



**ESCUELA POLITÉCNICA DEL
EJÉRCITO
SEDE LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ**

TESIS DE GRADO

**OBTENCIÓN, PREPARACIÓN Y APLICACIÓN
DEL ALCOHOL COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO EN UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN INTERNA.**

**Santiago Fernando Celi Ortega
Edwin Michel Macías Cevallos**

**LATACUNGA - ECUADOR
ABRIL – 2006**

CERTIFICACIÓN

Certifico que la presente tesis ha sido desarrollada en su totalidad por los Sres.: Santiago Celi O. y Michel Macías C., egresados de la carrera de Ingeniería Automotriz.

Ing. Luis Mena
DIRECTOR DE TESIS

.....

Dr. César Cruz
CODIRECTOR DE TESIS

.....

AGRADECIMIENTO:

Quiero agradecer a la Escuela Politécnica del Ejército sede Latacunga ya que en sus aulas tuve un enriquecimiento intelectual, al Colegio Hermano Miguel por haber prestado sus instalaciones para la realización de una parte de esta tesis, a mis profesores quienes hicieron posible la culminación de mi carrera profesional.

Además agradezco de forma muy especial:

A Dios, por darme la salud y la fuerza necesaria para seguir adelante.

Mis padres, por ser un apoyo cada día de mi vida y confiar en mí.

Hermanos, porque fueron amigos en toda mi carrera.

Y amigos por estar conmigo siempre.

Edwin Michel Macías Cevallos

AGRADECIMIENTO:

A Dios por ser el aliado fundamental en cada decisión que tome, a mis padres quienes con su amor y consejos son el pilar más fuerte de mi vida, a mis amigos por ser un gran complemento en cada momento de tristezas y alegrías, a mis profesores por ser buenos amigos y maestros y todas las personas que siempre estuvieron a mi lado..... A ellos muchas gracias.....

Santiago Fernando Celi Ortega

DEDICATORIA:

Esta tesis de grado va dedicada a todas las personas que hicieron posible la culminación de una meta importante en mi vida, en especial a Dios, a mis padres, a mis hermanos, a mi novia y amigos por estar a mi lado en todos los momentos de bonanza y desventuras.

Edwin Michel Macías Cevallos

DEDICATORIA:

Con mucho cariño quiero dedicar esta tesis a mis padres quienes hicieron posible que hoy culmine esta etapa tan importante para mi superación personal y profesional...

Santiago Fernando Celi Ortega

INDICE

CARÁTULA	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	V
INDICE	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Los Alcoholes.....	3
1.1.1 Características de los alcoholes.....	3
1.1.2 El Metanol.....	4
1.1.3 El Etanol.....	4
1.2 Propiedades físicas de los alcoholes.....	7
1.3 Combustibles Alternativos.....	8
1.4 El etanol como combustible.....	9
1.5 Procesos de obtención del Alcohol.....	11
1.6 Procesos de destilación del Alcohol.....	14
1.6.1 Teoría de la destilación.....	14
1.6.2 Aparato casero de destilación.....	15
1.6.3 Destilación simple.....	16
1.6.4 Destilación fraccionada.....	17
1.6.5 Destilación destructiva.....	19
1.7 Aspectos técnicos vinculados al empleo del alcohol como carburante en motores de explosión.....	20
II. OBTENCIÓN DEL ALCOHOL	21
1.2 Obtención del alcohol a partir de la biomasa.....	21
2.1.1 Pretratamiento de la biomasa.....	22
2.1.2 Hidrólisis.....	23
2.1.3 Fermentación Alcohólica.....	23
2.1.4 Separación y purificación del Etanol.....	24

2.2 Producción del alcohol a partir de la caña de azúcar.....	25
2.2.1 Sección de molienda.....	26
2.2.2 Sección de fermentación.....	28
2.2.3 Sección de destilación del alcohol.....	30
2.3 Obtención del alcohol Anhidro en el laboratorio.....	33
III. INFLUENCIA DEL USO DEL ALCOHOL EN LOS SISTEMAS DEL MCI.....	37
3.1 Principios de combustión.....	37
3.1.1 Ecuaciones de combustión.....	37
3.2 Proceso de combustión y termodesprendimiento.....	43
3.3 Sistema de Encendido.....	44
3.3.1 Inflamación por la descarga de chispa con propagación posterior a la llama.....	45
3.3.2 Combustión en el motor de ciclo Otto.....	49
3.3.3 Combustión detonante.....	52
3.4 Ajustes y calibraciones.....	55
3.5 Sistema de Alimentación.....	56
3.6 Ajustes y calibraciones.....	61
3.7 Sistema de Lubricación.....	61
3.8 Consideraciones.....	62
3.9 Sistema de Refrigeración.....	62
3.10 Consideraciones.....	63
IV. PRUEBAS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....	64
4.1 Relación estequiométrica teórica adecuada para el funcionamiento del motor con alcohol.....	64
4.2 Pruebas a diferentes velocidades del motor con alcohol.....	65
4.3 Pruebas con gasolina.....	69
4.4 Cálculo de parámetros característicos de operación y comparación del motor de combustión interna gasolina y con alcohol.....	73
4.4.1 Definición de parámetros a calcularse.....	73

4.4.2 Cálculo de parámetros con alcohol en todas las velocidades de prueba.....	75
4.4.3 Cálculo de parámetros con gasolina en todas las velocidades de prueba.....	88
4.5 Gráficas comparativas entre alcohol y gasolina de los parámetros de prueba.....	100
V. ANÁLISIS DE EMISIONES.....	104
5.1 Contaminantes de la gasolina.....	104
5.2 Gases de escape.....	105
5.3 Contaminantes del etanol.....	111
5.4 Efectos nocivos de los contaminantes de la gasolina.....	113
5.5 Tablas y gráficas de emisión de gases obtenidos en el laboratorio.....	115
5.5.1 Tablas con gasolina a diferentes velocidades.....	118
5.5.2 Tablas con alcohol a diferentes velocidades.....	118
5.5.3 Gráficas comparativas de las emisiones contaminantes.....	118
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
6.1 Conclusiones.....	123
6.2 Recomendaciones.....	124
BIBLIOGRAFÍA.....	125
ANEXOS.....	126
ANEXO A.....	127
ANEXO B.....	128

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo se viene escuchando que el petróleo sube su precio y esto nos hace pensar, ¿Acaso nuestro motor de explosión no puede funcionar con otro combustible?

Cualquier líquido o gas que contenga hidrógeno y carbono, al mezclarse con el oxígeno en una combustión, puede producir calor, con lo cual es susceptible de sustituir a la gasolina. Para que se produzca una combustión de calidad, deberemos conseguir que la mezcla sea lo más homogénea posible, es decir, la unión de las moléculas del fluido (gas o líquido) con el oxígeno debe ser lo más íntima o repartida posible. El gas, capaz de mezclarse mucho más fácilmente, sería preferible al líquido en este sentido; el líquido hay que pulverizarlo consiguiendo las partículas más pequeñas que nos sea posible, y dosificarlo convenientemente para que su mezcla con el O₂ resulte idónea.

Los problemas aducidos siempre de falta de poder calorífico de otros productos, siendo ciertos, no dejan de sonar como excusa, puesto que hoy día se pueden solventar aunque sea parcialmente, ya que en algunos países utilizan mezclas para la combustión de los motores. En la siguiente tabla (Tabla 1.1.) podemos observar algunos tipos de combustibles (gas y líquido) con su respectivo índice de octano, cetano y su poder calorífico.

GASES	Índice de Octano	Poder calorífico cal/kg
Butano	90	10.900
GLP	102	10.950

Metano	125	11.500
Propano	125	11.000
LÍQUIDOS	Índice de Octano	Poder calorífico cal/kg
<u>Alcohol etílico</u>	100	6.500
Alcohol metílico	120	5.050
Gasolina 95	95	10.400
Gasolina 98	98	10.550
Benzol	100	9.600
	Índice de Cetano	Poder calorífico cal/kg
Diesel	46	11.000

Tabla 1.1. Tipos de combustibles

Todos estos líquidos tienen la cualidad de ser muy volátiles; es decir, su capacidad de evaporarse espontáneamente en el aire (y mezclarse con él) es alta. No ocurre lo mismo con otros combustibles como el gasóleo (diesel) o el keroseno, que deben ser finamente divididos utilizando métodos físicos antes de provocar la combustión. De aquí la necesidad entre otras razones, de que la inyección del diesel se lleve a cabo, a la mas alta presión posible.

El etanol o alcohol etílico, cuya fórmula química es: $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{OH}$ es obtenido de la destilación de una serie de vegetales como la uva, o la caña de azúcar, en general de los monosacáridos, así en los países como Brasil, en los cuales la caña es muy abundante es rentable su obtención. Se puede obtener sintéticamente del etileno, hidrocarburo derivado del petróleo.

El metanol o alcohol metílico $\text{CH}_3 - \text{OH}$ se puede obtener por síntesis utilizando carbono e hidrógeno, pero su obtención es más compleja.

La obtención del etanol, podría realizarse por destilación de plantas (biomasa) que se repoblarían en regiones pobres, en las que con la llegada

de la globalización han quedado devastadas. Estos nuevos cultivos, podrían transformar los hábitos de vida en estas extensiones, incidiendo por doble motivo en la economía del país.

1.1. LOS ALCOHOLES

1.1.1. Características de los Alcoholes

Los alcoholes son derivados de hidrocarburos simples (moléculas formadas por carbono e hidrógeno) y se caracterizan por tener un grupo oxidrilo (OH) unido a uno de los átomos de carbono en sus moléculas.

Los alcoholes simples de bajo peso molecular como el etanol son incoloros, volátiles, líquidos, inflamables y solubles en agua. Cuando el peso molecular crece, el punto de ebullición, el punto de fusión y la viscosidad crecen y la solubilidad en agua decrece. Estas propiedades físicas pueden ser alteradas por la presencia de otro grupo funcional (es un átomo o grupo de átomos unidos entre sí y al resto de las moléculas de una determinada manera estructural).

La mayoría de los alcoholes de bajo peso molecular son los de mayor importancia comercial. Son usados como solventes en la preparación de pinturas, anticongelantes, productos farmacéuticos y otros compuestos.

En la gran familia de los alcoholes se encuentran el “etanol” y el “metanol” dos compuestos que se están implementando como combustibles alternativos en los motores de automóviles.

1.1.2. El Metanol

También llamado alcohol metílico, carbinol o alcohol de madera, porque originalmente se obtenía mediante la destilación de ésta en ausencia de aire. Actualmente, con las técnicas existentes puede producirse a partir de fuentes variadas y abundantes: gas natural, carbón, madera e incluso los residuos orgánicos (biomasa), aunque lo más común es producirlo sintéticamente.

Su fórmula química es: $\text{CH}_3 - \text{OH}$

Es el más simple de los alcoholes. Es incoloro, tóxico y causa ceguera por destrucción irreversible del nervio óptico. Una ingestión de más de 30 ml causa la muerte.

Es usado en la fabricación de ácido acético y otros compuestos químicos. Es un solvente para los plásticos, pinturas, barnices y sirve como anticongelante en refrigerantes de automóviles.

Su alto octanaje, performance y seguridad hacen que sea el combustible elegido para Las 500 Millas de Indianápolis desde 1965.

Además, la reducción en la emisión de contaminantes y las pocas modificaciones (relacionadas con su alta corrosión) necesarias para permitir a los motores a gasolina el uso del metanol, hicieron que se popularice como un combustible alternativo en vehículos de competición y particulares en otros países del mundo.

1.1.3. El Etanol

También llamado alcohol etílico o alcohol de grano, porque es un líquido derivado de los granos de maíz u otros granos.

El etanol se puede producir a partir de 3 principales tipos de materias primas (Tabla 1.2.):

MATERIA PRIMA	SUSTANCIAS DE LAS CUALES SE PUEDEN OBTENER	EJEMPLOS
Azucaradas	Mostos y jugos de diversas frutas	Remolacha, caña de azúcar
Amiláceas	Cereales	Maíz, cebada, malta, trigo, avena, centeno, arroz
	Tubérculos	Papa, malanga, yuca
	Raíz de girasol	Girasol
Celulósicas	Madera, bagazo de caña de azúcar, residuos de paja de trigo, despojos de maíz, líquidos residuales del papel, pulpa de remolacha	

Tabla 1.2. Materias primas para obtener alcohol

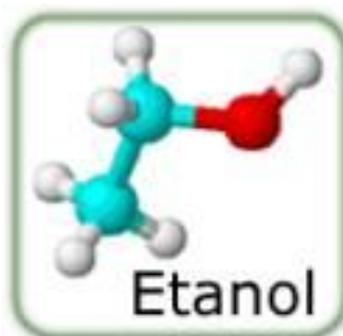
Desde el punto de vista técnico, la caña de azúcar es una de las materias primas más atractivas de biomasa. Lo anterior se debe a que los azúcares que contiene se encuentran en una forma simple de carbohidratos fermentables y además durante su procesamiento se genera el bagazo, que se usa como combustible en la producción de etanol. El principal inconveniente de la caña de azúcar son los costos de producción. Además, se requieren tierras fértiles para su cultivo las cuales podrían ser destinadas a la producción de alimentos.

Por su parte, las materias ricas en almidón contienen carbohidratos de mayor complejidad molecular que necesitan ser transformados en azúcares más simples por un proceso de conversión (sacarificación), lo que introduce un paso más en la producción con el consiguiente aumento en los costos de capital y de operación. No obstante lo anterior, existen ciertos cultivos amiláceos como es el caso de la yuca, los cuales se pueden establecer con un mínimo de insumos y en tierras marginales en donde generalmente otras

especies más exigentes no se desarrollan.

Finalmente, las materias primas ricas en celulosa son las más abundantes, sin embargo la complejidad de sus azúcares hacen que la conversión de estos en carbohidratos fermentables sea una tarea difícil y poco rentable en la actualidad. Los procesos de hidrólisis ácida y enzimática de sustratos celulósicos se encuentran poco desarrollados a nivel industrial, sin embargo se esperan avances importantes en los próximos años.

La fórmula química del etanol es: $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{OH}$



Fórmula tridimensional del Etanol

La fórmula tridimensional del etanol demuestra la posición exacta de los átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno en el espacio.

Características:

- ✓ Es un líquido inflamable, incoloro y es el alcohol de menor toxicidad.
- ✓ Es usado en las bebidas alcohólicas y como desinfectante o

solvente.

- ✓ Posee un alto octanaje y una mayor solubilidad en gasolina que el metanol.
- ✓ Además es usado como un aditivo que se le añade a la gasolina para oxigenarla, llamado Ethyl Tertiary Butyl Ether, ETBE, el cual ayuda a que se produzca una mejor y limpia combustión.

1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ALCOHOLES

Estructuralmente el alcohol, es un compuesto de un alcano y agua. Contiene un grupo lipófilo, del tipo de un alcano, y un grupo oxidrilo que es hidrófilo, similar al agua. De estas dos unidades estructurales, el grupo OH da a los alcoholes sus propiedades físicas características, y el alquilo es el que las modifica, dependiendo de su tamaño y forma.



Alcano



Agua



Alcohol

El grupo OH es muy polar y, lo que es más importante, es capaz de establecer puentes de hidrógeno: Con sus moléculas compañeras, con otras moléculas neutras y con iones. Las propiedades físicas (Tabla 1.3.) muestran algunos de los efectos de estos puentes de hidrógeno.

Nombre	Fórmula	P.f. (°C)	P.e. (°C)	Densidad relativa a 20 °C	Solubilidad g/100 g H ₂ O
Metílico	CH ₃ OH	-97	64.5	0.793	∞
Etílico	CH₃CH₂OH	-115	78.3	0.789	∞
n-Propílico	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	-126	97	0.804	∞
n-Butílico	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	-90	118	0.81	7.9
n-Pentílico	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₂ OH	-78.5	138	0.817	2.3
n-Hexílico	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₂ OH	-52	156.5	0.819	0.6
n-Heptílico	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₂ OH	-34	176	0.822	0.2
n-Octílico	CH ₃ (CH ₂) ₆ CH ₂ OH	-15	195	0.825	0.05
n-Decílico	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₂ OH	6	228	0.829	
n-Dodecílico	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₂ OH	24			
n-Tetradecílico	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ CH ₂ OH	38			
n-Hexadecílico	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ CH ₂ OH	49			
n-Octadecílico	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₂ OH	58			
Isopropílico	CH ₃ CHOHCH ₃	-86	82.5	0.789	∞
Isobutílico	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ OH	-108	108	0.802	10
sec-Butílico	CH ₃ CH ₂ CHOHCH ₃	-114	99.5	0.806	12.5
t-Butílico	(CH ₃) ₃ COH	25.5	83	0.789	∞
Isopentílico	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH ₂ OH	-117	132	0.813	2
t-Pentílico	CH ₃ CH ₂ C(OH)(CH ₃) ₂	-12	102	0.809	12.5
Ciclohexanol	ciclo-C ₆ H ₁₁ OH	24	161.5	0.962	

Tabla 1.3. Propiedades físicas de algunos alcoholes

1.3. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

A continuación se muestra una lista con los distintos tipos de combustibles alternativos con alcohol más utilizados:

E5: Es una mezcla de nafta súper sin plomo con 5 % de etanol anhidro (se entiende por etanol anhidro al que tiene el 98 % como grado de hidratación).

GASOHOL (E10): Es una mezcla que contiene 90% de nafta súper sin plomo y 10% de etanol anhidro por volumen.

ALCONAFTA (E15): Es una mezcla que contiene 15% de etanol anhidro y 85% de nafta súper por volumen.

E85: Es una mezcla que contiene 85% de etanol anhidro y 15% de nafta súper sin plomo por volumen.

E93: Es una mezcla que contiene 93% de etanol anhidro, 5% de metanol anhidro y 2% de kerosén por volumen.

E95: Es una mezcla que contiene 95% de etanol anhidro y 5% de nafta súper sin plomo por volumen.

E100: Es etanol anhidro al 100%. Se utiliza como combustible alternativo en motores diseñados originalmente a gasolina.

ETBE (ethyl tertiary butyl ether): Es un aditivo que oxigena la nafta ayudando a una combustión más limpia. Se puede añadir a la nafta hasta un 17% del volumen.

M85: Es una mezcla que contiene 85% de metanol anhidro y 15% de nafta súper sin plomo por volumen. Se utiliza en motores originalmente diseñados para gasolina.

M100: Es metanol anhidro al 100%. Se utiliza en motores diseñados originalmente a diesel.

1.4. EL ETANOL COMO COMBUSTIBLE

El etanol tiene numerosas aplicaciones industriales como disolvente y como combustible. Históricamente, el empleo del etanol como combustible de automóvil data de los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, cuando en Inglaterra funcionaron automóviles con mezclas de gasolina y etanol.

Posteriormente, en 1935, Henry Ford fabricó un modelo de automóvil con un carburador adecuado para funcionar con etanol, gasolina o una mezcla de ambos. El alcohol se abandonó como combustible después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el petróleo se convirtió en un producto abundante y barato.

Actualmente sin embargo, vivimos precisamente una situación inversa (petróleo escaso y caro), por lo que se está convirtiendo en un hecho cada vez más importante el plantearse de nuevo la posibilidad de utilizar alcohol como combustible. Así, en la actualidad son varios los países que están estudiando el empleo del etanol, obtenido de la biomasa y más específicamente a partir de la caña de azúcar, como combustible, bien como componente único o bien como una mezcla con gasolinas.

Para analizar las propiedades del etanol como sustitutivo total o parcial de la gasolina en su uso como combustible, es necesario, en primer lugar, conocer las propiedades de cada uno de estos productos y sus posibles interrelaciones en caso de mezcla.

Las propiedades físico - químicas de interés (Tabla 1.4.) para el estudio del comportamiento del etanol como combustible en motores de automóvil, aparecen comparadas con las de la gasolina en la siguiente tabla:

PROPIEDADES	GASOLINA	ETANOL
Fórmula	C ₈ - H ₁₈	C ₂ H ₆ O
Densidad (g/cc)	0,75	0,79
Solubilidad en agua a 20° C (ppm)	240	Infinita
Punto de ebullición (° C)	88	78.3
Relación estequiométrica aire/combustible	14:1	9:1
Índice de octano	95	100
Poder calorífico (KJ/kg)	43500	26700
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	348,8	920,9

Tabla 1.4. Comparación entre propiedades físico - químicas del etanol y la gasolina

1.5. PROCESOS DE OBTENCIÓN DEL ALCOHOL

Como dijimos anteriormente existen varios medios para obtener alcohol etílico a partir de diferentes materias primas, pero sin embargo la manera más fácil es por medio de la caña de azúcar, la cual en el Ecuador se da en relativa abundancia.

Esta materia prima es la que se utilizó en esta investigación para obtener en primer lugar un alcohol básico y luego realizar mediante procesos de destilación en el laboratorio una deshidratación del mismo, proceso que trataremos más adelante.

A continuación presentamos uno de los procesos más comunes que se siguen para obtener el alcohol etílico a partir de la caña de azúcar.

La caña de azúcar es molida en trapiches de los que sale un “primer jugo” o “jugo mixto” el cual pasa a un proceso de purificación.

El proceso de purificación consiste principalmente en el calentamiento del jugo, para llevarlo luego a una decantación que produce, por una parte, jugo clarificado y por otra, un residuo llamado cachaza. Esta cachaza contiene una proporción de jugo turbio que es separada por medio de filtros y este jugo filtrado vuelve al proceso de purificación, mientras el residuo de la cachaza se usa como abono.

El jugo clarificado se concentra por medio de vapor y vacío. El jugo concentrado normalmente va a tres cocimientos sucesivos, donde se producen los cristales de azúcar que por medio de centrífugas se separan de las mieles de primera (en el primer cocimiento), de las mieles de segunda (en el segundo cocimiento) y de la melaza (en el tercer cocimiento).

El azúcar de primera, si no se hace un proceso de refinamiento, pasa directamente al secado, pesado, embolsado y expedición o almacenaje.

Los azúcares de segunda, si no se usan como azúcares crudos, se diluyen en agua y retornan al cocimiento de primera.

Los azúcares de tercera se diluyen en mieles de primera y retornan al cocimiento de segunda.

Las mieles de primera pasan en parte al segundo cocimiento y en parte se usan para diluir el azúcar de tercera. Las mieles de segunda pasan al tercer cocimiento.

La melaza, que todavía contiene cierta cantidad de azúcar se utiliza normalmente como materia prima para obtener alcohol, en destilerías anexas al ingenio o en destilerías independientes a las que se transporta en tanqueros apropiados.

La melaza se fermenta con levaduras cuya calidad tiene gran importancia en el proceso, para pasar luego a la destilación. El producto destilado se rectifica y así se obtiene el alcohol de 60° (de buen o mal gusto). Cuanto más azúcares contenga la melaza (es decir cuanto más ineficiente sea el proceso de extracción de azúcar) más alcohol se obtendrá.

Para pasar de alcohol 60° a alcohol anhidro (sin agua) es necesaria una redestilación adicional que implica la necesidad de instalar un par de columnas más o llevar a un laboratorio para lograr este proceso.

En la figura 1.1 se muestra un esquema de obtención de la caña de azúcar.

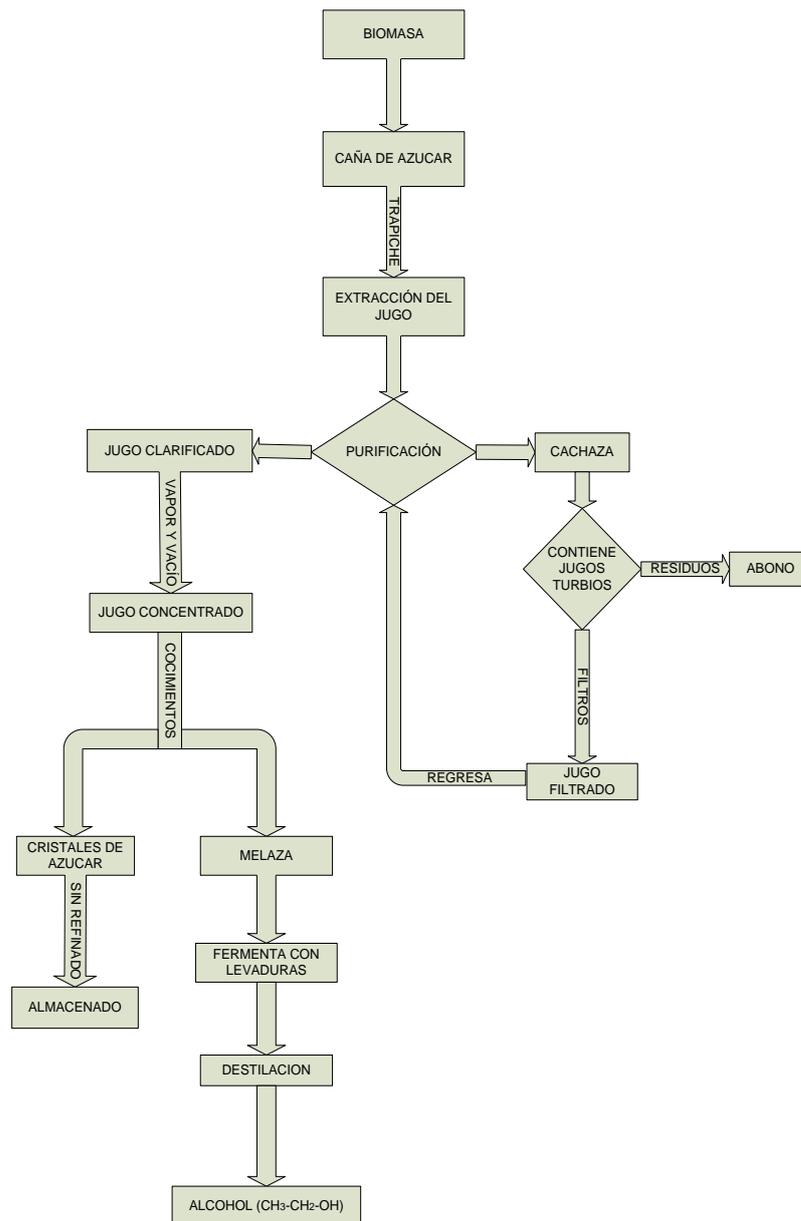


Figura 1.1. Obtención del Etanol a partir de la caña de azúcar

1.6. PROCESOS DE DESTILACIÓN DEL ALCOHOL

Destilación, es el proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasen a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma

líquida, por medio de la condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles. En la evaporación y en el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente más volátil; el componente menos volátil, casi siempre agua, se desecha. Sin embargo, la finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil en forma pura.

Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

1.6.1. Teoría de la destilación

En la mezcla simple de dos líquidos solubles entre sí, la volatilidad de cada uno es perturbada por la presencia del otro. En este caso, el punto de ebullición de una mezcla al 50%, por ejemplo, estaría a mitad de camino entre los puntos de ebullición de las sustancias puras, y el grado de separación producido por una destilación individual dependería solamente de la presión de vapor, o volatilidad de los componentes separados a esa temperatura. En disoluciones de alcohol muy concentradas, la destilación de alcohol de 99% produce un vapor de menos de 99% de alcohol. Por esta razón el alcohol no puede ser concentrado por destilación más de un 98%, aunque se realice un número infinito de destilaciones.

Para todos los casos de destilación el proceso químico de obtención del alcohol etílico (C_2H_6O) tiene la misma reacción química; esta reacción se da mediante la siguiente ecuación:



Obteniendo así el alcohol deshidratado que es el que se utilizará para la parte de experimentación de esta tesis.

1.6.2. Aparato casero de destilación

Técnicamente el término alambique se aplica al recipiente en el que se hierven los líquidos durante la destilación, pero a veces se aplica al aparato entero, incluyendo la columna fraccionadora, el condensador y el receptor en el que se recoge el destilado (Fig. 1.2.).



Figura 1.2. Alambique

Este término se extiende también a los aparatos de destilación destructiva o craqueo. Los alambiques para trabajar en el laboratorio están hechos normalmente de vidrio, pero los industriales suelen ser de hierro o acero. En los casos en los que el hierro podría contaminar el producto se usa a menudo el cobre. A veces también se usa el término retorta para designar a los alambiques.

1.6.3. Destilación Simple

Es la más utilizada en los laboratorios por su facilidad de manejo para una destilación de bajo volumen, y consta de los siguientes componentes: Un mechero, un balón de destilación,

termómetro, condensador, vaso de precipitación, tuberías de goma, soportes universales y tapones para evitar la fuga de vapor.

Se instala el equipo como se indica en el gráfico (Fig. 1.3), colocando el líquido que se va a destilar en el balón, el cuál se sellará con un termómetro insertado en el tapón para controlar la temperatura de ebullición del líquido.

Por medio de tuberías se conecta el condensador a una toma permanente de agua para enfriar el vapor y convertirlo en líquido que luego será recolectado en el vaso de precipitación

Este método es el que se utilizó en esta investigación por ser uno de los procedimientos de destilación de menor costo y menor complejidad, y luego de varias destilaciones se obtiene el Alcohol anhidro.

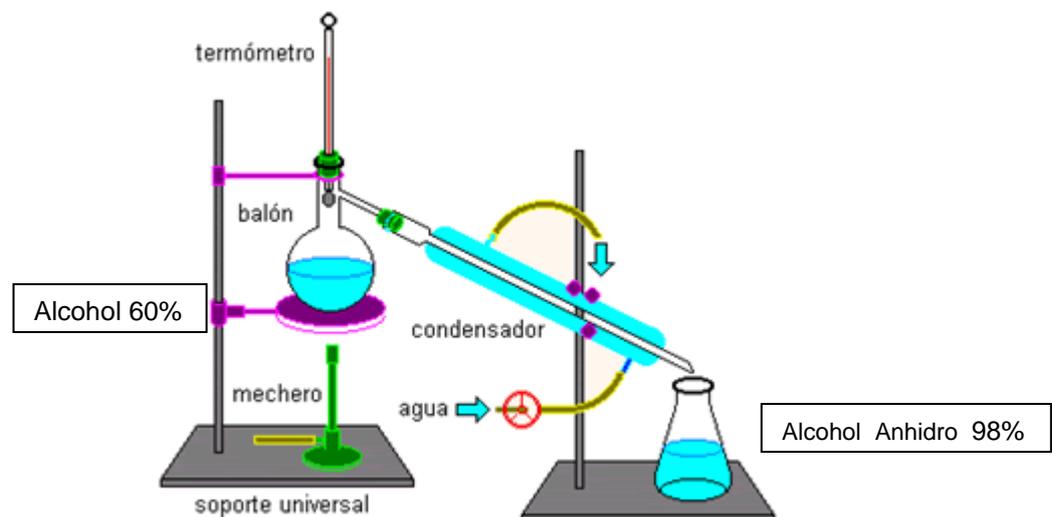


Figura 1.3. Equipo de destilación simple

1.6.4. Destilación fraccionada

Si se consigue que una parte del destilado vuelva del condensador y gotee por una larga columna a una serie de placas, y

que al mismo tiempo el vapor que se dirige al condensador burbujee en el líquido de esas placas, el vapor y el líquido interaccionarán de forma que parte del agua del vapor se condensará y parte del alcohol del líquido se evaporará. Así pues, la interacción en cada placa es equivalente a una redestilación, y construyendo una columna con el suficiente número de placas, se puede obtener alcohol de 95% en una operación individual. Además, introduciendo gradualmente la disolución original de 10% de alcohol en un punto en mitad de la columna, se podrá extraer prácticamente todo el alcohol del agua mientras desciende hasta la placa inferior, de forma que no se desperdicie nada de alcohol (Fig. 1.4.).

Este proceso, conocido como rectificación o destilación fraccionada, se utiliza mucho en la industria, no sólo para mezclas simples de dos componentes (como alcohol y agua en los productos de fermentación, u oxígeno y nitrógeno en el aire líquido), sino también para mezclas más complejas como las que se encuentran en el alquitrán de hulla y en el petróleo. La columna fraccionadora que se usa con más frecuencia es la llamada torre de burbujeo, en la que las placas están dispuestas horizontalmente, separadas unos centímetros, y los vapores ascendentes suben por unas cápsulas de burbujeo a cada placa, donde burbujan a través del líquido. Las placas están escalonadas de forma que el líquido fluye de izquierda a derecha en una placa, luego cae a la placa de abajo y allí fluye de derecha a izquierda. La interacción entre el líquido y el vapor puede ser incompleta debido a que puede producirse espuma y arrastre de forma que parte del líquido sea transportado por el vapor a la placa superior.

En este caso, pueden ser necesarias cinco placas para hacer el trabajo de cuatro placas teóricas, que realizan cuatro destilaciones. Un equivalente barato de la torre de burbujeo es la llamada columna

apilada, en la que el líquido fluye hacia abajo sobre una pila de anillos de barro o trocitos de tuberías de vidrio.

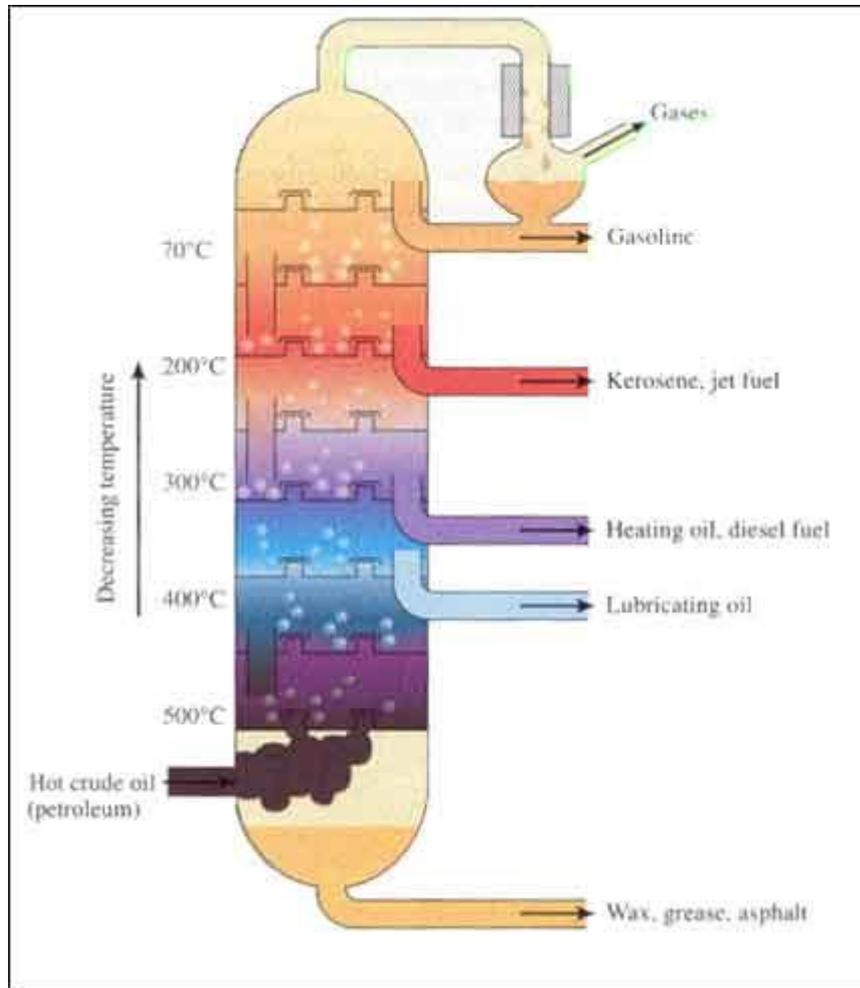


Figura 1.4. Equipo para destilación fraccionada

La única desventaja de la destilación fraccionada es que una gran fracción (más o menos la mitad) del destilado condensado debe volver a la parte superior de la torre y eventualmente debe hervirse otra vez, con lo cual hay que suministrar más calor. Por otra parte, el funcionamiento continuo permite grandes ahorros de calor, porque el destilado que sale puede ser utilizado para precalentar el material que entra.

1.6.5. Destilación destructiva

Cuando se calienta una sustancia a una temperatura elevada, descomponiéndose en varios productos valiosos, y esos productos se separan por fraccionamiento en la misma operación, el proceso se llama destilación destructiva.

Las aplicaciones más importantes de este proceso son la destilación destructiva del carbón para el coque, el alquitrán, el gas y el amoníaco, y la destilación destructiva de la madera para el carbón de leña, el ácido etanoico, la propanona y el metanol (Fig. 1.5.). Este último proceso ha sido ampliamente desplazado por procedimientos sintéticos para fabricar distintos subproductos. El craqueo del petróleo es similar a la destilación destructiva.

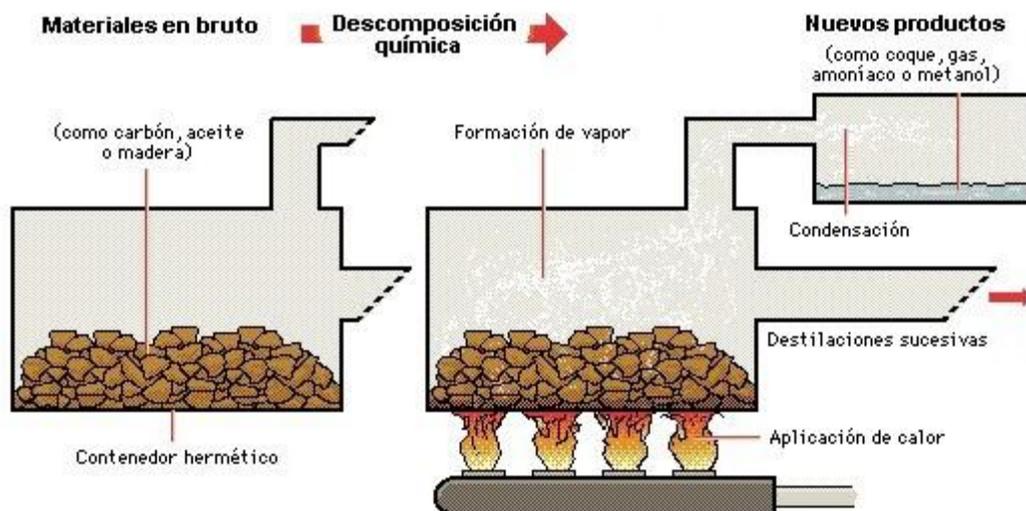


Figura 1.5. Destilación Destructiva

1.7. ASPECTOS TÉCNICOS VINCULADOS AL EMPLEO DEL ALCOHOL COMO CARBURANTE EN MOTORES DE EXPLOSIÓN

La factibilidad técnica de utilizar el alcohol en plantas motrices de automotores está plenamente demostrada por investigaciones y experiencias en el extranjero.

El poder calórico del alcohol por unidad de volumen es inferior al de la gasolina, de modo que, en principio el alcohol debiera restar autonomía y potencia al vehículo. Sin embargo, a raíz del mejor llenado de la cámara de combustión (por la menor temperatura de la mezcla) y gracias al contenido de oxígeno dentro de la molécula del alcohol, que permite una mejor combustión, se compensa esta desventaja.

Es posible utilizar alcohol (anhidro) en los motores de explosión con sólo ligeras modificaciones: aumento de los surtidores del carburador a raíz de la menor cantidad de calorías por litro del alcohol con respecto a la gasolina, en el caso de los motores con inyección electrónica, según las pruebas realizadas, el aumento de caudal de inyección es regulado automáticamente por medio de impulsos eléctricos que la computadora envía a los actuadores (inyectores), otra modificación (no imprescindible pero sí conveniente para mejorar el rendimiento), es realizar un aumento de la relación de compresión.

CAPÍTULO II

OBTENCIÓN DEL ALCOHOL

2.1. OBTENCIÓN DEL ALCOHOL A PARTIR DE LA BIOMASA

La producción de etanol siempre ha tenido como objetivo el consumo humano y la obtención de bebidas alcohólicas concentradas mediante destilación. Su uso como materia prima química se inicia a principios de la microbiología industrial, pero su obtención se lleva a cabo mediante la hidratación catalítica del etileno.

No es hasta hace pocos años cuando la atención ha vuelto de nuevo a la producción por fermentación del etanol para fines químicos y como combustible.

Entre los países en los que se están llevando a cabo estudios intensivos sobre la producción de etanol a partir de carbohidratos como la sacarosa y el almidón, se debe destacar Brasil dado que tiene el clima y

terreno adecuados para la producción a gran escala de caña de azúcar. Sin embargo, la eficiencia del rendimiento de energía (relación de demanda de energía y energía producida) varía según el material de partida. Esta relación es la siguiente:

- ✓ Remolacha: 86%
- ✓ Tapioca: 50%
- ✓ Patatas: 59%
- ✓ Azúcar de caña: 66%
- ✓ Maíz: 25%

2.1.1. Pretratamiento de la biomasa

El pretratamiento tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando esta es poco asequible a la fermentación (Fig. 2.1.). El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas, ya que su objetivo fundamental es reducir estas a partículas pequeñas de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores, es el mecánico, consistente en la trituración, molienda, pulverización, etc. de la biomasa.

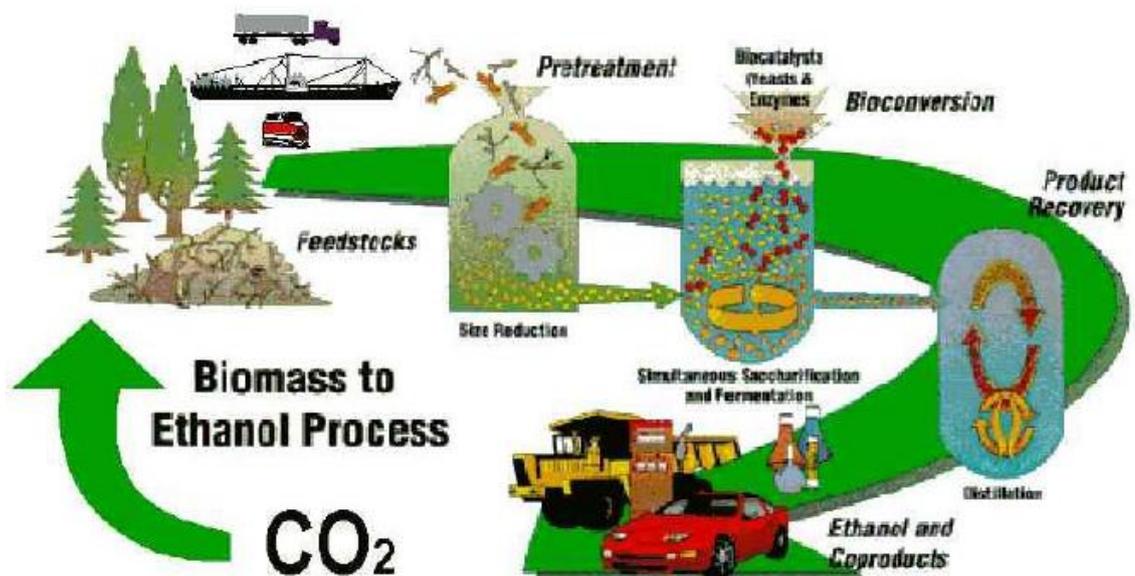


Figura 2.1. Ciclo de procedimiento para la elaboración y utilización del Etanol

Cuando se trabaja con biomasa que contiene almidón, se suele someter esta, además a una cocción, con objeto de gelatinizarla, es decir, impregnarla bien de agua para obtener una masa homogénea. La celulosa generalmente se trata con diversos agentes químicos (ácidos, principalmente), que permiten solubilizarla y separarla de la lignina, sustancia no fermentable.

2.1.2. Hidrólisis

La hidrólisis, o ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa, bien mediante fermentos o enzimas (hidrólisis enzimática), o bien mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

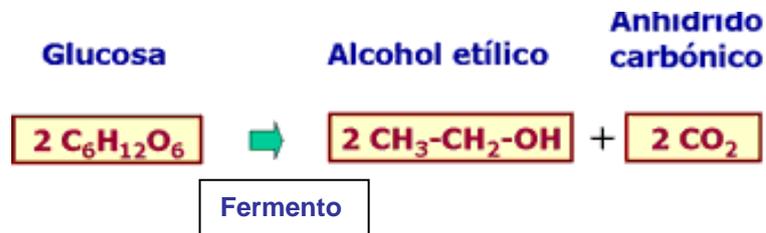
La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidas de microorganismos, dependiendo las condiciones óptimas del proceso de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos del pretratamiento efectuado y del sustrato empleado.

La hidrólisis química de la celulosa se efectúa preferentemente con los ácidos clorhídrico y sulfúrico (hidrólisis ácida) o con una base fuerte (hidrólisis alcalina). Aunque en este caso la reacción es mucho más rápida que en la hidrólisis enzimática, las temperaturas de trabajo son muy superiores (mayor consumo de energía) y se producen problemas de corrosión.

2.1.3. Fermentación alcohólica

Una vez que la biomasa conteniendo hidratos de carbono se ha transformado en una solución azucarada se puede someter esta a un proceso de fermentación con objeto de convertir los azúcares en etanol.

La fermentación alcohólica es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos. Esta transformación se produce a través de una compleja secuencia de reacciones que puede expresarse, desde el punto de vista tecnológico, por la siguiente ecuación:



Según esta reacción, de 100 kg de glucosa se obtienen 51,1 kg de etanol y 48,9 kg de dióxido de carbono. En la práctica, el rendimiento real del etanol es menor que el valor teórico, ya que aproximadamente un 5% de glucosa es utilizado por el microorganismo para producir nuevas células y otros productos de su metabolismo.

Los microorganismos generalmente empleados como fermentos son las levaduras, hongos unicelulares ampliamente distribuidos en la naturaleza. En la acción de las levaduras influye una gran cantidad de factores, entre los que destaca la temperatura, el pH y la concentración de azúcares.

Tradicionalmente, la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

2.1.4. Separación y purificación del etanol

En la masa de fermentación, el etanol solo se encuentra en una concentración máxima del 8 al 12%. Esto obliga a una concentración de la disolución si se quiere obtener el etanol libre de agua. Industrialmente se emplea la rectificación (una forma de destilación) para separar el etanol de la masa fermentada. Esta operación se hace normalmente en dos etapas.

En la primera destilación que contiene etanol al 50 - 60% y otros productos, mientras que los residuos están compuestos por una disolución de proteínas, azúcares y vitaminas, que pueden utilizarse en la elaboración de suplementos vitamínicos para animales.

El efluente intermedio contiene una disolución de etanol anhidro al 98%, pureza imposible de superar por destilación ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este etanol es el que se encuentra comercializado en la actualidad.

Si el objetivo de la planta es obtener etanol anhidro o absoluto, es preciso romper el azeótropo agua-etanol, lo que generalmente se consigue procediendo a una nueva destilación utilizando un tercer componente (benceno, éter, hexano, etc.), que forme a su vez un azeótropo con el agua y libere al etanol seco. La pureza normal del etanol obtenido por este procedimiento es ligeramente mayor al que se consigue por destilación simple. Obsérvese que, cualquiera que sea el agente empleado para formar este nuevo azeótropo, ha de reciclarse posteriormente por razones económicas.

2.2. PRODUCCIÓN DE ALCOHOL A PARTIR DE LA CAÑA DE AZUCAR

El proceso productivo se inicia en el área de campo con la preparación de los terrenos, trazado y construcción de vías de riego, drenaje y elaboración de surcos, labores previas a la siembra de la caña. Una vez concluida esta etapa, continúa la selección de la semilla y se procede a la siembra y riego de germinación, actividades que se complementan con la aplicación de abonos, control de plagas y de malezas.

Una vez que tiene lugar la maduración de la caña entre los 12 y 14 meses, se procede a su cosecha, involucrando la labor agrícola del corte manual de la caña (Fig. 2.2.), se alza mecánicamente y se conduce a la fábrica por medio de modernos y eficientes equipos de transporte, para dar comienzo al proceso de elaboración de alcohol.



Figura 2.2. Caña de azúcar cosechada lista para ser molida

En la fábrica, tiene lugar como fase inicial, el muestreo, pesaje y lavado de la caña. De ahí, el material pasa a las picadoras y los molinos. El bagazo resultante en la molienda se emplea en las calderas para la producción del vapor utilizado en el proceso y la generación eléctrica para atender las necesidades de la planta, generándose excedentes para su consumo en la región. Para el desarrollo de la ingeniería del proceso, la planta de producción de etanol se divide básicamente en tres secciones:

- ✓ Sección de molienda
- ✓ Sección de fermentación
- ✓ Sección de destilación del alcohol

2.2.1. Sección de Molienda

La caña preparada llega a los molinos (Fig. 2.3.) que generalmente están impulsados por un motor a Diesel y mediante presión se extrae el jugo que se recolecta en tanques.



Figura 2.3. Trapiche para la extracción del jugo de caña

En el recorrido de la caña (Fig. 2.4.) por el molino, se le agrega agua para insaturar los jugos y maximizar la extracción de la sacarosa que contiene el material fibroso que pasa a través de todas las unidades que componen dicho molino.



Figura 2.4. Recorrido de la caña por el trapiche

El bagazo que sale de la última unidad de molienda (Fig. 2.5.) se conduce a las calderas como combustible. El bagazo puede tener otros usos en fábricas de papel o producción de tableros aglomerados.



Figura 2.5. Bagazo resultante de la molienda

2.2.2. Sección de fermentación

En esta unidad se efectúa, por acción biológica, la transformación de los azúcares fermentables contenidos en el jugo (Fig. 2.6.), en alcohol etílico y gas carbónico.



Figura 2.6. Jugo de Caña almacenado para su fermentación

El proceso fermentativo ocurre entre 5 a 7 días dependiendo del grado de madurez de la caña de azúcar, las condiciones de operación normal se fijan para producir alcohol etílico.

Los tanques que se emplean para el reposo del jugo de caña generalmente son de madera (Fig. 2.7.) recubiertos externamente con cemento, esto se hace con el fin de evitar que la acidez del jugo de caña fermentado destruya el concreto, y para acelerar el proceso de fermentación.



Figura 2.7. Tanques de fermentación del jugo de caña

2.2.3. Sección de destilación del alcohol

El vino obtenido con 8% de etanol en peso es bombeado hacia las destiladoras a través de una serie de intercambiadores de calor (Fig. 2.8.) lo cual cumplen con el objetivo de precalentar el jugo fermentado (vino), hasta llevarlo hasta 93°C.



Figura 2.8. Precalentamiento del jugo fermentado

Luego pasa a la caldera (Fig. 2.9.) en donde el etanol es removido de las sustancias que no fermentaron y del agua mediante la ebullición del vino



Figura 2.9. Caldera de ebullición

Este vapor es conducido por medio de tuberías que pasan por un serpentín (condensador) que está dentro de un tanque con agua, el que tiene la finalidad de refrigerar el vapor (Fig. 2.10.) para que de esta manera se condense y caiga en forma líquida a los recipientes de almacenaje.



Figura 2.10. Tanque con agua donde se coloca el serpentín y recipiente de recolección del etanol

En la siguiente fotografía (Fig. 2.11.) mostramos los componentes en conjunto de la parte de precalentamiento, ebullición del jugo de caña, la condensación y recolección del alcohol etílico.



Figura 2.11. Conjunto de elementos para la obtención del etanol

2.3. OBTENCION DEL ALCOHOL ANHIDRO EN EL LABORATORIO

El proceso de destilación que se utilizó en esta investigación, para obtener una deshidratación del alcohol proveniente de la planta de campo, es la destilación simple, la cual se realizó en los laboratorios del Colegio “Hermano Miguel” en la ciudad de Latacunga.

Este proceso fue utilizado debido a la facilidad del procedimiento y a los bajos costos de instrumentaria. El equipo consta de las siguientes partes:

- ✓ Mechero
- ✓ Balón de destilación
- ✓ Condensador
- ✓ Vaso de Precipitación
- ✓ Tuberías de goma
- ✓ Soportes universales
- ✓ Tapones

Se instala el equipo como se indica en la fotografía (Fig. 2.12.) colocando el etanol que se va a destilar en el balón, el cuál se sellará con un termómetro insertado en el tapón para controlar la temperatura de ebullición del alcohol.

Por medio de tuberías se conecta el condensador a una toma permanente de agua para enfriar el vapor y convertirlo en líquido que luego será recolectado en el vaso de precipitación.



Figura 2.12. Armado del equipo de destilación simple en el laboratorio

Una vez completo el armado se verifica la correcta instalación de los componentes y el caudal correcto de agua que atraviesa el condensador quedando de la manera que se indica en la figura 2.13.



Figura 2.13. Equipo listo para su utilización

Se inicia el proceso mediante el encendido del mechero (Fig. 2.14.) para de esta manera lograr que el alcohol empiece a hervir.



Figura 2.14. Encendido del mechero

Una vez que ha comenzado el momento de ebullición se presta atención a la temperatura del alcohol con el termómetro (Fig. 2.15.) para de esta manera controlar el apagado de la llama a una temperatura determinada de acuerdo al número de destilación que se realice.



Figura 2.15. Control de la temperatura

Luego de que la temperatura llega a su temperatura de control, se desecha el residuo, y lo que se obtuvo en el vaso de precipitación será almacenado en recipientes para realizar las pruebas correspondientes en el motor de combustión interna.

CAPÍTULO III

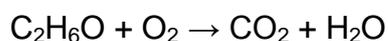
INFLUENCIA DEL USO DEL ALCOHOL EN LOS SISTEMAS DEL MCI

3.1. PRINCIPIOS DE COMBUSTION

El término combustión comúnmente se refiere a una reacción química en la que interviene un combustible y oxígeno o aire; generalmente va acompañada de una llama o chispa. Los procesos de combustión tienen gran aplicación en motores de combustión interna, plantas generadoras de vapor, hornos y celdas de combustible, entre otros.

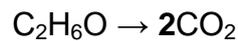
3.1.1. ECUACIONES DE COMBUSTIÓN

Una reacción química se basa en el principio de conservación de la materia, en términos de la conservación de átomos. Para ilustrar este punto vamos a considerar la combustión del etanol (C_2H_6O) con el oxígeno (O_2). La combustión completa implica que el carbono se convierte totalmente en dióxido de carbono (CO_2), el hidrógeno se transforma en vapor de agua (H_2O) y el azufre, si existiera, se convierte el dióxido de azufre (S_2O). Así, la combustión del etanol con oxígeno, si se consideran solo los compuestos que intervienen, puede analizarse como sigue:

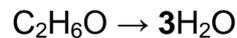


Para determinar el número de moles en cada componente de un modo que satisfaga los requisitos impuestos por la conservación de la materia, es necesario realizar balances de carbono, hidrógeno y oxígeno. Esto es:

Balance de Carbono ($C_{\text{reactivos}} = C_{\text{productos}}$):



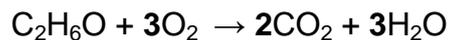
Balance de Hidrógeno ($H_{\text{reactivos}} = H_{\text{productos}}$):



Balance de Oxígeno ($O_{\text{reactivos}} = O_{\text{productos}}$):



En consecuencia, la ecuación de combustión completa del etanol con el oxígeno queda de la siguiente manera:

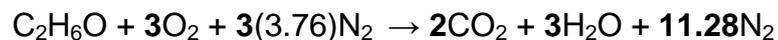


Es decir, un mol de etanol reacciona con tres moles de oxígeno para formar dos moles de dióxido de carbono y tres moles de agua. Por otra parte la misma ecuación establece que 46kg de etanol reaccionan con 48kg de oxígeno para formar 56kg de dióxido de carbono y 54kg de agua. Esta última puede encontrarse como vapor, como líquido o como sólido según las condiciones de presión y temperatura de los productos de combustión.

La misma ecuación establece también que un volumen de etanol reacciona con un volumen de oxígeno para formar un volumen

de dióxido de carbono y un volumen de vapor de agua. Cabe destacar que el número de moles o volúmenes tanto de reactivos y de productos no son necesariamente iguales en magnitud. Sin embargo la masa de los reactivos debe ser siempre igual a la de los productos.

En la mayor parte de los procesos de combustión el oxígeno se suministra a través del aire del ambiente. El aire seco se constituye básicamente por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen. Es decir, por cada mol de oxígeno hay 79/21, esto hace que exista 3.76 moles de nitrógeno presentes (valores previamente analizados por investigaciones anteriores en laboratorios especializados). Aún cuando el contenido de humedad en el aire ambiente es variable, su presencia solamente implica una cantidad adicional de materia esencialmente inerte. En consecuencia, la ecuación de combustión del etanol queda expresada de la siguiente manera:

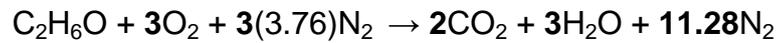


La ecuación anterior no garantiza por supuesto que la reacción se lleve a cabo o no. La posibilidad o imposibilidad de que la reacción suceda es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica.

Por el momento, se supondrá que este tipo de reacciones ocurre de forma espontánea al suministrar al combustible la cantidad apropiada de aire. La cantidad mínima de este último, requerida para oxidar por completo todos los elementos combustibles, se conoce como *cantidad de aire teórico, cantidad químicamente correcta de aire o cantidad estequiométrica de aire*.

La relación aire/combustible se define como el cociente de la masa de aire a la masa de combustible. Para la combustión del etanol con la cantidad teórica del aire, la relación aire/combustible, teniendo

en cuenta que el peso molecular del aire es aproximadamente 29 g/mol, se puede determinar de la siguiente forma:



$$2\text{C} = 24$$

$$6\text{H} = 6$$

$$\text{O} = 16$$

$$\text{C}_2\text{H}_6\text{O} = 46 \text{ g/mol}$$

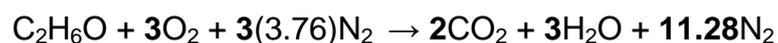
Entonces:

$$A/C = \frac{m_a}{m_c}$$

$$A/C = \frac{(3 + 11.28) \times 29}{46}$$

$$A/C = 9.00 \frac{\text{g}_{\text{aire}}}{\text{g}_{\text{etanol}}}$$

Dado que a bajas temperaturas el agua en los productos de combustión, están por lo general en estado líquido, el *análisis volumétrico* en base seca implica que el agua en los productos se encuentra condensada. En estas circunstancias, el líquido ocupa un volumen insignificante. El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión del etanol con la cantidad teórica del aire es el siguiente:



$$\text{CO}_2 = \frac{2}{13.28} \times 100$$

$$\text{CO}_2 = 15.06\%$$

$$N_2 = \frac{11.28}{13.28} \times 100$$

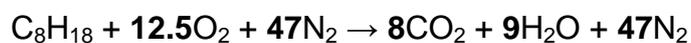
$$N_2 = 84.94\%$$

Cuando el aire no alcanza a tener la cantidad químicamente correcta, parte del carbono se une con el oxígeno para formar monóxido de carbono (CO). Por otra parte, al suministrar un exceso de aire con respecto a la cantidad químicamente correcta, aparece oxígeno (O₂) en los productos de combustión.

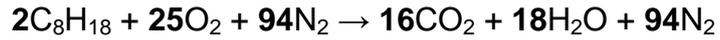
El exceso de aire únicamente disminuye la temperatura de los productos de combustión y, por tanto, la transferencia de calor. Así, cabe mencionar que las turbinas de gas operan con un gran exceso de aire para disminuir la temperatura en los álabes de la turbina.

El exceso o deficiencia de aire puede detectarse a través de un análisis de los productos de combustión.

El mismo análisis químico de la combustión del etanol se aplicará ahora mediante la aplicación del octano de la gasolina (C₈H₁₈), con la cantidad químicamente correcta de aire, ecuación de combustión que ya balanceada nos queda de la siguiente manera:



En la práctica real no se puede balancear la ecuación con medias moléculas de ninguna sustancia. Si se toma estos valores sirven únicamente como base para el cumplimiento de la ley de Lavoisier; entonces se hace indispensable duplicar todos los valores moléculas obteniendo moléculas completas de la siguiente manera:



$$16\text{C} = 192$$

$$36\text{H} = 36$$

$$\text{C}_8\text{H}_{18} = 228 \text{ g/mol}$$

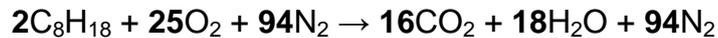
La relación aire/combustible es:

$$A/C = \frac{m_a}{m_c}$$

$$A/C = \frac{(25 + 94) \times 29}{228}$$

$$A/C = 15.14 \frac{\text{g}_{\text{aire}}}{\text{g}_{\text{etanol}}}$$

El análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión es el siguiente:



$$\text{CO}_2 = \frac{16}{110} \times 100$$

$$\text{CO}_2 = 14.55\%$$

$$\text{N}_2 = \frac{94}{110} \times 100$$

$$\text{N}_2 = 85.45\%$$

Como puede observarse en la figura 3.1, el porcentaje de CO_2 en los productos de combustión es máximo cuando la relación

aire/combustible es químicamente correcta. Este porcentaje disminuye al haber exceso o deficiencia de aire. Por otra parte, el CO aparece en mezclas ricas (mezclas con exceso de combustible o deficiencia de aire). De manera similar, el O₂ aparece con mezclas pobres (mezclas con deficiencia de combustible o exceso de aire).

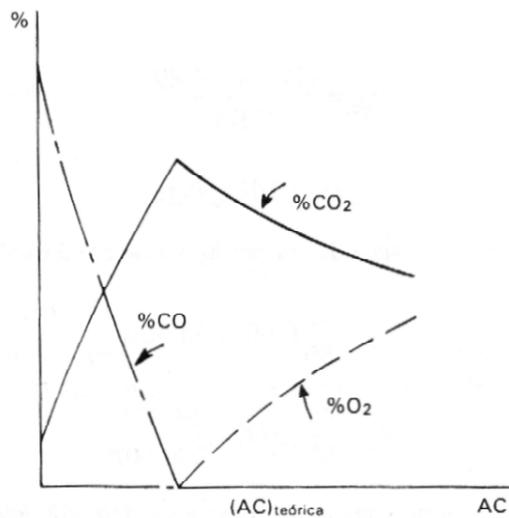


Figura 3.1. Variación esquemática de CO₂, CO y O₂ en los productos de combustión

3.2. PROCESO DE COMBUSTIÓN Y TERMODESPRENDIMIENTO

La combustión es un proceso físico – químico complejo.

Sin embargo, sobre la mayor parte de los índices del motor no influyen las particularidades físico – químicas del proceso de combustión, sino las leyes del termodespndimiento y las variaciones de presión que estas provocan en el cilindro. Por ellas se determinan: los índices energéticos y económicos del ciclo, las cargas estáticas y dinámicas sobre las piezas las cuales se evalúan por la presión máxima del ciclo y la velocidad del aumento de la presión durante la combustión, su intensidad térmica, que se evalúa según la distribución de las temperaturas y los flujos

térmicos, intensidad de los ruidos y en grado determinado las pérdidas mecánicas en el motor y la toxicidad de los gases de escape.

Los índices favorables del trabajo del motor se aseguran durante el termodesprendimiento que comienza $5 - 15^\circ$ antes del PMS y provoca la elevación uniforme de la presión en el intervalo de los ángulos de rotación del cigüeñal $15 - 30^\circ$ y en lo fundamental termina a $45 - 50^\circ$. La utilización del calor en el ciclo real con tal tipo de carácter del termodesprendimiento difiere poco del que tiene lugar en el ciclo con suministro de calor a volumen constante, puesto que el pistón se mueve cerca del PMS a velocidades pequeñas y por eso durante el tiempo del desprendimiento el recorrido es corto. Si el termodesprendimiento termina a 35° después del PMS, entonces el grado de la expansión posterior de los gases difiere de la relación de compresión solamente en $11 - 12^\circ$. En realidad, el termodesprendimiento paulatino es más ventajoso que el instantáneo debido a la disminución de las pérdidas de calor al medio refrigerante y las pérdidas mecánicas.

Las particularidades físico – químicas del proceso de combustión influyen esencialmente en la irradiación de la llama, en la deposición de carbonilla sobre las piezas y en la toxicidad de los gases de escape.

3.3. SISTEMA DE ENCENDIDO

Los sistemas de encendido tienen como objetivo generar un arco eléctrico entre los electrodos de una bujía. Este arco es el encargado de iniciar la combustión de una mezcla aspirada por los pistones dentro de los cilindros del motor y comprimida dentro de una cámara de volumen reducido llamada cámara de combustión.

El encendido es la fase que da inicio al fenómeno de la combustión siendo muy importante el instante en que se establece la chispa (Fig. 3.2.) detonante en la bujía.



Figura 3.2. Explosión en un cilindro con chispa

En los motores con gasolina, la mezcla se inflama por capas concéntricas, la combustión no es inmediata, siendo necesario prever un cierto avance de encendido que tiene en cuenta la duración de la combustión.

Provocando el encendido antes de que el pistón alcance el punto muerto superior (PMS), la fuerza que la expansión de los gases ejercen sobre el pistón es máxima cuando este último ya ha pasado el PMS, consiguiendo así que el instante de máxima energía coincida con una posición de biela y codo de cigüeñal (90°) que permita sacar el máximo rendimiento mecánico de la combustión.

El intervalo en grados que existe entre el inicio de la combustión y el PMS se llama avance al encendido.

3.3.1. INFLAMACIÓN POR LA DESCARGA DE CHISPA CON PROPAGACIÓN POSTERIOR A LA LLAMA

El proceso de inflamación de la mezcla homogénea se realiza con la ayuda de la descarga de una chispa. Esta descarga debe poseer una potencia determinada, es decir, comunicar a la mezcla en la zona de inflamación la energía suficiente para la continuación posterior del proceso de combustión en todo el volumen de la cámara.

En el espacio en el que se produce la chispa aparecen temperaturas muy altas, a consecuencia de la disociación térmica y la ionización en el espacio en el que se produce la chispa, la mezcla reacciona a gran velocidad, sin retraso de la inflamación. Aquí naturalmente, no tiene lugar la autoaceleración de la reacción química. Al contrario, la velocidad de las reacciones químicas con el transcurso del tiempo se reduce hasta valores que corresponden a la temperatura de la llama, para una composición dada de la mezcla.

Sobre las condiciones de inflamación además de la potencia y la naturaleza de la chispa influyen en la naturaleza y composición de la mezcla, las condiciones del desalojo del calor de la zona de inflamación, que dependen en particular de la construcción de la bujía de encendido, su colocación, el carácter y la intensidad del movimiento de la carga y otros. El aumento de la potencia de la descarga de la chispa asegura la posibilidad de inflamar mezclas más pobres.

En condiciones favorables, las reacciones del foco de inflamación se propagan por todo el volumen mediante el calentamiento sucesivo y el traslado de las partículas activas, sucede la propagación de la llama que puede observarse por el movimiento del frente de llama. En dependencia de las condiciones del movimiento de la mezcla, se distinguen dos velocidades de la llama: normal y turbulento. La velocidad normal (V_n) se determina por los fenómenos moleculares del traslado de calor y de partículas activas, es decir que depende de características tales como coeficientes de termodifusividad (a) y de difusión así como también de la velocidad de las reacciones químicas (W_z) encontramos que:

$$V_n \approx \sqrt{a \times W_z}$$

Donde:

a = Coeficiente de Termodifusividad.

W_z = Velocidad de las reacciones químicas.

V_n = Velocidad normal

Para el proceso estudiado en cada momento hay dos zonas: la mezcla fresca y los productos de la combustión, divididas por el frente de llama en el cual sucede la reacción. La anchura del frente laminar δ_ℓ habitualmente no es grande (0.1– 1 mm). Ella depende de los mismos factores que la velocidad normal V_n , pero en este caso, el aumento de la velocidad de las reacciones químicas conduce a la reducción de la anchura del frente laminar de la llama $\delta_\ell \approx \sqrt{a/W_z}$. La velocidad de las reacciones químicas es mayor en las mezclas enriquecidas y por eso V_n llega al máximo cuando $\alpha = 0.85 - 0.9$ (α = coeficiente de exceso de aire). Para un empobrecimiento o enriquecimiento de la mezcla a partir de este valor V_n disminuye.

Existe un determinado límite crítico de reducción de V_n por debajo del cual la llama no se propaga; ella se apaga puesto que crece demasiado la anchura de la zona de combustión y como consecuencia, las pérdidas relativas de calor de esta zona. La mezcla suficientemente rica en la cual es posible aún la propagación de la llama laminar y, consecuentemente, la inflamación de la mezcla, se denomina *límite superior de concentración* o *límite superior de inflamabilidad*. Análogamente, el límite de la mezcla empobrecida en la cual es posible la propagación del frente de llama se denomina *límite inferior de concentración* o *límite inferior de inflamabilidad*. Para los motores a gasolina los límites de inflamabilidad no salen del intervalo $0.6 < \alpha < 1.4$.

La velocidad normal de la llama disminuye con el aumento de la presión en la mezcla y aumenta al crecer la temperatura. Estas dependencias provienen del análisis de la influencia de los parámetros de estado sobre el valor de los coeficientes de la termodifusividad y la difusión. En particular, la disminución de la velocidad normal de la llama al aumentar la presión está provocada por la reducción de la velocidad de difusión de las partículas.

En la mezcla turbulenta, la velocidad de propagación de la llama es mayor en decenas de veces de que la velocidad normal de la llama. El frente de llama turbulento es muy curvado y para alta turbulencia, se fracciona en una mayor cantidad de focos. El traslado de las partículas térmica y químicamente activas se realiza mediante la difusión turbulenta, es decir, el traslado de unos volúmenes completos de la mezcla. El coeficiente de combustión turbulenta supera en 100 veces el coeficiente de difusión molecular.

Con esto se explica la intensificación del proceso de propagación de la llama en la mezcla turbulenta. La anchura de la zona de la combustión turbulenta δ_t también es sensiblemente mayor que la laminar δ_ℓ . Para las condiciones de los motores de pistón δ_t alcanza varios centímetros.

La velocidad turbulenta de la llama, a diferencia de la normal, crece no solamente con el aumento de la temperatura, sino también con el aumento de la presión.

La estimulación de la propagación de la llama en la carga turbulenta está condicionada en gran medida por los fenómenos del traslado molecular. La intensidad del movimiento de la carga turbulenta en algunos casos puede influir negativamente en los

procesos de inflamación, favoreciendo el sobreenfriamiento del volumen en el cual tuvo lugar la descarga de la chispa.

Por período de formación del foco de inflamación (frente de llama) se entiende el tiempo de aumento de las dimensiones del volumen en que sucede la reacción hasta el valor en el cual se hace notable el termodesprendimiento y el aumento de la presión. El volumen se reduce si crece la turbulencia de la carga a consecuencia de la intensificación del traslado turbulento de calor y de las partículas químicamente activas y también a causa de la reducción del espesor de la capa límite de la carga en el cual habitualmente se encuentra el espacio en el que se produce la chispa y donde el proceso se determina por fenómenos moleculares, la velocidad de los cuales no es grande.

3.3.2. COMBUSTIÓN EN EL MOTOR DE CICLO OTTO

Analizando el proceso de combustión (Fig. 3.3.) según el diagrama indicado del motor de ciclo Otto, se distinguen tres fases.

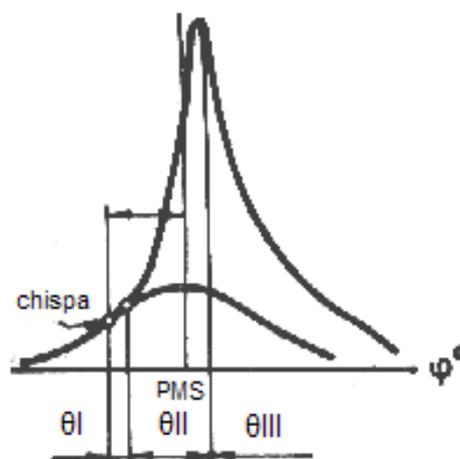


Figura 3.3. Determinación de las fases del proceso de combustión

Primera fase: θ_i que comienza en el momento de aparición de la chispa eléctrica y termina cuando la presión en el cilindro, como resultado del termodesprendimiento, se hace más alta que durante la compresión de la mezcla sin combustión, se denomina *fase inicial de combustión* o *fase de la formación del frente de llama*.

El desarrollo de la combustión en el transcurso de esta fase, en general, determina las regularidades de la combustión turbulenta a pequeña escala. En la duración θ_i (en grados de giro del cigüeñal) influyen una serie de factores:

1. Composición de la mezcla. El menor valor de θ_i corresponde a la composición de la mezcla en la cual la mayor magnitud la tiene la velocidad normal de combustión ($\alpha = 0.8 - 0.9$). Para un considerable empobrecimiento de la mezcla no solo aumenta notablemente θ_i sino también se empeora bruscamente la estabilidad de la inflamación hasta que se observa que no existe inflamación en algunos ciclos.
2. Relación de Compresión. Con el crecimiento de ε (relación de compresión) aumenta la temperatura y la presión de la mezcla lo que posibilita el aumento de la velocidad normal de la combustión y la reducción correspondiente de la duración de la fase θ_i . Por las mismas causas, la reducción del avance al encendido conduce a una cierta reducción de θ_i .
3. Número de revoluciones (n). La experiencia demuestra que $\theta_i \approx n^m$ en el cual el valor $m = 0.5 - 1.0$. Mientras más fuertemente crezcan las pulsaciones de pequeña escala durante el crecimiento de las revoluciones, mayores serán las magnitudes del índice m .

4. Carga del motor. A medida que se cierra la mariposa crece la cantidad relativa de los gases residuales y se reduce la presión de la mezcla. Todo esto conduce el aumento de θ_I y también al empeoramiento de la estabilidad de inflamación.
5. Características de la descarga de la chispa. Mientras más alta es la tensión, duración y estabilidad de la descarga, menor será θ_I y por eso los sistemas electrónicos (transistorizados, efecto Hall, entre otros) de inflamación mejoran en comparación con los sistemas clásicos de baterías, la inflamación y la combustión, sobre todo en el arranque.

Segunda fase: θ_{II} Se denomina a la *fase principal de la combustión*, su duración se calcula desde el final de la primera fase hasta el momento de alcanzar la presión máxima en el ciclo. La duración θ_{II} se determina por las regularidades de la combustión turbulenta a gran escala. θ_{II} casi no depende de las propiedades físico – químicas de la mezcla, y solo para una estrangulación muy fuerte se observa un crecimiento de θ_{II} . La intensidad de la turbulencia en la carga en el cilindro es proporcional al número de revoluciones, por ello con el crecimiento de n (número de revoluciones) la duración de la segunda fase con el tiempo se reduce en correspondiente con la duración de todo el ciclo, es decir, que la fase θ_{II} en grados de giro del cigüeñal prácticamente no varía. La ubicación de la bujía más cercana al centro de la cámara de combustión posibilita la reducción de la duración de la fase θ_{II} y también el aumento de la turbulencia de la carga.

Tercera fase: θ_{III} o *fase de postcombustión*, empieza en el momento de alcanzarse la presión máxima en el ciclo.

En esta fase, la mezcla se quema en las capas cercanas a las paredes donde las escalas de las pulsaciones turbulentas son

notablemente menores que en el volumen principal de la cámara de combustión. Volúmenes independientes elementales de la mezcla postcombustionan fuera del frente de llama, sobre todo cuando en la zona de combustión turbulenta tiene gran profundidad. Sobre la duración de la fase θ_{III} influyen los mismos valores que influyen sobre θ_I , es decir, de los cuales depende la velocidad de combustión turbulenta a pequeña escala.

Con el aumento de la relación de compresión crece la fracción de la mezcla que postcombustiona en las capas cercanas a la pared y en el espacio entre la culata y el fondo del pistón, lo cual influye considerablemente en la duración de la θ_{III} . Sin cálculos especiales y la elaboración del diagrama indicado no se puede determinar el momento final de esta fase que se caracteriza por el final del termodesprendimiento.

En las condiciones de explotación habitualmente se cambian, tanto los regímenes de velocidad como los de carga del motor. Al disminuir la carga y aumentar las revoluciones, la duración de la primera y tercera fase crece, si la magnitud de la segunda fase cambia poco es necesario el aumento del ángulo de avance al encendido θ_e para compensar la duración creciente de θ_I y θ_{III} .

Por eso los sistemas de encendido de los motores de carburación tienen generalmente, reguladores de vacío y centrífugos de avance del encendido. El primero aumenta θ_e a medida que disminuye la carga y el segundo, con el aumento de las revoluciones.

3.3.3. COMBUSTIÓN DETONANTE

Una parte de la mezcla hasta la cual el frente de llama llega en el último momento se calienta como resultado de la compresión hasta la temperatura que supera la temperatura de autoinflamación.

En otras palabras, Detonación es cuando, durante la combustión, el aire y combustible que aún están en la cámara explotan sin necesidad de que llegue el frente de llama.

En el transcurso normal de la combustión no sucede la autoinflamación de las últimas porciones de la mezcla, puesto que para su combustión no alcanza el tiempo. Si esa porción de aire y combustible (mezcla residual no combustionada) se ponen a mucha presión, acaban inflamándose por sí solos (como en un Diesel).

Hay que tener muy en cuenta que la detonación no quiere decir que la mezcla explote antes de que salte la chispa (aunque se podría dar en algún caso extremo) sino que se produce después del salto de chispa, durante la combustión.

El trabajo del motor con una detonación fuerte está relacionado con grandes cargas térmicas y mecánicas en toda una serie de piezas, como resultado de lo cual pueden quemarse los bordes de los pistones, la junta de la culata y también los electrodos de las bujías.

Puesto que cuando existe detonación existe un constante golpeteo del pistón contra el cilindro la película de aceite se ve destruida por estas ondas de choque, provocando el desgaste intenso de las paredes del cilindro.

Para eliminar la detonación existen cinco factores que aumentan el retraso a la autoinflamación de las mezclas residuales, las cuales son:

1. La utilización de combustibles con un número de octano suficientemente alto. En el proceso de producción del combustible (gasolina) el número de octano puede elevarse mediante la adición de pequeñas cantidades de aditivos

antidetonantes, por ejemplo Tetraetilo de Plomo $[Pb(C_2H_5)_4]$. Pero al agregar este elemento estamos perjudicando en un gran nivel a la contaminación ambiental y lo que es peor estamos tentando contra la salud del ser humano.

Este problema es solucionado con la utilización de combustibles alternativos como el etanol el cual tiene dentro de su composición físico - química un alto índice de octano muy superior al de la gasolina sintética.

En la combustión al utilizar el etanol como combustible alternativo, los valores de temperatura de combustión y temperatura de escape son bajas, por lo que el calentamiento de la superficie del electrodo central de la bujía y de las cabezas de las válvulas de escape también caen a valores bajos y esto hace que se evite la formación de partículas incandescentes de la carbonilla, no permitiendo con esto que se inflamen los productos residuales de la mezcla con alcohol.

A diferencia de la gasolina el etanol posee únicamente dos moléculas de carbono dentro de su composición molecular, por lo que la formación de carbonilla dentro del motor es baja, pero la desventaja de utilizar este combustible es que la energía que se produce dentro del cilindro en el momento de la combustión es tres veces menor que la energía producida por la gasolina, y también por que el poder calorífico del etanol es menor.

Esta diferencia de energías entre los dos combustibles estudiados, hacen que, con el uso del etanol la potencia del motor de combustión interna sea menor en comparación con la potencia que genera un motor funcionando con gasolina como combustible.

La pérdida de potencia del motor a etanol se la puede compensar mediante el aumento de la relación de compresión por medio de cualquier método ya conocido para conseguir este fin. Para aumentar esta relación de compresión se debe tomar en cuenta las características iniciales de cada parte del motor con la que este fue fabricado, puesto que al momento de aumentar la compresión aumenta también su potencia y su torque, con el peligro de dañar las piezas móviles en la parte interna del motor.

2. Reducción del ángulo de adelanto del encendido. En este caso disminuye la presión máxima y la velocidad de aumento de la presión del ciclo, lo que posibilita una menor compresión de la mezcla ante el frente de llama.
3. Aumento de las revoluciones. En este caso aumenta la velocidad de propagación del frente principal de llama y correspondientemente se hace menor el tiempo de desarrollo de los procesos de prellama en las últimas partes de la carga y, por otro lado, la intensidad de estos procesos disminuye por la gran concentración de gases de escape por la mezcla y por la menor velocidad del crecimiento de la presión. Por estas causas, con el crecimiento de las revoluciones la posibilidad del surgimiento de la detonación disminuye.
4. Carga del motor. El estrangulamiento está vinculado con la reducción de la presión y la temperatura de la carga; como resultado de esto al disminuir la carga se reduce la tendencia del motor a la detonación.
5. Medidas constructivas. Para disminuir la probabilidad de la aparición de la detonación se favorece la disminución de la

relación de compresión, la disminución del diámetro del cilindro, aumento de la turbulencia de la carga, el mejoramiento del enfriamiento de los cilindros y la disminución del recorrido del frente de llama desde la bujía hasta las partes más alejadas de la cámara de combustión.

3.4. AJUSTES Y CALIBRACIONES.

En las pruebas de campo que se realizaron en el motor suzuki de 993cc, se trató de experimentar con varios ángulos tanto de avance como retraso al encendido, dando como resultado que el ángulo de encendido para trabajar con el motor, cambia de acuerdo a la altura del lugar donde se trabaja, tal como se procede con gasolina.

El Laboratorio de Motores donde se realizaron las pruebas experimentales está ubicado en la ciudad de Quito, que está a una altura de 2818 metros sobre el nivel del mar, entonces nuestro ángulo de avance al encendido es de 12°.

Este ángulo únicamente se lo puede comprobar o medir en los motores que constan con distribuidor, por este motivo nuestro afán ha sido el utilizar este motor para poder variar de una manera práctica el encendido; ya que en los motores modernos el encendido se lo realiza por medio de un módulo de encendido que es controlado por una computadora, la cual calibrará el encendido por la señal que envíen los sensores existentes en el sistema.

La medición del ángulo efectivo para trabajar con etanol se lo realizó con la utilización de la lámpara estroboscópica y la escala graduada que está ubicada en la polea del cigüeñal en la mayoría de los casos o en el volante de inercia en otros vehículos.

Este ángulo se fue regulando de forma que no afecte la potencia significativamente y que exista una estabilidad óptima tanto en altas como en bajas revoluciones, pero para poder regular este ángulo es necesario primero modificar el sistema de alimentación.

3.5. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación tiene por misión almacenar la gasolina y transferirla a los cilindros del motor en los tiempos de admisión, en forma de vapor mezclado con el aire. El sistema de alimentación debe ser apto para alterar las proporciones de aire y de gasolina con el fin de cumplir con los requisitos que exigen las diferentes condiciones de funcionamiento del vehículo. Durante el arranque inicial, con motor frío, el sistema de alimentación debe suministrar una mezcla rica (en gasolina o en nuestro caso será el etanol). Más adelante cuando el motor ya se ha calentado, la mezcla debe empobrecerse. En la aceleración o marcha a gran velocidad, debe enriquecerse nuevamente.

Ahora describiremos en breves rasgos el trabajo que realiza el sistema de alimentación (en carburación y luego con inyección) con la utilización de alcohol anhidro como combustible, ya que varía en cierta parte con respecto a la utilización de las gasolinas; cuando el pistón comienza su descenso, se produce una absorción de aire que llega a los cilindros y que, a su vez, arrastra el combustible. Mediante un colector de admisión, se une la entrada de combustible de cada cilindro con el carburador.

En los motores gasolina la aspiración de aire se diseña para que ingrese la cantidad de aire necesaria para producir una mezcla eficiente de acuerdo a los parámetros de relación estequiométrica.

Para el uso del Etanol esta parte del sistema tuvo que ser modificada para que haya un menor ingreso de aire al sistema, ya que el etanol en su composición molecular posee moléculas de oxígeno, por tanto, esto hace

que con el oxígeno que entra del medio ambiente exista demasiada cantidad de este en el cilindro y el motor no tenga un funcionamiento correcto, por ello la necesidad de estrechar el paso de aire hacia los cilindros.

En el carburador se produce la mezcla de aire y combustible, ya que su misión es la de pulverizar el etanol de manera que pueda relacionarse debidamente con el aire y cuya relación (dosado) debe permitir variaciones que van desde 17:1 hasta 12:1 con gasolina y desde 9:1 hasta 6:1 con alcohol, según las necesidades del motor.

En las prácticas de laboratorio que se realizaron en la ESPE Matriz se tuvo que practicar ensayos con diferentes calibres de surtidores para alcanzar la relación estequiométrica adecuada para funcionar con alcohol, ya que solo se conocía en forma teórica cual era el porcentaje de mezcla.

El carburador se forma de un cilindro denominado colector, en el cual hay un estrechamiento (difusor o vénturi), bajo éste se encuentra una válvula que, cuando se encuentra de forma horizontal, estrangula el canal impidiendo el paso del aire. Si la válvula de mariposa estuviera de manera vertical, la depresión en el difusor aumentaría junto con la velocidad de giro del motor. Ésta se llama válvula de mariposa. En la zona más estrecha del difusor, podemos encontrar el surtidor, ya que es la zona donde hay una mayor depresión.

Cuando el aire pasa por el difusor se produce un aumento de velocidad, por lo que el combustible del surtidor es aspirado, cuya cantidad varía con la cantidad de aire que pasa. Estos dos elementos determinarán la riqueza de la mezcla.

Por otra parte, la bomba de alimentación se encarga del envío del combustible hasta un depósito más pequeño en el carburador llamado cuba, en cuyo interior flota una boya con una aguja en su parte superior que permite o impide el paso de combustible según convenga. Así se consigue

mantener un nivel que impide desbordamientos en el surtidor principal, puesto que el nivel del líquido queda unos milímetros por debajo del agujero de salida.

Además, en el carburador se incorpora una válvula unida al acelerador que es encargada de regular la cantidad de mezcla que pasa al motor, siendo que cuando este pedal se presiona, deja paso libre y provoca un buen llenado del cilindro. Esta válvula se va cerrando a medida que se suelta el acelerador.

Inyección en motores

En la actualidad los sistemas de inyección han desplazado a los carburadores debido a que cumplen mejor con su cometido (Fig. 3.4.), que es proporcionar la cantidad justa de combustible en cada momento, por ello reducen el consumo, aunque cuando se utiliza el etanol tiene un aumento con respecto a la gasolina, por lo que la mezcla es mucho más rica pero en cambio con el uso de etanol en el sistema de alimentación en los motores a inyección, se ajusta perfectamente a las normativas vigentes de emisión de gases de escape.

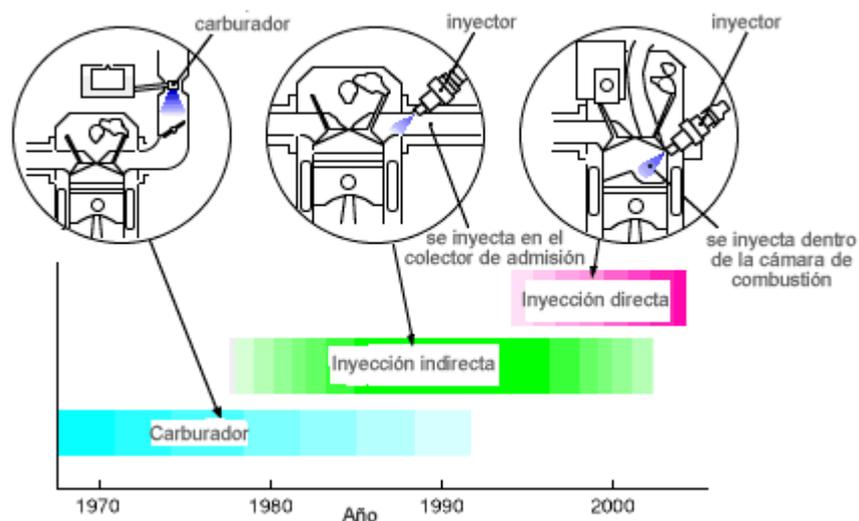


Figura 3.4. Avance de la inyección del combustible con el paso del tiempo

La misión de la inyección de combustible es hacer a cada cilindro el combustible adecuado en cada momento acorde con las necesidades del motor. Las exigencias del motor varían muy rápidamente, con lo cual necesitamos un sistema muy eficaz y que controle los datos necesarios para la correcta administración de combustible. De ahí que los sistemas electrónicos de inyección sean los más adecuados. Éstos pueden controlar una enorme cantidad de datos de servicio para transformarlos en señales eléctricas mediante captadores. Estas señales se hacen llegar a la unidad de control de la instalación que las procesa y calcula inmediatamente los caudales necesarios.

Sistemas de control de llenado de aire en los cilindros

En los motores de inyección, la masa de aire aportada es decisiva para conseguir un buen par motor y una buena potencia. En el caso con etanol, la masa de aire es superior, comparando con la gasolina, pero por tener número de calorías o energía muy reducido en el momento de la combustión, existe un decremento de potencia como hablamos anteriormente. El par motor entregado es proporcional a la masa de aire aportada.

En los sistemas convencionales, la mariposa es accionada mecánicamente por una varilla o cable, unida al pedal del acelerador. La posición de la mariposa afecta a la apertura del conjunto de admisión y controla el paso del aire aspirado por el motor. Esta información se transmite mediante conexiones eléctricas a la unidad de control, la cual recibe así información acerca de la cantidad de aire y la temperatura del mismo.

La influencia del etanol como carburante en el sistema de alimentación da lugar a que la preparación y suministro de mezcla inflamable a los cilindros del motor (ya sea a carburación o a inyección) y la regulación

de su cantidad y composición sea realizado por este sistema, cuyo trabajo ejerce gran influencia sobre todo en los índices fundamentales del motor (potencia, consumo y toxicidad de los gases de escape).

Estos parámetros con el uso de etanol se ven modificados con lo que respecta el uso de la gasolina, algunos de estos se modifican para mal, mientras que en cambio otras le dan un mejor desarrollo del motor y al medio ambiente.

Cuando hablamos de consumo, el etanol dentro del sistema de alimentación es mayor, debido a que entra más combustible ya que para la combustión se necesita una mezcla más rica, es por eso que en la actualidad el uso de este carburante sería muy costoso, y por otra, este tipo de carburante no está todavía explotado en nuestro país, ni existen fábricas que produzcan este tipo de combustible (alcohol anhidro) en grandes cantidades apto para su utilización en vehículos.

El aumento del consumo del combustible, haciendo una comparación respectiva con la gasolina, según las pruebas realizadas en el laboratorio es de un 20% mayor.

En la parte que más influye el etanol como combustible es en la reducción de los gases tóxicos que emanan los motores de combustión interna al medio ambiente, como podemos observar más adelante en el capítulo 5.

3.6. AJUSTES Y CALIBRACIONES.

Debido a que el alcohol para su combustión necesita de una relación ideal estequiométrica menor (9:1) al de la gasolina, se realizó el estrechamiento de los conductos de aire y el aumento de los surtidores del carburador con el fin de alcanzar una mezcla de combustible adecuada para el funcionamiento del motor tanto a altas como a bajas revoluciones y se

fueron haciendo test en el banco de pruebas con cada modificación que se realizaba, con el fin de tener un acercamiento lógico a lo que la relación estequiométrica ideal se refiere y poder así comenzar con las pruebas de rendimiento las cuales se tratarán específicamente en el próximo capítulo.

Ya que no hubo el apoyo ni la predisposición debida por parte del encargado del laboratorio de motores de la ESPE matriz para las pruebas de todos los parámetros que se querían encontrar utilizando un motor a inyección, las pruebas que se realizaron fueron en un motor a carburador, por esta razón nos limitamos a decir que no hay modificaciones del sistema de alimentación cuando utilizamos un motor a inyección electrónica, y los otros parámetros se regularían con la señal que la computadora envíe a los actuadores.

3.7. SISTEMA DE LUBRICACIÓN.

El sistema de lubricación cumple las siguientes funciones dentro de los MCI como se puede observar en la figura 3.5, y estas son:

1. Reduce la fricción entre las piezas en movimiento.
2. Absorbe y disipa el calor.
3. Refrigerar las partes del motor que no pueden ceder su calor directamente al líquido refrigerante o al aire de refrigeración.
4. Hace hermético el cierre de los segmentos contra las paredes del cilindro.
5. Limpia las piezas y arrastra la suciedad.
6. Contribuye a amortiguar los ruidos del motor.

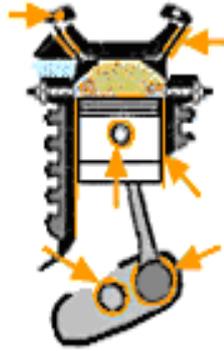


Figura 3.5. Principales partes lubricadas del motor

3.8. CONSIDERACIONES.

Al momento de utilizar el alcohol como combustible en vez de la gasolina no se realizó ninguna modificación a este sistema por las características físicas aparentes (color, viscosidad, volumen) que el aceite presentó al momento de finalizar las pruebas con alcohol (aproximadamente 8 horas de funcionamiento permanente), estas características a simple vista no tuvieron ningún cambio, pero en todo caso creemos conveniente se debería realizar un estudio a fondo de este tema para poder observar cuales son los puntos que se deben tomar en cuenta al momento de cambiar de combustible y ver si afecta de manera positiva o negativa en el rendimiento del sistema de lubricación y su mantenimiento, y cuales serían las consecuencias para el aceite y/o sus aditivos.

3.9. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

La refrigeración tiene la misión de ceder a un medio refrigerante el calor que, debido al proceso de combustión se ha transmitido a partes del motor y al aceite del mismo, dada la limitada resistencia al calor de los materiales y del aceite lubricante. Aproximadamente un 25% a 30% de la energía suministrada por el combustible se pierde con este calor.

3.10. CONSIDERACIONES.

Según el tiempo que se tuvo el motor en funcionamiento con etanol, el sistema de refrigeración no tuvo ninguna alteración. Salvo que por tener el etanol un poder calorífico menor, la temperatura de funcionamiento se prolonga y por ende el termostato se abre a intervalos de tiempo más largos.

Entonces, con lo que respecta a la utilización del alcohol como combustible, este sistema tiene la función de refrigerar el motor y mantener la temperatura normal de funcionamiento del mismo, y como la refrigeración se la hace de forma externa (camisas, conductos, etc.) no tiene relevancia en este estudio, caso contrario al sistema de lubricación en el cual si se ve inmerso el alcohol ya que ocurren mezclas dentro del cilindro.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

4.1. RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA TEÓRICA ADECUADA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR CON ALCOHOL

Esta relación se distingue entre la entre la mezcla teórica y la mezcla práctica.

La relación teórica de la mezcla según se comprobó en el capítulo 3 es de 1:9, es decir, que para la combustión total de 1 Kg de alcohol son necesarios unos 9 kg de aire.

La relación de la mezcla práctica que tiene que hacer el carburador, difiere de la teórica, según la temperatura, número de revoluciones y carga del motor. El alcohol, se gasifica mal cuando el motor está frío.

Con bajo número de revoluciones el combustible se pulveriza mal, por esta razón el carburador deberá dar una mezcla tanto más rica cuanto más frío está el motor y más bajo sea el número de revoluciones.

En el caso de contar con un motor a inyección electrónica, estos parámetros son similares con la diferencia que la computadora es la encargada de modificar estos, según los requerimientos del motor y según los datos enviados por los sensores que el sistema posee.

En el arranque se exige una mezcla mucho más rica porque parte del combustible se condensa en el tubo de aspiración que está frío y lo mismo en las paredes del cilindro.

4.2. PRUEBAS A DIFERENTES VELOCIDADES DEL MOTOR CON ALCOHOL

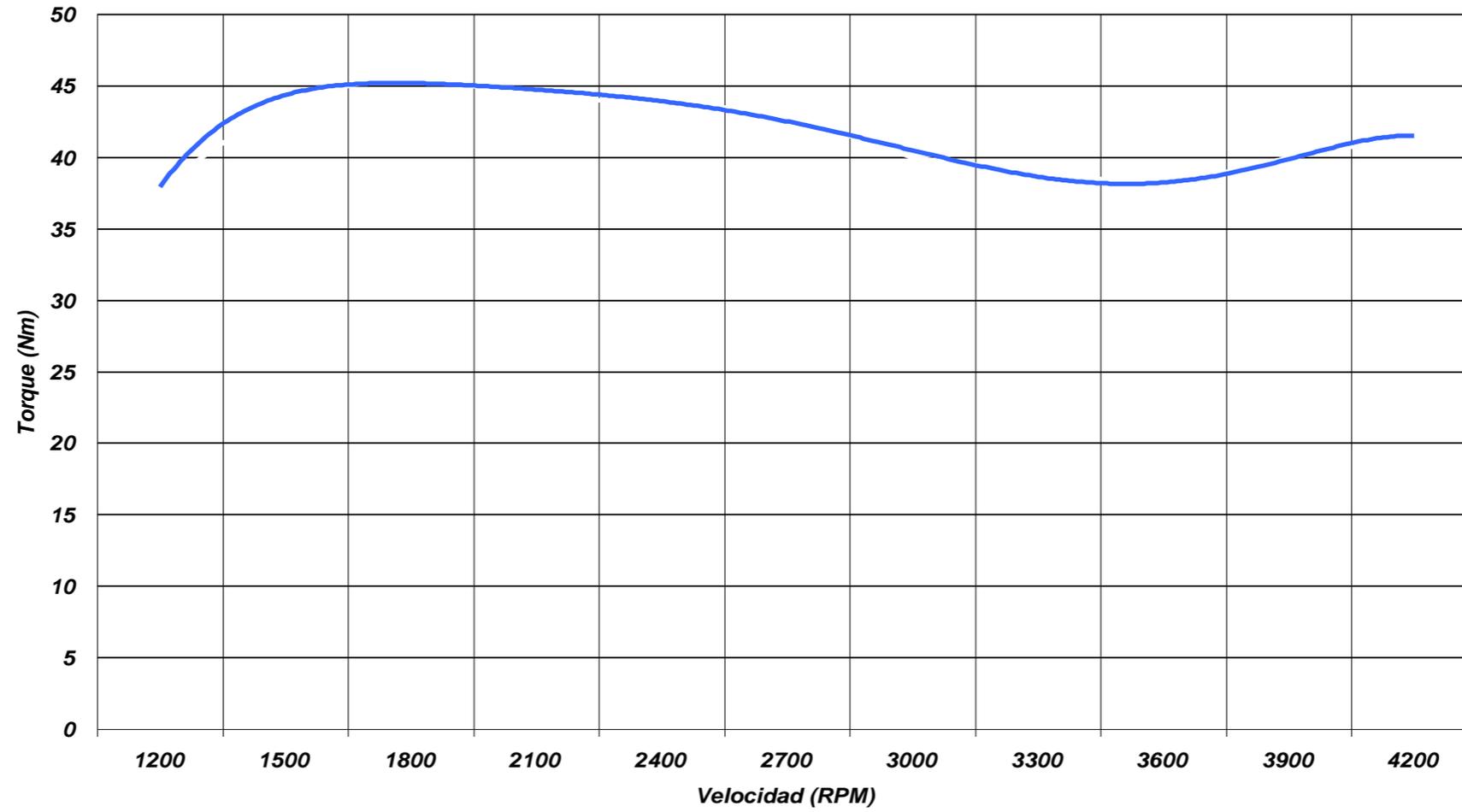
Antes de realizar las pruebas correspondientes con etanol se hizo una limpieza del sistema de alimentación, un lavado del tanque y conductos de combustible, con el fin de eliminar por completo cualquier residuo de gasolina que pudo haber existido, y de esta manera poder obtener datos que sean lo más reales posibles en el uso de etanol como combustible.

Para la ejecución de esta práctica se ha tomado en cuenta algunos parámetros, los cuales nos ayudaran en el desarrollo del mismo, estos están detallados en la siguiente tabla y de acuerdo a los siguientes datos:

- Velocidad variable
- Aceleración al 100%
- Temperatura ambiente de 21 °C
- Combustible: Alcohol Etílico deshidratado
- Poder calorífico del combustible 26700 KJ/Kg
- Índice de octano: 100
- Presión barométrica de 74.5 Kpa
- Densidad especifica de 0,79 g/cc
- Volumen de prueba 50 cc

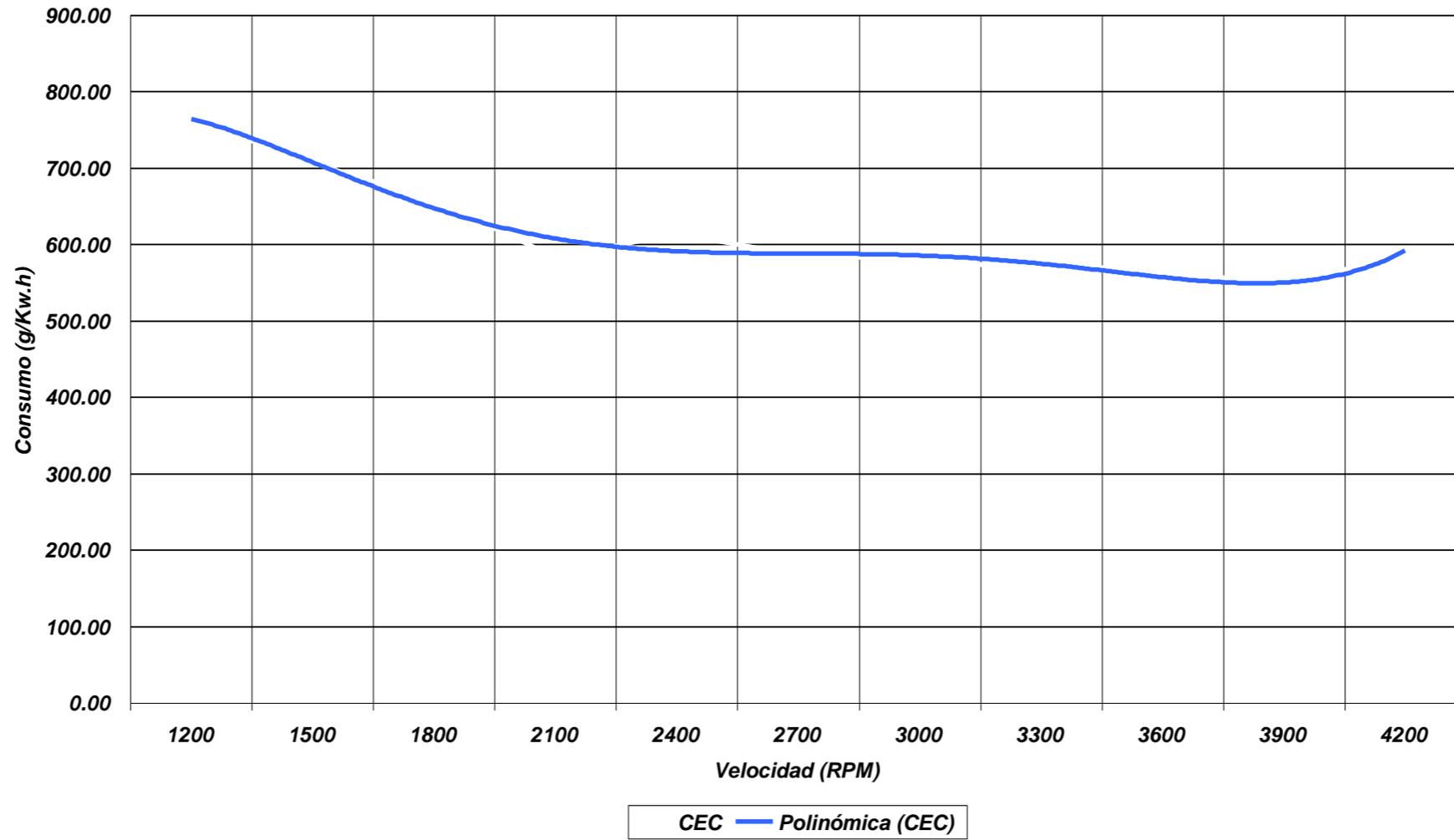
TEST	VELOC	TORQUE	C.ESPEC	POT FRENO
	N	Tq	CEC	Pf
	RPM	N.m	g/Kw-h	W
1	1200	38	764.92	4775.22
2	1500	44	706.53	6911.50
3	1800	46	658.62	8670.80
4	2100	44	583.63	9676.11
5	2400	44	613.79	11058.41
6	2700	43	586.26	12157.96
7	3000	40	580.30	12566.37
8	3300	39	567.86	13477.43
9	3600	38	572.44	14325.66
10	3900	40	542.00	16336.28
11	4200	41.5	593.79	18252.65

TORQUE vs RPM

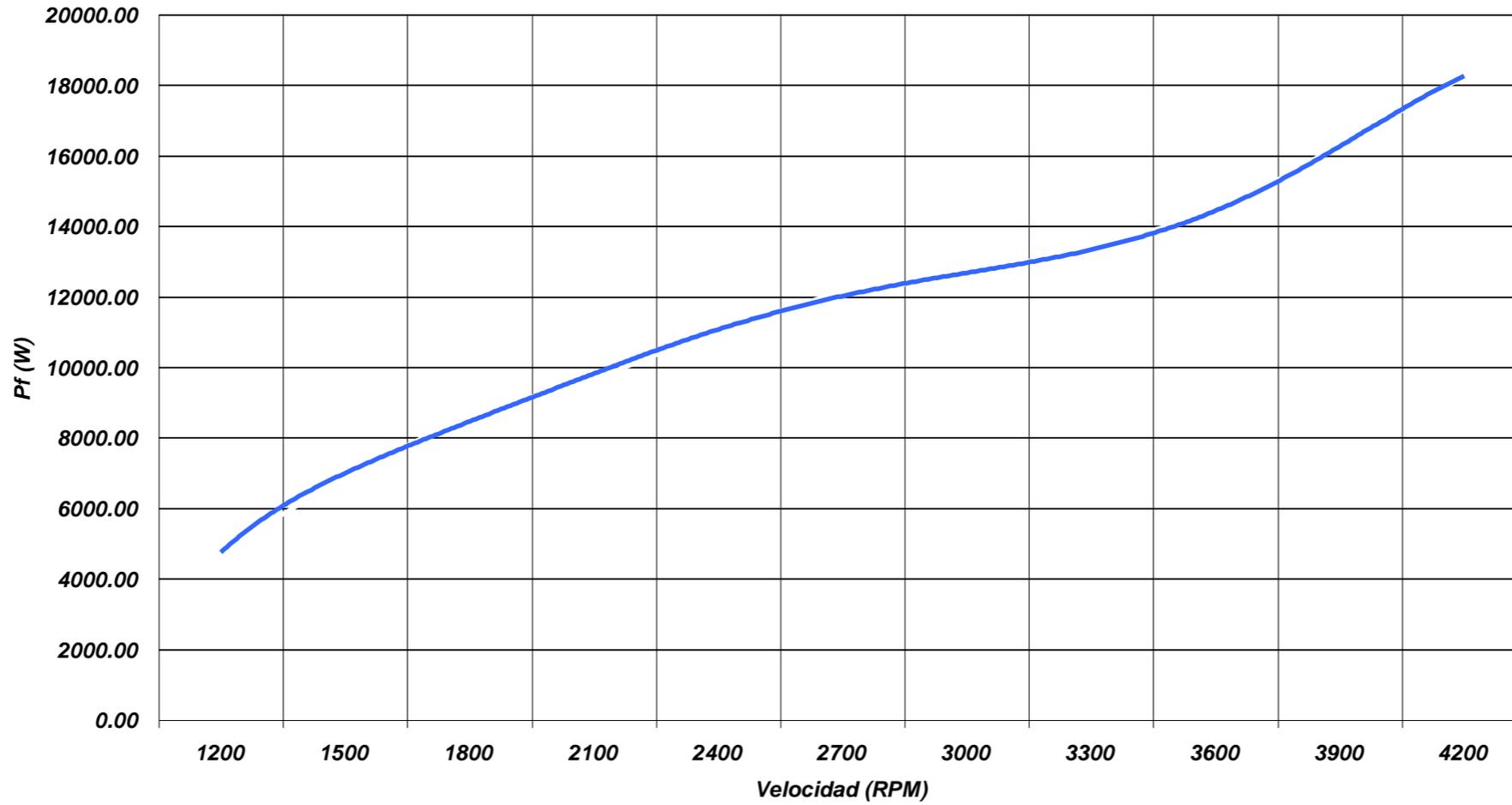


TORQUE — Polinómica (TORQUE)

CEC vs RPM



POTENCIA AL FRENO vs RPM



P_f — Polinómica (P_f)

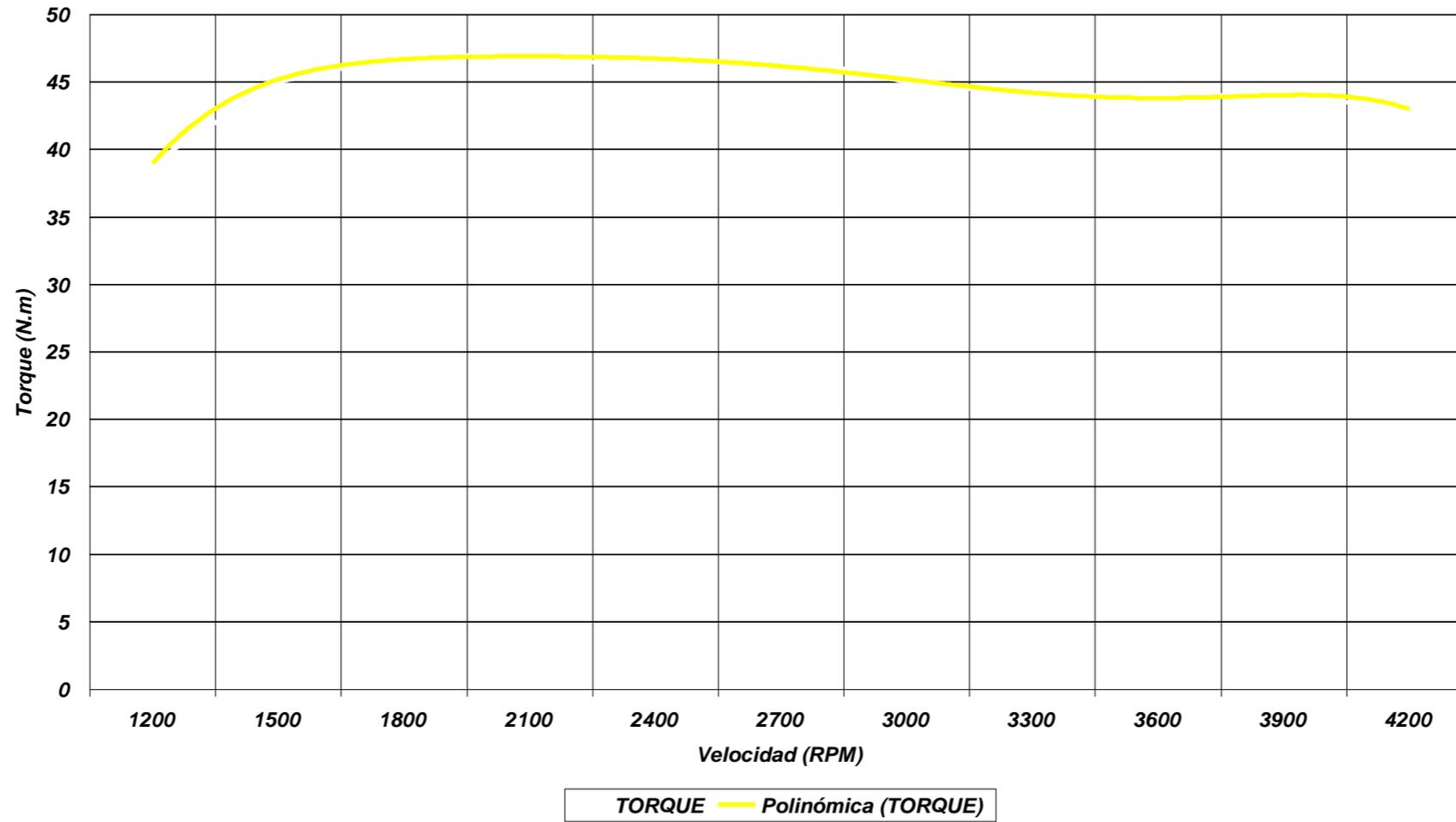
4.3. PRUEBAS CON GASOLINA

Para la ejecución de esta práctica se ha tomado en cuenta algunos parámetros, los cuales nos ayudaran en el desarrollo del mismo, estos están detallados en la siguiente tabla y según los siguientes datos:

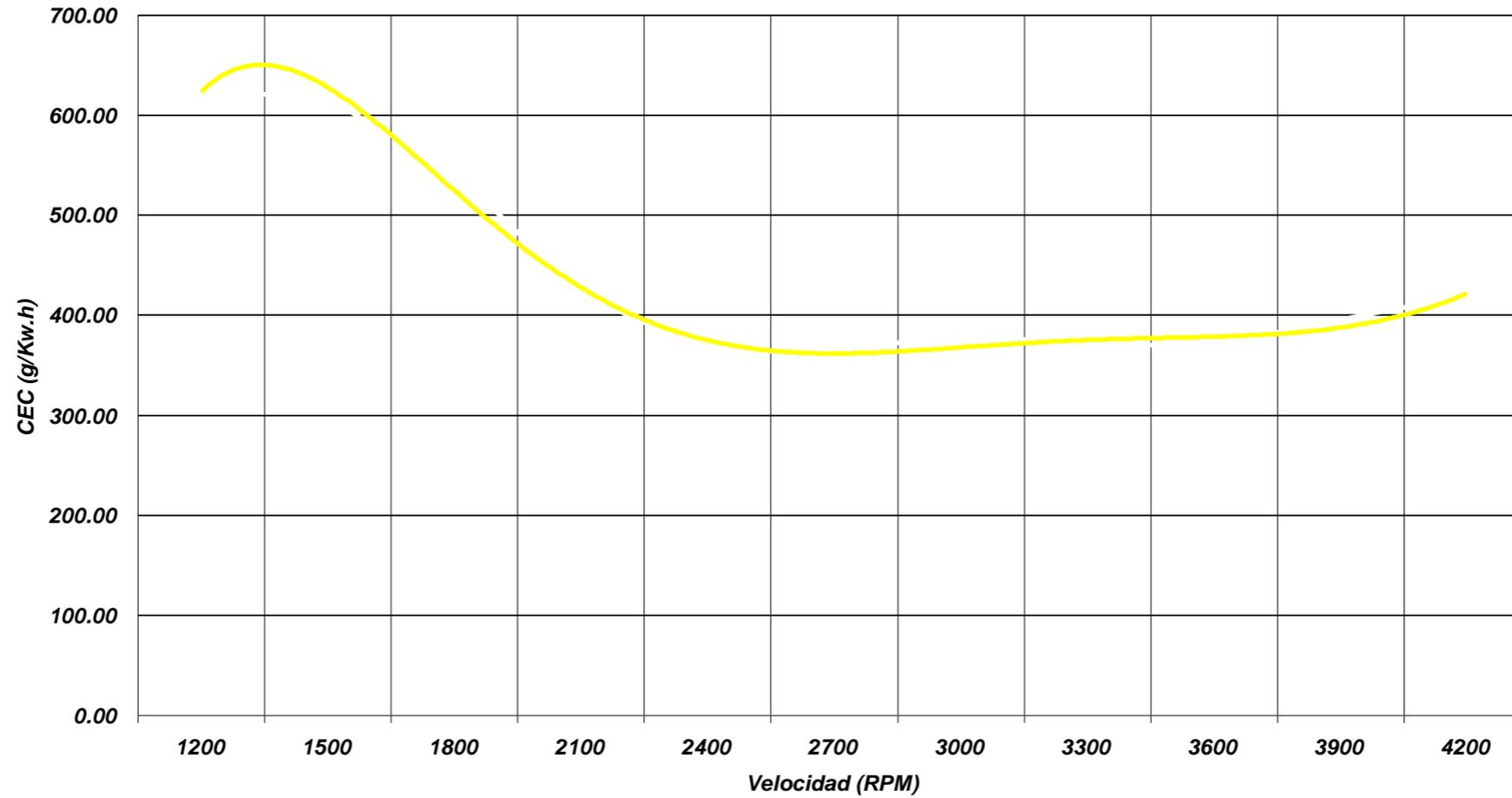
- Velocidad variable
- Aceleración al 100%
- Temperatura ambiente de 21 °C
- Combustible: Gasolina Súper
- Poder calorífico del combustible 43500 KJ/Kg
- Índice de octano: 95
- Presión barométrica de 74.5 Kpa
- Densidad especifica de 0,75 g/cc
- Volumen de prueba 50 cc

TEST	VELOC	TORQUE	C.ESPEC	POT FRENO
	N	Tq	CEC	Pf
	RPM	N.m	g/Kw-h	W
1	1200	39	626.04	4900.88
2	1500	45	616.08	7068.58
3	1800	47	544.22	8859.29
4	2100	47	421.33	10335.84
5	2400	46	364.91	11561.06
6	2700	47	362.81	13288.94
7	3000	45	381.97	14137.17
8	3300	44	369.93	15205.31
9	3600	44	369.93	16587.61
10	3900	44	395.39	17969.91
11	4200	43	419.89	18912.39

TORQUE vs RPM

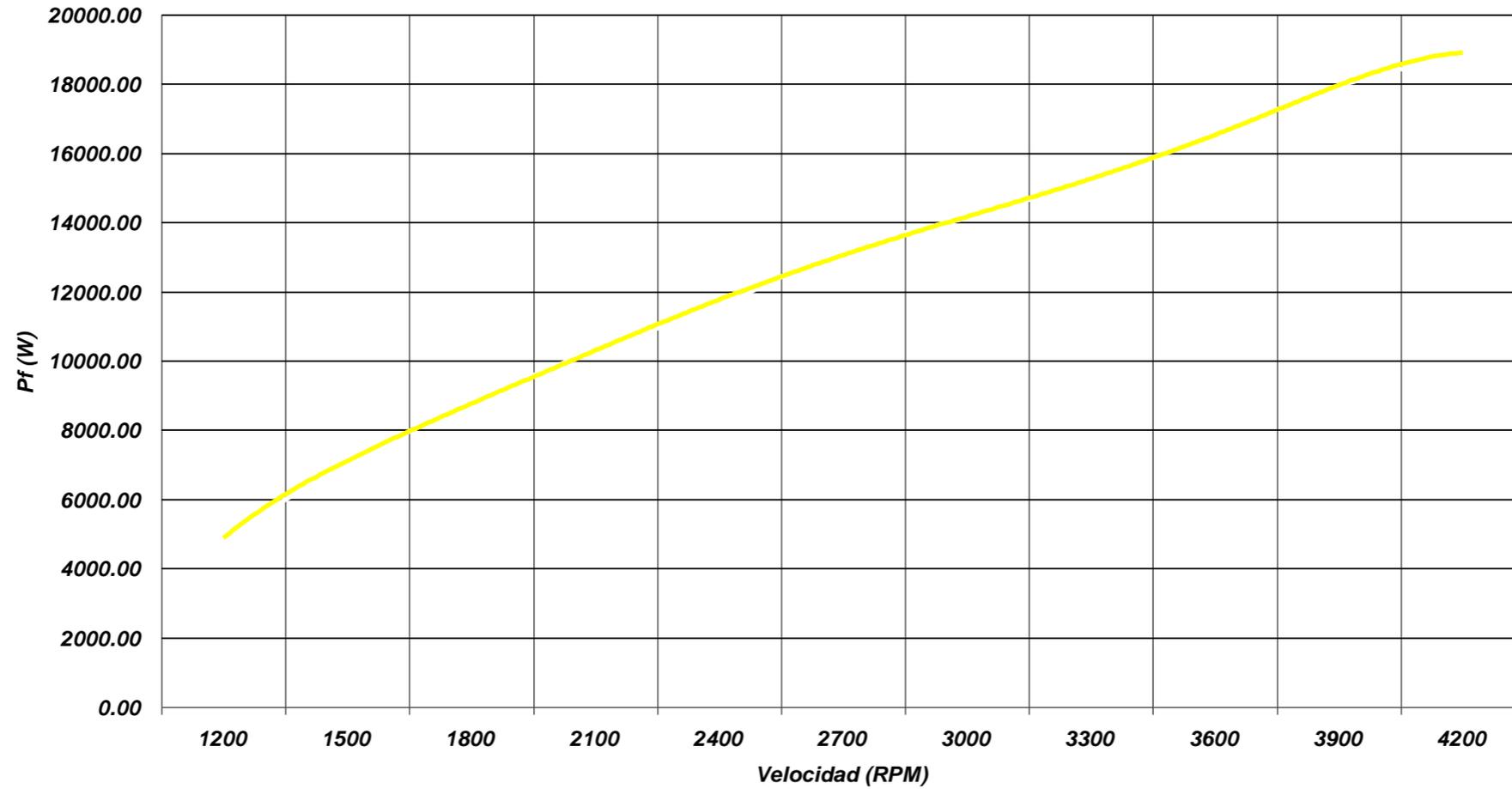


CEC vs RPM



CEC — Polinómica (CEC)

POTENCIA AL FRENO vs RPM



P_f — Polinómica (P_f)

4.4. CÁLCULO DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE OPERACIÓN Y COMPARACIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA GASOLINA Y CON ALCOHOL.

4.4.1. Definición de parámetros a calcularse

Torque: Indica la fuerza torsional que es capaz de proporcionar un motor desde su eje principal, hasta el diferencial del vehículo. El torque es igual a la fuerza multiplicada por el brazo de palanca.

$$Tq = F \times l$$

Donde:

Tq = Torque (N.m)

F = Fuerza (N)

l = Brazo de palanca (m)

El cálculo del Torque no se realiza en este estudio, ya que este dato fue arrojado directamente por el banco de pruebas en cada una de las velocidades.

Potencia al Freno: Es la potencia que se obtiene en el eje del motor, también es denominada potencia en la flecha. Es el trabajo desarrollado por la fuerza durante el número de revoluciones del motor en un tiempo dado.

$$P_f = \frac{Tq \times 2\pi N}{60}$$

Donde:

P_f = Potencia al freno (W)

Tq = Torque (N.m)

N = velocidad de rotación (rpm)

Flujo Másico de Combustible: Este parámetro nos indica la cantidad de masa de combustible de un motor por unidad de tiempo.

$$m_c = \frac{V_p}{t} \times \delta_{comb.} \times 3600$$

Donde:

m_c = Flujo másico de combustible (g/h)

V_p = Volumen de prueba (cm³)

$\delta_{comb.}$ = Densidad específica del combustible (g/cm³)

Consumo Específico de Combustible: Es la masa de combustible necesaria para generar una unidad de energía por unidad de tiempo:

$$C.E.C = \frac{m_c}{P_f}$$

Donde:

$C.E.C.$ = Consumo específico de combustible (g/Kw-h)

m_c = Flujo másico de combustible (g/h)

P_f = Potencia al freno (W)

Relación Aire – Combustible: Es la relación entre consumo de aire y el consumo de combustible en términos de volumen o masa.

$$A / C = \frac{m_a}{m_c}$$

Donde:

A / C = Relación aire – combustible

m_a = Flujo másico de aire (g/h)

m_c = Flujo másico de combustible (g/h)

Eficiencia térmica: Se define el rendimiento térmico para un ciclo, con objeto de mostrar el rendimiento de conversión de calor en trabajo.

$$\eta_t = \frac{P_f}{m_c \times Q_{neto}} \times 3600$$

Donde:

η_t = Eficiencia térmica

Q_{neto} = Poder calorífico del combustible (KJ/Kg)

4.4.2. Cálculo de parámetros con alcohol en todas las velocidades de prueba

Potencia al freno

N = 1200 rpm

$$P_f = Tq \times \frac{2\pi N}{60}$$

$$P_f = 38N.m \times \frac{2\pi(1200rpm)}{60}$$

$$P_f = 4775.22W$$

N = 1500 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(1500rpm)}{60}$$

$$P_f = 6911.50W$$

N = 1800 rpm

$$P_f = 46N.m \times \frac{2\pi(1800rpm)}{60}$$

$$P_f = 8670.80W$$

N = 2100 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(2100rpm)}{60}$$

$$P_f = 9676.11W$$

N = 2400 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(2400rpm)}{60}$$

$$P_f = 11058.41W$$

N = 2700 rpm

$$P_f = 43N.m \times \frac{2\pi(2700rpm)}{60}$$

$$P_f = 12157.96W$$

N = 3000 rpm

$$P_f = 40N.m \times \frac{2\pi(3000rpm)}{60}$$

$$P_f = 12566.37W$$

N = 3300 rpm

$$P_f = 39N.m \times \frac{2\pi(3300rpm)}{60}$$

$$P_f = 13477.43W$$

N = 3600 rpm

$$P_f = 38N.m \times \frac{2\pi(3600rpm)}{60}$$

$$P_f = 14325.66W$$

N = 3900 rpm

$$P_f = 40N.m \times \frac{2\pi(3900rpm)}{60}$$

$$P_f = 16336.28W$$

N = 4200 rpm

$$P_f = 41.5N.m \times \frac{2\pi(4200rpm)}{60}$$

$$P_f = 18252.65W$$

Flujo másico de combustible

Para 1200 rpm

$$m_c = \frac{V_p}{t} \times \delta_{alch}$$

$$m_c = \frac{50cm^3}{38.93sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 3652.71g / h$$

Para 1500 rpm

$$m_c = \frac{50cm^3}{29.12sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 4883.24g / h$$

Para 1800 rpm

$$m_c = \frac{50cm^3}{24.90sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 5710.84g / h$$

Para 2100 rpm

$$m_c = \frac{50cm^3}{25.18sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 5647.34g / h$$

Para 2400 rpm

$$m_c = \frac{50cm^3}{20.95sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 6787.59g / h$$

Para 2700 rpm

$$m_c = \frac{50cm^3}{19.95sg} \times 0.79 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 7127.82g / h$$

Para 3000 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{19.50\text{sg}} \times 0.79 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 7292.31\text{g} / \text{h}$$

Para 3300 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{18.58\text{sg}} \times 0.79 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 7653.39\text{g} / \text{h}$$

Para 3600 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{17.34\text{sg}} \times 0.79 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 8200.69\text{g} / \text{h}$$

Para 3900 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{16.06\text{sg}} \times 0.79 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 8854.30\text{g} / \text{h}$$

Para 4200 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{13.12\text{sg}} \times 0.79 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 10838.41\text{g} / \text{h}$$

Consumo específico de combustible

Para 1200 rpm

$$CEC = \frac{m_c}{P_f}$$

$$CEC = \frac{3652.71g/h}{4775.26W}$$

$$CEC = 764.92 \frac{g}{Kw.h}$$

Para 1500 rpm

$$CEC = \frac{4883.24g/h}{6911.56W}$$

$$CEC = 706.53 \frac{g}{Kw.h}$$

Para 1800 rpm

$$CEC = \frac{5710.84g/h}{8670.86W}$$

$$CEC = 658.62 \frac{g}{Kw.h}$$

Para 2100 rpm

$$CEC = \frac{5647.34g/h}{9676.18W}$$

$$CEC = 583.63 \frac{g}{Kw.h}$$

Para 2400 rpm

$$CEC = \frac{6787.59g/h}{11058.49W}$$

$$CEC = 613.79 \frac{g}{Kw.h}$$

Para 2700 rpm

$$CEC = \frac{7127.82 \text{ g / h}}{12158.06 \text{ W}}$$

$$CEC = 586.26 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3000 rpm

$$CEC = \frac{7292.31 \text{ g / h}}{12566.47 \text{ W}}$$

$$CEC = 580.30 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3300 rpm

$$CEC = \frac{7653.39 \text{ g / h}}{13477.54 \text{ W}}$$

$$CEC = 567.86 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3600 rpm

$$CEC = \frac{8200.69 \text{ g / h}}{14325.77 \text{ W}}$$

$$CEC = 572.44 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3900 rpm

$$CEC = \frac{8854.30 \text{ g / h}}{16336.41 \text{ W}}$$

$$CEC = 542.00 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 4200 rpm

$$CEC = \frac{10838.41 \text{ g / h}}{18252.79 \text{ W}}$$

$$CEC = 593.79 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Flujo másico de aire

Con 1200 rpm

$$m_a = \frac{\pi D^2}{4} \times C \times \sqrt{\frac{2C_1 h_o P_a}{R_a T_a}} \times 3600$$

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (1.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 26.56 Kg / h$$

Con 1500 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (2mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 30.67 Kg / h$$

Con 1800 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (2.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 34.29 Kg / h$$

Con 2100 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (5.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 50.86 Kg / h$$

Con 2400

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 48.50 Kg / h$$

Con 2700 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O \cdot m^2}\right) \times (5.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m \cdot s^2}\right)}{\left(287 \frac{N \cdot m}{Kg \cdot ^\circ K}\right) \times (294^\circ K)}} \times 3600$$

$$m_a = 50.86 Kg / h$$

Con 3000 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O.m^2}\right) \times (7mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m.s^2}\right)}{\left(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}\right) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 57.38 Kg / h$$

Con 3300 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O.m^2}\right) \times (8.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m.s^2}\right)}{\left(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}\right) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 63.23 Kg / h$$

Con 3600 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O.m^2}\right) \times (10.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m.s^2}\right)}{\left(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}\right) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 70.28 Kg / h$$

Con 3900 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O.m^2}\right) \times (12mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m.s^2}\right)}{\left(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}\right) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 75.13 Kg / h$$

Con 4200 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2\left(\frac{9.807N}{mmH_2O.m^2}\right) \times (12.5mmH_2O) \times \left(\frac{71976.71Kg}{m.s^2}\right)}{\left(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}\right) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 76.68 Kg / h$$

Relación estequiométrica aire/combustible real

Analizando los datos obtenidos en el banco de pruebas y según los cálculos realizados se procede a tomar un valor promedio del flujo másico de aire y el flujo másico de combustible para realizar este cálculo:

$$A/C = \frac{m_a}{m_c}$$

$$A/C = \frac{53130.90 g / h}{6968.06 g / h}$$

$$A/C = 7.6$$

Rendimiento térmico

Con 1200 rpm

$$\eta_t = \frac{P_f}{m_c \times Q_{neto}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = \frac{4775.22W}{3652.71 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 17.62\%$$

Con 1500 rpm

$$\eta_t = \frac{6911.50W}{4883.24 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 19.08\%$$

Con 1800 rpm

$$\eta_t = \frac{8670.80W}{5710.84 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 20.47\%$$

Con 2100 rpm

$$\eta_t = \frac{9676.11W}{5647.34 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 23.10\%$$

Con 2400 rpm

$$\eta_t = \frac{11058.41W}{6787.59 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 21.97\%$$

Con 2700 rpm

$$\eta_t = \frac{12157.96W}{7125.82 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 23.00\%$$

Con 3000 rpm

$$\eta_t = \frac{12566.37W}{7292.31 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 23.23\%$$

Con 3300 rpm

$$\eta_t = \frac{13477.43W}{7653.39 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 23.74\%$$

Con 3600 rpm

$$\eta_t = \frac{14325.66W}{8200.69 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 23.55\%$$

Con 3900 rpm

$$\eta_t = \frac{16336.28W}{8854.30 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 24.88\%$$

Con 4200 rpm

$$\eta_t = \frac{18252.65W}{10838.41 \frac{g}{h} \times 26700 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 22.71\%$$

4.4.3. Cálculo de parámetros con gasolina en todas las velocidades de prueba

Potencia al freno

N = 1200 rpm

$$P_f = Tq \times \frac{2\pi N}{60}$$

$$P_f = 39N.m \times \frac{2\pi(1200rpm)}{60}$$

$$P_f = 4900.88W$$

N = 1500 rpm

$$P_f = 45N.m \times \frac{2\pi(1500rpm)}{60}$$

$$P_f = 7068.58W$$

N = 1800 rpm

$$P_f = 47N.m \times \frac{2\pi(1800rpm)}{60}$$

$$P_f = 8859.29W$$

N = 2100 rpm

$$P_f = 47N.m \times \frac{2\pi(2100rpm)}{60}$$

$$P_f = 10335.84W$$

N = 2400 rpm

$$P_f = 46N.m \times \frac{2\pi(2400rpm)}{60}$$

$$P_f = 11561.06W$$

N = 2700 rpm

$$P_f = 47N.m \times \frac{2\pi(2700rpm)}{60}$$

$$P_f = 13288.94W$$

N = 3000 rpm

$$P_f = 45N.m \times \frac{2\pi(3000rpm)}{60}$$

$$P_f = 14137.17W$$

N = 3300 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(3300rpm)}{60}$$

$$P_f = 15205.31W$$

N = 3600 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(3600rpm)}{60}$$

$$P_f = 16587.61W$$

N = 3900 rpm

$$P_f = 44N.m \times \frac{2\pi(3900rpm)}{60}$$

$$P_f = 17969.91W$$

N = 4200 rpm

$$P_f = 43N.m * \frac{2\pi(4200rpm)}{60}$$

$$P_f = 18912.39W$$

Flujo másico de combustible

Para 1200 rpm

$$m_c = \frac{V_p}{t} \times \delta_{gasolina}$$

$$m_c = \frac{50cm^3}{44sg} \times 0.75 \frac{gr}{cm^3} \times \frac{3600sg}{1h}$$

$$m_c = 3068.18g / h$$

Para 1500 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{31\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 4354.84\text{g} / \text{h}$$

Para 1800 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{28\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 4821.43\text{g} / \text{h}$$

Para 2100 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{31\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 4354.84\text{g} / \text{h}$$

Para 2400 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{32\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 4218.75\text{g} / \text{h}$$

Para 2700 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{28\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 4821.43\text{g} / \text{h}$$

Para 3000 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{25\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 5400.00\text{g} / \text{h}$$

Para 3300 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{24\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 5625.00\text{g} / \text{h}$$

Para 3600 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{22\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 6136.36\text{g} / \text{h}$$

Para 3900 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{19\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 7105.26\text{g} / \text{h}$$

Para 4200 rpm

$$m_c = \frac{50\text{cm}^3}{17\text{sg}} \times 0.75 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times \frac{3600\text{sg}}{1\text{h}}$$

$$m_c = 7941.18\text{g} / \text{h}$$

Consumo específico de combustible

Para 1200 rpm

$$CEC = \frac{m_c}{P_f}$$

$$CEC = \frac{3068.18\text{g} / \text{h}}{4900.92\text{W}}$$

$$CEC = 626.04 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 1500 rpm

$$CEC = \frac{4354.84\text{g} / \text{h}}{7068.64\text{W}}$$

$$CEC = 616.08 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 1800 rpm

$$CEC = \frac{4821.43 \text{ g / h}}{8859.36 \text{ W}}$$

$$CEC = 544.22 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 2100 rpm

$$CEC = \frac{4354.84 \text{ g / h}}{10335.92 \text{ W}}$$

$$CEC = 421.33 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 2400 rpm

$$CEC = \frac{4218.75 \text{ g / h}}{11561.15 \text{ W}}$$

$$CEC = 364.91 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 2700 rpm

$$CEC = \frac{4821.43 \text{ g / h}}{13289.04 \text{ W}}$$

$$CEC = 362.81 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3000 rpm

$$CEC = \frac{5400.00 \text{ g / h}}{14137.28 \text{ W}}$$

$$CEC = 381.97 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3300 rpm

$$CEC = \frac{5625.00 \text{ g / h}}{15205.43 \text{ W}}$$

$$CEC = 369.93 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3600 rpm

$$CEC = \frac{6136.36 \text{ g/h}}{16587.74 \text{ W}}$$

$$CEC = 369.93 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 3900 rpm

$$CEC = \frac{7105.26 \text{ g/h}}{17970.05 \text{ W}}$$

$$CEC = 395.39 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Para 4200 rpm

$$CEC = \frac{7941.18 \text{ g/h}}{18912.53 \text{ W}}$$

$$CEC = 419.89 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}}$$

Flujo másico de aire

Con 1200 rpm

$$m_a = \frac{\pi D^2}{4} * C * \sqrt{\frac{2C_1 h_o P_a}{R_a T_a}} * 3600$$

$$m_a = \frac{\pi(0.055\text{m})^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{\text{N}}{\text{mmH}_2\text{O} \cdot \text{m}^2}) \times (2\text{mmH}_2\text{O}) \times (71976.71 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2})}{(287 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}) \times (294^\circ \text{K})}} \times 3600$$

$$m_a = 30.67 \text{ Kg/h}$$

Con 1500 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (2.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 34.29 Kg / h$$

Con 1800 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (3.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 40.57 Kg / h$$

Con 2100 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (6.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 55.30 Kg / h$$

Con 2400 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (5.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 50.86 Kg / h$$

Con 2700 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (6.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 55.30 Kg / h$$

Con 3000 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (7.5mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 59.40 Kg / h$$

Con 3300 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055m)^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{N}{mmH_2O.m^2}) \times (9mmH_2O) \times (71976.71 \frac{Kg}{m.s^2})}{(287 \frac{N.m}{Kg.^{\circ}K}) \times (294^{\circ}K)}} \times 3600$$

$$m_a = 65.07 \text{ Kg / h}$$

Con 3600 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055\text{m})^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{\text{N}}{\text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{m}^2}) \times (10.5\text{mmH}_2\text{O}) \times (71976.71 \frac{\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2})}{(287 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{Kg}\cdot^\circ\text{K}}) \times (294^\circ\text{K})}} \times 3600$$

$$m_a = 70.28 \text{ Kg / h}$$

Con 3900 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055\text{m})^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{\text{N}}{\text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{m}^2}) \times (13\text{mmH}_2\text{O}) \times (71976.71 \frac{\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2})}{(287 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{Kg}\cdot^\circ\text{K}}) \times (294^\circ\text{K})}} \times 3600$$

$$m_a = 78.20 \text{ Kg / h}$$

Con 4200 rpm

$$m_a = \frac{\pi(0.055\text{m})^2}{4} \times 0.62 \times \sqrt{\frac{2(9.807 \frac{\text{N}}{\text{mmH}_2\text{O}\cdot\text{m}^2}) \times (15\text{mmH}_2\text{O}) \times (71976.71 \frac{\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2})}{(287 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{Kg}\cdot^\circ\text{K}}) \times (294^\circ\text{K})}} \times 3600$$

$$m_a = 84.01 \text{ Kg / h}$$

Relación estequiométrica aire/combustible

De la misma forma que se realizó los cálculos con alcohol se procede con gasolina:

$$A/C = \frac{m_a}{m_c}$$

$$A/C = \frac{56722.72 \text{ g/h}}{5258.84 \text{ g/h}}$$

$$A/C = 10.8$$

Rendimiento térmico

Con 1200 rpm

$$\eta_t = \frac{P_f}{m_c \times Q_{neto}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = \frac{4900.88 \text{ W}}{3068.18 \frac{\text{g}}{\text{h}} \times 43500 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 13.21\%$$

Con 1500 rpm

$$\eta_t = \frac{7068.58 \text{ W}}{4354.84 \frac{\text{g}}{\text{h}} \times 43500 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 13.43\%$$

Con 1800 rpm

$$\eta_t = \frac{8859.29W}{4821.43 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 15.21\%$$

Con 2100 rpm

$$\eta_t = \frac{10335.84W}{4354.84 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 19.64\%$$

Con 2400 rpm

$$\eta_t = \frac{11561.06W}{4218.75 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 22.68\%$$

Con 2700 rpm

$$\eta_t = \frac{13288.94W}{4821.23 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 22.81\%$$

Con 3000 rpm

$$\eta_t = \frac{14137.17W}{5400.00 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 21.67\%$$

Con 3300 rpm

$$\eta_t = \frac{15205.31W}{5625.00 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 22.37\%$$

Con 3600 rpm

$$\eta_t = \frac{16587.61W}{6136.36 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 22.37\%$$

Con 3900 rpm

$$\eta_t = \frac{17969.91W}{7105.26 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

$$\eta_t = 20.93\%$$

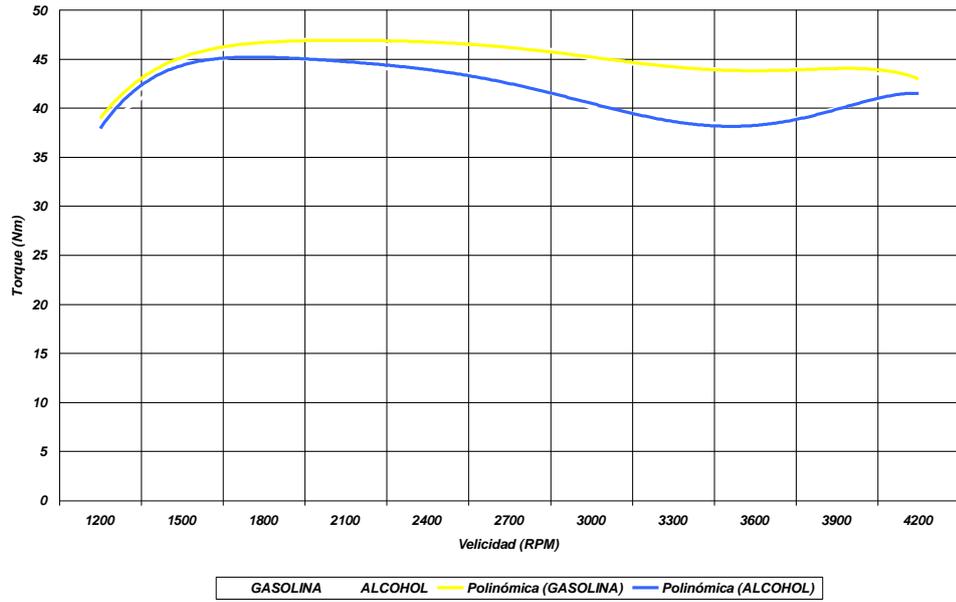
Con 4200 rpm

$$\eta_t = \frac{18912.39W}{7941.18 \frac{g}{h} \times 43500 \frac{KJ}{Kg}} \times 100 \times 3600$$

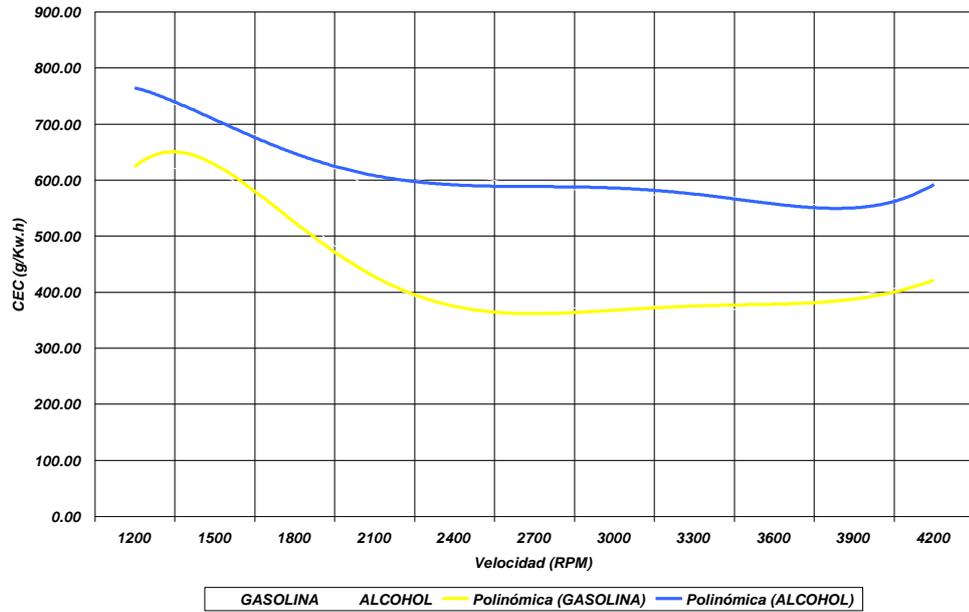
$$\eta_t = 19.71\%$$

4.5. GRAFICAS COMPARATIVAS ENTRE ALCOHOL Y GASOLINA DE LOS PARÁMETROS DE PRUEBA

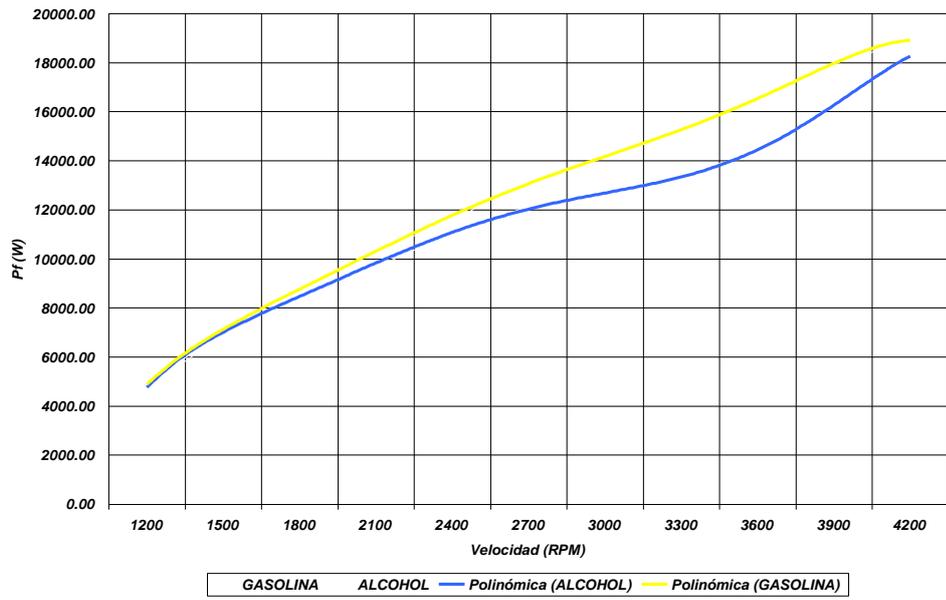
TORQUE vs RPM



CEC vs RPM



POTENCIA AL FRENO vs RPM



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE EMISIONES

5.1. CONTAMINANTES DE LA GASOLINA.

Reacciones químicas en el motor.

La combustión en un motor de ciclo OTTO procede de la reacción química del combustible (gasolina) formado por Hidrógeno y Carbono y el comburente (aire) formado en su mayor parte por oxígeno y nitrógeno.

Se introduce en los cilindro la mezcla de aire y combustible finamente pulverizado y en una proporción de 14:1 y se comprime a gran presión, en ese momento se hace saltar una chispa que eleva la temperatura y el combustible se quema en presencia del oxígeno del aire, es decir, se oxida rápidamente combinándose el carbono del combustible con el oxígeno del comburente.

La energía química del combustible se libera en forma de calor cuando se quema, transformándose en el motor en energía mecánica.

Se produce la transformación de la mezcla en vapor de agua H_2O con el oxígeno del aire y el hidrógeno del combustible; y dióxido de carbono CO_2 , por la reacción del oxígeno del aire y el carbono del combustible. El nitrógeno del aire no interviene y queda como N_2 .

La combustión en el motor de ciclo OTTO, aunque teóricamente no produciría productos nocivos, la combustión incompleta (Tabla 5.1.) que se produce en la realidad si los crea.

El resultado de la combustión es:

Nombre	Símbolo	Porcentaje
Nitrógeno	N ₂	71 %
Vapor de agua	H ₂ O	9 %
Anhídrido carbónico	CO ₂	18 %
Oxígeno y otros	O ₂	1 %
Contaminantes		1 %
Oxido de nitrógeno	Nox	0,08 %
Hydrocarburos	HC	0,05 %
Monóxido de Carbono	CO	0,85 %
Partículas sólidas		0,02 %

Tabla 5.1. Gases producto de la combustión de la gasolina

Como vemos hay un 1% de gases contaminantes pero este porcentaje es suficiente para crear trastornos en la atmósfera sobre todo de las grandes ciudades, que se suma a la contaminación de las industrias, centrales energéticas y la propia de las ciudades por las calefacciones, etc.

Se calcula que los automóviles producen una sexta parte de la contaminación por óxidos de nitrógeno.

5.2. GASES DE ESCAPE

Es el principal elemento de contaminación.

En el motor se produce una combustión que si fuese ideal produciría vapor de H₂O, CO₂ y N₂, ninguno de los cuales es contaminante, pero en la

realidad como las combustiones son incompletas se produce en los gases de escape, gases muy contaminantes como el monóxido de carbono CO, óxidos de nitrógeno NOx, hidrocarburos HC y plomo Pb. El contenido perjudicial asciende aproximadamente al 1% de los gases de escape

Monóxido de carbono (CO):

Es incoloro, inodoro e insípido y por ello muy peligroso. Reduce la capacidad de absorción de oxígeno por la sangre al ocupar el espacio de este en la hemoglobina, disminuyendo por ello el contenido del oxígeno en la sangre. Un porcentaje de tan solo un 0,3% de CO en el aire es suficiente para ocasionar la muerte en 30 minutos (Fig. 5.1). Es un gas muy venenoso.

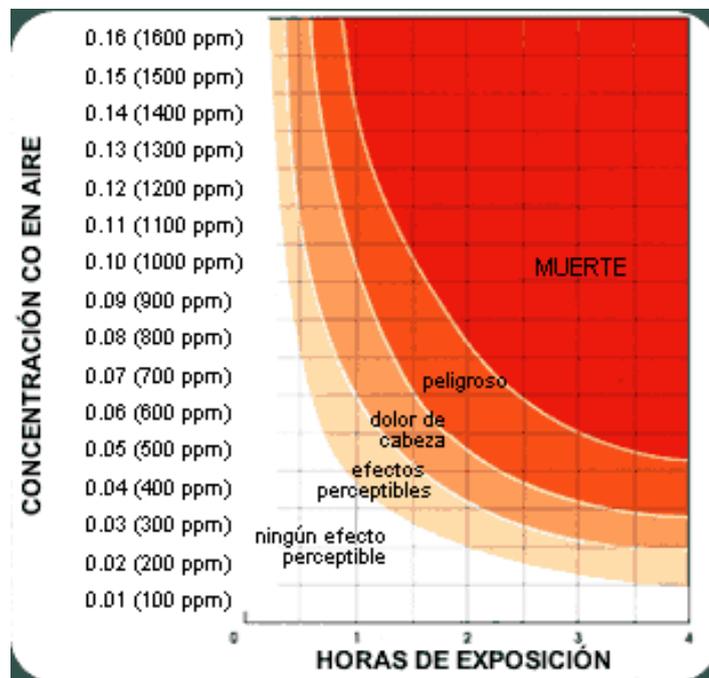


Figura 5.1 Efectos del CO en la Persona

Se produce cuando se va a formar CO₂ pero el carbono no encuentra la suficiente cantidad de oxígeno.

El CO se difunde rápidamente y al contacto con el oxígeno del aire se transforma en CO₂. Por todo ello la necesidad de tener bien ventilados los recintos donde se tenga un motor en marcha.

Como es lógico su proporción aumenta en las mezclas ricas y disminuye en las pobres, por lo que se usa como indicador en la preparación de la mezcla.

Para evitar la formación de CO basta con mejorar el proceso de combustión.

Los motores disponen de distintos dispositivos que permiten regular el CO manualmente, o bien es el computador el que se encarga de su control, en el caso de motores a inyección electrónica.

Óxidos de Nitrógeno:

El NO es incoloro, inodoro e insípido y aunque es inerte (no se mezcla con otros) en las condiciones de altas temperaturas (en la combustión) en presencia del oxígeno del aire, reacciona rápidamente con este, dando bióxido de nitrógeno NO₂ de color marrón rojo y olor picante que provoca gran irritación de los órganos respiratorios.

En concentraciones altas, el bióxido de nitrógeno es también nocivo para la salud, pues destruye el tejido pulmonar. El NO y el NO₂ suelen denominarse conjuntamente con la expresión de óxidos de nitrógeno NO_x.

Estos compuestos vertidos a la atmósfera, humedad y rayos solares forman ácido sulfúrico que forma la llamada lluvia ácida, que está compuesta en un 30% de NO_x y en un 60% de óxidos de azufre SO₂.

Hidrocarburos HC:

Aparecen en los gases de escape de forma muy variada según las diversas reacciones que se produzcan, formando gran variedad de compuestos orgánicos, acetileno, etileno, ácidos carbónicos, cetonas, aromáticos, etc. En presencia de óxido de nitrógeno y la luz solar forman oxidantes que provocan irritación de las mucosas.

Una parte de los hidrocarburos ha sido catalogada como nociva para la salud, porque algunos son cancerígenos.

Estos hidrocarburos provienen del combustible que no se han quemado, es decir que han quedado parcialmente oxidados, y se producen por la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica), o por que la velocidad de inflamación sea muy baja (mezcla pobre). Como se ve, es por tanto conveniente un adecuado ajuste de la mezcla, ya sea en motores a carburador por la variación del tornillo regulador de la mezcla o en el caso de motores a inyección electrónica por medio de las señales que envían los sensores a la computadora para que esta a su vez haga los ajustes respectivos.

Si la mezcla es rica hay exceso de CO y de HC pero mejora las emisiones de NOx.

Si la mezcla es pobre se mejoran los valores de CO y HC pero empeoran los de NOx.

Otros productos contaminantes:

Plomo:

El plomo (tetraetilo de plomo) se usa en las gasolinas como antidetonante, como no interviene en la combustión es expulsado con los gases de escape. El plomo es venenoso para el cuerpo humano ya que ataca al sistema nervioso.

Actualmente se utilizan gasolinas sin plomo que tienen otros elementos no contaminantes que se agregan como aditivo antidetonante.

Dióxido de azufre SO₂:

Es causado por las impurezas del combustible y provoca la niebla contaminante y la lluvia ácida (Fig. 5.2), aunque solo un 2% de la contaminación por SO₂ es producida por los automóviles

El dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno provienen, en su mayor parte, de las centrales termoeléctricas, que generan electricidad a partir de la

combustión del carbón, y de los automóviles que utilizan como combustible algún derivado del petróleo.

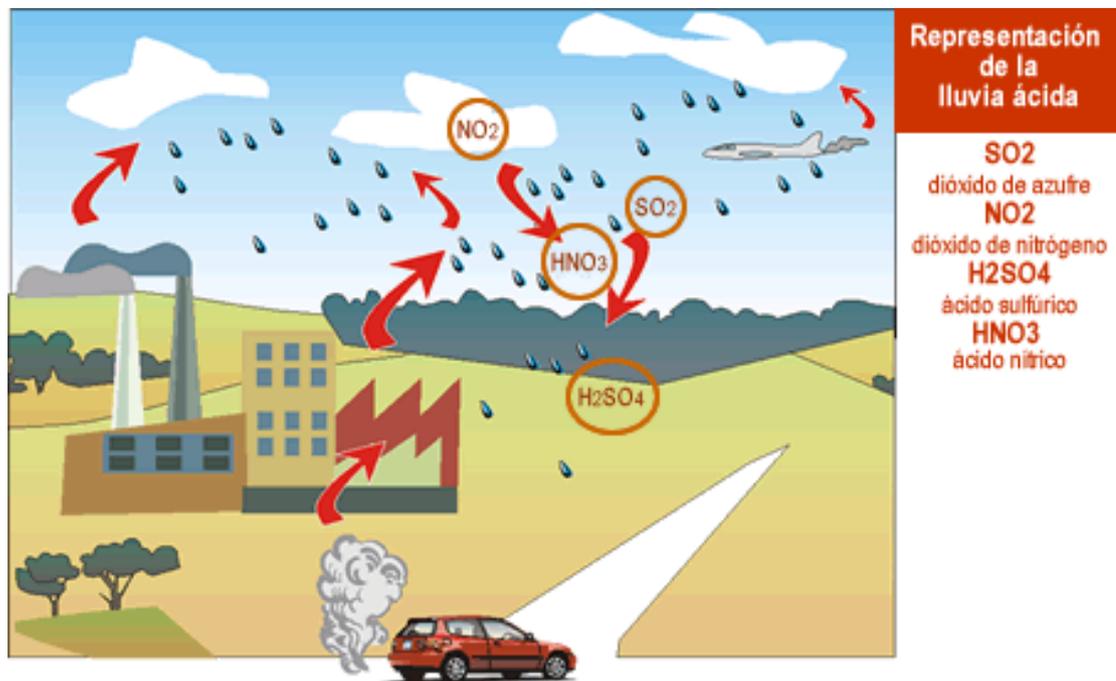


Figura 5.2 Representación de la Lluvia Ácida

Cuando estos gases entran en contacto con el vapor de agua de la atmósfera, el dióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico, y el dióxido de nitrógeno, en ácido nítrico. Estos ácidos, concentrados en las nubes, son trasladados por el viento hacia distintas latitudes, y caen al suelo junto con la lluvia o la nieve.

Entre sus efectos negativos se destacan:

- ❖ La destrucción de bosques enteros.
- ❖ El aumento extraordinario de la acidez de los suelos, que arruina los cultivos y daña las plantas silvestres.
- ❖ La disolución de las sustancias químicas del suelo, como, por ejemplo, el aluminio, que provoca el envenenamiento de los lagos.
- ❖ La corrosión de los materiales de construcción de los edificios, las casas y los monumentos.

Aunque el SO_2 no es venenoso para la salud se le considera el principal causante del efecto invernadero (Fig. 5.3). Pero para reducir su emisión deberíamos recurrir a otros combustibles como el etanol.

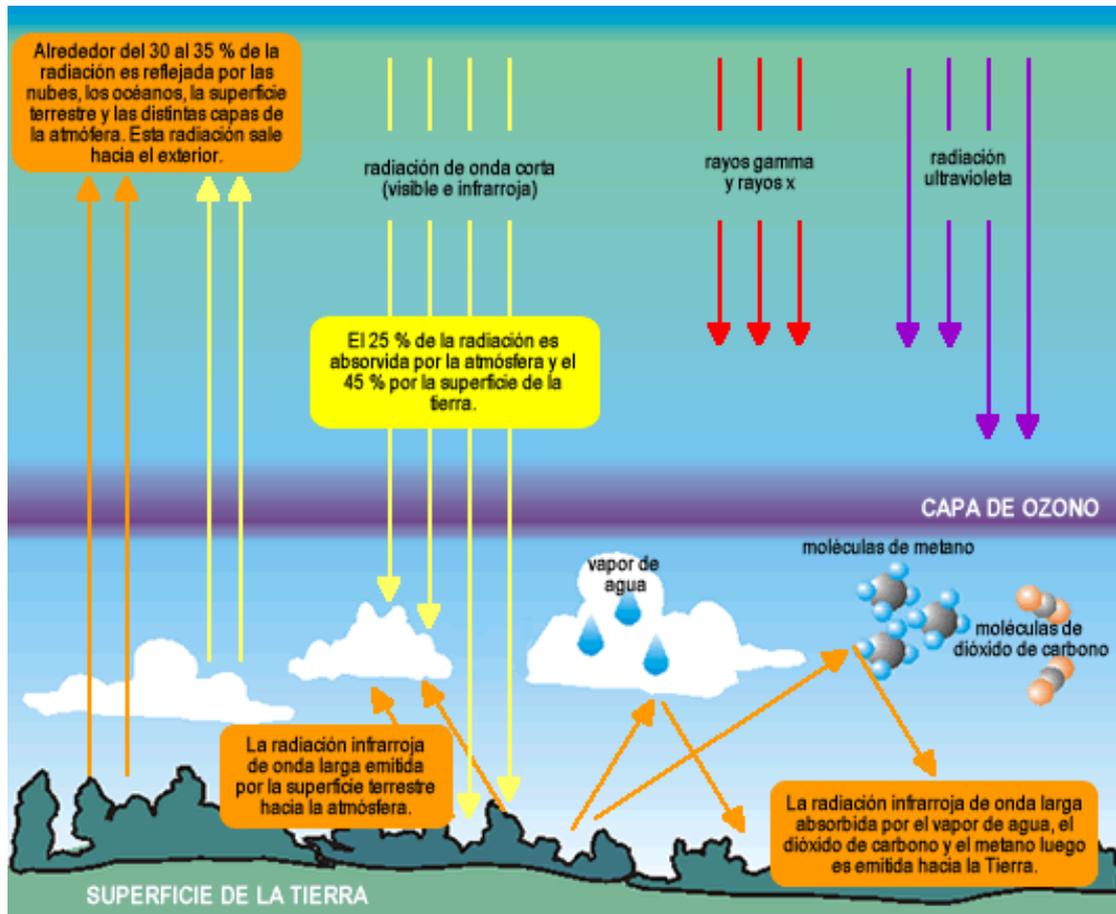


Figura 5.3 Causas del Efecto Invernadero

En un invernadero, el cristal permite el ingreso de los rayos solares e impide la salida del calor. En la atmósfera, los gases cumplen una función similar al cristal del invernadero: la energía solar reflejada por la superficie terrestre es interceptada, en su trayecto hacia el espacio, por el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua presentes en la atmósfera.

Lo descrito anteriormente es un mecanismo absolutamente natural, gracias al cual la vida en la Tierra se hizo posible. Por desgracia, este proceso de almacenamiento de calor se ha visto alterado, en los últimos años, como consecuencia de la acción irresponsable del hombre.

La emisión de ciertos gases, provenientes de la quema de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, está provocando un considerable aumento de la temperatura en el planeta. Uno de esos gases - emitido en su mayoría por fábricas, automóviles y centrales termoeléctricas - es el dióxido de carbono (CO_2). Al aumentar su concentración en la atmósfera, aumenta también el calor que refleja hacia la superficie.

Este paulatino calentamiento global puede traer innumerables consecuencias catastróficas (derretimiento del hielo polar, aumento del nivel de los mares, inundaciones, etc.).

Partículas Sólidas:

Proceden de la combustión incompleta, sobre todo en los motores Diesel y son partículas de cenizas y hollín.

5.3. CONTAMINANTES DEL ETANOL.

Desde que comenzó la historia del automóvil se ha venido utilizando el alcohol como combustible, como lo hizo Henry Ford en sus inicios con los primeros vehículos, los cuales tenían un motor que podía funcionar con gasolina, alcohol, o una mezcla de ambos.

Claro está que en esos tiempos se pensaba que no podía existir una contaminación significativamente alta por la presencia de pocos vehículos, hoy en nuestros días lo más importante es conservar el medio ambiente y la mayoría de las grandes empresas han basado su producción con el fin de causar el menor daño posible tanto a la corteza terrestre como a la atmósfera y al agua.

En cualquier estado físico en el que encuentre el etanol no tiene ningún efecto contaminante debido a su gran solubilidad con el agua.

Oxígeno (O₂)

Por poseer el alcohol dentro de su composición interna una molécula más de oxígeno, cuando se produce la combustión del etanol dentro de un cilindro del motor vamos a tener como resultado una alta emanación de O₂ en el escape de gases, con respecto a la combustión con gasolina, lo que es un punto favorable para la utilización de este tipo de combustible alternativo.

Monóxido de Carbono (CO)

Como ya dijimos antes el monóxido de carbono se forma cuando el carbono no encuentra la suficiente cantidad de oxígeno para formar CO₂, problema que estaría en parte solucionado con la utilización de alcohol ya que la emanación de CO es muy baja por el mismo hecho de tener más oxígeno en el escape lo cual crearía más CO₂.

Hidrocarburos (HC)

Como vamos a ver más adelante en las gráficas comparativas la cantidad de hidrocarburos no combustionados es relativamente baja con respecto a la gasolina ya que no existe en este tipo de combustible ninguna adición de isoparafinas o compuestos aromáticos para aumentar el índice antidetonante, ya que el octanaje del etanol es mayor al de la gasolina.

Además el etanol se combustiona en el motor casi en su totalidad porque el llenado del cilindro es mejor y más completo. Cabe destacar que esta reducción de HC se debe también a que el etanol utilizado para este análisis es un alcohol anhídrido.

Otros contaminantes.

Una gran ventaja que tenemos al utilizar este tipo de combustible alternativo como sustituto de la gasolina es que no existe SO₂ (dióxido de azufre) que es el principal causante del efecto invernadero.

No existe plomo ya que no se necesita de este elemento para combustionar el alcohol.

5.4. EFECTOS NOCIVOS DE LOS CONTAMINANTES DE LA GASOLINA

Según estudios realizados por varias entidades responsables de dar soluciones ambientales, han llegado a las siguientes conclusiones sobre los efectos que los gases de escape producto de la combustión de la gasolina ocasionan en la salud de los seres vivos, además de influir directamente en el efecto invernadero o calentamiento global del planeta.

Sistema hemopoyético: El plomo afecta la producción de hemoglobina en diversas etapas de su síntesis. Cuando el nivel de plomo en la sangre alcanza los 50 ug/dl los niveles de producción de hemoglobina son mínimos, y se presentan casos de anemia si el nivel de plomo supera los 80 ug/dl en la sangre.

Sistema renal: Se pueden presentar daños en los riñones como consecuencia de la exposición a niveles de plomo muy altos.

Sistema cardiovascular: Algunos estudios han mostrado posibles relaciones estadísticas entre la presencia de plomo en la sangre y la alta presión sanguínea, sin embargo otros estudios realizados, no han encontrado evidencia alguna para apoyar la creencia de que moderados aumentos en la carga corporal de plomo tienen relevancia en los riesgos de enfermedad cardiovascular.

Efectos neurocomportamentales: Se piensa que los contaminantes de la gasolina y especialmente el plomo afectan el desarrollo intelectual y el comportamiento de los niños. Puede causar daños neurológicos.

Otros estudios realizados por diferentes organismos de Salud han concluido que no existen pruebas evidentes lo suficientemente significantes sobre la relación causal entre diferentes niveles de presencia de plomo y el desarrollo

intelectual o comportamental en niños. Este elemento afecta los sistemas circulatorios, reproductivos, urinarios y nerviosos. Se estima que es el causante de la hiperactividad y reducción de la capacidad de aprendizaje de los niños. Se acumula en los huesos y otros tejidos teniendo efectos duraderos.

El uso de las gasolinas sin plomo puede lograr bajos niveles de emisiones tóxicas, siempre y cuando el motor esté diseñado para su consumo y tenga todos sus dispositivos de control de combustión y de emisiones en buen estado. Sin embargo, si estas gasolinas sin plomo son utilizadas en motores convencionales sin convertidor catalítico se generarán serias implicaciones para la salud, el ambiente y el motor, ya que éstos emitirán mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera, que cuando usan gasolina con plomo, además de sufrir daños mecánicos, como lo son: la recesión de los asientos de válvulas y el incremento del requerimiento de octano.

Esto se debe a que en la formulación de gasolina sin plomo, para sustituir el efecto antidetonante de éste (índice de octano), se utilizan proporciones mucho mayores de ciertos hidrocarburos aromáticos, isoparafinas, y compuestos oxigenados, cuyo exceso deberá ser recirculado al motor y/o transformado en el convertidor catalítico, de manera tal que si el motor no posee estos dispositivos, dicho exceso saldrá a la atmósfera como hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (debido a las altas temperaturas de combustión de los aromáticos). Existen diferentes formas de obtener gasolina sin plomo, cada una de ellas presenta características tóxicas y formas diferentes de obtención:

Sustancias aromáticas: Investigaciones realizadas han indicado que el benceno es una peligrosa sustancia cancerígena y causa una variedad de desórdenes sanguíneos tales como la leucemia. En orden de peligrosidad le siguen el tolueno y el xileno. Todas estas sustancias están presentes en las gasolinas sin plomo "aromáticas" en composiciones que oscilan, en el caso de Europa, entre 29 y 55% por volumen, en donde el contenido de benceno es de 5%. Sin embargo, aún cuando la cantidad de benceno fuese muy baja, éste se produce también durante la combustión a través de procesos de

dimetilación de otras sustancias aromáticas tales como el tolueno y el xileno, encontrados en mayor proporción. En experimentos de carcinogenicidad en ratas, realizados por el Instituto de Oncología y Ciencias Ambientales de Bolonia, Italia, se demostró que la exposición a gasolinas con alto contenido aromático conduce a la formación de tumores generalmente malignos, especialmente tumores del útero.

Isoparafinas: Investigaciones apoyadas por el American Petroleum Institute (API) demostraron que la exposición de inhalación de 344 ratas Fischer machos a los vapores de gasolina con alto contenido de isoparafina produce tumores renales benignos y malignos, además de un aumento de los tumores del hígado en ratones femeninos expuestos a inhalación del mismo tipo de gasolina.

Compuestos oxigenados: Para mejorar la calidad octanal de la gasolina sin plomo se pueden añadir también compuestos oxigenados, tales como alcoholes (metanol y etanol) y éteres (MTBE y ETBE). En el proceso de combustión, estas sustancias pueden producir formaldehído, el cual es irritante y cancerígeno.

A pesar de todo, los avances de la tecnología han podido reducir las emisiones de los vehículos e incrementar la economía de combustible, sin embargo la polución o contaminación, hoy en día, continúa siendo el mayor inconveniente para el incremento del número de autos y camiones en la calle.

Combustibles alternativos más limpios ofrecen una solución atractiva para este problema ambiental.

5.5. TABLAS Y GRÁFICAS DE EMISIÓN DE GASES OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

Las pruebas que se realizaron para obtener los datos que presentamos a continuación, fueron realizadas en la ESPE sede Latacunga con el

analizador de gases infrarrojo que existe en nuestros laboratorios (Fig. 5.4.), modelo RAG Gas Check.

El procedimiento que se sigue es el siguiente: Calentar el motor hasta la temperatura óptima de funcionamiento, luego se ingresan los datos del vehículo.



Figura 5.4. Ingreso de datos en el Analizador

Realizado este paso se procede a conectar la toma de revoluciones (Fig. 5.5.) del analizador en el primer cilindro del motor.



Figura 5.5. Conexión del captador de voltaje

Ahora se introduce sonda del analizador (Fig. 5.6.) en el escape del motor, el cual es el que recibe los gases y envía a la computadora los resultados de los gases producto de la combustión, que serán procesados por el analizador y sacará a la pantalla estos datos.



Figura 5.6. Ingreso de la sonda en el escape

Los datos que fueron tomados se presentan a continuación.

5.5.1. Tablas con gasolina a diferentes velocidades:

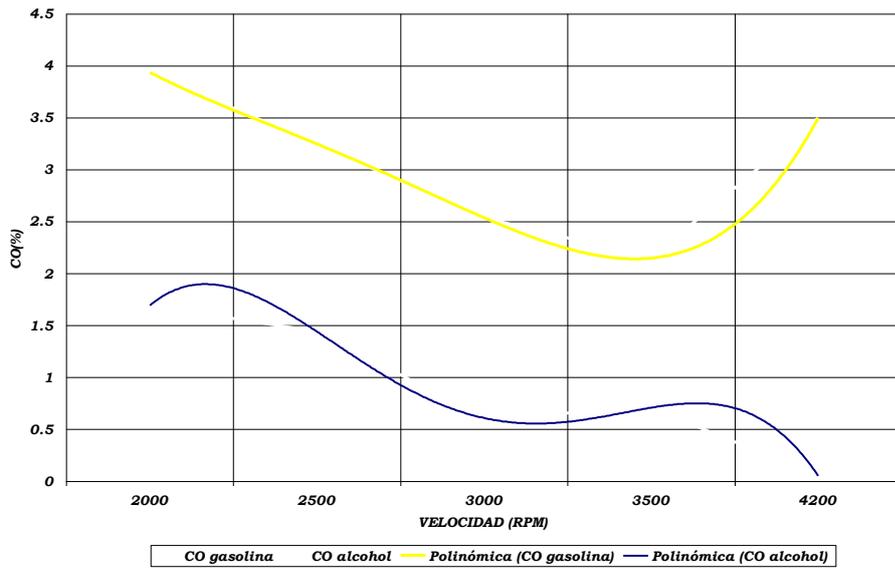
ACELERACION = 100%				
VELOCIDAD		GASES DE ESCAPE		
RPM	CO	CO₂	O₂	HC
	%	%	%	ppm
2000	3.94	3.85	5	12788
2500	3.25	3.26	4.6	12782
3000	2.54	2.56	8.3	12764
3500	2.15	2.24	9.1	12755
4200	3.5	3.5	6.1	12699

5.5.2. Tablas con alcohol a diferentes velocidades:

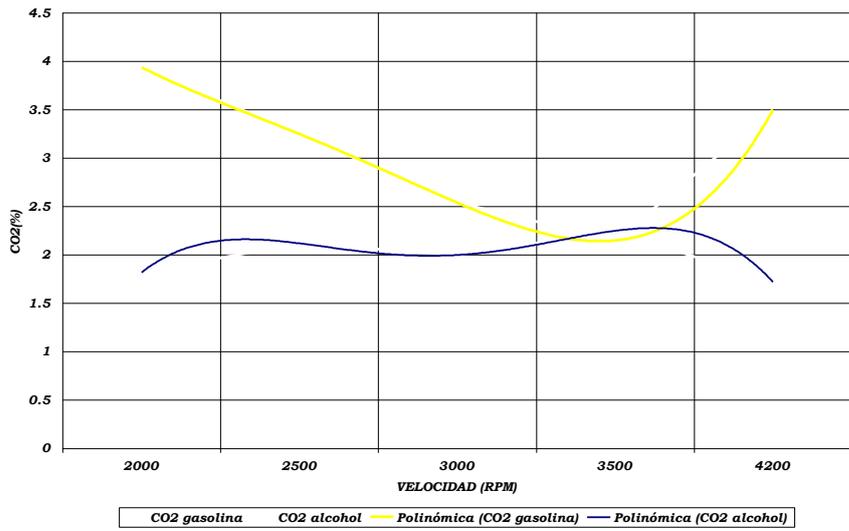
ACELERACION = 100%				
VELOCIDAD		GASES DE ESCAPE		
RPM	CO	CO₂	O₂	HC
	%	%	%	ppm
2000	1.694	1.82	17.13	360
2500	1.442	2.12	16.69	773
3000	0.61	2	17.78	1013
3500	0.709	2.25	18.49	1255
4200	0.051	1.72	17.99	1436

5.5.3. Graficas comparativas de las emisiones contaminantes:

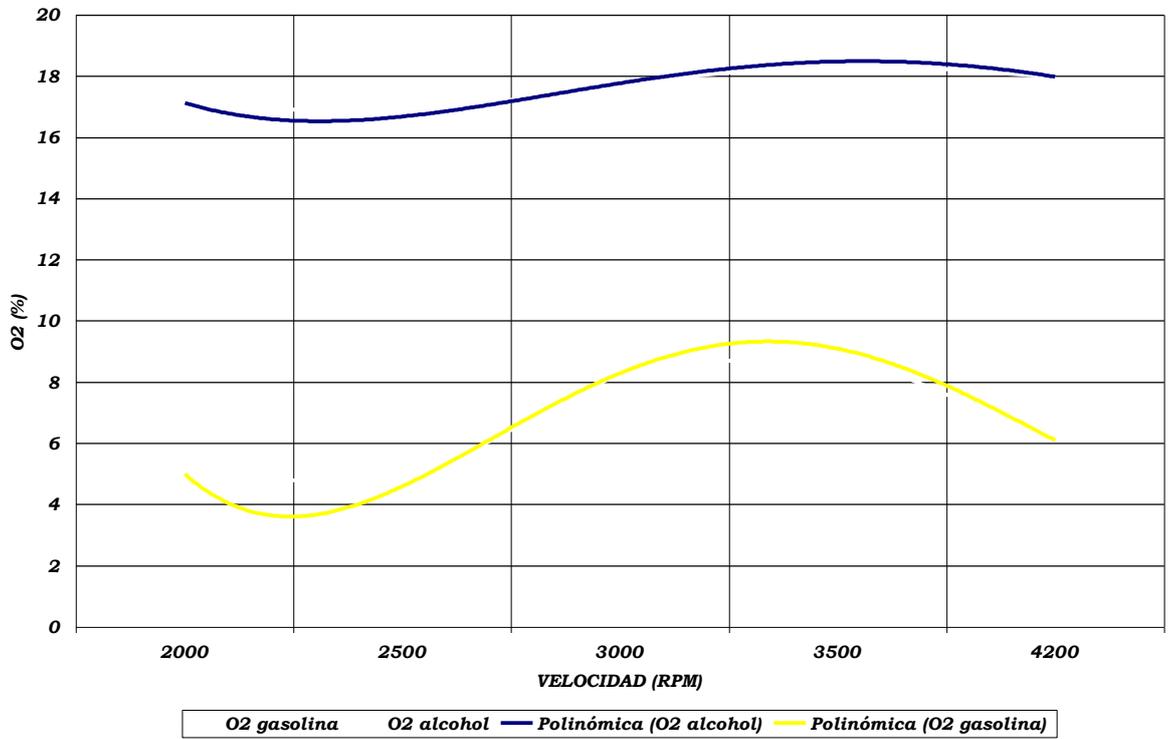
COMPARATIVA CO



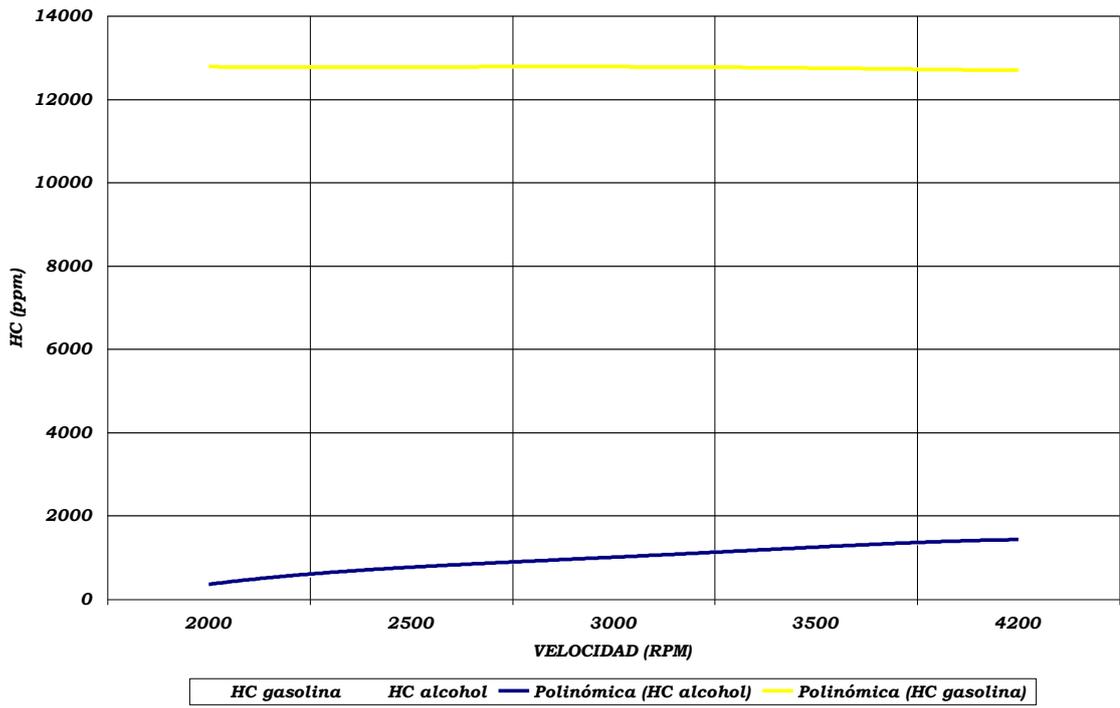
COMPARATIVA CO2



COMPARATIVA O2



COMPARATIVA HC



CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES:

- El alcohol es un combustible que puede reemplazar total o parcialmente (mezcla) a los combustibles derivados del petróleo.
- El Etanol utilizado como combustible alternativo para motores de combustión interna presenta algunas ventajas sobre la gasolina, sobre todo en lo que refiere a las emisiones tóxicas de los gases de escape.
- Para utilizar el etanol como combustible se necesita que esté deshidratado para que no presente problemas de oxidación y corrosión por la presencia de agua en el motor.
- Económicamente el uso del etanol en estos días tendría un costo elevado por el proceso de obtención y preparación en comparación a la gasolina, pero si se produce en grandes cantidades industrializando una planta de procesamiento, el costo sería similar.
- El efecto invernadero producido en gran parte por la combustión de la gasolina se verá solucionado con el uso del alcohol por no poseer partículas de azufre ni plomo.
- El etanol se puede obtener a partir de varios productos agrícolas que se dan en nuestro país con gran facilidad.
- En todas las pruebas realizadas con alcohol como combustible notamos que las temperaturas de funcionamiento del motor son aceptables al igual que su comportamiento en diferentes revoluciones.

- La pérdida de potencia que se observa en las curvas se solucionaría con un aumento de la relación de compresión por tener el alcohol un índice de octano más elevado que la gasolina.

6.2 RECOMENDACIONES:

- El uso del alcohol como combustible generaría más trabajo en sector agrícola y por ello se recomienda que exista una planta de tratamiento de alcohol para producción en grandes cantidades, aptos para el funcionamiento del motor.
- La Escuela Politécnica del Ejército debería dar mayor apertura a la investigación de este tipo de temas para poder analizarlos con mayor profundidad.
- Se debería incentivar este tema con mayor profundidad con el ánimo de que las futuras generaciones tengan un ambiente menos contaminado y por ende una mejor calidad de vida.
- Se recomienda que en el país se debería fomentar la aplicación del alcohol como combustible alternativo y que exista estaciones de servicio de abastecimiento.
- Para la utilización de este combustible se recomienda que el motor alcance primero la temperatura óptima de funcionamiento antes de poner carga al motor para así obtener un mejor rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- **MENA N. LUIS**, Motores de combustión interna gasolina diesel, 1ra edición, Ecuador, 2002, 214 páginas.
- **EDWARD F. OBERT**, Motores de combustión interna análisis y aplicaciones, Primera edición, México, 1992, 764 páginas.
- **WILLIAM H CROUSE**, Sistemas de alimentación de combustible, lubricación y refrigeración del Automóvil, Primera edición, España, 1985, 338 páginas.
- **GTZ**, Tecnología del Automóvil, Tomo II, 20 edición alemana, Barcelona-España, 1985, 378 páginas.
- **BABOR – IBARZ**, Química General Moderna, 8 edición, España, 1983, 1144 páginas.
- **CARLOS MARTINEZ ACOSTA**, Nomenclatura Química General y Potencial Hidrógeno, 2 edición, Ecuador, 1965, 165 páginas.
- **DR. HUGO FREIRE ROMÁN**, Química, 7 edición, Ecuador, 1981, 298 páginas.
- **JOSÉ ANGEL MANRIQUE VALADEZ**, Termodinámica, 3 edición, México, 2001, 541 páginas.
- **K. MOROSOV, R CHOY PEREZ, J. L. REYES**, Teoría de los motores de combustión interna, 1 edición, Cuba, 1990, 407 páginas.
- **INTERNET**
<http://www.energy.ca.gov/afvs/m85/>
<http://www.energy.ca.gov/energy/afvs/ethanol/>
<http://www.autoshop.com.mx/tecnologia/Alconafta/alconafta.asp>
<http://www.concepcionero.com.ar/Notas/EnergiasRenovables.htm>

<http://www.caddet.org/html/biomas.htm>

<http://www.automecánico.com>

<http://www.ambiente-ecologico.com/revist53/alnaft53.htm>

Realizado por:

.....
Santiago Fernando Celi Ortega

.....
Edwin Michel Macías Cevallos

EL DIRECTOR DE CARRERA DE
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

.....
Ing. Juan Castro C.

EL SECRETARIO ACADÉMICO

.....
Dr. Eduardo Vásquez A.