema de alimentación híbrido, colocándose en el múltiple de admisión un carburador para que se encargue de suministrar una mezcla de alcohol y aire, mientras que se mantiene la inyección de gasóleo en cada cilindro, actuando como llama piloto en sustitución de la bujía. El funcionamiento, en estas condiciones, puede considerarse como más próximo al de un ciclo Otto que al ciclo Diesel. En este caso la proporción del alcohol debe mantenerse sobre el 60-80 % del total de combustible utilizado (diesohol). Esta cantidad de alcohol agregada a la toma de aire puede ser difícil de manejar y podría causar falla y/o funcionamiento errático del motor (Smith y Workman, 2005).

Se produce un aumento del consumo total como consecuencia del menor poder calorífico del alcohol (Márquez, 1995), pero se puede ocupar un sistema turbo cargador que aumentaría la eficacia volumétrica del motor y produciría más energía. Un resultado similar al anterior se puede obtener usando un intercooler (enfriador de mezcla).

El alcohol metílico, debido a su naturaleza altamente polar, no se mezcla con el combustible diesel, en cambio, el etanol se puede mezclar con el combustible diesel con una presencia pequeña de agua. En este caso, sin embargo, el encendido del motor diesel no funcionará normalmente, además, el etanol no lubrica bien el sistema de inyección del combustible. Otro problema que presenta la adición de etanol al diesel es la disminución del número de cetano, por debajo nivel recomendado por el fabricante del motor (Smith y Workman, 2005).

Por otro lado, el alcohol butílico se puede mezclar con el combustible diesel en cualquier concentración. No se separa si hay presencia de agua o disminuye la temperatura. Además éste no cambia perceptiblemente el número de cetano y tiende a reducir la temperatura de la solidificación del combustible (Smith y Workman, 2005).

GAS

El gas licuado y el biogas pueden usarse indistintamente en motores a gasolina y en motores diesel. Hay evidencia de utilización de motores a gas desde 1860, cuando Etienne Lenoir construyó un motor de un cilindro que se le inyectaba gas alternadamente por un lado y luego por el otro, dándole ignición mediante una chispa. Con relación al biogas, se mencionan algunos ensayos en 1907, siendo posteriormente remplazado por los combustibles tradicionales, como ha pasado con todos los biocombustibles ya descritos, aunque, a diferencia de los otros, ha tenido importancia en periodos posteriores, como la II guerra mundial, y en la actualidad para la generación de electricidad.

En Chile se ha visto un aumento de la utilización de vehículos a gas en los últimos años (motor de Ciclo Otto). Este biocombustible tendría el mismo efecto que el bioalcohol, pudiendo utilizarse en vehículos, motobombas, motores estacionarios y de equipos de riego, entre otros. Además es posible la utilización de gas en motores diesel mediante un sistema mixto, aunque es más difícil de utilizar que en los motores Otto. A medida que los motores son más eficiente y robustos van siendo más adaptados para este trabajo dual (gas-diesel), siendo necesario comprimir este gas a más de 200 bares para su utilización en motores, e implementar estanques especiales para contenerlo a los lados del tractor, o bien en el techo.

El sistema dual, para tener eficiencias comparable con el motor diesel (85-90%), debe trabajar a velocidad y torque medio a alto al trabajar con gas licuado, y en caso de utilizarse biogás la velocidad debe ser media y torque alto, debido a que con torque bajo, la temperatura para una correcta ignición es baja, bajando de ese modo la eficiencia.

El principal problema del biogás, es el ácido sulfhídrico (H_2S), que puede provocar graves problemas de corrosión. A su vez, las partículas que se arrastran con el gas tienen una acción abrasiva, aspectos que varían según la composición de la biomasa de origen que podría aportar agentes corrosivos como HCl o el H_2S (Fernández, 2002). El ácido sulfhídrico tiene, además un efecto sobre la capacidad buffer del aceite de lubricación, lo que implica acortar los periodos de tiempo entre cambios de aceite. Se ha recomendado una disminución del contenido de H_2S del gas a un nivel de 1 mg H_2S por litro o menos. La corrosión ocurre fundamentalmente cuando el motor no está funcionando continuamente, mientras está detenido el H_2S reacciona con el agua que se condensa, produciendo H_2SO_4 que es altamente corrosivo, por esta razón, se recomienda que antes de parar un motor con biogás, debe funcionar unos minutos con un gas limpio (gas licuado).

Instalar un sistema desulfurador puede ser caro (sólo se justifica en grandes plantas), por lo cual es más sencillo realizar modificaciones en el motor, remplazar todos aquellos elementos que contengan cobre o protegerlos, revisar el TBN (número base total, que es la capacidad del aceite de neutralizar el efecto de los productos ácidos de la combustión) del aceite con frecuencia y sustituirlo antes de alcanzar el valor de 3 o menos, hacer funcionar el motor tan continuamente como sea posible y evitar las épocas inmóviles, o en caso

de que sea necesario, antes de parar el motor, éste debe funcionar con un gas limpio como el gas licuado por unos minutos como recién se mencionó (Ortiz-Cañavate 1994b).

Para elegir el motor adecuado a biogas para trabajar en forma estacionaria en una actividad silvo-agropecuaria, es necesario considerar cuánto biogás se produce por hora o por día y el número de horas que debe funcionar el motor por día según los datos de la tabla siguiente:

Tabla 2. Consumo promedio de biogas $m^3 h^{-1}$.

| Potencia Motor(kW) | Motores Otto | | Motores Diesel | |
|--------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Potencia máxima | 50% potencia | Potencia máxima | 50% potencia |
| 10 | 6 | 4 | 4,5 | 3,3 |
| 20 | 12 | 8 | 9 | 6,5 |
| 30 | 18 | 12 | 13,5 | 9,8 |
| 40 | 30 | 20 | 22,5 | 16,3 |
| 50 | 48 | 30 | 36 | 26 |

Fuente: Batel et al, 1982, citado por Ortiz-Cañavate, 1994b

Modificaciones en motores de gasolina (Ortiz-Cañavate, 1994b). El uso de un motor a gasolina sin modificar provoca una disminución de la potencia entre un 30-40%, situación que se podría mejorar trabajando el motor (sin modificar) en forma continua a mayor velocidad, sobrealimentándolo o poniéndole turbo al motor, incrementando la relación de compresión del motor o bien usando un sistema dual de combustible.

Modificaciones en motores de diesel (Ortiz-Cañavate, 1994b). Muchas de las indicaciones para gasolina son adecuadas para motores diesel, pero éstos tienen una relación de compresión mayor (16-20), y además existe un efecto del tipo de inyección (inyección directa o indirecta) y del número de ciclos (motor de dos o cuatro tiempos). Por otro lado, el gas no se auto enciende como ocurre con el diesel, por lo cual es necesario la inyección de una pequeña cantidad de diesel. Existe la posibilidad de hacer modificaciones mayores, lo que implica un elevado costo. Cambios en el sistema de carburación, pistones, culata y un sistema electrónico de ignición. Por otro lado, se puede mejorar el motor para trabajar en forma dual, en ese caso se debe poner un nuevo múltiple de admisión, un mezclador gas-aire, la bomba de inyección debe ser modificada para inyectar una cantidad fija y pequeña de combustible. Es más fácil de convertir los motores de inyección directa que los de inyección indirecta o precámara, debido a que los primeros tienen una menor relación de compresión (16-17), mientras que en los de precámara es de 21, por lo que debe ser reducido a 16, además, se debe adelantar la inyección unos 30° , pero esta variable depende de cada motor y del tipo de gas utilizado, siendo más sencillo en motores estacionarios que trabajan a solo una carga, que en los de carga variable.

En estos sistemas aun existe la interrogante si la combustión del gas en un motor de combustión interna dará lugar a un desgaste creciente del motor y a un tiempo de vida más corto. La causa principal del desgaste del motor son los ácidos acéticos altamente complejos generados en la zona de la destilación y la significativa cantidad de sulfuro de amoníaco e hidrógeno asociado a la gasificación del carbón y de algunos combustibles de la biomasa. Para disminuir el desgaste de los motores es necesario un sistema eficiente de purificación, pero esto no es una garantía para motores desgastados. Para minimizar el daño a los motores provocados por el gas, en la actualidad algunos fabricantes de motores han instalado una alimentación de goteo de aceite para mojar el gas antes de que éste entre en el mezclador. Otros han empleado un depurador de aceite autoinducido como última etapa de limpieza y una saturaron gas con niebla fina del aceite.

SINTESIS

La utilización de combustibles renovables en motores es una alternativa interesante para vehículos y/o equipos estacionarios. Los motores no requerirían modificaciones si se utilizara una mezcla con bajo porcentaje del biocombustible (hasta 20%), en caso de aumentar el porcentaje se hace necesario realizar modificaciones que dependen del contenido de biocombustible de la mezcla.

LITERATURA

- Anónimo, 2005a. Biocombustibles. Disponible en <http://html.rincondelvago.com/biocombustibles.html> (visitado diciembre 2005).
- Anónimo, 2005b. Aceite vegetal usado como combustible diesel. Disponible en http://journeytoforever.org/es/biodiesel_cav.html (visitado diciembre 2005).
- Bär, B. 2005. El biodiesel. Disponible en <http://usuarios.lycos.es/biodieseltr/index.html> (visitado diciembre 2005).
- Boto, J.a. 2000. La mecanización agraria. Ediciones Universidad de León, León, España. 306p.
- Camps, M. 1994. Alcohols: Ethanol and methanol. In. Ruiz-Altisent, M. Ed Application of biologically derived products as fuel or additives in combustion engines. Directorate-General XII, Science, Research and Development. p.22-50.
- De Juana, J.M^a. 2002. La energía. In De Juana, J.M^a. , coordinador. Energías renovables para el desarrollo. Paraninfo, Madrid, España. 1-22.
- Dorado, M.p., Arnal, J.M., Gomez, J., Ballesteros, E., Lopez, F.J. 2003. Funcionamiento de un motor diesel al utilizar biodiesel de aceite de oliva recalentado como combustible. 2º Congreso de la Sociedad de Agroingeniería, Córdoba, septiembre de 2003. paper AG03-0206.
- Fernandez, J. 2002. Energía de la biomasa. In De Juana, J.M^a. , coordinador. Energías renovables para el desarrollo. Paraninfo, Madrid, España. 188-258.
- Guadilla, A.1989. Tractores, mecánica, reparación y mantenimiento. Ediciones CEAC 4ª edición, Barcelona, España. 708p.
- Márquez, L. 1995. Los biocarburantes: Limitaciones y perspectivas In Energías Renovables, Instituto de Ingenieros de España (Comité de la Energía y Recursos Naturales) ISBN 84-7834-262-1.
- Martínez, R. 2001. Combustibles vegetales Los hederemos del gasoil. Revista Super Campo. VII, N°78.
- Ortiz-Cañavate, J. 1994a. Plants oils and methylesters. In. Ruiz-Altisent, M. Ed Application of biologically derived products as fuel or additives in combustion engines. Directorate-General XII, Science, Research and Development. p.2-20.
- Ortiz-Cañavate, J. 1994b. Gaseous Biofuels: Biogas and producer gas. In. Ruiz-Altisent, M. Ed Application of biologically derived products as fuel or additives in combustion engines. Directorate-General XII, Science, Research and Development. p.52-67.
- Ortiz-Cañavate, J. 2005. Tractores, técnica y seguridad. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.212p.
- Oteguí, M., 2005. Paysandú busca en el biodiesel una esperanza de reactivación. Espectador.com, uruguayos para el mundo, disponible en: <http://www.espectador.com/uruguayos/invierta/inv2003-12-18-2.htm> (visitada diciembre 2005).
- Reyes, J.F.; Sepúlveda, M.; Melón, P. 2006 potencia y emisión particulada en un motor Diesel operando con biodiesel y metilester de aceite animal. Agricultura Técnica. En prensa.
- Servicio de Impuestos Internos. 2004. Ventas y servicios – Nuevo texto – Actual ley sobre impuestos a las- LEY 18.502, ART. 6º, LETRA B) – LEY N° 19.030. (ORD. N°2.013, DE 30.04.2004). Oficio N° 2.013, de 30.04.2004. Subdirección Normativa Dpto. de Impuestos Indirectos.

- Smith, J.I. y Workman, J.P. 2005. Alcohol for Motor Fuels. CSU Cooperative Extension-Agriculture, Colorado State University, Cooperative Extension no. 5.010, disponible <http://www.ext.colostate.edu/pubs/farmmgmt/05010.html>. (visitado Diciembre 2005).
- Ugolini, G. 2001. Combustibles vegetales, nuevo rol para la agricultura. Revista Súper Campo. VII, N°78.
- Villa, R. 2003. Tractores agrícolas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, departamento de Ingeniería y Suelos, Publicación docente N°. Cuarta edición. 156p.