

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY  
CAMPUS ESTADO DE MÉXICO



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

# **INCREMENTO DE EFICIENCIA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.**

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA  
PRESENTA

**MIGUEL ANGEL ROJAS RIVERA**

Asesor:	Dr. ARMANDO BRAVO ORTEGA	
Comité de tesis:	Dr. SADEGH BABAI KOCHEKSERAI Dr. JESUS ENRIQUE CHONG QUERO	
Jurado:	Dr. SADEGH BABAI KOCHEKSERAI Dr. JESUS ENRIQUE CHONG QUERO Dr. ARMANDO BRAVO ORTEGA	Presidente Secretario Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., 30 marzo de 2007

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Estado de México por haberme dado la oportunidad de demostrar la calidad de Ingeniero que soy y haber confiado en mí para poder cumplir en norma con los estándares del postgrado.

Al Dr. Armando Bravo Ortega por haberme acompañado en esta investigación y orientado con palabras de aliento.

Al Dr. Sadegh Babaii Kocheksaraii y al Dr. Jesús Enrique Chong Quero por haber fungido como asesores en este proyecto que sin ayuda de ellos no se hubiera realizado.

A mis padres los cuales han creído siempre en mí y me han apoyado en todo mi camino profesional, y esta tesis es sólo un pequeño regalo por todo lo que me han otorgado.

## **RESUMEN.**

En todo el mundo, la industria automotriz es una arteria principal, ya que cada día un mayor número de personas está haciendo uso de vehículos particulares o vehículos del transporte público. Estos transportes usan motores de combustión interna los cuales a pesar de todas las medidas para limpiar sus gases remanentes siguen contaminando. La contaminación ya se está regulando, como por ejemplo el restringir el uso de gasolinas con plomo, como resultado negativo se obtuvo una gasolina al principio con menor potencia, la cual incrementaba el uso de un recurso no renovable: el petróleo.

El presente trabajo fue elaborado con la finalidad de proponer un sistema de recirculación de energía, para mejorar la eficiencia del ciclo y con el objetivo final de reducir el consumo de gasolina. Esto se realiza por el uso de los gases de salida que aún tienen una temperatura alta la cual puede ser usada para ayudar al mejor consumo de la gasolina, y de esta manera se propuso el diseño de un intercambiador de calor.

Si este equipo se pusiera a pruebas de laboratorio, nos daría como resultado un avance o un punto de partida para futuras investigaciones sobre el adecuado uso del combustible. Se plantean también otras alternativas como son los autos híbridos, pero para esta década no dejaremos de usar los automóviles de gasolina, ya sea para recargar las baterías o para mover el vehículo directamente. Es por eso de la preocupación plasmada en este documento de hacer un uso adecuado de tan preciado líquido el cual en este siglo se acabará.

El contenido de esta tesis presenta la teoría básica de termodinámica, los componentes que conforma un motor de combustión interna, avances tecnológicos, resultados de las ecuaciones aplicadas para diseñar un intercambiador de calor y su influencia en el motor, así como todo lo necesario para su diseño térmico y se plantean alternativas para mejorar tanto el diseño, como la eficiencia total del motor.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
CONTENIDO.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	11
NOMENCLATURA.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Historia de los automóviles.....	14
1.2 Estado actual de los motores de combustión interna.....	17
1.1.1 Clasificación de los motores.....	17
1.1.2 Últimos avances tecnológicos.....	21
1.3 Motores con energías alternativas.....	35
1.4 Motores de CI y su relación con el ambiente.....	36
1.4.1 Historia sobre contaminación.....	37
1.5 Problemática y justificación de la tesis.....	38
1.6 Objetivos.....	39
1.7 Metodología de investigación.....	40
1.8 Organización de la tesis.....	40
2. TERMODINÁMICA BÁSICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	42
2.1 Calor.....	42
2.1.1 Calor específico.....	43
2.1.2 Transmisión de calor.....	43
2.2 Transferencia de calor dentro del cilindro.....	47
2.2.1 Modelo de gas ideal.....	48
2.3 Ley cero de la termodinámica.....	49
2.4 Primera ley de la termodinámica.....	49
2.4.1 Conservación de la masa.....	49
2.4.2 Conservación de la energía.....	50

2.4.3 Aplicaciones del flujo en estado estable.....	50
2.5 Segunda ley de la termodinámica.....	51
2.5.1 Entropía.....	51
2.5.2 Entalpía.....	52
2.6 Tercera ley de la termodinámica.....	52
2.7 Eficiencia térmica.....	53
2.8 Energía interna.....	53
2.9 Calor específico.....	54
2.10 Ciclos térmicos y de combustión.....	54
2.10.1 Carnot.....	54
2.10.2 Otto.....	57
2.10.3 Diesel.....	60
2.11 Diferencia entre ciclos de combustión.....	63
3. FUNDAMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	64
3.1 Componentes.....	64
3.1.1 Monobloque.....	65
3.1.2 Cabezal o culata.....	66
3.1.3 Árbol de levas.....	66
3.1.4 Cigüeñal.....	68
3.1.5 Carburador.....	68
3.1.6 Convertidor catalítico.....	69
3.1.7 Cámara de combustión.....	70
3.1.8 Biela.....	71
3.1.9 Casquillos de biela.....	71
3.1.10 Aletas disipadoras de calor.....	72
3.1.11 Cáster del motor.....	72
3.1.12 Cilindros.....	73
3.1.13 Múltiple de escape.....	73
3.1.14 Cola de escape.....	74
3.1.15 Volante de inercia.....	75
3.1.16 Inyector de combustible.....	75
3.1.17 Bomba de combustible.....	76
3.1.18 Bujía de precalentamiento.....	76
3.1.19 Múltiple de entrada.....	77
3.1.20 Bomba de aceite.....	77
3.1.21 Pistón.....	77
3.1.22 Anillos del pistón.....	78
3.1.23 Taqués (“push rods”).....	79
3.1.24 Radiador.....	79
3.1.25 Bujías.....	80
3.1.26 Sistema de encendido.....	81
3.1.27 Súper cargador.....	81
3.1.28 Estrangulador o acelerador.....	82
3.1.29 Sonda Lambda.....	83
3.1.30 Válvula.....	85
3.2 Sobrealimentación del motor.....	85
3.2.1 Sobrealimentación dinámica.....	85
3.2.2 Sobrealimentación mecánica.....	88
3.2.3 Turbo alimentación por gases de escape.....	88

3.2.4 Ventajas y desventajas de la turbo alimentación por gases de escape.....	90
3.3 Funcionamiento.....	91
3.3.1 Proceso de cuatro tiempos.....	92
3.3.2 Fases de distribución por válvulas.....	93
3.3.3 Compresión.....	94
3.3.4 Relación entre aire y combustible.....	95
3.3.5 Distribución de la mezcla en la cámara de combustión.....	95
3.4 Par motor y potencia.....	96
3.5 Integración de los componentes de un motor.....	97
4. COMBUSTIÓN Y COMBUSTIBLES.....	99
4.1 Conceptos básicos de la combustión.....	99
4.2 Características básicas de los combustibles.....	100
4.2.1 Diesel.....	101
4.2.2 Biodiesel.....	101
4.2.3 Gasolina.....	104
4.2.4 Energías alternas.....	111
4.3 Comparación de combustibles.....	121
4.4 Relación estequiométrica.....	123
4.4.1 Radio de mezcla estequiométrica aire-combustible (A/F).....	124
4.5 Contaminación ambiental.....	124
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.....	126
5.1 Rendimiento del motor.....	126
5.1.1 Rendimiento térmico.....	127
5.1.2 Pérdidas.....	129
5.2 Eficiencia de un motor de gasolina.....	130
5.3 Métodos para incrementar la eficiencia de un motor.....	132
5.3.1 Control de la temperatura.....	132
5.3.2 Control de la mezcla.....	138
5.3.3 Uso de nuevos materiales.....	140
5.4 Datos de los gases de salida de un automóvil.....	142
5.5 Analisis de autoignición del combustible en el tubo de inyección.....	144
5.6 Diseño propuesto del intercambiador de calor.....	147
5.6.1 Alimentación de combustible.....	155
5.6.1 Diferencia entre inyección directa e inyección en el tubo de admisión.....	158
5.6.2 discusión de resultados.....	159
6. CONCLUSIONES.....	160
6.1 Modificaciones y recomendaciones.....	161
6.2 Conclusiones generales.....	163
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
ANEXO A.....	172
ANEXO B.....	174
ANEXO C.....	178
ANEXO D.....	182
ANEXO E.....	185

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1	Historia cronológica de los automóviles .....	14
Figura 1. 2	1886 Motor de un pistón de Daimler de 1.1 HP .....	15
Figura 1. 3	1885 Vehículo de prueba de Daimler .....	16
Figura 1. 4	1886 Automóvil de tres ruedas patentado por Benz.....	16
Figura 1. 5	Válvula en L. Se encuentra en motores viejos o pequeños .....	18
Figura 1. 6	Válvula en I, estándar en automóviles actuales.....	18
Figura 1. 7	Válvula en F, una ubicada en la cabeza y otra en el monobloque.....	18
Figura 1. 8	Válvula en T, posicionada en el monobloque y en lados opuestos .....	19
Figura 1. 9	Motor de un cilindro de dos tiempos .....	20
Figura 1. 10	Motor en línea.....	20
Figura 1. 11	Motor en V .....	20
Figura 1. 12	Cilindros opuestos .....	20
Figura 1. 13	Motor en W.....	21
Figura 1. 14	Pistones opuestos.....	21
Figura 1. 15	Motor en radial .....	21
Figura 1. 16	Ford modelo U.....	22
Figura 1. 17	Modelo U con súper cargador de 2.3 litros de hidrógeno con sistema híbrido .....	23
Figura 1. 18	Profesor Ben T. Zinn mostrando el funcionamiento del sistema SPRF .....	23
Figura 1. 19	Pantalla de monitoreo mostrando los niveles de NOx.....	24
Figura 1. 20	Valvetronic de BMW .....	25
Figura 1. 21	BMW 316ti con valvetronic .....	25
Figura 1. 22	Sistema estándar de admisión de aire con mariposa.....	26
Figura 1. 23	Sistema de admisión con el valvetronic .....	27
Figura 1. 24	Incremento de apertura gracias al valvetronic.....	28
Figura 1. 25	VTEC de tres etapas .....	29
Figura 1. 26	Gráfica de RPMs .....	29
Figura 1. 27	Motor VTEC 1.8l Honda creado en 2005 y usado actualmente.....	30
Figura 1. 28	Auto de hidrógeno de Mazda.....	30
Figura 1. 29	Motor rotativo del Mazda RX-8 .....	31
Figura 1. 30	Esquema del híbrido hidrógeno-gasolina .....	32
Figura 1. 31	Válvulas eléctricas de SIEMENS .....	32
Figura 1. 32	Rueda generadora KSG para operar con 42V .....	33
Figura 1. 33	Altima híbrido 2007 .....	33
Figura 1. 34	VarioCam Plus de Porsche© .....	34
Figura 1. 35	Sistema de VarioCam Plus montado en un auto Caimán .....	35
Figura 2. 1	Ejemplo de Conducción.....	44
Figura 2. 2	Ejemplo de un calentador solar usando convección.....	44
Figura 2. 3	Direccionamiento de la radiación a celdas solares .....	45
Figura 2. 4	Muestra de gases a diferentes temperaturas y su intercambio térmico.....	46
Figura 2. 5	Muestra de pérdidas en un motor .....	47
Figura 2. 6	Intercambiador de Calor .....	50
Figura 2. 7	Ejemplo de Energía Interna.....	53
Figura 2. 8	Máquina de Carnot esquematizada.....	55

Figura 2. 9	Ciclo de Carnot en función de Temperatura y Entropía.....	55
Figura 2. 10	Ciclo de Carnot en función de Presión y Volumen .....	57
Figura 2. 11	Ciclo Otto en función de Presión y Volumen.....	58
Figura 2. 12	Ciclo Diesel P-V.....	60
Figura 2. 13	Momentos reales de las etapas del ciclo Diesel.....	61
Figura 2. 14	Funcionamiento del motor Diesel de dos tiempos.....	62
Figura 3. 1	Motor de combustión interna.....	64
Figura 3. 2	Monobloque de un motor .....	65
Figura 3. 3	Bloque de motor enfriado por aire.....	65
Figura 3. 4	Vista superior e inferior del cabezal .....	66
Figura 3. 5	Cabezal de un motor de 4 cilindros con doble árbol de levas .....	66
Figura 3. 6	Árbol de Levas .....	67
Figura 3. 7	Ejemplo de un solo árbol de levas.....	67
Figura 3. 8	Ejemplo de un árbol de levas doble.....	67
Figura 3. 9	Cigüeñal para motor de cuatro cilindros.....	68
Figura 3. 10	Carburador de un automóvil.....	68
Figura 3. 11	Convertidor catalítico de un automóvil .....	69
Figura 3. 12	Cámara de combustión visible.....	70
Figura 3. 13	Gráficas de posición, velocidad y aceleración de un pistón, en función de distintas relaciones de R (brazo de cigüeñal) y L (longitud de biela).....	71
Figura 3. 14	Biela.....	71
Figura 3. 15	Casquillos de biela o rodamiento.....	72
Figura 3. 16	Disipador de calor del motor de una motocicleta.....	72
Figura 3. 17	Cárter de un Cadillac V8 .....	73
Figura 3. 18	Camisa que hace la función de cilindro del motor .....	73
Figura 3. 19	Múltiple de escape completo para Honda Civic.....	74
Figura 3. 20	Escape con silenciador.....	74
Figura 3. 21	Volante de inercia.....	75
Figura 3. 22	Inyector de combustible marca Bosch.....	75
Figura 3. 23	Ejemplo de inyector limpio .....	76
Figura 3. 24	Bomba de gasolina Bosch.....	76
Figura 3. 25	Bujía de calentamiento para motores diesel .....	76
Figura 3. 26	Múltiple de entrada o “Manifold” de Honda.....	77
Figura 3. 27	Bomba de aceite para Honda Civic .....	77
Figura 3. 28	Pistón para motor de dos litros .....	78
Figura 3. 29	Pistón con recubrimiento de cerámica para MERCEDES-BENZ OM355 .....	78
Figura 3. 30	Anillos de Fuego.....	78
Figura 3. 31	Pistón, Pin y Anillos.....	79
Figura 3. 32	Taques para autos de carrera de aleación especial .....	79
Figura 3. 33	Taques.....	79
Figura 3. 34	Radiador de agua .....	80
Figura 3. 35	Bujía de automóvil .....	80
Figura 3. 36	Bobina de encendido de alto voltaje.....	81
Figura 3. 37	Distribuidor eléctrico completo.....	81
Figura 3. 38	Súper cargador Jackson .....	82
Figura 3. 39	Turbo de un automóvil .....	82
Figura 3. 40	Estrangulador con sensor masa del Nissan Micra .....	83
Figura 3. 41	Estrangulador independiente para motor Honda Civic.....	83

Figura 3. 42	Ubicación y función de la sonda lambda.....	84
Figura 3. 43	Gráfica del funcionamiento de la sonda lambda marca NGK.....	84
Figura 3. 44	Sonda Lambda.....	85
Figura 3. 45	Válvula de entrada o de escape con su resorte y guía.....	85
Figura 3. 46	Principio de sobrealimentación por tubo oscilante de admisión.....	86
Figura 3. 47	Principio de sobrealimentación por resonancia.....	86
Figura 3. 48	Aumento del llenado de aire máximo (rendimiento volumétrico) por sobrealimentación dinámica.....	87
Figura 3. 49	Sistema de tubo oscilante de admisión.....	87
Figura 3. 50	Principio de funcionamiento del compresor helicoidal.....	88
Figura 3. 51	Turboalimentador por gases de escape para automóvil.....	89
Figura 3. 52	Geometría variable de la turbina del sobrealimentador VTG.....	89
Figura 3. 53	Geometría de la turbina del sobrealimentador VST.....	90
Figura 3. 54	Gráfica de transcurso de potencia y del par de un motor con turbo sobrealimentador por gases de escape en comparación de uno aspirado.....	91
Figura 3. 55	Ciclo de trabajo del motor de gasolina de cuatro tiempos.....	92
Figura 3. 56	Relación de las válvulas, árbol de levas y cigüeñal.....	94
Figura 3. 57	Distribución de la mezcla en la cámara de combustión.....	95
Figura 3. 58	Transcurso ejemplar del par motor y de la potencia en un motor de gasolina de inyección en el tubo de admisión.....	96
Figura 3. 59	Componentes principales de un motor (a).....	97
Figura 3. 60	Componentes principales de un motor (b).....	98
Figura 4. 2	Curva típica de destilación ASTM.....	104
Figura 4. 3	Efecto de la estructura del combustible en tendencias de detonación.....	105
Figura 4. 4	Suplemento mundial de metanol.....	119
Figura 4. 5	Auto solar.....	121
Figura 4. 6	Emisiones de un automóvil.....	124
Figura 4. 7	Emisión de dióxido de carbono en miles de toneladas 2003.....	125
Figura 5. 1	Diagrama p-V de un motor Ciclo Otto.....	127
Figura 5. 2	Rendimiento de un motor de gasolina $\lambda=1$ .....	129
Figura 5. 3	Diagrama p-V del ciclo Otto.....	130
Figura 5. 4	Eficiencia ideal de Otto y Diesel en referencia a su radio de compresión.....	132
Figura 5. 5	Esquema de un horno con aire precalentado por recuperación o regeneración...	134
Figura 5. 6	Gráfica P-v con valores de $\Phi = 1.0$ , $P_1 = 0.5$ atm, $T_1 = 298$ K.....	136
Figura 5. 7	Temperatura de la flama y presión pico para volúmenes constantes de combustión, con productos de combustión reciclados.....	138
Figura 5. 8	Economía de combustible vs. Peso en un SUV.....	140
Figura 5. 9	Economía vs. Peso en un auto.....	141
Figura 5. 10	Nueva distribución de materiales para la reducción de 500 lb. (a 2860 lb.).....	141
Figura 5. 11	Columna de dirección, ejemplo de componente de chasis.....	141
Figura 5. 12	Cadillac CTS, ejemplo de interiores.....	142
Figura 5. 13	“Transfer Case” para 4x4 y un transmisión de 7 velocidades DCX.....	142
Figura 5. 14	Cajuela del VW Lupo 3L y techo convertible del Cadillac XLR, ejemplo de exteriores.....	142
Figura 5. 15	Composición de los gases de salida de gasolina.....	143
Figura 5. 16	Valores de presiones y salida de un ciclo Otto.....	143
Figura 5. 17	Sistema de inyección directa precalentado.....	148

Figura 5. 18	Diagrama usando los gases EGR.....	148
Figura 5. 19	Diagrama sin el uso de EGR. ....	149
Figura 5. 20	Múltiple de escape a modificar.....	149
Figura 5. 21	Diseño propuesto 1. ....	150
Figura 5. 22	Diseño propuesto 2.....	150
Figura 5. 23	Inyección a 1.15 ms a 75° BTDC y 5 MPa en el riel de inyección a temperatura ambiente .....	151
Figura 5. 24	Inyección a 1.15 ms a 75° BTDC y 5 MPa en el riel de inyección a 100° C.....	151
Figura 5. 25	Residuos de combustión a 656 K .....	152
Figura 5. 26	Residuos de combustión a 616 K .....	153
Figura 5. 27	Parámetros para el rendimiento de un motor.....	154
Figura 5. 28	Eficiencias del rendimiento de un motor.....	154
Figura 5. 29	Gráfica de eficiencia máxima de un motor a gasolina a un ángulo de -10°.....	155
Figura 5. 30	Alimentación de combustible para un motor a gasolina de inyección en el tubo de admisión. ....	156
Figura 5. 31	Esquema del sistema propuesto.....	157
Figura 5. 32	Sistema de retención de vapores de combustible .....	157
Figura 5. 33	Comparación entre inyección directa e inyección en el tubo de admisión con el transcurso de señal de activación de la válvula de inyección a alta presión .....	158

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1	Calor específico de sustancias varias.....	43
Tabla 2. 2	Principales compuestos del aire seco.....	48
Tabla 2. 3	Naturaleza de los cuatro procesos en diferentes motores.....	63
Tabla 4. 1	Derivados de la destilación del petróleo.....	100
Tabla 4. 2	Costo de producción por tonelada de Ester a partir de Aceite de soya en Brasil	103
Tabla 4. 3	Índice de octanos en hidrocarburos y aromáticos.....	110
Tabla 4. 4	Balance de energía obtenido de caña de azúcar y de maíz.....	112
Tabla 4. 5	Comparativa de precios de combustible para el transporte en Brasil y EE.UU ..	113
Tabla 4. 6	Ventajas y desventajas de los combustibles más usados.....	122
Tabla 4. 7	Ventajas y desventajas de las nuevas tendencias de combustible .....	122
Tabla 4. 8	Valores comerciales de energía (mega joules/kilogramo).....	123
Tabla 5. 1	Límites de flamabilidad y energía mínima de ignición de varios combustibles .	135
Tabla 5. 2	Valores de temperatura, presión y número de moles a diferentes %EGR.....	137
Tabla 5. 3	Propiedades oxigenantes .....	147
Tabla 5. 4	Diferencia entre los dos sistemas propuestos. ....	150

## NOMENCLATURA

$m_f$	peso molecular del combustible.
$H_{lg}$	entalpía del líquido abajo del vapor a 60° F, Btu/lbm.
$C_p$	Calor específico a presión constante, Btu/lbm (J/Kg.-K).
$C_v$	Calor específico a volumen constante, Btu/lbm (J/Kg.-K).
$Q_{ch}$	Alto calor de combustión, Btu/lbm °R.
$Q_c$	Bajo calor de combustión, Btu/lbm.
$k$	Radio de calor específico.
$m_m$	Peso molecular de la mezcla estequiométrica.
$F_c$	Radio de mezcla estequiométrica.
$r_m$	Peso del radio molecular antes de la combustión a peso del radio molecular después de completada una combustión de mezcla estequiométrica.
$a$	velocidad del sonido en el gas, fps.
$T$	temperatura, °R.
$m_a$	peso molecular del aire = 28.95
$Q_v$	Calor de combustión del gas del combustible en 1 cu. ft. de mezcla estequiométrica a 14.7 psia, 60° F.
$r$	Radio de compresión.
$V$	Volumen.
$p$	Presión.
$\gamma$	Radio específico de calor, $C_p/C_v$
$\rho$	Densidad (Kg./m <sup>3</sup> )
$\Phi$	Radio equivalente.
$\chi$	Fracción molar
$(A/F)_{stoic}$	Radio estequiométrico de aire-combustible.
$F/A$	Radio de masa combustible-aire (kg/kg)
$P$	Presión (Pa)
$R_u$	Constante universal del gas (J/kmol-K) (8314.51)

# 1. INTRODUCCIÓN.

Leonardo DaVinci, uno de los precursores del diseño de máquinas, con una gran inventiva y deseo de crear fue el iniciador del diseño de aparatos que transportaran personas, aunque nunca se imaginó que sus ideas fueran usadas para la guerra.

Desde mediados del siglo XVII la evolución de los mecanismos fue notoria, y más con la introducción de máquinas de vapor, el pistón de vapor fue introducido en 1690 y con ello, trajo grandes avances tecnológicos gracias a su aplicación.

Las máquinas de vapor pronto tuvieron un competidor pobre en su tiempo, pero que los logró igualar en un lapso de 10 años, el motor de combustión interna.

Se buscaron diferentes combustibles aparte del vapor de agua que logrará impulsar las máquinas, e inclusive se trató de diseñar la máquina perpetua, aquel artefacto que generara algún trabajo sin necesidad de requerir energía externa, el “momentum perpetuum”. Por supuesto hasta la fecha aún no se logra dicha cosa debido a factores como la fricción y la gravedad.

Los motores de combustión interna son utilizados en todo el mundo, ya sea como generadores de electricidad, como fuerza de trabajo o para transporte. Estos motores ocupan un combustible derivado del petróleo, el cual es utilizado para generar una explosión que mueva el mecanismo de la máquina. Debido a esto, es muy importante el constante estudio de los motores tanto por aumentar el rendimiento en el ciclo termodinámico debido a la escasez del petróleo, como la seguridad del control de la explosión.

El concepto original de Nicolaus Otto (1831-1891) se sigue usando, con algunas mejoras y la incorporación de computadoras y sensores que logran controlar el ingreso del combustible y lograr una combustión adecuada.

Lo que se tratará en este capítulo serán los antecedentes de las máquinas de combustión interna y el desarrollo que sufrieron hasta nuestros tiempos para transformarlas en máquinas más

eficientes. Cabe recalcar desde el inicio de este capítulo que la eficiencia puede ser interpretada en varios sentidos, y que lo que se propone es que el motor realice el mismo trabajo con un menor requerimiento de combustible, al igual que con una menor expulsión de gases contaminantes a la atmósfera beneficiando en dos sentidos al usuario automovilista: en reducción de costos en combustible, y reducción de contaminación en la atmósfera.

Los motores de combustión interna no han cambiado su funcionamiento básico desde los últimos años, las mejoras que se pueden observar es la integración de sistemas electrónicos para un mejor control y sistemas de seguridad que fue el gran inquietante de los ingenieros del siglo pasado, y que aún se conserva en este siglo.

Pero debido a los sucesos que han acontecido durante este siglo como las guerras por el energético que mueve a estos motores y el inminente agotamiento de este recurso en unas décadas, se ha buscado maneras de economizar el combustible y buscar fuentes de energía alterna más baratas y renovables. Esta búsqueda ha sido apoyada por gobiernos de diferentes países, un ejemplo claro es el estado de California el cual con la ley 2007 incentiva a la industria automotriz a la prueba de sus nuevos modelos en la vida cotidiana. El diseño de estos nuevos modelos beneficia a la población en general al disminuir los contaminantes emitidos por los automóviles y la economía de combustible que se pretende lograr. Aunque cabe subrayar que un auto híbrido es tan eficiente como uno Diesel en cuanto consumo de combustible por distancia recorrida. Pero aún se están investigando nuevas mejoras que ayuden tanto a reducción de costo del vehículo (por conveniencia de la industria automotriz) y reducción de consumo y emisiones de contaminantes.

En el presente capítulo se presentan los antecedentes que ayudaron al desarrollo de los motores de combustión interna y a posicionarlos como la mejor opción para los automóviles de su tiempo, y de los actuales con ciertas modificaciones.

## 1.1 HISTORIA DE LOS AUTOMÓVILES.

El uso de vehículos impulsados por motores de combustión interna no fue tan rápido, para esto, tuvieron que pasar varios años y diseños fallidos.

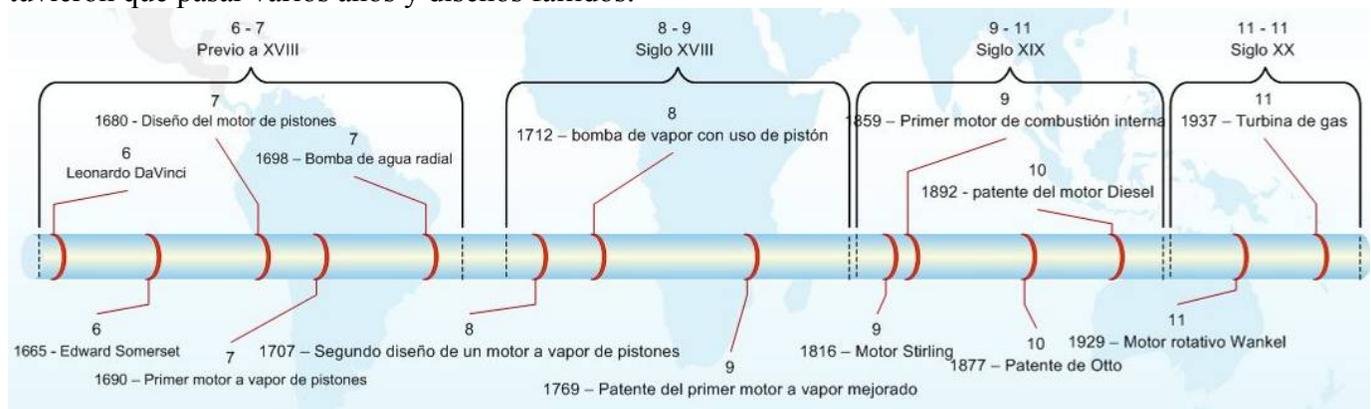


Figura 1. 1 Historia cronológica de los automóviles. Figura elaborada por el autor.

El hombre siempre quiso transportarse cómodamente y tratar de no depender del caballo. Fue por eso que se inventó el carruaje, el cual no es más que una caja con ruedas jalada por un par de caballos. En este siglo XVII se impulsó el uso del vapor como energía motriz, y no faltó el ingenio de más de una persona para colocarlo dentro de un carruaje. El primer diseño de un tractor de tres ruedas para uso militar que se conoce fue inventado por el ingeniero francés Joseph Cugnot el cual se encuentra en un museo.

En 1789 se otorgó la primera patente por un carruaje de vapor a Oliver Evans en Estados Unidos, aunque Inglaterra parecía ganar la carrera del automóvil. Inglaterra dirigió su desarrollo al área ferroviaria, la cual ayudó al país a proporcionar un sistema de transporte de carga y personas pero impidió ganar la carrera automotriz.

Los alemanes August Otto y Eugen Langen desarrollaron un motor propulsado por gas en 1866 y diez años después August Otto diseñó y construyó un motor de 4 cilindros teniendo su patente en 1877. Esto impulsó el desarrollo de los motores a gasolina. En 1887 fue un gran impulso, ya que personas como Karl Benz y Gottlieb Daimler empezaron a vender autos a gasolina. Es así como Mercedes-Benz posee la patente número 28022 del motor de combustión interna. El motor de un pistón mostrado en la Figura 1.2 se encuentra en el museo Daimler.



Figura 1. 2 1886 Motor de un pistón de Daimler de 1.1 HP. [1]

Daimler se enfocó en el motor y su venta para así poder financiar otros proyectos en los cuales incluía un vehículo completo. En la Figura 1.3 se muestra un prototipo de Daimler. Mientras que Benz se enfocó en fabricar un auto completo, utilizando los últimos avances motrices de la industria de la bicicleta, haciendo un auto de tres ruedas en 1888, ver Figura 1.4.

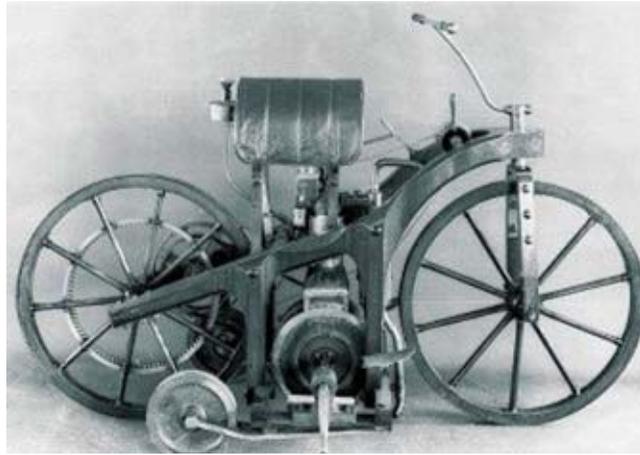


Figura 1. 3 1885 Vehículo de prueba de Daimler [1]



Figura 1. 4 1886 Automóvil de tres ruedas patentado por Benz [1]

La historia no acaba ahí por supuesto, los diseños y ventas de ambos fue conocida en otros lugares, y en la feria Universal de París los ingenieros Émile Levassor y René Panhard descubrieron el motor Daimler y solicitaron los derechos para copiar su diseño. Los ingenieros Levassor y Panhard consideraron que el motor no tendría mucho futuro y vendieron sus derechos a Peugeot, quien fue el primero en fabricar autos en serie del planeta en 1892, seguido posteriormente por la Benz.

Hasta 1893, la superioridad de los motores Daimler era notoria, mientras que en 1900 el mayor fabricante de autos era Benz al producir 2500 autos al año.

La historia de los inventos y creaciones se ha visto mermada por gobiernos y por leyes como lo son las patentes. En América, Henry Ford peleaba por los derechos que en el año 1895 habían sido concedidos a Baldwin Selden para la aplicación del motor de combustión interna a los carros. En 1899 la “Electric Vehicle company” compró esa patente y dio licencia a productores locales que no lograron crecer a comparación de los europeos. Para 1903 Henry Ford fue a

proceso judicial por negarse a comprar dicha licencia y ganó en la corte a mediados de 1911. Para entonces ya había miles de autos vendidos en Estados Unidos, pero la mayoría eran de vapor. Estos pleitos legales le costó al continente americano 10 años de desventaja frente a Europa que crecía a una gran velocidad.

Lo que aconteció después es más presente que pasado, Henry Ford logró hacer la producción en serie y abaratar los costos, vendiendo así un mayor número de automóviles. Aunque en esas épocas los consumidores se fijaban más en el confort y la elegancia que en prestaciones motrices, pero al ser Estados Unidos un país con mayor población y de ingresos altos logró ganarle a Europa en consumir más automóviles en menor tiempo. Ligado a esto estaba el hecho de que no existía competencia real sino hasta unas décadas después.

Benz sufrió por los impuestos a autos de lujo, y Ford tenía la mitad del mercado en 1923 de Estados Unidos. Ante esto, Benz y Daimler-Motoren-Gesellschaft (DMG) ambas alemanas, decidieron firmar un “acuerdo de interés mutuo” en 1926. Ambas marcas mantuvieron su identidad y el acuerdo fue válido hasta el año 2000 [2]. Para 1930 Mercedes-Benz logró títulos en automóviles de carreras y logró su color insignia, que fue gracias al piloto que removió la pintura blanca del automóvil para quitarle peso y lo dejó en lámina color plateada. Ahí empezó el éxito de Benz.

## **1.2 ESTADO ACTUAL DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

Los motores de combustión interna han evolucionado, pero sin embargo el concepto básico del ciclo Otto no ha cambiado, y se sigue utilizando un combustible derivado del petróleo como fuente principal para el motor. Sin embargo existen grandes diferencias, en su mayoría electrónicas y de materiales, de los motores de los años 30 a los actuales.

### **1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES.**

Los motores se clasifican de acuerdo a un número indefinido de aspectos, pero se dividirá a continuación en diez conceptos.

- 1) Tipo de ignición.
  - a) Encendido por chispa
  - b) Encendido por compresión
- 2) Ciclos del motor
  - a) Cuatro tiempos
  - b) Dos tiempos. Ver Figura 1.9.
- 3) Ubicación de las válvulas
  - a) Válvulas en la cabeza (“I head engine”). Ver Figura 1.6.
  - b) Válvulas en el bloque (“L Head engine” y “T head engines”). Ver Figura 1.5 y 1.8.
  - c) Una válvula en la cabeza y otra en el monobloque (“F head engine”). Ver Figura 1.7.
- 4) Diseño básico

- a) Alternativo
- b) Rotativo

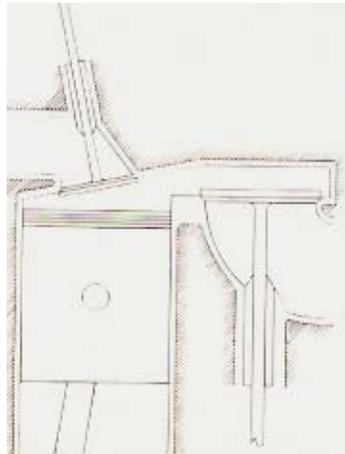


Figura 1. 5 Válvula en L. Se encuentra en motores viejos o pequeños [3].



Figura 1. 6 Válvula en I, estándar en automóviles actuales [3].

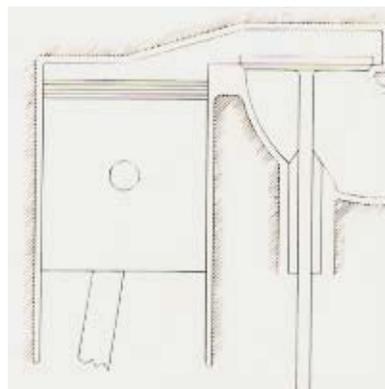


Figura 1. 7 Válvula en F, una ubicada en la cabeza y otra en el monobloque [3].

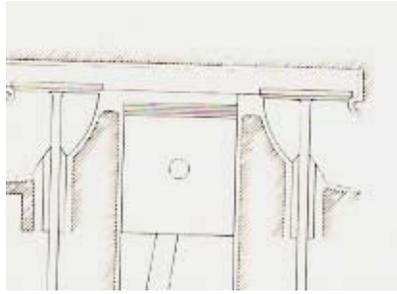


Figura 1. 8 Válvula en T, posicionada en el monobloque y en lados opuestos. [3].

- 5) Posición y número de cilindros en motores alternativos
  - a) Un cilindro. Ver Figura 1.9.
  - b) En línea. Ver Figura 1.10.
  - c) Motor en V. Ver Figura 1.11.
  - d) Cilindros opuestos. Ver Figura 1.12.
  - e) Motor en W. Ver Figura 1.13.
  - f) Pistones opuestos. Ver Figura 1.14.
  - g) Motor Radial. Ver Figura 1.15.
  
- 6) Tipo de aspiración
  - a) Aspiración natural
  - b) Súper cargado
  - c) Turbo cargado
  - d) Compresión del cárter: Se realiza la compresión del aire de entrada por medio del cárter superior.
  
- 7) Tipo de inyección de combustible
  - a) Carburador
  - b) Inyección multipunto
  - c) Inyección en tubería de alimentación de aire: Inyectores en la parte superior del flujo de entrada de aire.
  
- 8) Tipo de combustible
  - a) Gasolina
  - b) Diesel
  - c) Gas, Gas natural, Metano
  - d) LPG
  - e) Alcohol (Etil, Metil)
  - f) Híbrido
  - g) Gasoil: Combustible que consta de 90% de gasolina y 10% de alcohol.
  
- 9) Aplicación
  - a) Automóvil, Camioneta, Autobús
  - b) Locomotora
  - c) Estacionario
  - d) Marino
  - e) Aviación
  - f) Pequeño, modelismo, motosierra

- 10) Tipo de enfriamiento
- a) Enfriado por aire
  - b) Enfriado por líquido



Figura 1. 9 Motor de un cilindro de dos tiempos [3].

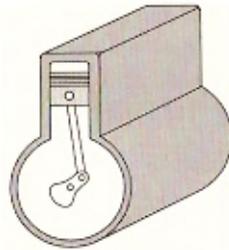


Figura 1. 10 Motor en línea [3].

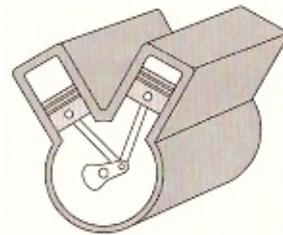


Figura 1. 11 Motor en V [3].

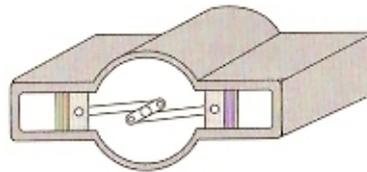


Figura 1. 12 Cilindros opuestos [3].



Figura 1. 13 Motor en W [3].

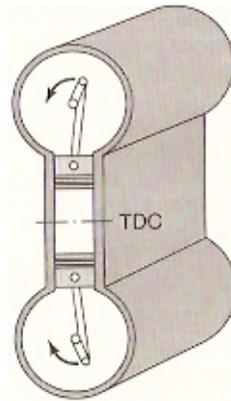


Figura 1. 14 Pistones opuestos [3].

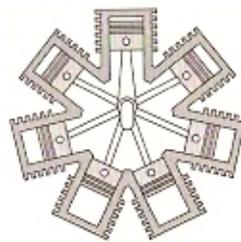


Figura 1. 15 Motor en radial [3].

El motor rotativo (Figura 1. 15) se usó en la primera guerra mundial en aviones como el “Sopwith Camel”. También se montó un motor rotativo en automóviles Admas-Farwell que poseían tres y cuatro cilindros colocados horizontalmente dando un efecto de giroscopio.[3]

### 1.1.2 ÚLTIMOS AVANCES TECNOLÓGICOS.

Ford iniciará con el uso de tecnología híbrida en camionetas con el modelo U. Este modelo, mostrado en la Figura 1.16 no sólo presume de ser uno de los más ecológicos debido al uso de componentes biológicos, sino también por el primero en usar un motor de hidrógeno súper cargado de combustión interna y es híbrido al poseer una transmisión eléctrica.

El modelo U entre sus varias características técnicas, resalta el ser amigable con el ambiente, al poseer un sistema de combustión de cuatro cilindros de 2.3 litros usando como combustible el

hidrógeno, el cual al ser desprendido a la atmósfera en combinación con el oxígeno forman vapores de agua. Este motor está acoplado a un motor eléctrico que en conjunto dan un rendimiento prometido de 19.13 kilómetros por litro y recorriendo una distancia total de 482.80 kilómetros. Aunado a esto una emisión regulada y un 99% de reducción de dióxido de carbono. El vehículo puede cumplir con las regulaciones PZEV (Vehículo de nivel parcialmente nulo de emisiones, por sus siglas en inglés). Por lo que estará listo para su circulación en el 2007 en el Estado de California.



Figura 1. 16 Ford modelo U [4].

El motor del modelo U usa como combustible al hidrógeno y está súper cargado y enfriado para obtener su máximo rendimiento y se presume tener un rendimiento del 25% mayor a uno de gasolina. Ford inicia la carrera de nuevos combustibles apostando por el hidrógeno, pero no dejando fuera el uso de híbridos con motores eléctricos, ya que el usuario aún no define sus preferencias.

Este motor, como se muestra en la Figura 1.17, está basado en el 2.3 litros I-4 usado por Ford Ranger y un número de vehículos Mazda. El motor está optimizado para quemar hidrógeno con una relación de compresión de 12.2:1, pistones de alta compresión, inyectores de hidrógeno, sistemas de encendido eléctrico para el gas y un programa especial para la regulación de paso del combustible.

Debido a que el hidrógeno posee un alto rango de combustión (de 4 a 75 por ciento), los motores de hidrógeno usan un amplio rango de mezcla aire/combustible y pueden ser utilizados bajo un régimen “esbelto” de eficiencia sin las complicaciones del golpeteo de la pre-ignición. Así como los motores diesel, los motores de hidrógeno corren con una mezcla esbelta en autopista de 86:1, comparados al 14.7:1 de vehículos de gasolina. Puede llegar a obtener una eficiencia del 38 por ciento, que es casi un 25% mejor rendimiento que un motor de gasolina.

Como no hay presencia de átomos de carbón en el combustible, el hidrógeno como combustible no produce hidrocarburos o emisiones de dióxido de carbono. Aún sin el tratado especial con un catalizador, los óxidos de nitrógeno (NOX) son muy bajos, y el estudio de catalizadores pronto reducirá la salida del escape de emisiones de smog a niveles muy bajos.

Diseñar un motor de gasolina que queme hidrogeno como combustible ha resultado en una salida de potencia más baja. Los investigadores de Ford han mostrado que con el súper cargador, el hidrogeno puede proporcionar la misma potencia que un motor de gasolina y aun así proveer casi cero emisiones y ahorro de combustible. El turbo cargador centrífugo proporciona cerca de 15 PSI de potencia al ser demandada. [5]



Figura 1. 17 Modelo U con súper cargador de 2.3 litros de hidrógeno con sistema híbrido. [4]

Ford implementa en este modelo un nuevo sistema de enfriamiento de aire después del compresor el cual aún está pendiente su patente. El aire después de pasar por el súper cargador es pasado por un enfriador de aire y posteriormente pasa por un sistema de enfriado por aire acondicionado para bajar aún más su temperatura. Esto logra una mayor compresión dentro del cilindro y por lo tanto una mayor potencia. Lamentablemente esto no se puede hacer en un motor de gasolina ya que a mayor compresión empieza el golpeteo y mal funcionamiento.

En “Georgia Tech” se está desarrollando una nueva tecnología a causa de un concurso organizado por la NASA, el desarrollo es de un componente llamado combustor que es donde el combustible se transforma en energía. Más específicamente se le conoce como Estación de Punto de Flujo Reverso (SPRF por sus siglas en inglés). Es una cámara de combustión diseñada para quemar combustible con casi cero emisiones de óxido de nitrógeno y monóxido de carbono. El diseño del SPRF es por el momento enfocado a motores en donde se realiza una premezcla del combustible antes de ser quemado como son turbinas o motores de avión. Este sistema quema mejor el combustible a temperaturas mucho más bajas que los combustores tradicionales. Esa temperatura se traduce en un sistema más estable y más eficiente que otros, dando una salida de casi cero contaminantes. El diseño también significa menor nivel de ruido, que es un causante de daño a los motores. El SPRF, mostrado en la Figura 1.18, tiene un punto de entrada y de salida, en lugar de tener dos separados, y su forma permite que suceda la mezcla antes de que la ignición ocurra. [6]

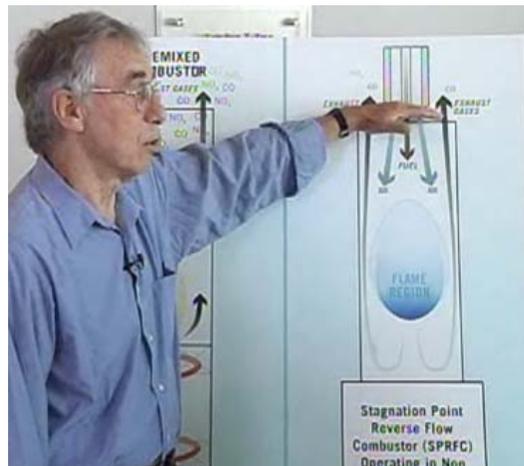


Figura 1. 18 Profesor Ben T. Zinn mostrando el funcionamiento del sistema SPRF. [6]

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  son mayores en un automóvil que en turbinas, como se puede ver en la Figura 1.19, por lo que enfocarnos a disminuir las emisiones en los automóviles contribuirá a la reducción de emisiones anuales de  $\text{NO}_x$ .

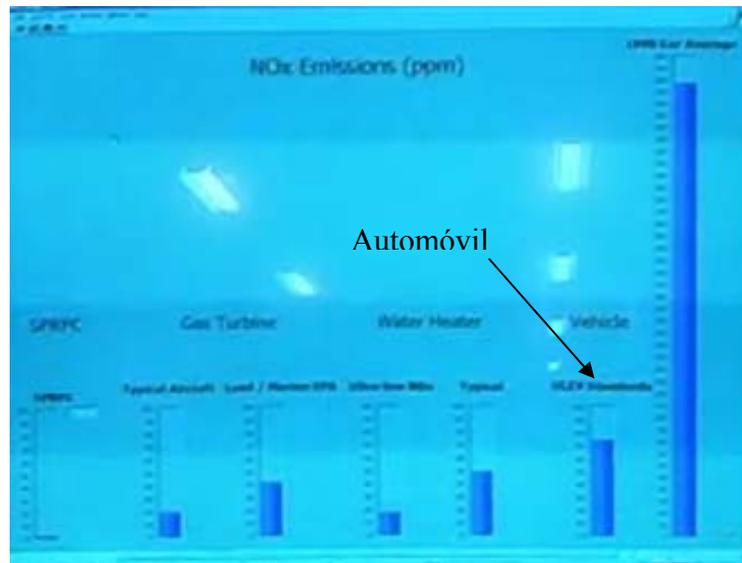


Figura 1. 19 Pantalla de monitoreo mostrando los niveles de  $\text{NO}_x$ . [6]

Mercedes-Benz está en el desarrollo de un nuevo tipo de motor, el cual su variante será el uso de pistones con dimensiones variables, esto quiere decir, que conforme el pistón necesite una mayor relación de compresión, un pistón interno al actual saldrá accionado por un mecanismo el cual reducirá el espacio en la cámara de combustión aumentando su presión. Esto con el propósito de dar un mejor rendimiento tanto a bajas como a altas revoluciones por minuto. BMW ya criticó su sistema al poseer una aspiración natural en lugar de un turbo cargador.

Por otra parte, BMW ha estado usando un sistema llamado “valvetronic”. En la Figura 1.20 se puede observar que el motor eléctrico varía el tiempo y el alzado de válvulas de entrada de aire. Estas son accionadas como cualquier otra por medio de un árbol de levas, pero están aunadas a un motor que regula en tiempo prolongado su estadía en cierta posición. Este sistema ya no depende de una mariposa sino que controla el aire por medio de la válvula, tampoco requiere de una cadena de tiempo o polea conectada al cigüeñal sino que tiene su propia computadora para controlar esto, ya que el tiempo es variado constantemente.

El sistema valvetronic provee al motor de una reducción de costos de mantenimiento, un mejor comportamiento de encendido en frío, menores gases contaminantes de salida y una suavidad mayor del motor.

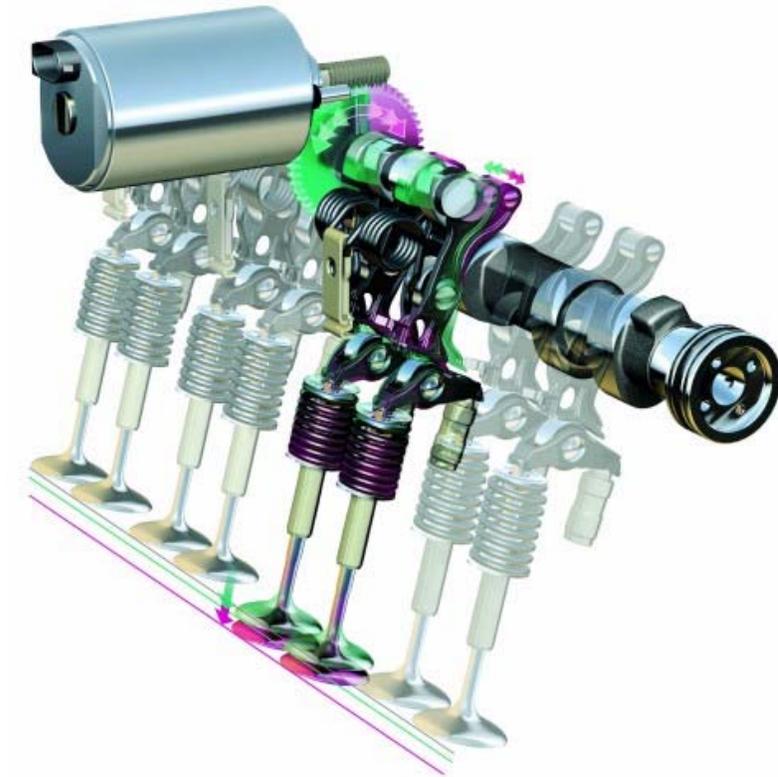


Figura 1. 20 Valvetronic de BMW [7]

Debido a que el sistema valvetronic permite al motor respirar de una manera más libre, el consumo de gasolina es reducido por un 10% según aclama BMW. Este sistema ya está en uso y se encuentra en el modelo 316ti el cual se aprecia en la Figura 1.21. Cabe aclarar que el ahorro de combustible es mayor a menores RPM. A más de 6,000 RPM este sistema ya no es funcional en cuanto a la eficiencia ya que se necesitan unos resortes de válvulas de mayor resistencia, y como los resortes duros proveen de mayor fricción y por lo tanto pérdida de energía. Es por eso que este sistema no se encuentra en la serie M de BMW. El sistema de valvetronic es un elemento importante de BMW para en el 2008 obtener emisiones de dióxido de carbono de 140 gm/km.

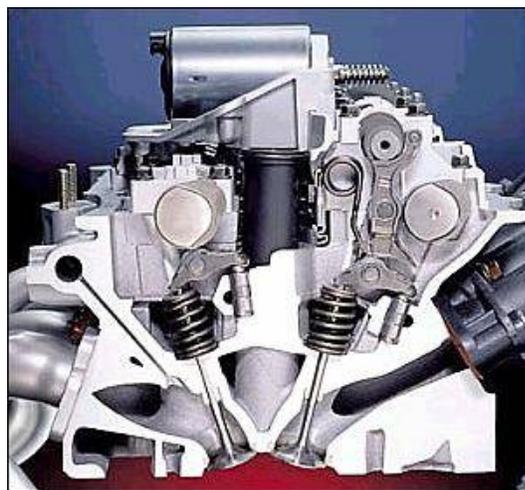


Figura 1. 21 BMW 316ti con valvetronic [7].

El sistema de monitoreo de inyección de combustible sensa cuánto aire pasa por la mariposa interna y determina la cantidad de combustible requerido por el motor.

En sistemas estándar como el de la Figura 1.22, los pistones están en funcionamiento, tomando aire de la mariposa parcialmente cerrada. El conducto de aire entre la mariposa y la cámara de combustión tiene un vacío parcial, gastando energía al resistirse al movimiento del pistón. Los ingenieros automotrices se refieren a este fenómeno como “pérdida de bombeo” (pumping loss). Entre más lento funcione el motor, más se cierra la mariposa que permite el paso del aire, y mayor es la energía que se pierde.

**Intake valve with throttle plate.**

The supply of the fuel/air mixture is controlled by the throttle plate. Valve lift is unchanged.

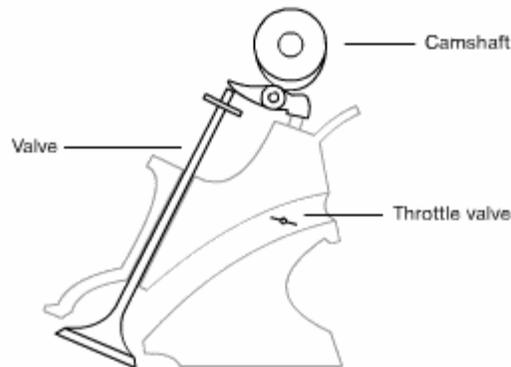


Figura 1. 22 Sistema estándar de admisión de aire con mariposa [7].

El sistema valvetronic minimiza la pérdida de bombeo por vacío al reducir el alzado de la válvula y la cantidad de aire entrando a la cámara de combustión. En la Figura 1.23 se observa el corte transversal del sistema valvetronic donde la mezcla combustible/aire es controlada por una válvula variable.

Comparado con sistemas convencionales de doble árbol de levas, el valvetronic emplea un estrangulador adicional, un motor eléctrico y varios balancines que en conjunto activan la apertura y cierre de las válvulas. Si el balancín presiona más al fondo, las válvulas de entrada tendrán un empuje mayor y viceversa. Esta variación le permite tener un sistema variable de levas que permite una mayor o menor apertura con tiempos diferidos dependiendo de las necesidades del motor. [7]

### Intake valve with VALVETRONIC.

The fuel/air mixture is controlled by a variable valve lift, without a throttle plate.

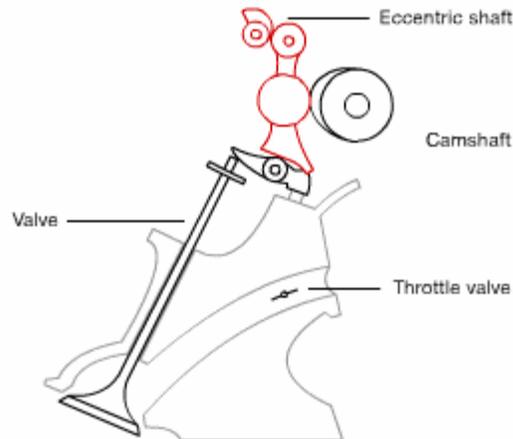


Figura 1. 23 Sistema de admisión con el valvetronic [7].

Aun cuando este sistema tiene un costo, BMW lo justifica con beneficios como la reducción de temperatura del aceite y de energía. Ver Tabla 1.1.

Parámetros de operación	Beneficios adicionales
El alzado de la válvula es variable entre 0 y 9.7 mm.	Fluye aire fresco sobre el cabezal, resultando en una reducción de temperatura del 60%.
Ajuste del engrane tipo gusano de un lado a otro tarda 300 milisegundos.	La bomba de agua es reducida a la mitad, reduciendo el consumo de energía en un 60%
Combinada con un sistema doble de “Vanos” el ángulo del árbol de levas con el cigüeñal puede ser ajustado hasta 60°.	El líquido de la dirección hidráulica se calienta mas rápido, reduciendo la potencia usada por la bomba hidráulica.
El balancín intermedio tiene tolerancias de 0.008 mm.	Montando la bomba de agua y de poder en el mismo cigüeñal y un intercambiador de calor entre el refrigerante y el aceite del motor reduce la temperatura del aceite en un 30%.
Las levas que controlan al segundo sistema tienen tolerancia muy pequeñas	

Tabla 1. 1 Parámetros de operación y beneficios adicionales [7].

Como se puede observar en la Figura 1. 24 este sistema permite variar la cantidad de apertura de la válvula, logrando así una disminución en el consumo de combustible.



Figura 1. 24 Incremento de apertura gracias al valvetronic. Imagen modificada de [www.transporte.cu](http://www.transporte.cu)

## HONDA VTEC

VTEC es un acrónimo de Válvula de Tiempo Variable de control Electrónico. Es un mecanismo que consiste en optimizar la mezcla aire/combustible que fluye a la cámara de combustión.

Para obtener más potencia en un motor existe el método de agrandar el tamaño de la cámara de combustión, o de comprimir el aire y combustible dentro de la cámara. Pero HONDA ha buscado una manera diferente, y es hacer el motor más rápido. Es por eso que los pequeños motores de aluminio son muy revolucionados, para obtener el mismo trabajo en el mismo tiempo que los grandes. En el mismo tiempo se quemará la misma cantidad de aire.

Conforme el motor gira mas rápido, mayor aire/combustible debe ser proporcionado. Y es por eso que se deben de abrir las válvulas de una mejor manera para que se aspire el aire sin problemas. Ahora bien, no se necesita el sistema VTEC si el motor estará siempre a altas RPMs, como es el caso de los autos de carrera, pero el problema radica cuando el motor de calle está casi siempre a bajas RPMs y en algunas ocasiones se demanda mayor velocidad.

El VTEC logra abrir las válvulas con mayor incremento a altas RPMs y se desactiva a bajas RPMs.

Lo último en este tipo de tecnología es el motor D15B con el VTEC de tres etapas. El motor es usado en el Honda Civic en Europa y Japón. El motor es 1.5L y proporciona 128 HP. No hay otro motor en el mercado que pueda desarrollar dicha potencia con un consumo bajo de combustible.

En la Figura 1. 25 se puede observar en la primera etapa operando el motor a bajas RPMs las válvulas operan de manera independiente y solamente una se abre. Esto reduce el consumo de combustible.

En la segunda etapa, a una media de RPMs el sistema funciona como el VTEC normal abriendo más o menos las válvulas conforme se necesite.

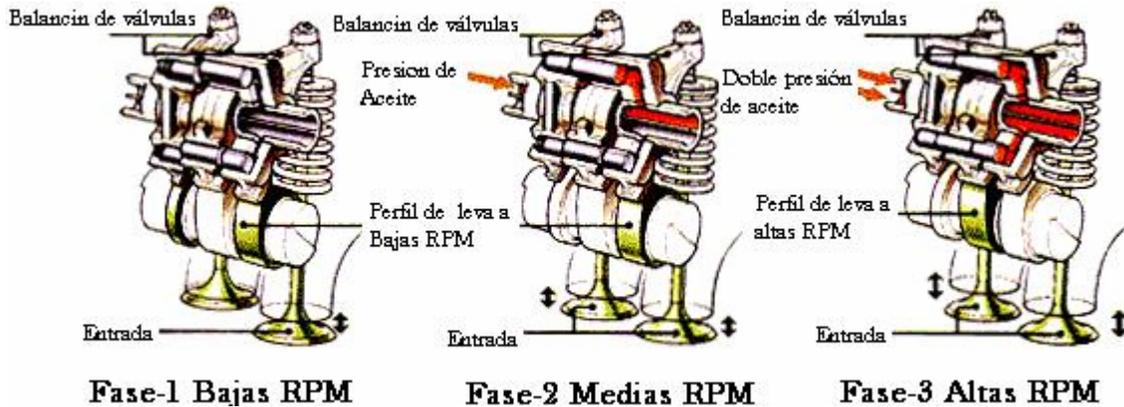


Figura 1. 25 VTEC de tres etapas. Esquema tomado de autospeed.drive.com.au.

En la tercera etapa a altas RPMs el sistema abre ambas válvulas lo necesario para obtener mayor mezcla y desarrollar mayor potencia. Los datos se grafican en la Figura 1.26 en donde se muestra la potencia de salida en relación con las revoluciones por minuto del motor.

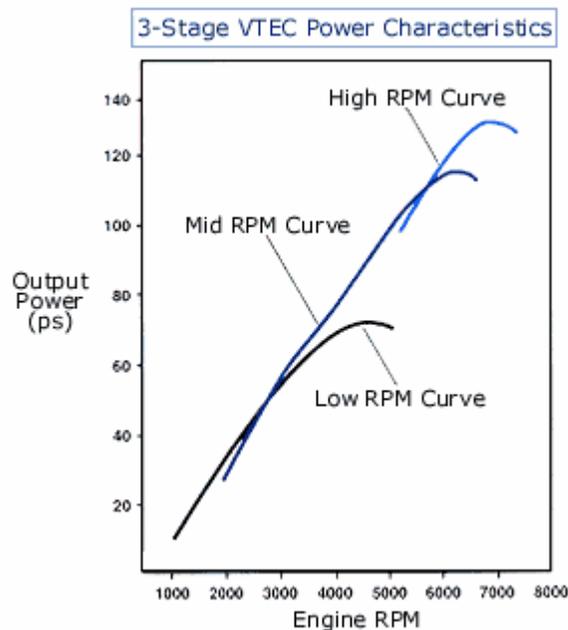


Figura 1. 26 Gráfica de RPMs. Esquema tomado de autospeed.drive.com.au.

Este sistema permite tener un motor pequeño que a bajas RPMs consume poco combustible, y que cuando se le demanda potencia es capaz de proporcionarlo.

Honda usa el sistema VTEC en autos pequeños donde el ahorro de combustible es lo primordial pero que la potencia extra que se obtiene es bien recibida por el usuario. Ver Figura 1.27 del motor del Civic 2005.



Figura 1. 27 Motor VTEC 1.8l Honda creado en 2005 y usado actualmente. Fotografía tomado de [www.honda.com](http://www.honda.com)

El motor en la Figura 1. 27 se ha usado en el Honda Civic y se están pensando nuevas modificaciones en cuanto a materiales y sistemas electrónicos.

## MAZDA

Mazda ha liberado en abril del 2006 dos nuevos vehículos los cuales uno de ellos ya fue requerido por el gobierno de Hiroshima, basados en el motor hidrógeno-gasolina RX-8 RE. Con esto mazda muestra la misma línea que Ford en apostar por la tecnología de hidrógeno en autos familiares, ver Figura 1.28 donde se muestra una vagoneta.



Figura 1. 28 Auto de hidrógeno de Mazda. Fotografía tomada de [www.greencarcongress.com/2005](http://www.greencarcongress.com/2005)

El auto posee una autonomía de 100 Km. usando únicamente el tanque de hidrógeno. La ventaja de los autos híbridos de hidrógeno es que las emisiones se reducen a casi cero, aún cuando su desempeño no sea el mejor.

Mazda tiene el motor rotativo, ver Figura 1.29, el cual no dispone de pistones, sino que es un cilindro dentro de la cámara de combustión y un triángulo dentro del mismo que comprime la mezcla provocando tres explosiones por cada vuelta del rotor.

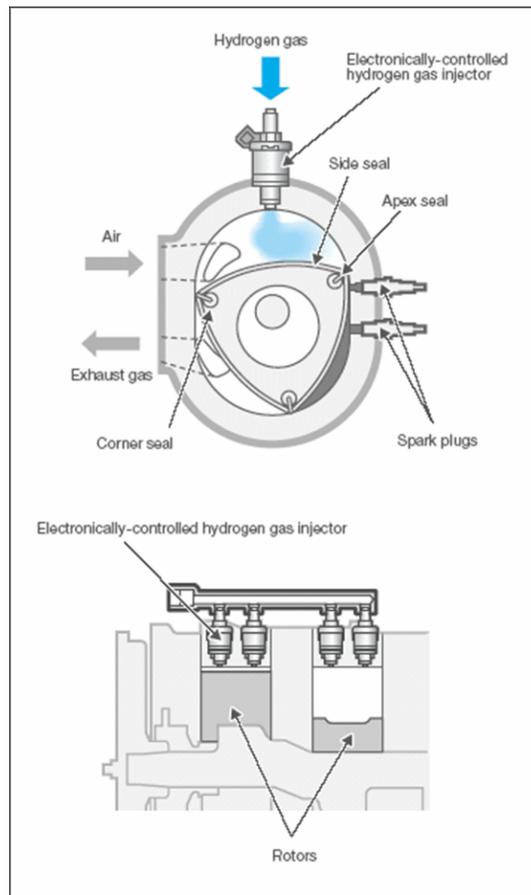


Figura 1. 29 Motor rotativo del Mazda RX-8. Fotografía tomada de [www.greencarcongress.com/2005](http://www.greencarcongress.com/2005)

Mazda le ha apostado a este tipo de motor ya que reduce el número de piezas y así, posteriormente, reducir su costo de fabricación masiva. El nuevo sistema que está integrando es que los inyectores tengan la presión suficiente para la inyección de hidrógeno y que permita también la inyección de gasolina. La gran ventaja que tiene este sistema es que no ocupa un motor independiente y por lo tanto es un menor peso en el vehículo. Aunque claro que la energía centrífuga no se recicla de ninguna manera como es en el caso de los eléctricos.

La única modificación que se le tuvo que hacer a este motor es la implementación de un segundo inyector, ya que los usados en el actual motor no son suficientes para inyectar suficiente hidrógeno y proporcionar una combustión con fuerza motriz suficiente para desplazar el vehículo. El esquema de su funcionamiento se muestra en la Figura 1.30.

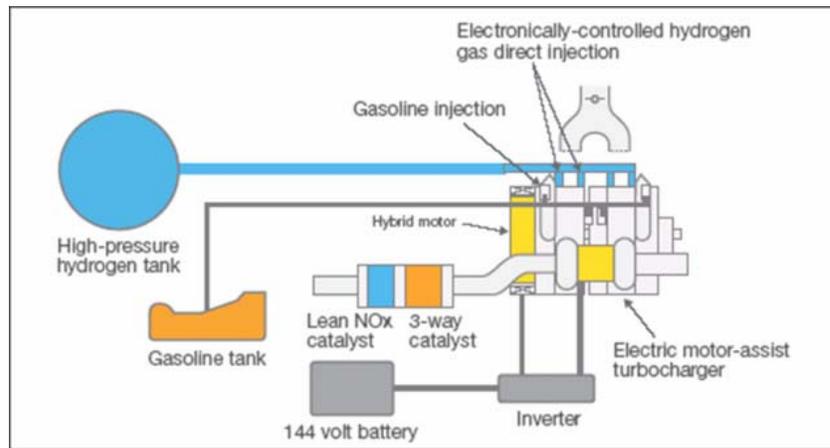


Figura 1. 30 Esquema del híbrido hidrógeno-gasolina. Fotografía tomada de [www.greencarcongress.com/2005](http://www.greencarcongress.com/2005)

SIEMENS propone un motor sin árbol de levas.

Por medio de un novedoso sistema, ver Figura 1.31, SIEMENS propone eliminar todos los componentes mecánicos necesarios para activar las válvulas de entrada y de salida del aire. Este sistema estaría activado por solenoides y sincronizado por medio de una computadora para activarlos en el momento adecuado.



Figura 1. 31 Válvulas eléctricas de SIEMENS. Esquema tomado de [autospeed.drive.com.au/cms/A\\_0910](http://autospeed.drive.com.au/cms/A_0910)

Este proyecto aún está en desarrollo y pruebas, uno de los principales inconvenientes de este sistema es que necesita demasiada corriente eléctrica la cual el automóvil aún no se la puede proporcionar con una batería estándar de 12V. Es por eso que aún se espera la batería de 42V la cual ya podrá integrarse con este sistema, además de que necesitará un generador.

Una propuesta que existe es un generador anclado al motor, el cual permitirá generar electricidad durante su funcionamiento y además ayudarlo al arranque por medio de inducción eléctrica. La Figura 1.32 muestra el generador el cual proporcionará energía eléctrica al motor.



Figura 1. 32 Rueda generadora KSG para operar con 42V. Esquema tomado de [autospeed.drive.com.au/cms/A\\_0910](http://autospeed.drive.com.au/cms/A_0910)

## NISSAN ALTIMA

El cuatro de octubre del 2006 el Nissan Altima híbrido debutó en el auto show en Anaheim, California. Basado en la tecnología de Toyota, el sistema de transmisión continuamente variable del Altima es controlada eléctricamente (eCVT) con un motor eléctrico que genera una potencia de 40Hp con una potencia combinada de 198Hp y una eficiencia de 17.41 Kilómetros por litro. Con una capacidad de tanque de 75 litros y una autonomía de hasta 1126 Km. En la Figura 1.33 se muestra el automóvil presentado por nissan.

En este motor hubo un aumento en la compresión de 9.5:1 a 9.6:1 y una reducción de fricción. Un dato que hace destacar a este vehículo es su torque alto a bajas RPMs ya que puede utilizar el motor eléctrico para el arranque sin necesidad de acelerar el motor de gasolina. El funcionamiento de este motor está controlado por una computadora que mide la eficiencia del motor de combustión, y cuando alguna carga es aplicada o se aumentan las revoluciones, el motor eléctrico embraga para asistirlo y así mantener un consumo bajo de combustible.



Figura 1. 33 Altima híbrido 2007. Fotografía tomada de [www.nissan.com](http://www.nissan.com)

Este motor también está clasificado como PZEV listo para cumplir con las normas de California. Y estará a la venta a inicios del 2007 en California, Nueva York, Massachussets, Connecticut, Vermont, Rhode Island, Maine y New Jersey, que son los estados que han adoptado las regulaciones del Estado de California. El modelo salió después de la presentación en noviembre 2006 de los modelos de gasolina y la versión híbrida es el sexto modelo en la línea de Altima.

El sistema de Porsche tiene un sistema llamado “VarioCam Plus” el cual es mostrado en la Figura 1.34 con un sistema innovador el cual ajusta el tiempo de apertura de las válvulas para un mejor desempeño. El objetivo es dar mayor potencia y torque a todas las velocidades



Figura 1. 34 VarioCam Plus de Porsche© [8]

El sistema de ajuste de tiempo de las válvulas está alterándose continuamente para ajustarse a las condiciones del motor como es la velocidad y la carga. Para un incremento de respuesta en un arranque en frío, “VarioCam Plus” levanta aún más y retarda el tiempo de la válvula. Para medianas revoluciones con mínima carga, la válvula se levanta menos y se retarda el tiempo para ayudar a minimizar el consumo de combustible y de emisiones. Para máxima potencia y torque, la válvula se levanta y el tiempo se adelanta.

Todas las operaciones son manejadas por un potente control electrónico que mantiene el punto máximo de operación del motor realizando los ajustes necesarios en fracciones de segundos. El montaje del VarioCam en un motor de seis cilindros se muestra en la Figura 1.35. Y no sólo este sistema está enfocado a dar mayor potencia, sino que también es amigable con el medio ambiente ya que realiza un diagnóstico a bordo de la unidad para dar monitoreo constante y detección de fallas en el escape y sistemas de inyección que pudieran provocar una falla.

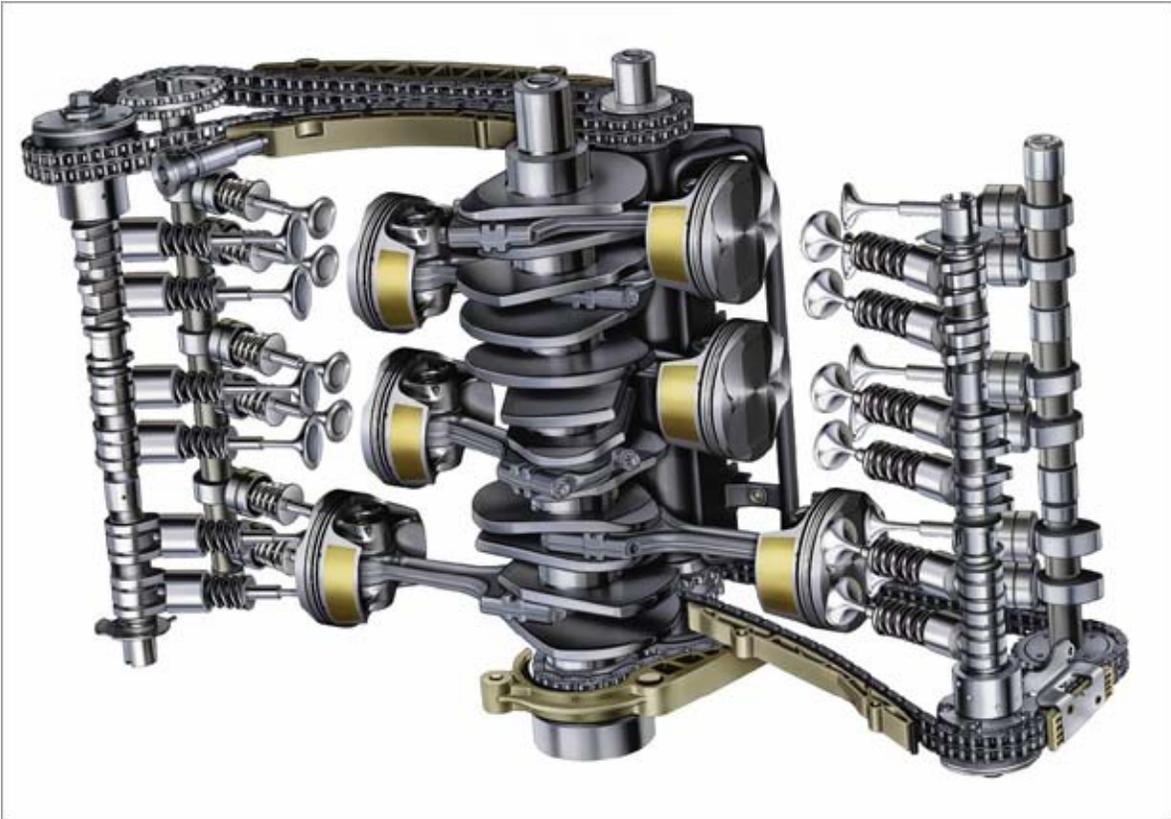


Figura 1. 35 Sistema de VarioCam Plus montado en un auto Caimán. [8]

### 1.3 MOTORES CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS.

Los autos híbridos son una realidad en este siglo, y se ha empezado la carrera por estandarizar qué tipo de energía es el que ocuparán dichos autos. Ford ha empezado con la línea del hidrógeno, el cual piensa terminar con las celdas de combustible.

El sistema que tiene Ford está basado en hidrógeno y está unido a un avanzado sistema de transmisión eléctrica llamada por Ford Sistema de Transmisión Híbrida (MHTS por sus siglas en inglés). El sistema está conectado uno con el otro para operar de manera independiente o en conjunto por medio de dos embragues hidráulicos. El motor hidráulico sirve como volante de inercia, motor de tracción y como alternador.

El sistema híbrido es conocido como un arreglo en paralelo, el cual significa que el auto puede operar ya sea con el motor primario o con el eléctrico, o ambos para una potencia mayor. Un sistema regenerativo de energía ocupa la fuerza del frenado que de otra manera sería energía desperdiciada, guardándola como 300 voltios en una batería refrigerada por aire para ser usada la próxima aceleración o cualquier circunstancia que demande potencia.

Cuando el conductor se detiene en un semáforo, el motor puede pararse para economizar combustible, pero cuando el acelerador es accionado, el motor eléctrico inicia al de hidrógeno, el embrague y la transmisión haciendo que el vehículo se mueva, todo esto en 300 milisegundos. [5]

Reducir los contaminantes y el consumo del combustible es uno de las mayores preocupaciones de los fabricantes de autos, ya que las nuevas legislaciones obligan a emisiones parcialmente nulas y los consumidores, por su parte, obligan a los fabricantes a un consumo de combustible menor para ayudar a su economía.

Argentina ya está preparándose para la escasez del crudo, y basta citar una noticia del diario El Clarín mostrando lo siguiente:

“Argentina está creando un nuevo negocio: la producción de biodiesel y otros combustibles alternativos. Prueba de ello son las inversiones que están en marcha o en estudio, y que sumarían US\$ 1.000 millones en los próximos años. Para 2010, según estimaciones privadas, el país contará con decenas de plantas capaces de producir 2,9 millones de toneladas de ese sustituto renovable del gasoil. El salto sería enorme respecto de las 60.000 toneladas actuales.”[9]

"Si se concretan todas las inversiones que están en estudio, Argentina podría producir en pocos años más de **3 millones de toneladas de biodiesel**, excediendo largamente las necesidades de su mercado. Las grandes cerealeras que ya largaron (Bunge, Dreyfus, Molinos, AGD, Vicentín y Glencore), más varias otras que guardan el as en la manga, piensan en ese mercado. Lo mismo que algunas petroleras como Repsol-YPF y varias empresas extranjeras que andan pululando en busca de su espacio. Tanta euforia tiene explicación. A partir de 2005, la Unión Europea exige también la mezcla con biocombustibles, en escalas ascendentes que comenzaron en 2% y llegarán a 5,75% en cuatro años. Sus necesidades de biodiesel podrían llegar a 19 millones de toneladas y se estima que con propia producción podrá cubrir 60% de esa demanda. El resto deberá importarlo. Ahí se anota Argentina.” [9]

#### **1.4 MOTORES DE CI Y SU RELACIÓN CON EL AMBIENTE.**

Los motores de combustión interna juegan un papel importante en el cuidado del medio ambiente, y esto se debe a que los motores ocupados en los vehículos son responsables de la mayoría de la contaminación del aire.

Plantas automotrices como Mercedes-Benz se preocupan por esos asuntos y han tomado medidas como iniciativas de crear autos de materiales no tan contaminantes y el desmantelamiento de los mismos para la separación de materiales. El mayor enfoque está dado en los sistemas de propulsión, entre ellos, la celda de combustible, diesel híbrido y combustibles “biogenic”, que son combustibles de desperdicio orgánico. Ahora Mercedes-Benz está enfocado en su nueva tecnología “BlueTec®” que está dirigida a reducir las emisiones de un motor diesel a los niveles de un motor de gasolina a un largo plazo.

Uno de los principales precursores del medio ambiente es el estado de California, y no sólo por su legislación actual. Se remonta a 1959 en donde se adopta un control de emisiones de hidrocarburo y de monóxido de carbono debido a la preocupación de secretarías de salud. Y al no ser eficientes al 100% los motores de combustión interna representan una fuente de contaminantes muy grande para los países con mayor población vehicular. El energético que se utiliza, aparte de ser no renovable, es muy contaminante.

Un combustible no basado en el petróleo lograría la independencia de los países del control que los productores de petróleo tienen al menos en términos de transporte. Desde los años setentas a

la fecha se ha estado investigando la forma cómo convertir al motor de combustión interna en una máquina eficiente, minimizando el consumo y maximizando los beneficios obtenidos. Los avances han sido muchos en estos años, pero cada vez lograr ahorros es más y más difícil. Podríamos decir sin mucho temor a equivocarnos que el motor de combustión como lo conocemos actualmente, tiene sus años contados. Hay muchos esfuerzos por encontrar sistemas capaces de utilizar combustibles alternos. Los más sencillos y actualmente disponibles utilizan el mismo modelo del motor de combustión interna pero en lugar de quemar gasolina utilizan algún otro producto como gas natural o mezclas de alcoholes. Hay también una gran inversión en modelos híbridos, algunos ya a la venta al público. Estos modelos utilizan un motor a gasolina o diesel pero haciendo equipo con baterías y motores eléctricos. Los modelos híbridos están considerados por muchos como el paso intermedio o la transición hacia la nueva tecnología, las celdas de combustible. Las celdas obtienen energía eléctrica del hidrógeno y su único residuo es vapor de agua. Son consideradas la fuente de energía móvil más limpia actualmente disponible y ya hay unidades de prueba en flotillas privadas y gubernamentales en ciudades avanzadas [10].

#### **1.4.1 HISTORIA SOBRE CONTAMINACIÓN.**

Aunque hay varios eventos documentados en donde los niveles de contaminantes fueron extremadamente elevados, tres episodios ocurrieron a mediados del siglo 20, y fueron muy bien documentados y fueron los primeros casos estudiados a detalles sobre la contaminación.

En diciembre de 1930, una inversión atmosférica llevó a provocar una gruesa neblina de contaminantes sobre “Meuse Valley” en Bélgica. Durante un periodo de 4 días, 60 muertes fueron atribuidas a la contaminación (10 veces más de lo normal), y varios individuos sufrieron de enfermedades respiratorias [11]. Los niveles de varios contaminantes fueron incrementados durante este episodio, con concentraciones elevadas de componentes de base de sulfuro.

En el segundo evento, en Octubre de 1948, similares circunstancias (inversión de temperatura en un área con dominante actividad industrial) llevó a un evento de contaminación del aire en “Donora, Pennsylvania”. Casi la mitad de los residentes del pueblo cayeron enfermos, con 20 muertes atribuidas al episodio.

Finalmente, tal vez el más dañino y conocido caso de contaminación ocurrió en Diciembre de 1952 en Londres, donde una inversión de temperaturas asociada con la elevada contaminación llevó a 4000 muertes durante este episodio, y otras 8000 muertes ocurridas en los meses subsecuentes como consecuencia de la acumulación de contaminantes a los que fueron expuestos.

Como en todos los casos, personas de la tercera edad y aquellos con problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares fueron los más propensos [11].

Éstos, y otros episodios similares proveen de clara evidencia de los efectos de los niveles altos de contaminación del aire, que generalmente ocurren cuando los contaminantes son concentrados en una neblina a una baja altura debido a condiciones atmosféricas. Un caso en México es el valle de México, en donde al estar rodeado de montañas, se crea un efecto invernadero en donde los contaminantes cubren el valle y las montañas evitan la salida de los mismos al no haber una circulación libre del viento. Ya en el siglo 21 los niveles de contaminación como los mostrados en los ejemplos pasados son rara vez vistos en países desarrollados o en desarrollo. [11]

Como se comentó en los párrafos anteriores, la contaminación del aire puede provocar la muerte como caso extremo. Es por eso que el uso eficiente de máquinas y motores de automóvil es necesario para la existencia de un vehículo de uso individual para la transportación de las personas.

Al incrementar la eficiencia del ciclo térmico de un motor, se aumenta su eficiencia. Esto significa que ocupa menos combustible para producir el mismo trabajo, y que se desecha una menor cantidad de contaminantes a la atmósfera. Pero si se logra reducir la temperatura del aire residual del escape del motor, se logra también evitar el calentamiento atmosférico. Es por eso que la idea de reciclar la energía del escape de un motor automotriz contribuye al ahorro económico en uso de combustible fósil, y a la reducción de contaminantes emitidos a la atmósfera.

## **1.5 PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.**

De acuerdo al inventario preliminar de emisiones correspondiente al año 1995 (del Instituto Nacional de Ecología) los automóviles constituyen la principal fuente de contaminación atmosférica en el Área Metropolitana de Monterrey, contribuyendo con, aproximadamente, un 71% de las emisiones totales. Un 88% de la contaminación generada por fuentes móviles es monóxido de carbono. [10]

En los motores de combustión interna de los automóviles, el oxígeno disponible para la oxidación del combustible está limitado por el volumen de aire que existe dentro de la cámara de combustión en el momento de la ignición. Una relación aire/combustible inadecuada, característica de autos mal afinados, da como resultado una combustión incompleta, y, por tanto, mayores emisiones de monóxido de carbono. La combinación de éstas dos circunstancias provoca altas emisiones de hidrocarburos.

Además de las emisiones contaminantes de escape en un vehículo, se presentan las emisiones evaporativas de hidrocarburos. Durante el llenado del tanque de combustible y en el sistema interno de almacenamiento y conducción de gasolina de un automóvil, se presentan fugas por la toma de gasolina, el carburador o las válvulas y conexiones de mangueras.

Los motores de combustión interna aún no son tan eficientes como se creó que podrían serlo, y esto sin tomar en cuenta el residuo que no sólo emana como calor, sino como contaminante a la atmósfera.

La justificación de esta tesis está más que sustentada en la proyección de las empresas automotrices, un ejemplo claro es el discurso del Doctor Göschel. “No hay duda que el automóvil seguirá siendo un gran éxito. La movilidad no es sólo algo fundamental para las necesidades del hombre, sino también para las economías modernas”. [12]

En el mediano plazo, una incrementada demanda mundial de combustible, recurso fósiles finitos y restricciones técnicas en cuotas de producciones anuales elevarán el precio del petróleo. Al mismo tiempo, nuestros consumidores esperan no sólo un avance en confort y seguridad pero también esperan una mejora en el desempeño, mejor dinámica y experiencia de manejo del

vehículo. Estas expectativas no son sólo confinadas al sector Premium, sino al mercado de alto volumen e incremento de clientes como China lo ha demostrado.

La respuesta del Grupo BMW a este conflicto es: incrementar la eficiencia de la dinámica. Nuestros consumidores esperan un BMW con características claves asociadas con la marca, como son deportivos y dinámicas de manejo distintivas combinadas con un moderado consumo de combustible. “A largo plazo, nos estamos moviendo a un hidrógeno producido de manera limpia. Mientras tanto, nuestros clientes esperan que continuemos con el desarrollo de ambos vehículos mencionado.” [12]

El grupo BMW no se centra en soluciones técnicas individuales sino que se centra en cuatro áreas de la tecnología para producir dinámicas eficientes.

1. Incremento en la optimización del motor de combustión interna.
2. Manejo de energía dentro del vehículo.
3. Construcción de vehículos ligeros.
4. Mejora en aerodinámica.

“Este enfoque permite a BMW flexibilidad para lograr la mejor eficiente combinación de con diferente tipo de tecnología.” [12]

Para resumir: Hay más de una manera.

Dejando elaborar en mayor detalle dos áreas de tecnología: optimización del motor de combustión interna y manejo de energía.

El motor de combustión interna seguirá como la fuente principal de propulsión para vehículos. Una mayor optimización de la conversión de energía de la termodinámica primaria en los motores. A favor del incremento del motor está la eficiencia intermedia de cada incremento. Inclusive pequeños pasos en la optimización exhortan a un gran incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la saturación de combustible en el motor.” [12]

Es por eso que BMW optó por usar el sistema Valvetronic el cual actúa de manera eficiente en cuanto al uso de combustible, sin agregar peso o componentes extras.

Por este motivo se justifica el hecho de elaborar dicha tesis al identificar la necesidad de métodos para incrementar la eficiencia del ciclo termodinámico de un motor de combustión interna. Y aunado a esto disminuir la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

## **1.6 OBJETIVOS.**

Debido a la necesidad de investigar maneras de incrementar la eficiencia del uso de combustibles para los vehículos del mañana, se plantea el objetivo general de incrementar la eficiencia de un motor de combustión interna de gasolina por medio de la regeneración de energía en forma de calor. Se tendrán dos objetivos específicos:

- 1) Utilizar la energía calorífica que sale por el escape del motor y calentar la mezcla de aire dentro de la cámara de combustión, existiendo dos métodos:

- a) Recirculando los gases de salida dentro de la cámara de combustión.
  - b) Calentando los gases de entrada limpios a la cámara de combustión por medio de los gases de salida.
- 2) Utilizar parte de la energía calorífica de los gases de salida del motor para elevar la temperatura del combustible.

## **1.7 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.**

Para poder llevar a cabo los objetivos planteados, se seguirán los siguientes pasos para el éxito de esta tesis.

- Revisión bibliográfica. Estado del arte de la tecnología de motores de Combustión Interna.
- Familiarización con los motores de gasolina y sus diferencias con los de diesel.
- Familiarización con el ciclo Otto real y teórico.
- Mostrar necesidades actuales de compañías automotrices.
- Usar aplicaciones Java de instituciones educativas avaladas en este tipo de investigación y ver los resultados arrojados con las variables modificadas como la temperatura de entrada.

## **1.8 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.**

En este primer capítulo se han cubierto los antecedentes más relevantes de los motores de combustión interna así como el estado del arte, de los estados de los motores de cada una de las marcas y los planes de algunas de ellas. Así como la justificación.

En el capítulo dos se aborda el análisis teórico y práctico de los ciclos termodinámicos del motor de combustión interna. Se verán los diferentes ciclos y el ciclo Otto el cual es el que rige en los automóviles actuales.

En el capítulo tres se habla de los fundamentos de los motores de combustión interna, sus componentes y sus funciones, así como su importancia. Se muestra cada parte con sus características como pueden ser material o aplicación.

Siguiendo en el capítulo cuatro revisamos los tipos de combustibles usados en los motores y los factores involucrados en la misma, tipos de encendidos o cámaras de combustión, nuevos combustibles en uso y en fase inicial para el combustible del futuro. Sus beneficios y sus desventajas de cada uno de ellos.

En el capítulo cinco se describe la integración de las ideas presentadas en cada capítulo y las necesidades ya notorias, así como una propuesta para aprovechar la energía calorífica de salida para su reutilización en el ciclo térmico. Esto se logra proponiendo mejoras en conceptos como el

tiempo de encendido, la marcha a bajas y altas RPMs y sus ventajas y desventajas de cada propuesta. Pruebas en simuladores que orientan el cause de la investigación y datos actuales de investigadores. Se obtiene la eficiencia teórica termodinámica basado en los datos deseados y calculados.

En el capítulo seis se dan conclusiones y recomendaciones para el estudio en taller con diferentes motores y factores que se deben de medir para obtener el ciclo real. Se muestra el resultado obtenido del diseño propuesto y la elección del mejor de ellos basado en análisis teórico y matemático, así como lógica actual que permite o impide la elección de dicho sistema.

## **2. TERMODINÁMICA BÁSICA DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

La Termodinámica es la disciplina de la Física que trata de la transformación del calor en otras formas de energía, y constituye la base para medir la eficiencia de los motores, estudia los intercambios de energía en forma de calor que se llevan a cabo entre un sistema y otro.

Los términos calor y temperatura se escuchan con frecuencia, y es importante diferenciarlos. El calor es generalmente descrito como una cantidad medible, mientras que la temperatura se refiere al nivel de intensidad.

La temperatura de un cuerpo está determinada por el promedio de la energía cinética desarrollada por cada molécula. El calor está determinado por el total de energía cinética de las moléculas. La temperatura está medida en grados con un termómetro, mientras que el calor es medido en unidades Térmicas Inglesas (Btu) , en calorías o en joules.

Una caloría es la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua un grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Un Btu es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ). Un Btu es equivalente a 252 calorías.

### **2.1 CALOR.**

A principios de 1840 se creía que el *calor* era una propiedad de los cuerpos que podía transferirse de uno a otro como lo hacen los fluidos, al cual se le denominaba “calórico”. Y aunque esta teoría es obsoleta, aún se sigue hablando del término "calor", a pesar de que en realidad se trata

únicamente de la transferencia de energía: Si se trasfiere energía de un objeto a otro por medio de una diferencia de temperatura entre ellos, esta transferencia será referida como *flujo de calor*. La cantidad de energía se le denomina calor.

### 2.1.1 CALOR ESPECÍFICO.

Se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado. En el Sistema Internacional de unidades, el calor específico se expresa en julios por kilogramo y kelvin; en ocasiones también se expresa en calorías por gramo y grado centígrado.

De acuerdo con la ley formulada por los químicos franceses Pierre Louis Dulong y Alexis Therese Petit, para la mayoría de los elementos sólidos, el producto de su calor específico por su masa atómica es una cantidad aproximadamente constante. Si se expande un gas mientras se le suministra calor, hacen falta más calorías para aumentar su temperatura en un grado, porque parte de la energía suministrada se consume en el trabajo de expansión. Por eso, el calor específico a presión constante es mayor que el calor específico a volumen constante.

En la Tabla 2. 1 se puede ver cual es el calor específico de cada sustancia.

SUSTANCIA	CALOR ESPECÍFICO (A 25 °C)	
	cal/g °C	J/kg K
Aire	0,24	1.010
Aluminio	0,22	900
Alcohol etílico	0,59	2.450
Oro	0,03	130
Granito	0,19	800
Hierro	0,11	450
Aceite de oliva	0,47	2.000
Plata	0,06	240
Acero inoxidable	0,12	510
Agua (líquida)	1	4.180
Madera	0,42	1.760

Tabla 2. 1 Calor específico de sustancias varias. [14]

### 2.1.2 TRANSMISIÓN DE CALOR.

Para hacer uso eficiente del calor, es importante saber cómo es transferido de un punto a otro, y cómo su movimiento se puede detener. El calor debe siempre fluir de un objeto caliente a uno frío. El grado de transferencia del flujo de calor depende de la diferencia de temperatura entre los objetos.

La transmisión del calor depende en gran parte del material conductor. El calor puede ser conducido efectivamente a través de sólidos, gases o líquidos. Pero la transmisión de calor puede ser realizada únicamente por conducción, convección o radiación.

**Conducción.-** En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. Un ejemplo claro de conducción se muestra en la Figura 2.1. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.



Figura 2. 1 Ejemplo de Conducción. Imagen modificada de [teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA)

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

**Convección.-** Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. La convección es usada en calentadores solares, como se muestra en la Figura 2.2, donde el fluido con mayor temperatura asciende y es utilizado o almacenado. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

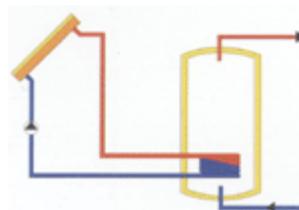


Figura 2. 2 Ejemplo de un calentador solar usando convección. Imagen modificada de [www.uc.cl/quimica](http://www.uc.cl/quimica)

**Radiación.-** La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que

pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. La radiación es usada en torres solares, como la mostrada en la Figura 2.3, donde la energía calorífica es usada para accionar unas turbinas las cuales producen electricidad.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. La captación de energía por medio de radiación es común para obtener energía calorífica del sol.

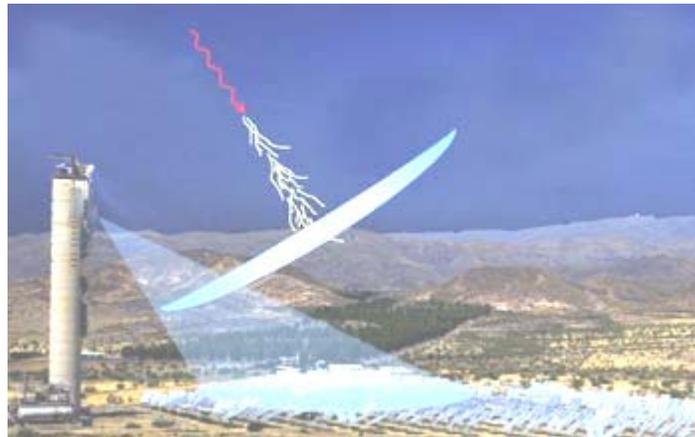


Figura 2. 3 Direccinamiento de la radiación a celdas solares. Imagen tomada de [editorial.cda.ulpgc.es/ambiente](http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente)

El uso de energías renovables no es sólo enfocado al ahorro monetario, sino también al ahorro de contaminantes que son los residuos de energía que desperdiciamos día a día. Es por eso que diferentes organizaciones tanto gubernamentales como privadas se han dado a la tarea de investigar la forma de utilizar la energía sobrante de procesos térmicos para aumentar la eficiencia de las máquinas.

En el caso de las compañías automotrices, el principal problema ahora es el alto consumo de combustibles para obtener una potencia considerable. Desde hace más de una década, los motores de los automóviles han sufrido varias modificaciones, y una muy notoria es el cambio de 8 cilindros, a el uso de 4 cilindros. Esto es debido al incremento del precio del petróleo, y por ende de la gasolina.

Es por eso que la industria automotriz se ha dado a la tarea de realizar investigaciones en la búsqueda de nuevos combustibles que sean más baratos y que abunden en el planeta. Pero esto tiene igual una contraparte, que la quema de combustibles seguirá, y no se aumenta en ese cambio un aumento de eficiencia.

Dos gases idénticos a temperaturas diferentes están separados por una barrera aislante, mostrado en la Figura 2.4. El gas más caliente contiene moléculas con mayor energía cinética media que las moléculas del gas más frío. Cuando se juntan los gases, la mezcla alcanza una temperatura de equilibrio situada entre las dos temperaturas iniciales. El calor fluye del gas más caliente al más frío hasta que la energía cinética media de sus respectivas moléculas se iguala.

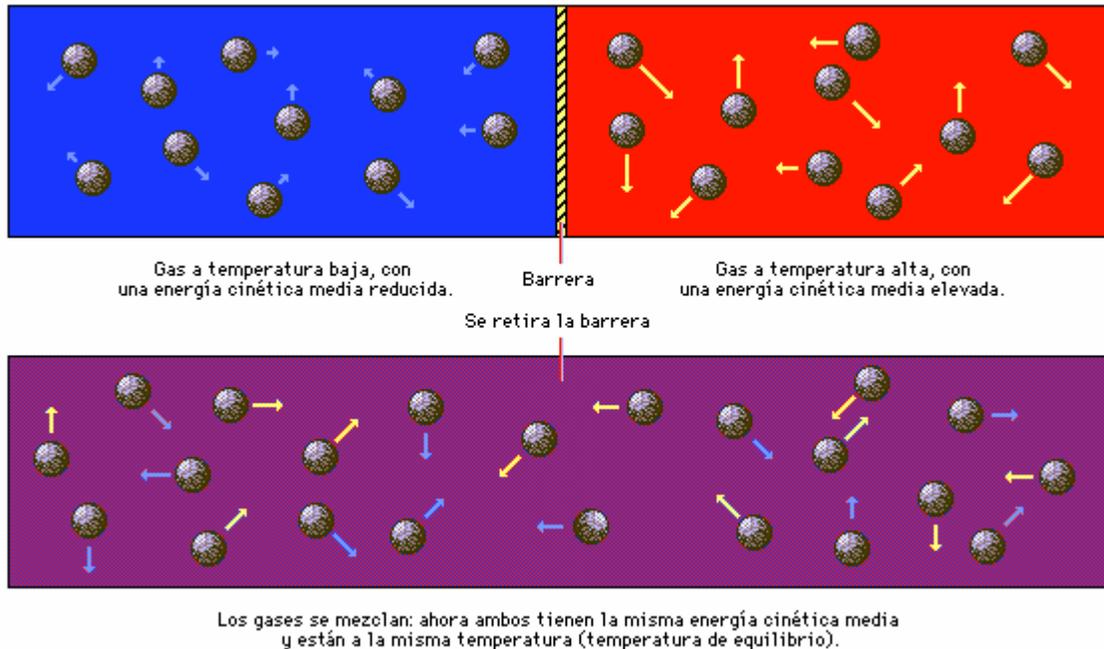


Figura 2. 4 Muestra de gases a diferentes temperaturas y su intercambio térmico. Imagen tomada de [editorial.cda.ulpgc.es/ambiente](http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente)

Otra opción es, y una de las más económicas para el usuario, reciclar la energía calorífica que es desprendida a la atmósfera. De esta manera no sólo se busca la forma de consumir menos combustible, sino de mandar menos contaminantes a la atmósfera, y de evitar de igual manera el sobrecalentamiento global y efectos invernadero. Enfoquémonos a lo que es un motor de gasolina. La gasolina es la fuente primaria de energía de un motor. Al mezclarla con oxígeno, se genera la fuerza necesaria para mover partes móviles y entregar una fuerza de giro excedente, que será distribuido a las ruedas del vehículo. Un motor de pistones, alimentado con gasolina, no es capaz de obtener una eficiencia térmica del 100%. Esto quiere decir que no utiliza todo el calor para transformarlo en fuerza motriz.

Un motor de gasolina derrocha mucha energía. En la Figura 2.5 se muestra un esquema de las pérdidas que se tiene durante el ciclo de trabajo de un motor. Del calor total disponible que se obtiene para quemar el combustible, se tiene pérdidas en: radiador (28% aprox.), block o paredes del motor (10% aprox.), pérdidas de calor por el escape (32 % aprox.). Dejando únicamente un 30% de la energía calorífica restante para transformarla en movimiento, y parte de está, disiparla a la atmósfera.

La popularidad de la gasolina es la aceleración que presenta, a diferencia de otros combustibles como el Diesel, que arrojan mejor eficiencia térmica, pero su energía cinética es menor.

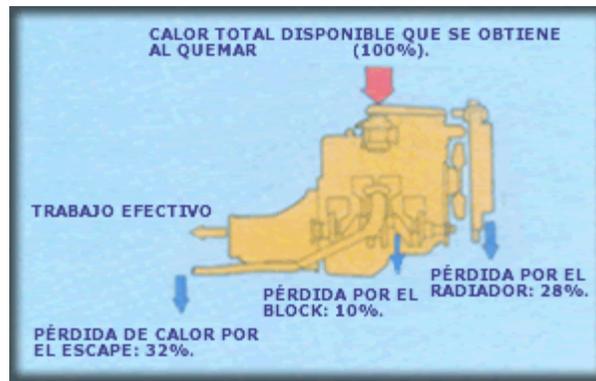


Figura 2. 5 Muestra de pérdidas en un motor. Imagen tomada de [www.todomotores.cl/mecanica/](http://www.todomotores.cl/mecanica/)

Hay que aclarar que no todos los motores presentan la misma eficiencia, algunos presentan mayor eficiencia que otros, y esto depende de su relación de compresión (Presión) y los materiales que se utilizan para su construcción. Se considera un motor más eficiente aquel que utilice mejor porcentaje de calor para producir una fuerza motriz. Un ejemplo claro es el uso del radiador. El uso del radiador es para disipar el calor excedente y evitar así que el monoblock se deforme. Pero si está sobre refrigerado, entonces se le retira mayor calor que el adecuado, por lo que el motor opera a temperaturas menores y su fuerza motriz decae.

Con lo dicho anteriormente, es lógico pensar que un motor de combustión interna debe calentarse previamente hasta alcanzar su temperatura ideal de combustión antes de demandarle una fuerza motriz. De lo contrario, la eficiencia será muy baja.

## 2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR DENTRO DEL CILINDRO.

Los termocoples son comúnmente usados para medir temperaturas, debido a que son robustos y comparativamente baratos, aunque su señal es pequeña ( $40 \mu\text{V/K}$ ).

La medición de dicha temperatura es usada para determinar la mezcla de aire-combustible y determinar el tiempo de ignición de la chispa.

Si se realiza una comparación entre los materiales usados, el aluminio tiene ciertas ventajas sobre el acero fundido, ya que el aluminio se enfría más rápido, por lo que existe una menor probabilidad de ignición espontánea. Sin embargo el aluminio soporta menores temperaturas. Si el intercambio de temperaturas no fuese realizado, se obtendría una ignición adelantada en un tiempo no deseado, produciendo un golpeteo en el motor y aunado a esto un incremento en la temperatura del bloque de hierro fundido, el cual se expandiría y provocaría el paro definitivo del motor.

Existen tres razones principales por la cual se debe de enfriar el motor: primeramente, para promover una alta eficiencia, segundo para asegurar una combustión adecuada, y tercero para asegurar un funcionamiento mecánico confiable. Entre más fría es la superficie de la cámara de combustión, mayor volumen de masa de aire y combustible pueden ser atrapados en el cilindro. Esto nos dice que entre mayor sea la eficiencia volumétrica, mayor la potencia de salida del motor.

Es debido a esto por lo que el motor debe de estar cambiando de temperatura para poder realizar su ciclo de trabajo correctamente. Si un motor aumenta su temperatura, aumenta su eficiencia, pero también se corre el riesgo de sobrecalentarlo y dañar diferentes componentes.

### 2.2.1 MODELO DE GAS IDEAL.

La mezcla de gases que se usa en un motor de combustión interna (oxígeno, nitrógeno, vapor de combustible, bióxido de carbono, vapor de agua, etc.) pueden ser tratados como gases ideales. Se pueden encontrar varias formas de expresar la ley de un gas ideal:

$$pV = mRT = m \frac{R'}{M} T = nR'T \quad (2.1)$$

donde p es la presión, V el volumen, m la masa de gas, R la constante de gas para la mezcla, T la temperatura, R' la constante de gas universal, M el peso molecular y n el número de moles.

Gas	ppm por volumen	Peso molecular	Fracción Molar	Radio molar
O <sub>2</sub>	209500	31.998	0.2095	1
N <sub>3</sub>	780900	28.012	0.7905	3.773
Ar	9300	39.948		
CO <sub>2</sub>	300	44.009		
Aire	1000000	28.962	1,0000	4.773

Tabla 2. 2 Principales compuestos del aire seco. [13]

En una combustión, el oxígeno es el componente reactivo del aire. Usualmente se clasifica como aire a la mezcla de 21 por ciento de oxígeno y 79 por ciento de gases inertes tomados como nitrógeno (usualmente llamado nitrógeno atmosférico o aparente). Por cada mole de oxígeno en el aire, hay:

$$\frac{1 - 0.2095}{0.2095} = 3.773$$

moles de nitrógeno atmosférico. El radio molar del N<sub>3</sub> es de 3.773, el peso molecular del aire se obtiene de la Tabla 2.2 con un valor de 28.962, usualmente aproximado por 29. Debido a que el nitrógeno atmosférico contiene trazas de otras especies, su peso molecular es diferente realmente al del nitrógeno puro, como se muestra en las siguientes dos relaciones.

$$\text{Peso molecular: } M = \frac{1}{n} \sum_i n_i M_i = \sum_i x'_i M_i \quad (2.2)$$

$$M_{aN_2} = \frac{28.962 - 0.2095 \times 31.998}{1 - 0.2095} = 28.16 \quad (2.3)$$

Esto da como resultado que el Nitrógeno tenga un peso molecular de 28.16 con todo e impurezas, Obteniendo así un valor molecular cercano a 29 para el aire.

## 2.3 LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA.

A este principio se le llama "equilibrio térmico". Si el sistema A y B están a la misma temperatura, y B está a la misma temperatura que un tercer sistema C, entonces A y C están a la misma temperatura. Este concepto fundamental, aún siendo ampliamente aceptado, no fue formulado hasta después de haberse enunciado las otras tres leyes.

## 2.4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

A esta ley se le conoce también como principio de la conservación de energía, ésta establece que si se realiza trabajo sobre un sistema, la energía interna del sistema variará. Esta diferencia de energías se le denomina calor.

Matemáticamente se expresa como [13]:

$$dE = \delta Q + \delta W \quad (2.4)$$

Y considerando las expresiones para las energías interna, cinética y potencial, finalmente se escribe:

$$\left( u + \frac{1}{2} \frac{V^2}{g_c} + \frac{gZ}{g_c} \right)_2 - \left( u + \frac{1}{2} \frac{V^2}{g_c} + \frac{gZ}{g_c} \right)_1 = {}_1q_2 + {}_1w_2 \quad (2.5)$$

### 2.4.1 CONSERVACIÓN DE LA MASA.

La masa que fluye dentro de un volumen de control específico debe ser igual a la masa que sale de dicho volumen de control; si esto no sucede, la masa dentro del volumen de control debe cambiar. Esto se enuncia como sigue [14]: *El cambio de la masa dentro de un volumen de control es igual a la masa que entra menos la masa que sale.*

Si  $\dot{m}$  es el símbolo que representa la rapidez del flujo de masa.

$$\dot{m}_{en} = \sum_{en} \dot{m} \quad (2.6)$$

El subíndice "en" significa entrada "s" significa salida. Ahora el balance de masa del volumen de control (VC) queda simplemente:

$$\frac{\partial m_{VC}}{\partial t} = \dot{m}_{en} - \dot{m}_s = \sum_{en} \dot{m} - \sum_s \dot{m} \quad (2.7)$$

## 2.4.2 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

La masa que fluye dentro del volumen de control porta energía y lo mismo sucede con la masa que sale de él. La ganancia neta de energía entre la entrada y la salida debe ser igual al cambio de energía dentro del volumen de control. La conservación se enuncia:

*“El cambio de la energía dentro del volumen de control es igual al transporte neto de energía al volumen de control más el calor transferido y el trabajo realizado sobre el volumen de control.”*

## 2.4.3 APLICACIONES DEL FLUJO EN ESTADO ESTABLE.

Un estado estable es aquel en el cual los valores del intercambio de energía suman cero. El estado estable sólo se alcanza cuando no existe energía disponible en un campo de energía definido. Entre los aparatos que operan en estado estable y no producen ni consumen trabajo están los intercambiadores de calor, los condensadores, los generadores de vapor, los difusores y las toberas, las válvulas de estrangulamiento y las tuberías. La mayoría experimenta cambios de la energía potencial muy pequeños.

Flujo de masa de entrada es igual a flujo de masa de salida.

$$\dot{m}_{en} = \dot{m}_s \quad (2.8)$$

y la Energía:

$$\left( h + \frac{1}{2} \frac{V^2}{g_c} \right)_{en} \dot{m}_{en} + \dot{Q}_{VC} = \left( h + \frac{1}{2} \frac{V^2}{g_c} \right)_s \dot{m}_s \quad (2.9)$$

El número de entradas y de salidas depende del equipo, así como de la localización del volumen de control.

Un intercambiador de calor se emplea para transferir la energía de un fluido a otro. Este puede ser de un gas a un líquido. No hay interacciones de trabajo con los alrededores y, normalmente, los cambios de las energías potencial y cinética son muy pequeños. El calor transferido se calcula por diferencia de entalpías y el análisis depende fuertemente de la elección del volumen de control. En la Figura 2.1 se muestra dos opciones, ésta se hará en función de la información deseada y de la conocida.

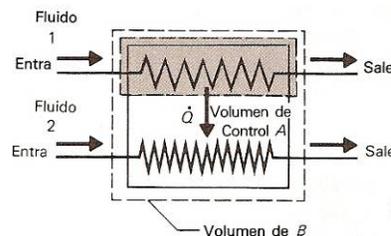


Figura 2. 6 Intercambiador de Calor. Imagen modificada de [14]

Para el volumen de control A,

$$q = h_{1,s} - h_{1,en} \quad (2.10)$$

y para el volumen de control B,

$$\dot{m}_1 h_{1,en} + \dot{m}_2 h_{2,en} = \dot{m}_1 h_{1,s} + \dot{m}_2 h_{2,s} \quad (2.11)$$

## 2.5 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

En forma concisa expresa: la cantidad de entropía de cualquier sistema aislado termodinámicamente tiende a incrementarse con el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo.

La segunda ley de la termodinámica afirma que las diferencias entre sistemas en contacto tienden a igualarse. Las diferencias de presión, densidad y, particularmente, las diferencias de temperatura tienden a ecualizarse. Esto significa que un sistema aislado llegará a alcanzar una temperatura uniforme. Una máquina térmica es aquella que provee de trabajo eficaz gracias a la diferencia de temperaturas de dos cuerpos. Dado que cualquier máquina termodinámica requiere una diferencia de temperatura, se deriva pues que ningún trabajo útil puede extraerse de un sistema aislado en equilibrio térmico, esto es, requerirá de la alimentación de energía del exterior.

Nicolas Léonard Sadi Carnot publicó en 1824 una Reflexione sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia. En este se propuso que: “La potencia motriz del calor es independiente de los agentes que intervienen para realizarla; su cantidad se fija únicamente por la temperatura de los cuerpos entre los que se hace, en definitiva, el transporte calórico.”

Este principio permite determinar el máximo rendimiento de una máquina térmica en función de las temperaturas de su fuente caliente y de su fuente fría, rendimiento que oscila entre 8 % y 30 % según el concepto de máquina.

### 2.5.1 ENTROPÍA.

Es el desorden microscópico de un sistema descrito por una propiedad del sistema.

La entropía se le conoce como el desorden de un sistema, pero en términos más sencillos, es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo.

La entropía física, en su forma clásica, es definida por la ecuación:

$$ds = \frac{\delta Q}{T} \quad (2.12)$$

o simplemente, cuando no se produce variación de temperatura o un proceso isotérmico como se le conoce:

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{T} \quad (2.13)$$

donde  $S$  es la entropía,  $Q_{1 \rightarrow 2}$  la cantidad de calor intercambiado y  $T$  la temperatura en grados Kelvin.

El significado de esta ecuación es el siguiente:

“Cuando un sistema termodinámico pasa del estado 1 al estado 2, el cambio en su entropía es igual al cambio en su cantidad de calor dividido por su temperatura.”

Las unidades de la entropía en el Sistema Internacional es el J/K (o Clausius) definido como la variación de entropía que experimenta un sistema cuando absorbe el calor de 1 Julio (unidad) a la temperatura de 1 Kelvin.

Sólo se pueden calcular variaciones de entropía. Para calcular la entropía de un sistema es necesario fijar la entropía del mismo en un estado determinado. La Tercera ley de la termodinámica fija un estado estándar para sistemas puros: en el cero absoluto (0 K) la entropía es nula.

### 2.5.2 ENTALPÍA.

Es la suma de la energía interna  $U$  y el producto de la presión y el volumen:

$$H = U + PV \quad (2.14)$$

La entalpía es pues una propiedad extensiva cuyo valor queda completamente determinado una vez fijado el estado del sistema. La entalpía específica  $h$ , se obtiene dividiendo la entalpía por la masa total:

$$h = \frac{H}{M} \quad (2.15)$$

La entalpía se puede aplicar únicamente a cuerpos a presión constante. La entalpía de un sistema no puede ser medida directamente, pero su variación si. La variación de entalpía se define mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H = H_{final} - H_{inicial} \quad (2.16)$$

La mayor utilidad de la entalpía se obtiene para analizar reacciones que incrementan el volumen del sistema cuando la presión se mantiene constante por contacto con el entorno, provocando que se realice un trabajo mecánico sobre el entorno y una pérdida de energía, esto es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

En este caso, la variación de entalpía se puede expresar del siguiente modo:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (2.17)$$

## 2.6 TERCERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

Propuesta por Walther Nernst, expresa que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos.

## 2.7 EFICIENCIA TÉRMICA.

Un concepto importante en la ingeniería térmica es el de rendimiento. El rendimiento de una máquina térmica que funciona entre un punto frío  $Q_f$  y uno caliente  $Q_c$  se define como:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_c} \quad (2.18)$$

donde  $W$  es el trabajo proporcionado por la máquina.

Carnot logró demostrar que el rendimiento máximo de una máquina es proporcional a la diferencia de temperatura de sus puntos:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (2.19)$$

donde  $T_f$  y  $T_c$  son las temperaturas del punto frío y punto caliente medidas en Kelvin.

## 2.8 ENERGÍA INTERNA.

La energía interna se define como  $U$ . La energía interna específica  $u=U/m$  para cualquier sustancia simple y compresible se encuentra en función de dos variables independientes cualquiera, de acuerdo con el postulado de estado [15].

La energía interna de un sistema es la suma de las energías que la componen, o sea, es el resultado de la energía cinética de las moléculas que lo componen, de sus energías de rotación y vibración, además de la energía potencial intermolecular debida a las fuerzas de tipo gravitatorio, electromagnético y nuclear. Esto nos queda claro al ver que al aumentar la temperatura de un sistema, sin variar nada más, varía su energía interna. El solo hecho de que dos objetos posean la misma masa no significa que posean la misma energía interna, esto se aprecia en la Figura 2.7.

Con esto podemos concluir que, si el sistema no posee ningún tipo de energía nuclear, química o de cualquier tipo ajena al exterior, ésta debe mantenerse con la misma energía hasta que se le aplique una.

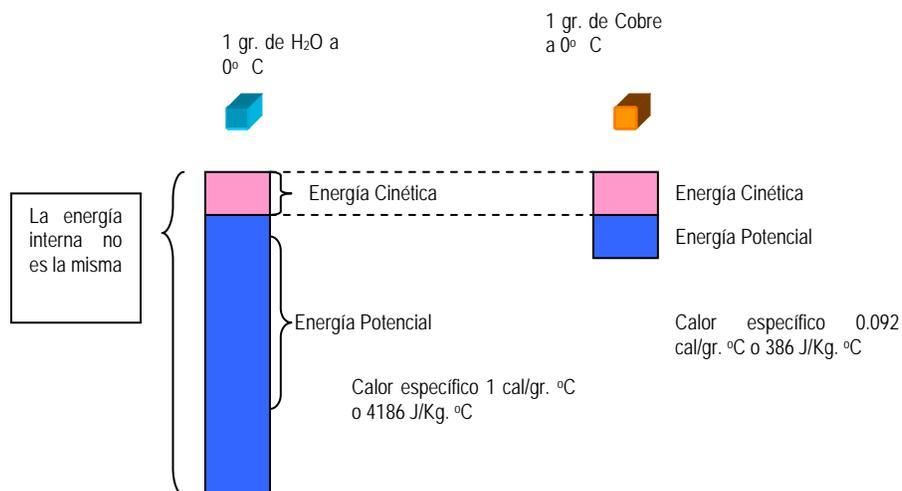


Figura 2. 7 Ejemplo de Energía Interna. Dibujo modificado de [15]

## 2.9 CALOR ESPECÍFICO.

El calor específico o capacidad calorífica específica,  $c$ , de una sustancia es la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura en una unidad por unidad de masa, sin cambio de estado:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.20)$$

En donde  $c$  es el calor específico,  $Q$  es la cantidad de calor,  $m$  la masa y  $\Delta T$  la diferencia entre las temperaturas inicial y final.[16]

Su unidad en el Sistema Internacional (SI) es el joule por kilogramo y kelvin, cuya notación es J/(kg·K).

## 2.10 CICLOS TÉRMICOS Y DE COMBUSTIÓN.

Un ciclo térmico es el proceso que tiene lugar en dispositivos destinados a la obtención de un trabajo a partir de dos fuentes de calor con diferentes temperaturas, o, de igual manera, de hacer pasar la fuente de calor de una a otra mediante la aportación de Trabajo.

Los procesos que regresan a su estado inicial reciben el nombre de *procesos cíclicos*. La máquina ideal de ignición por chispa se compone de procesos adiabáticos y a volumen constante. El combustible y el aire se comprimen adiabáticamente y la combustión consecuente se idealiza como un calentamiento a volumen constante. Los gases calientes se expanden adiabáticamente, realizando un trabajo. Entonces, los gases al escape disipan calor a volumen constante. [17]

Debido a la terminología que se va a usar en este capítulo, es útil describir brevemente lo que estos procesos representan:

- a) Isotérmico: Proceso que ocurre a temperatura constante ( $T_i = T_f$ )
- b) Isobárico: Proceso que ocurre a presión constante ( $P_i = P_f$ )
- c) Isocórico: Proceso que ocurre a volumen constante ( $V_i = V_f$ )
- d) Isentálpico: Proceso que ocurre a entalpía constante ( $H_i = H_f$ )
- e) Isentrópico: Proceso que ocurre a entropía constante ( $S_i = S_f$ )

### 2.10.1 CARNOT.

Una máquina que realiza un trabajo por medio de una transferencia de temperaturas se le llama máquina de Carnot. Trabaja absorbiendo una cantidad de calor  $Q_1$  de la fuente de alta temperatura y cede un calor  $Q_2$  a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. La máquina de Carnot es la idea original de un motor de combustión interna, en donde por medio de una fuente de energía (gasolina) se obtiene un trabajo (movimiento).

En la Figura 2.8 se muestra que la máquina absorbe calor a partir de la Temperatura  $T_1$  que es la caliente y cede calor a la fría con temperatura  $T_2$ , produciendo así trabajo.

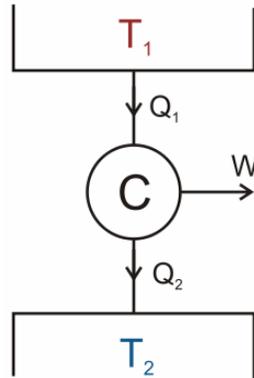


Figura 2. 8 Máquina de Carnot esquematizada. Dibujo modificado de wikipedia.com/carnot

En la Figura 2.9 se puede observar el ciclo de Carnot en función de la temperatura y la entropía de forma general.

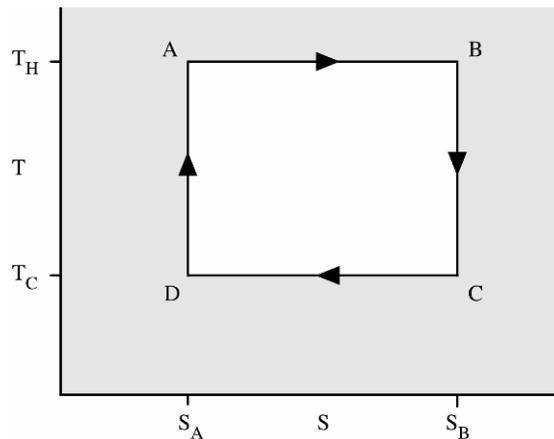


Figura 2. 9 Ciclo de Carnot en función de Temperatura y Entropía. Dibujo modificado de wikipedia.com/carnot basado en [17]

El teorema de Carnot se basa en dos puntos:

1. *No puede existir una máquina térmica que funcionando entre dos fuentes térmicas dadas tenga mayor rendimiento que una de Carnot.*

$$\eta_{\text{otramáquina}} \leq \eta_{\text{Carnot}} \quad (2.21)$$

Este teorema se debe de cumplir, o de lo contrario se contradice la segunda ley de la termodinámica. Ya que la máquina de Carnot es un ciclo reversible, por lo tanto, no puede existir una máquina con una mayor eficiencia teórica.

2. *Dos máquinas reversibles operando entre las mismas fuentes térmicas tienen el mismo rendimiento.*

$$\eta_1 = \eta_2 \quad (2.22)$$

Si no se cumpliera este teorema, entonces se diría que dos máquinas reversibles tendrían diferentes eficiencias y eso no es posible, ya que si siguen el mismo procedimiento, las ecuaciones aplican de la misma manera por lo que tendrían la misma eficiencia.

El ciclo de Carnot consta de cuatro etapas, con dos isotermas, y dos isobaras, tal como se muestra en la Figura 2.10.

1. *Expansión isoterma* (1  $\rightarrow$  2): Se parte que el gas se encuentra al mínimo volumen del ciclo y a temperatura  $T_1$  de la fuente caliente. En este estado se transfiere calor por el cuerpo desde la fuente de temperatura  $T_1$ , provocando que el gas se expanda. Al expandirse, el gas se enfría debido a que su presión baja, pero absorbe calor de  $T_1$  y mantiene su temperatura constante. Como se trata de un gas ideal, al no cambiar la temperatura tampoco lo hace su energía interna (véase sección 2.8, energía interna), y despreciando los cambios en la energía potencial y la cinética, a partir de la 1ª ley de la termodinámica se observa que todo el calor transferido es convertido en trabajo:

$$\begin{aligned} Q_{12} &> 0; \\ U_{12} &= 0 \\ 0 &= U_{12} = Q_{12} + W_{12} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Como el proceso es efectivamente reversible, la entropía aumentará

$$S_{12} = \frac{Q_{12}}{T_1} > 0 \quad (2.24)$$

2. *Expansión adiabática* (2  $\rightarrow$  3): La expansión de la isoterma termina sin realizarse intercambio de calor. En este punto el sistema se aislará térmicamente y no habrá transferencia de calor al exterior.

Esta expansión adiabática hace que el gas se enfríe hasta alcanzar exactamente la temperatura  $T_2$  en el momento en que el gas alcanza su máximo volumen. Al enfriarse disminuye su energía interna, con lo que utilizando un razonamiento análogo al anterior proceso:

$$\begin{aligned} Q_{23} &= 0; \\ U_{23} < 0 &\Rightarrow U_{23} = W_{23} < 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

*Y como no hay transferencia de calor, el valor de la entropía se mantiene.*

$$S_{23} = 0$$

3. *Compresión isoterma* (3  $\rightarrow$  4): La fuente de calor con temperatura  $T_2$  se pone en contacto con el sistema y el gas comienza a comprimirse, pero no aumenta su temperatura porque ese calor que gana, lo va cediendo a la fuente fría. Es así como no cambia su temperatura y tampoco lo hace la energía interna, y el intercambio de calor implica que hay un trabajo realizado sobre el sistema:

$$\begin{aligned}
 Q_{34} < 0; \\
 U_{34} = 0 \Rightarrow 0 = U_{34} = Q_{34} + W_{34} \Rightarrow W_{34} = -Q_{34} \Rightarrow W_{34} > 0
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

Al ser el calor negativo, significa un decremento de la entropía:

$$\begin{aligned}
 Q_{41} &= 0; \\
 U_{41} > 0 \Rightarrow U_{41} = W_{41} > 0 \\
 \text{Al ser el calor negativo, la entropía disminuye:}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

$$S_{34} = \frac{Q_{34}}{T_2} < 0$$

4. *Compresión adiabática* (4 → 1): El sistema evoluciona al estar aislado térmicamente, comprimiéndose y aumentando su temperatura hasta llegar al estado inicial. La energía interna aumenta y el calor es nulo, habiendo que comunicar un trabajo al sistema:

$$\begin{aligned}
 Q_{41} &= 0; \\
 U_{41} > 0 \Rightarrow U_{41} = W_{41} > 0
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

*Y como no hay transferencia de calor, el valor de la entropía se mantiene.*

$$S_{41} = 0$$

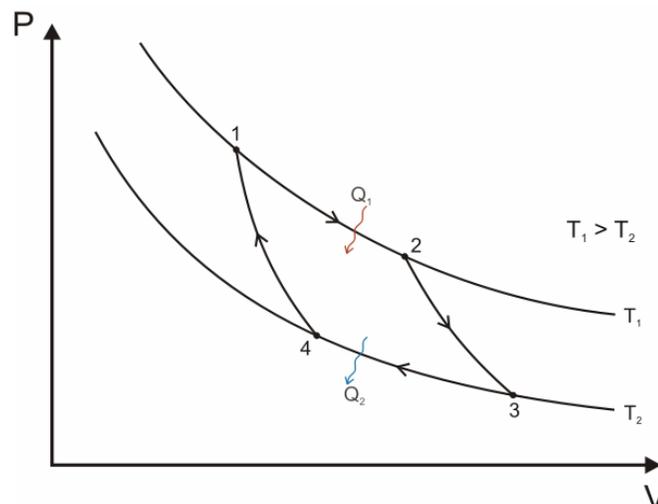


Figura 2. 10 Ciclo de Carnot en función de Presión y Volumen. Imagen modificada de wikipedia.com/carnot basada en [17]

### 2.10.2 OTTO.

El ciclo Otto es el ciclo ocupado por los motores de combustión interna en su mayoría. Su característica principal es que es un proceso en el cual la combustión permanece a una presión casi constante, esto debido a que el pistón se desliza hacia abajo mientras se realiza. Su gráfica P-V se muestra en la Figura 2.11.

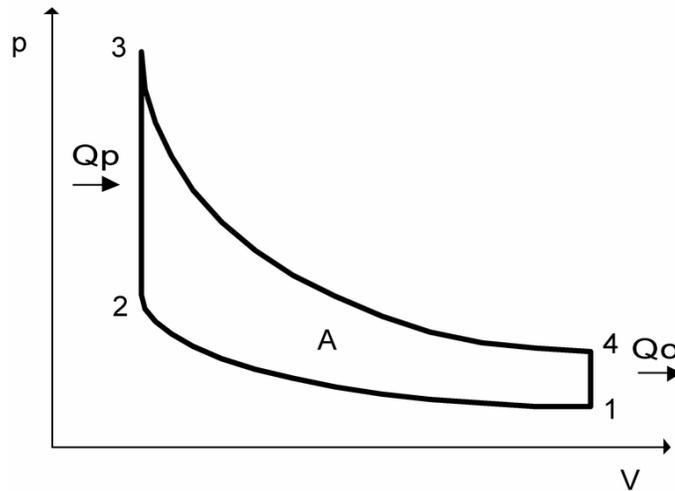


Figura 2. 11 Ciclo Otto en función de Presión y Volumen. Imagen modificada de [17]

Son usados dos tipos de motores con este ciclo, el de cuatro tiempos y el de dos. Este último contamina más y es menos eficiente, pero es pequeño y usado en podadoras y otros equipos pequeños.

La eficiencia del ciclo Otto de aire estándar ideal se encuentra definida por:

$$\begin{aligned}\eta_o &= 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|} \\ &= 1 - \frac{mc_v(T_4 - T_1)}{mc_v(T_3 - T_2)}\end{aligned}\quad (2.29)$$

para los procesos isentrópicos,

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_2}\quad (2.30)$$

y si se sustituye la relación de temperaturas en la ecuación:

$$\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = (r_v)^{\gamma-1}\quad (2.31)$$

donde  $r_v$  es la relación de compresión  $V_4/V_3$ .

La eficiencia aumentará únicamente si la relación de compresión aumenta, esto en cuanto al ciclo teórico se refiere. Es por eso que se trabajara y plantearan las propuestas para aumentar la eficiencia del ciclo real por medio de recuperación de calor.

En un motor de dos tiempos, se tienen dos fases en un tiempo, el primero es de admisión y de compresión, y posteriormente en el segundo ciclo sigue la expansión y escape de gases.

Por ser más eficiente el de cuatro tiempos es el más cotidiano y el adecuado para esta investigación. Sus cuatro tiempos son: Admisión, Compresión, Expansión, Escape.

1.- *Admisión*: Una mezcla de aire y combustible (gasolina) se inyecta a la cámara de combustión. El pistón al mismo tiempo es forzado a descender succionando la mezcla y llenando el cilindro del pistón. Al terminar su descenso el pistón, la válvula de admisión se cierra.

2.- *Compresión*: En la segunda fase, las válvulas permanecen cerradas y el pistón es forzado a subir comprimiendo así la mezcla (compresión de 10:1 normalmente). Al final de este ciclo se produce la chispa de la bujía que inicia la explosión en la cámara.

3.- *Expansión*: En este momento la energía de la combustión empuja al pistón hasta llegar al Punto Muerto Inferior (PMI). Este es el punto en que la energía térmica se transforma en energía mecánica y mueve el cigüeñal lo que posteriormente moverá al automóvil.

4.- *Escape*: En este punto se abre la válvula de salida dejando salir a los gases quemados y permitiendo al pistón llegar al Punto Muerto Superior (PMS). Preparándose así para comenzar el ciclo nuevamente.

### **2.10.2.1 Factores que afectan al ciclo Otto real.**

1.- *Admisión*: Si es de aspiración natural existe una pérdida de presión en el aire provocado por la válvula de entrada, filtros etc., lo que da una presión menor a la atmosférica. Esto disminuirá la potencia del motor.

2.- *Compresión*: Es adiabático, pero como la presión 1 es menor que lo esperado, por lo tanto esto afectará a la presión 2.

3.- *Expansión*: La realidad es que la flama no logra hacer una explosión inmediata, si esto fuera cierto, se tendría una explosión en tiempo 0. Al inicio de la combustión, se tiene un menor volumen que al final de la detonación de las últimas partículas de combustible. Además de que la teoría no considera la fricción del pistón sobre el cilindro.

4.- *Escape*: Al ser abierta la válvula de salida, se libera la presión, pero esto no ocurre en un tiempo 0, por lo que tarda un poco en bajar la presión. Algunos componentes que le afectan a ser liberada la presión son: el catalizador, múltiple de escape, ducto de escape, silenciador y válvula de salida). Cuando el pistón llega al punto muerto superior, la válvula de salida se cierra, lo que impide que todos los gases salgan y esto disminuye el rendimiento de la siguiente mezcla.

Es por esto que los motores reales no siguen al pie de la letra el ciclo Otto, ya que no pueden vaciar la presión en tiempo cero, ni ninguna de las demás consideraciones.

Es por esta razón que se deben de hacer algunas mejoras al ciclo, tales como:

1.- Abrir la válvula de admisión unos grados antes de que el pistón llegue al punto muerto superior. Así logrará aspirar el mayor volumen de aire posible desde que inicia la carrera hacia abajo del pistón. También se debe de atrasar el cerrado de la válvula de admisión ya que conforme el pistón desciende, la mezcla dentro adquiere una pequeña energía cinética que permite la admisión más allá del punto muerto inferior.

2.- Adelantar la chispa, si se adelanta el momento en que la chispa ocurre, la mezcla empieza a quemarse previamente y a tomar energía. Esto ocurriría un poco antes del punto 2 en la Figura 2.11. El adelanto de la chispa está en función de la velocidad y la carga del motor. A mayor velocidad, se puede adelantar la chispa. Esto nos acerca un poco a la realidad de tener una explosión a un volumen constante.

3.- Adelantar la apertura de salida, al hacer esto, se logra estar completamente abierta la válvula de salida para que en el punto 4 del a Figura 2.11 los gases logren escapar y se iguale así la presión interna del pistón con la del ambiente.

Con esto se logra una mayor eficiencia, ya que se acerca más al ciclo teórico. Al tener por un corto periodo abiertas ambas válvulas (de entrada y de salida), se logra un barrido del aire sucio por el aire limpio. La energía cinética de los gases quemados ayudan a la mezcla fresca a entrar, y con un mejor llenado, se obtiene una mejor presión de aire.

La realidad nos dicta que en los motores actuales únicamente es posible cambiar el momento de encendido de la bujía, esto para mejorar la combustión, pero la apertura y cierre de las válvulas no es dinámico. Aunque motores de mercedes Benz ya están modificando la carrera del pistón para variar la compresión.

### 2.10.3 DIESEL.

Un motor diesel es un motor de combustión interna en el cual la energía química del combustible es transformada en energía térmica de la explosión en el cilindro, en consecuencia de la auto-ignición del combustible dentro de la cámara de combustión debido a la compresión de aire. Esta energía es transformada en un trabajo mecánico. El ciclo P-V de un motor Diesel es muy diferente al de gasolina como se muestra en la Figura 2.12.

La eficiencia del motor diesel depende de la consistencia de explosiones y secuencia que ocurran en el mismo orden. [18]

Este ciclo es de una máquina de combustión interna. Se hablará de un ciclo ideal, ya que se tomará el aire estándar en un comportamiento ideal.

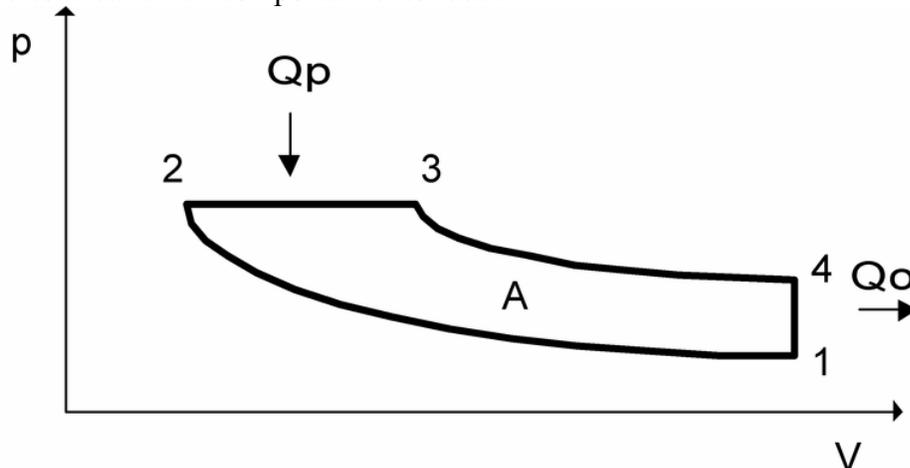


Figura 2. 12 Ciclo Diesel P-V. Imagen modificada de wikipedia.com/diesel basada en [18]

En el ciclo Diesel a diferencia del ciclo Otto, el combustible se mezcla al final de la etapa de compresión. El combustible se añade lentamente conforme la explosión ocurre a una presión constante de manera ideal. [19]

El ciclo de trabajo de un motor diesel puede ser realizado por un motor de cuatro o de dos pistones. El principio de funcionamiento de un motor de diesel de cuatro pistones se muestra en la figura 2.13 en el cual se muestra la gráfica de la presión de la cámara del pistón en cada tiempo y la posición de cada pistón tanto en su "TOP dead center" TDC (centro muerto superior) y su "bottom dead center" BDC (centro muerto inferior).

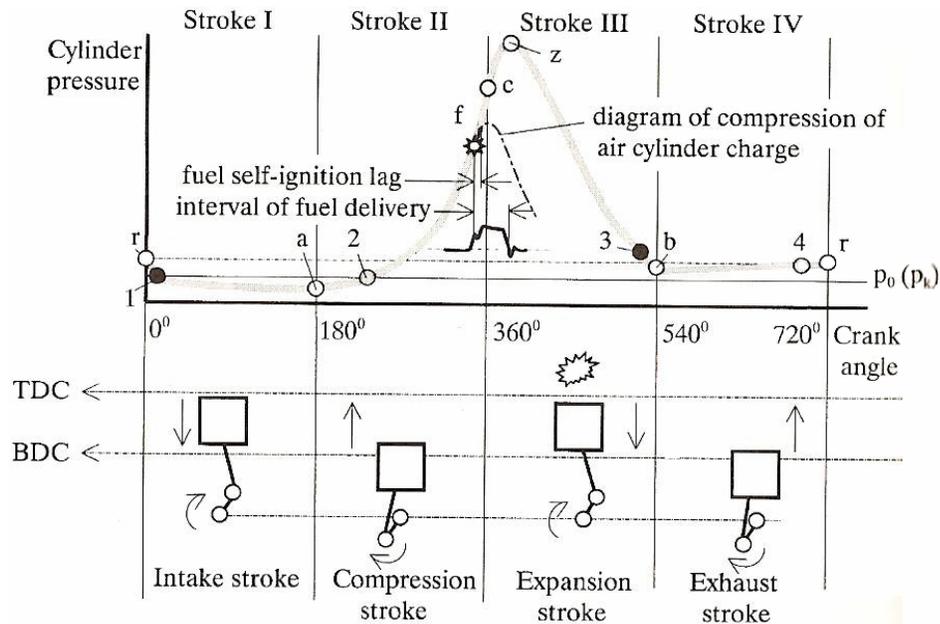


Figura 2. 13 Momentos reales de las etapas del ciclo Diesel. Figura modificada de [19]

El primer tiempo es la admisión de aire, en donde actúa del punto  $r$  al punto  $a$ , las válvulas se abren para recibir inspiración de aire fresco mientras que el pistón se encuentra en el punto superior TDC bajando hasta su punto inferior BDC.

Si el pistón bajara al mismo tiempo que la válvula de admisión se abriera dejando pasar el aire, esto significaría que se abriría por completo en la posición inferior de la carrera del pistón, por lo que al principio la válvula semiabierta ofrecería resistencia a la entrada del aire, es por eso que la apertura de la válvula de admisión de aire comienza un poco antes de que el pistón llegue a su posición superior mostrado en el punto  $r$  en la Figura 2.13, y el punto  $4$  muestra cuando la válvula comienza su apertura. Para mejorar el proceso, la válvula de salida debe estar completamente cerrada en el punto  $1$  que es un poco después del punto  $r$  que es cuando la presión dentro de la cámara de combustión es igual  $P_0$ .

El segundo tiempo es la compresión, en donde el pistón comprime el aire contenido en la cámara de combustión que va del punto  $a$  al punto  $c$ . Durante este trayecto las válvulas de entrada de aire y de salida se encuentran cerradas permitiendo así aumentar la presión y temperatura al disminuir el área.

En el punto  $f$ , cuando la temperatura del aire comprimido es suficiente para provocar que el combustible se prenda, se inyecta el combustible y después de una demora de ignición el

combustible se enciende provocando una explosión y aumento de presión que forzará al pistón a descender y así transmitir la fuerza motriz.

El tercer tiempo es la expansión, que va del punto *c* al punto *z* y terminando en el punto *b*. El tiempo *z* es el punto pico de presión del cilindro. Durante este proceso el combustible libera calor en forma de explosión, que resulta en la expansión del pistón e incremento de la presión. Este incremento de presión provoca la posición del pistón en el punto inferior BDC que provee la fuerza para operar el motor.

El cuarto tiempo es el escape, que va desde el punto *b* al punto *r* (el punto que se ve del lado derecho de la gráfica, el cual es el mismo que el de la izquierda). Durante este proceso el aire de la combustión es liberado por las válvulas de salida mientras éstas se abren. Para mejorar este proceso, la válvula de salida debe de estar completamente abierta al principio de la salida del aire en el punto *b*. El inicio de apertura de la válvula debe de comenzar antes, esto es el punto 3.

Los principios de funcionamiento del motor de dos tiempos se muestran en la figura 2.14 en donde el primer tiempo involucra la entrada de aire y el proceso de compresión. Durante el primer tiempo el pistón va desde el punto bajo (*d*) hasta el punto superior (*c*), y el aire es aspirado al cilindro del punto *d* al punto *a*, en este punto el pistón cierra la entrada de aire dentro del cilindro hasta llegar al punto medio superior. El proceso de compresión empieza en el punto *a*, y termina en el punto *c*. Durante este proceso la salida del pistón se cierra en el punto 2. En el punto *f*, cuando la temperatura del aire comprimido es lo suficientemente alta para que el combustible se encienda, se inyecta la gasolina y después de un retraso en la ignición, el combustible se enciende.

El segundo tiempo involucra la combustión/expansión y la salida del aire. Este tiempo comienza en el punto superior (*c*) y termina en el punto inferior (*d*). Su punto máximo de presión dentro de la cámara del pistón ocurre en el punto *z*, hasta que la ventana se abre en el punto *b* y termina de abrirse por completo en el punto *d*. La ventana de salida de aire ocurre en el punto 4. El punto 3 está diseñado para que la presión del cilindro en el punto 4 sea igual a la presión del aire de entrada  $p_k$ , y el gas de salida no fluya dentro del sistema de entrada de aire en el momento que la ventana de entrada de aire es abierta por el pistón.

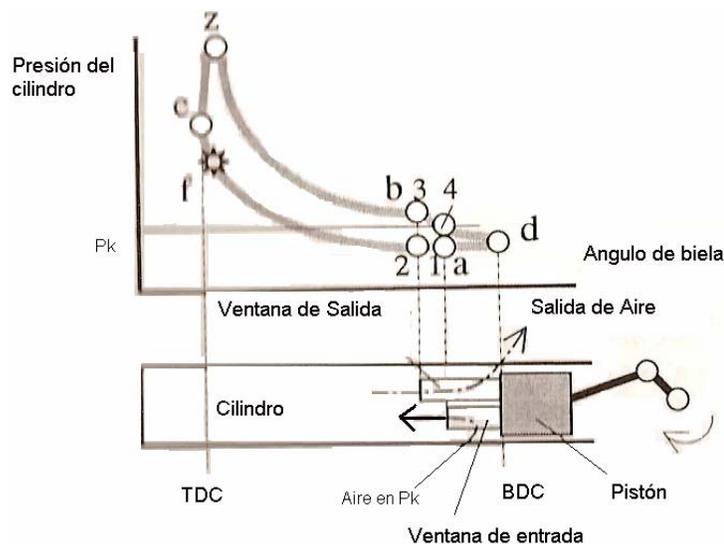


Figura 2. 14 Funcionamiento del motor Diesel de dos tiempos.

La eficiencia del ciclo Diesel es:

$$\eta_D = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (2.32)$$

Como  $k = C_p/C_v$ , se obtiene:

$$\eta_D = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \quad (2.33)$$

Si la relación de compresión  $V_1/V_2$  se representa por  $r_1$ , en tanto que la relación de expansión  $V_4/V_3$  se indica como  $r_2$ , entonces la eficiencia del ciclo de Diesel de aire es estándar ideal se escribe como:

$$\eta_D = 1 - \left(\frac{1}{r_1}\right)^{k-1} \frac{1 - (r_1/r_2)^k - 1}{k r_1/r_2 - 1} \quad (2.34)$$

La relación de compresión del ciclo Diesel siempre es mayor que la relación de expansión. Esto es muy interesante, ya que esto quiere decir que para una relación de compresión  $r$ , la máquina Diesel siempre tendrá una eficiencia menor que la máquina de Otto con la misma compresión  $r$ . Otro dato que cabe remarcar es que entre más se aproxima en una máquina diesel el valor de  $r_2$  al  $r_1$ , mayor similitud tendrá la máquina de Diesel con la de Otto en cuanto a eficiencias.

## 2.11 DIFERENCIA ENTRE CICLOS DE COMBUSTIÓN.

Los diferentes tipos de motores realizan procedimientos diferentes en sus fases. Algunos son isobáricos y otros adiabáticos. En la Tabla 2.3 se describen el ciclo térmico de cada uno de ellos.

Ciclo	Compresión	Adición de calor	Expansión	Repulsión de calor
Carnot	Adiabático	Isotérmico	Adiabático	Isotérmico
Otto	Adiabático	Isométrico	Adiabático	Isométrico
Diesel	Adiabático	Isobárico	Adiabático	Isométrico
Brayton	Adiabático	Isobárico	Adiabático	Isobárico
Stirling	Isotérmico	Isométrico	Isotérmico	Isométrico
Ericsson	Isotérmico	Isobárico	Isotérmico	Isobárico

Tabla 2. 3 Naturaleza de los cuatro procesos en diferentes motores. Tabla tomada de [18]

En este capítulo se aprendió sobre diferentes ciclos de combustión así como las ventajas y desventajas de los límites de temperatura. Por ejemplo, si se posee un motor con aleaciones de aluminio, es ligero, por lo que beneficia en el consumo del automóvil, pero su punto de fusión es bajo a comparación con el hierro por lo que no permite altas temperaturas dentro de su cámara de combustión.

Se aprendió también que si se adelanta el momento de encendido se logra quemar mayor cantidad de combustible inyectado, aumentando así la potencia mecánica. Y si se logra que la temperatura se disipe en su totalidad, se obtiene una mejor eficiencia.

### **3. FUNDAMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

Los motores de combustión interna son los más usados actualmente, es por eso la importancia de su estudio y de aumentar los índices de eficiencia así como reducir los índices de contaminación. Como se habló en el capítulo 1, los motores de combustión interna han ido mejorando y dieron un gran salto en su rendimiento y aumento de potencia. Pero el ciclo Otto es el mismo, la función básica de mezcla combustible-aire y la combustión de la misma no ha cambiado.

#### **3.1 COMPONENTES.**

Los motores se encuentran constituidos por más de una parte, que a su vez, pueden estar constituidos por más de un material, en la Figura 3.1 se muestran en diferentes colores los componentes usados para su construcción. Estos componentes agregan peso al motor, pero son vitales para su funcionamiento, optimización y seguridad del mismo.

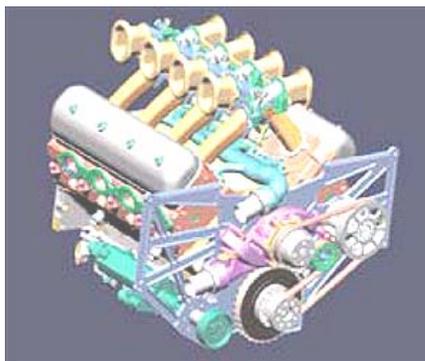


Figura 3. 1 Motor de combustión interna. Imagen tomada de [www.corvetteracing.com](http://www.corvetteracing.com)

### 3.1.1 MONOBLOQUE.

Cuerpo del motor que contiene los cilindros, fabricado de acero o aluminio. En motores enfriados por líquido refrigerante el monobloque, como el mostrado en la Figura 3.2, incluye conductos o camisa de agua que enfría al motor. En motores enfriados por aire el monobloque contiene en su parte exterior aletas disipadoras de calor. Un ejemplo claro de los motores enfriados por aire es en las motocicletas, se pueden observar sus aletas en la Figura 3.3 que sirven para evitar el sobrecalentamiento.

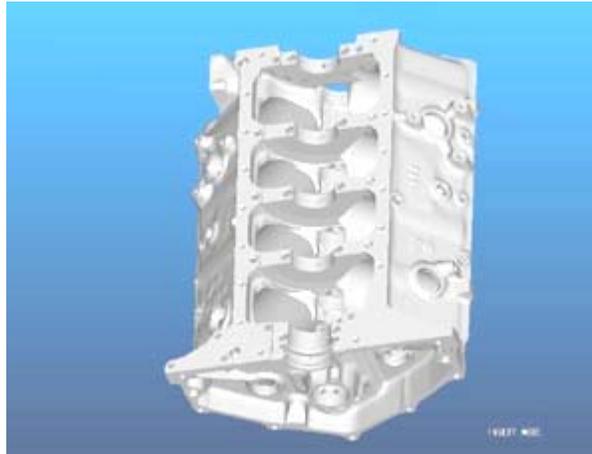


Figura 3. 2 Monobloque de un motor. Imagen modificada de [www.geomagic.com/en/assets/images/solutions](http://www.geomagic.com/en/assets/images/solutions)

Los motores enfriados por aire tienen la ventaja de no necesitar líquidos refrigerantes y además de que su diseño es sencillo, ya que no cuenta con venas o cavidades para líquidos que enfríen el motor, sino que cuentan con aletas disipadoras. Este tipo de motores casi siempre se encuentran en un lugar en donde reciba aire, de esta manera se enfría con el movimiento del vehículo motorizado.



Figura 3. 3 Bloque de motor enfriado por aire. Imagen modificada de [www.motoboard.com](http://www.motoboard.com)

La reducción de material o la densidad del mismo es un factor importante en la eficiencia neta de un automóvil. Esto se mostrará en el capítulo siguiente.

### 3.1.2 CABEZAL O CULATA.

Es la parte que tapa a los cilindros, usualmente contiene parte de la cámara de combustión. Se fabrica de hierro fundido o aluminio y se sujeta con pernos al bloque. En algunos motores la culata es una pieza con el bloque. La culata contiene a las bujías en motores de chispa y a los inyectores en motores de compresión, como los mostrados en la Figura 3.4 en su parte inferior y de perfil en la Figura 3.5 con doble árbol de levas montado. La mayoría de los motores modernos poseen en la culata las válvulas y el árbol de levas

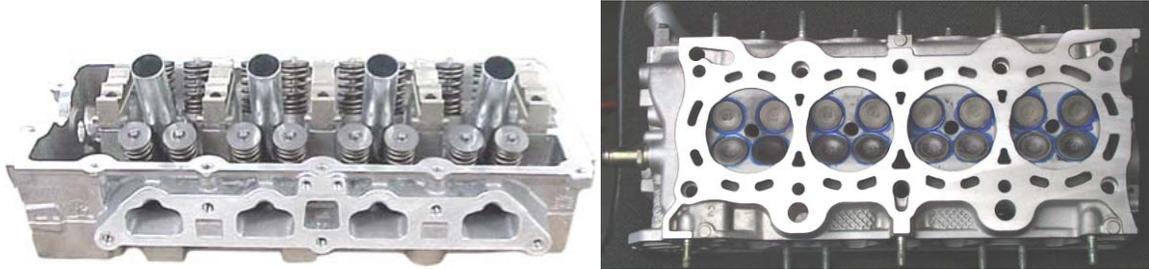


Figura 3. 4 Vista superior e inferior del cabezal. Imagen modificada de [www.dpracing.com](http://www.dpracing.com)



Figura 3. 5 Cabezal de un motor de 4 cilindros con doble árbol de levas. Imagen modificada de [www.cobbtuning.com](http://www.cobbtuning.com)

La polea dentada que se observa en la Figura 3.5 es la responsable de regular el giro del árbol de levas con respecto al cigüeñal con una relación de dos giros por cada vuelta.

### 3.1.3 ÁRBOL DE LEVAS.

Es un eje rotativo usado para empujar y abrir las válvulas en el tiempo adecuado del ciclo del motor, ya sea de manera directa o por medios mecánicos o un sistema hidráulico (bujes, balancín) La mayoría de los motores modernos posee uno o mas árbol de levas montado en la cabeza del motor. Los automóviles más viejos se encuentran a un costado y se mueven por medio de un balancín. El árbol de levas es de acero forjado o hierro fundido y son accionados por el cigüeñal ya sea por cadenas o poleas. En la Figura 3.6 se muestra un árbol de levas para 12 y para 8 válvulas

Para reducir el peso, algunos árboles de levas son fabricados de un eje hueco con las curvas del mismo añadidas de otro material.



Figura 3. 6 Árbol de Levas. Imagen modificada de [www.rectielx.es](http://www.rectielx.es) y [nitroshop.com.mx](http://nitroshop.com.mx)

El motor puede tener un solo árbol de levas o puede poseer doble árbol de levas como se muestra en la Figura 3.7. En el dibujo a la derecha la banda debe de estar en sincronía o de lo contrario no se realizará la apertura de las válvulas en el momento preciso.

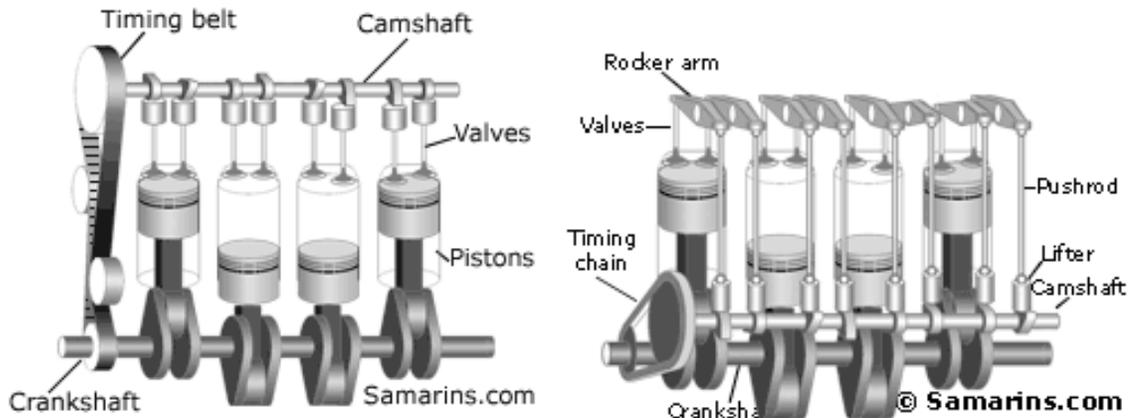


Figura 3. 7 Ejemplo de un solo árbol de levas.  
Dibujo tomado de [www.samarins.com](http://www.samarins.com)

En la Figura 3. 8 se puede ver un motor con 16 válvulas operado por dos árboles de levas.

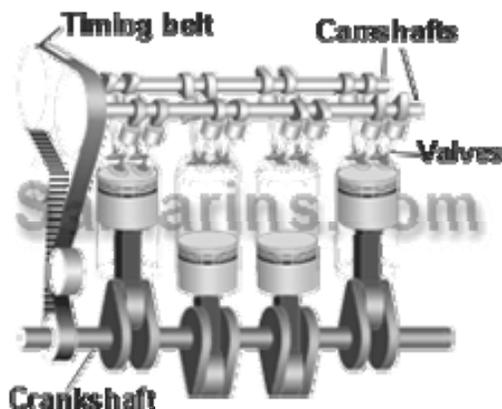


Figura 3. 8 Ejemplo de un árbol de levas doble.  
Dibujo tomado de [www.samarins.com](http://www.samarins.com)

### 3.1.4 CIGÜEÑAL.

Eje rotativo por el cual el motor proporciona la fuerza de salida del sistema. El cigüeñal como el mostrado en la Figura 3.9 tiene volantes de inercia que poseen para hacer una marcha más fluida y suavizarla y éste está conectado al bloque del motor con los cojinetes principales. Es rotado conforme los pistones suben y bajan girándolo en forma axial. La mayoría de los cigüeñales son de acero forjado aunque algunos son hechos de hierro fundido.



Figura 3. 9 Cigüeñal para motor de cuatro cilindros. Dibujo modificado de [www.samaris.com](http://www.samaris.com)

### 3.1.5 CARBURADOR.

Un tubo de venturi regula la cantidad adecuada de combustible dentro del paso del aire por medio de una diferencia de presiones. Por varias décadas era el método de inyección de todos los motores como el mostrado en la Figura 3.10 de un auto Ibiza. Es aún usado en motores pequeños de bajo costo como podadoras, sierra eléctrica, pero ya es inusual en automóviles modernos.



Figura 3. 10 Carburador de un automóvil. Imagen tomada de <http://mrpetah.homelinux.org/img/ibiza/carburador>

Los carburadores ya no son comunes en la actualidad y fueron desplazados por sistemas de inyección de gasolina electrónica que mejoran la mezcla gasolina aire por medio de sensores de flujo y de revoluciones del motor para obtener un mejor rendimiento de la máquina.

### 3.1.6 CONVERTIDOR CATALÍTICO.

Cámara montada en el tubo de escape conteniendo el material catalizador que por medio de una reacción química reduce las emisiones tóxicas al ambiente, su funcionamiento se muestra en la figura 3.11.

El catalizador de oxidación convierte los hidrocarburos y el monóxido de carbono contenidos en los gases de escape por combustión, en vapor de agua y dióxido de carbono. El oxígeno necesario para la oxidación se obtiene de un ajuste pobre de la mezcla ( $\lambda > 1$ ) o mediante la insuflación de aire en el sistema de escape delante del catalizador. Los óxidos de nitrógeno no pueden ser transformados por el catalizador de oxidación.

Por primera vez se utilizaron catalizadores de oxidación en vehículos en 1975 en EE.UU., para observar las disposiciones sobre gases de escape entonces válidas. [20]

Los catalizadores de tres vías es una parte integrante en motores de inyección en el tubo de admisión como también de inyección directa de gasolina. El catalizador de tres vías tiene la función de convertir los tres componentes contaminantes HC (hidrocarburos), CO (monóxido de carbono) y NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) producidos durante la combustión de la mezcla de aire y combustible, en componentes inofensivos. Como productos de salida se origina el H<sub>2</sub>O (vapores de agua), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y N<sub>2</sub> (nitrógeno).

Para que la cuota de conversión del catalizador de tres vías sea lo más alta posible para los tres componentes contaminantes, éstos deben encontrarse en un equilibrio químico. Eso exige una composición de la mezcla en la relación estequiométrica de  $\lambda = 1.0$ .

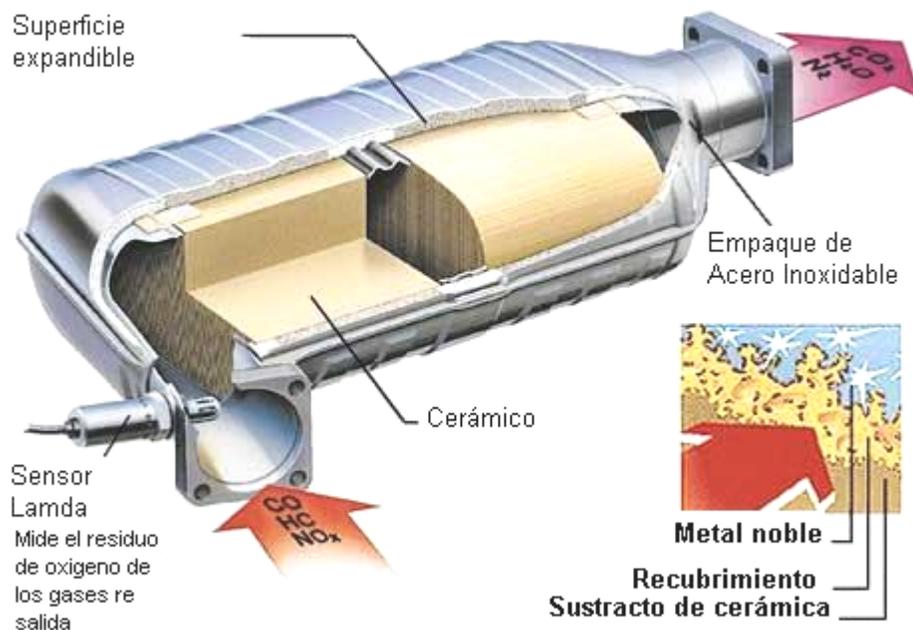


Figura 3. 11 Convertidor catalítico de un automóvil  
Esquema adaptado de [21]

Un catalizador de tres vías no iniciará su conversión hasta alcanzar una temperatura de 300 °C. Para cuotas de conversión reinan condiciones de 400 - 800 °C. Partiendo de las condiciones

térmicas necesarias para una alta transformación, es indispensable montar el catalizador de tres vías cerca del motor. Para el catalizador de tres vías se ha impuesto en lo esencial su disposición dividida con un catalizador previo cerca del motor y un catalizador debajo del piso. Los catalizadores dispuestos cerca del motor requieren una optimización del recubrimiento en el sentido de estabilidad respecto a altas temperaturas; los catalizadores bajo el piso, en el sentido “low Light off” (baja temperatura de arranque), así como una buena transformación de  $\text{NO}_x$ .

La definición dada por la universidad de Princeton es: “un convertidor que utiliza como catalizador platino-rodio para oxidar los contaminantes y el monóxido de carbón y transformarlos en dióxido de carbono y agua, es un dispositivo anticontaminante de un vehículo.”[22]

Con el catalizador de tres vías se puede impedir casi por completo la expulsión de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, con una distribución homogénea de la mezcla y una composición estequiométrica de ésta. Estas condiciones no se pueden mantener siempre, sin embargo, se puede partir de término medio una reducción de los contaminantes de más del 98%. [23]

### 3.1.7 CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

Es el volumen entre el punto más bajo del pistón y la cabeza del motor en donde ocurre la combustión, la misma que se muestra en la Figura 3.12 en una fotografía a un pistón en un cilindro transparente para pruebas de laboratorio. La cámara de combustión cambia constantemente de un mínimo que es cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior y un máximo que es cuando el pistón se aleja hasta llegar al punto muerto inferior. La relación entre su volumen máximo y mínimo se denomina relación de compresión.



Figura 3. 12 Cámara de combustión visible. Imagen modificada de [24]

Con la cámara de combustión se puede calcular el tamaño en litros del motor, obteniendo el volumen que existe dentro de cada una de las cámaras de combustión en el motor calculado en centímetros cúbicos (cc).

### 3.1.8 BIELA.

Es la que conecta el pistón con el cigüeñal, usualmente fabricada de acero o una aleación forjada. Aunque puede ser de aluminio en algunos motores pequeños. La longitud de la biela es importante para la relación de compresión y la velocidad en la que se desplaza del punto muerto superior al punto muerto inferior. En la Figura 3.13 se aprecia tres diferentes brazos de cigüeñal en donde se nota el cambio de velocidad, aceleración y posición que existe entre ellos. Una biela es de hierro fundido o aluminio como el mostrado en la Figura 3.14.

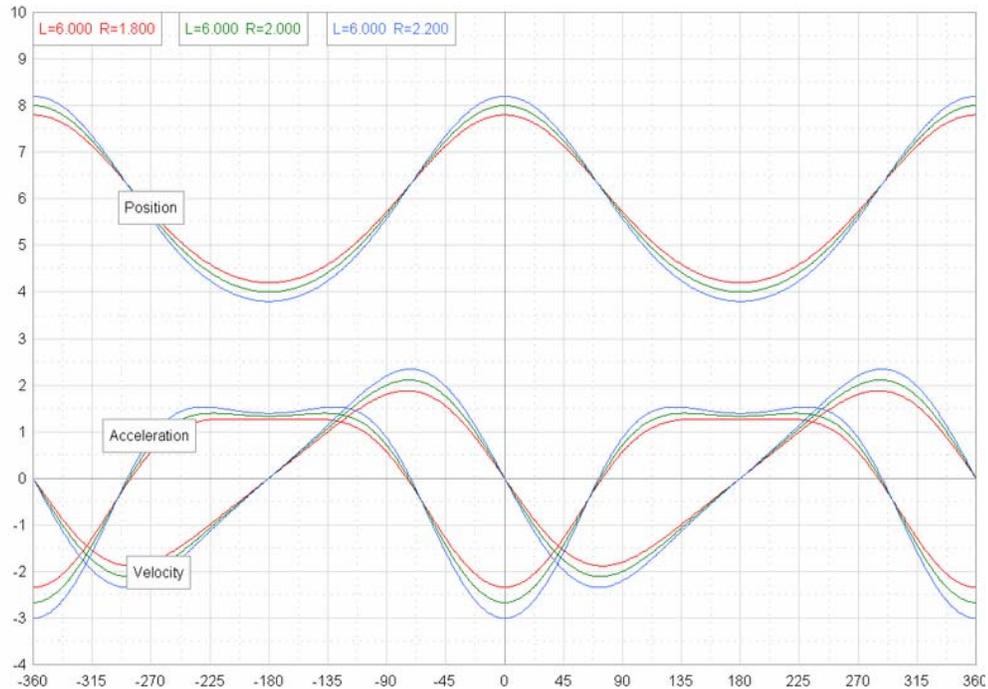


Figura 3. 13 Gráficas de posición, velocidad y aceleración de un pistón, en función de distintas relaciones de R (brazo de cigüeñal) y L (longitud de biela). Imagen tomada de [25]



Figura 3. 14 Biela. Imagen tomada de [25]

### 3.1.9 CASQUILLOS DE BIELA.

Sirven para reducir el desgaste y facilitar el movimiento debido a su superficie lisa, es por eso que son lisos como se observa en la Figura 3.15. Sirven para sujetar con firmeza el cigüeñal. Se les conoce también como cojinetes antifricción y su forma es dada por prensas hidráulicas dependiendo del diámetro del cigüeñal.



Figura 3. 15 Casquillos de biela o rodamiento. Imagen modificada de [26]

### 3.1.10 ALETAS DISIPADORAS DE CALOR.

Son pequeñas aletas que se encuentran en la parte exterior del motor en un motor enfriado por aire, así como se muestra en la Figura 3.16. Estas aletas ayudan a que el motor se enfríe por medio de conducción y convección térmica.



Figura 3. 16 Disipador de calor del motor de una motocicleta. Imagen modificada de [26]

Estas aletas son utilizadas para disipar el calor en motores en donde no se puede colocar o no es necesario un radiador de agua. Su función es únicamente esa, disipar el calor y arrojarlo a la atmósfera.

### 3.1.11 CÁRTER DEL MOTOR.

Parte inferior del motor o lateral (en el caso de los motores horizontales) que enjaula al cigüeñal y contiene aceite para lubricarlo. Dentro del mismo puede contener un sensor para medir el nivel de aceite, el cárter es de materiales livianos y con pliegues como en la Figura 3.17 para soportar pequeños golpes.



Figura 3. 17 Cárter de un Cadillac V8. Imagen tomada de [27]

### 3.1.12 CILINDROS.

Lugar por donde los pistones suben y bajan. Las paredes del cilindro son pulidas como se aprecia en la Figura 3.18 y poseen una alta dureza. Los cilindros pueden ser maquinados dentro del bloque del motor o una camisa de acero puede ser introducida en un bloque suave. En algunos motores las camisas de los cilindros son un poco porosas para retener una película de lubricante en las paredes. El diámetro y la carrera del cilindro tienen mucho que ver con la potencia que ofrece el motor, ya que está vinculado a la cantidad de mezcla aire/gasolina que puede alojar y luego explotar, generando así un movimiento mecánico.



Figura 3. 18 Camisa que hace la función de cilindro del motor. Imagen modificada de [28]

El cilindro es parte de la cámara de combustión de un motor, son las paredes por donde desliza el pistón.

### 3.1.13 MÚLTIPLE DE ESCAPE.

Sistema de tuberías que lleva los gases de salida fuera de los cilindros, usualmente de hierro fundido. Pueden ser de geometría variable para autos de alto rendimiento o sencillos, ambos mostrados en la Figura 3.19.



Figura 3. 19 Múltiple de escape completo para Honda Civic. Imagen modificada de [28]

### 3.1.14 COLA DE ESCAPE.

Sistema que remueve la mezcla de combustión de los cilindros. Consiste de un múltiple de escape que retiran los gases de escape del motor, un catalizador para reducir emisiones, un silenciador para reducir el ruido del motor y una tubería de salida para llevar los gases lejos del compartimiento de pasajeros. Este conjunto se muestra en la Figura 3.20.



Figura 3. 20 Escape con silenciador. Imagen modificada de [28]

Se le conoce comúnmente como escape, el cual es el que se asoma en la parte posterior del vehículo. Puede poseer uno o dos, dependiendo del automóvil.

### 3.1.15 VOLANTE DE INERCIA.

Masa rotativa con un gran momento de inercia conectada al cigüeñal del motor. El propósito del volante de inercia es almacenar energía y provocar que el motor continúe girando entre cada ciclo del pistón y suaviza la salida de velocidad del motor. Estos son pesados y un ejemplo de ello es la Figura 3.21. En motores de podadora la cuchilla funciona como volante de inercia.



Figura 3. 21 Volante de inercia. Imagen modificada de [www.reycomotor.com](http://www.reycomotor.com)

El tamaño del volante de inercia dependerá de la potencia del motor.

### 3.1.16 INYECTOR DE COMBUSTIBLE.

Inyector que pulveriza la gasolina con el aire de entrada en motores de encendido por chispa o dentro del motor en motores de compresión. En la mayoría de los motores se encuentra en la entrada de aire para su mezcla, aunque existen algunos en los que se ubica directamente en la cámara de combustión. En la Figura 3.22 se aprecia un inyector de la Marca Bosch.



Figura 3. 22 Inyector de combustible marca Bosch. Imagen modificada de [29]

Unos inyectores limpios (ver Figura 3.23) son indispensables para una combustión calculada conforme al sistema, si una de las boquillas se tapa entonces desviará el combustible o no inyectará la cantidad adecuada de combustible.



Figura 3. 23 Ejemplo de inyector limpio. Imagen tomada de [29]

### 3.1.17 BOMBA DE COMBUSTIBLE.

Bomba eléctrica o mecánica que proporciona el combustible desde el tanque principal al motor. Varios automóviles modernos tienen una bomba eléctrica sumergida en el motor de gasolina como el mostrado en la Figura 3.24. Los motores viejos no poseen bomba de gasolina y dependen de la gravedad para proporcionar el combustible.



Figura 3. 24 Bomba de gasolina Bosch. Imagen modificada de [30]

### 3.1.18 BUJÍA DE PRECALENTAMIENTO.

Pequeña resistencia eléctrica (Ver Figura 3.25) colocada dentro de la cámara de combustión interna de motores de compresión. Es usada para precalentar la cámara de combustión para que la explosión ocurra al primer arranque en un motor frío.



Figura 3. 25 Bujía de calentamiento para motores diesel. Imagen modificada de [recursos.cnice.mec.es](http://recursos.cnice.mec.es)

### 3.1.19 MÚLTIPLE DE ENTRADA.

Sistema de tuberías que entregan la entrada de aire a los cilindros, usualmente de metal, como el que se muestra en la Figura 3.26 o de materiales como el plástico u otro compuesto. En la mayoría de los motores de encendido por chispa, el combustible es inyectado el sistema de múltiple de entrada. **Algunos múltiples de entrada son calentados para fomentar la evaporación del combustible.** La tubería sola se le conoce como “runner”.



Figura 3. 26 Múltiple de entrada o “Manifold” de Honda. Imagen modificada de [31]

### 3.1.20 BOMBA DE ACEITE.

Distribuye el aceite requerido para la lubricación. Puede ser eléctrica o como en la mayoría de los motores mecánicamente accionada por el motor, la mostrada en la Figura 3.27 es mecánica. Algunos motores pequeños no poseen bomba de aceite y son lubricados sólo por su contacto con el depósito.



Figura 3. 27 Bomba de aceite para Honda Civic. Imagen modificada de [31]

### 3.1.21 PISTÓN.

Émbolo que se ajusta al interior de las paredes de un cilindro a través de unos aros flexibles llamados segmentos. Efectúa un movimiento alternativo, obligando al fluido que ocupa el cilindro a modificar su presión y volumen o transformando en movimiento el cambio de presión y volumen del fluido. La cabeza del pistón se le llama corona y sus paredes falda. Los pistones son fabricados de acero, aluminio y aleaciones como el mostrado en la Figura 3.28. En la Figura 3.29 el pistón tiene un recubrimiento cerámico.



Figura 3. 28 Pistón para motor de dos litros. Imagen modificada de [31]



Figura 3. 29 Pistón con recubrimiento de cerámica para MERCEDES-BENZ OM355. Imagen tomada de engine.en.alibaba.com

Los pistones de acero tienen una menor expansión térmica y por lo tanto unas tolerancias más ajustadas a la camisa del cilindro. Los de aluminio tienen menos masa de inercia.

### 3.1.22 ANILLOS DEL PISTÓN.

Anillos de metal que ajustan a la circunferencia del pistón y resbalan con el cilindro. En la parte cercana a la parte superior del pistón se encuentran dos anillos de compresión, aunque al primero se le conoce como anillo de fuego y al segundo como anillo rascador, estos se muestran en la Figura 3.30.



Figura 3. 30 Anillos de Fuego. Imagen modificada de engine.en.alibaba.com

El propósito de estos es de sellar el pistón y el cilindro y restringir los altos niveles de presión de gases que filtren pasando el pistón debajo de estos, se encuentra el anillo lubricante, que asiste en

la lubricación de las paredes y limpia el exceso de aceite para reducir la quema de aceite y reducir el consumo de aceite. El conjunto del mismo se muestra en la Figura 3.31 y se observan desensamblados para darles mantenimiento.



Figura 3. 31 Pistón, Pin y Anillos. Imagen modificada de [autospeed.drive.com.au](http://autospeed.drive.com.au)

### 3.1.23 TAQUÉS (“PUSH RODS”).

Enlace mecánico entre el árbol de levas y las válvulas. Unos son varillas como en la Figura 3.32.



Figura 3. 32 Taques para autos de carrera de aleación especial. Imagen modificada de [www.shadetreemechanic.com](http://www.shadetreemechanic.com)

Los taqués de varilla ya no son usados ya que ocupan espacio y fueron sustituidos por los taqués cortos (ver Figura 3.33)



Figura 3. 33 Taqués. Imagen modificada de [www.shadetreemechanic.com](http://www.shadetreemechanic.com)

### 3.1.24 RADIADOR.

Intercambiador de calor líquido-aire construido en forma de panal de abeja como se observa en la Figura 3.34 y es usado para remover el calor del líquido refrigerante. Comúnmente es colocado al frente del automóvil en donde el flujo del aire pasa a través del radiador y así ayudar a bajar la temperatura del líquido refrigerante.

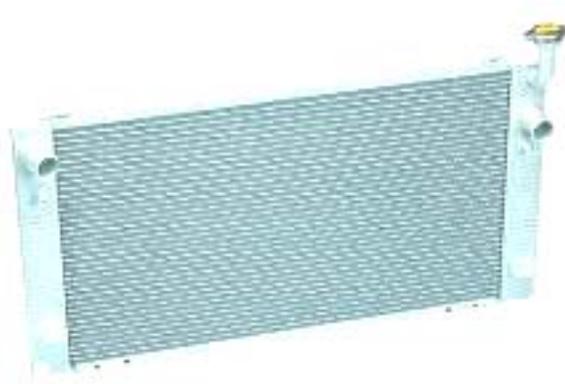


Figura 3. 34 Radiador de agua. Imagen modificada de [32]

### 3.1.25 BUJÍAS.

Dispositivo eléctrico encargado de producir una chispa a través de un electrodo en el interior de los cilindros en el momento adecuado con el fin de hacer prender la mezcla de aire y gasolina. Usualmente de metal rodeada de aislante cerámico. Algunos motores modernos tienen sensores de presión que mandan la información a la computadora del auto.

Las bujías pueden ser de uno de dos o de cuatro electrodos. El esquema de sus partes se describe en la Figura 3.35. Entre más electrodos tengan producen una chispa más segura e incrementa la posibilidad de una quema de combustible total. En motores viejos se les coloca un extensor de longitud a las bujías, esto para que la chispa sea producida más abajo y se queme antes la mezcla.

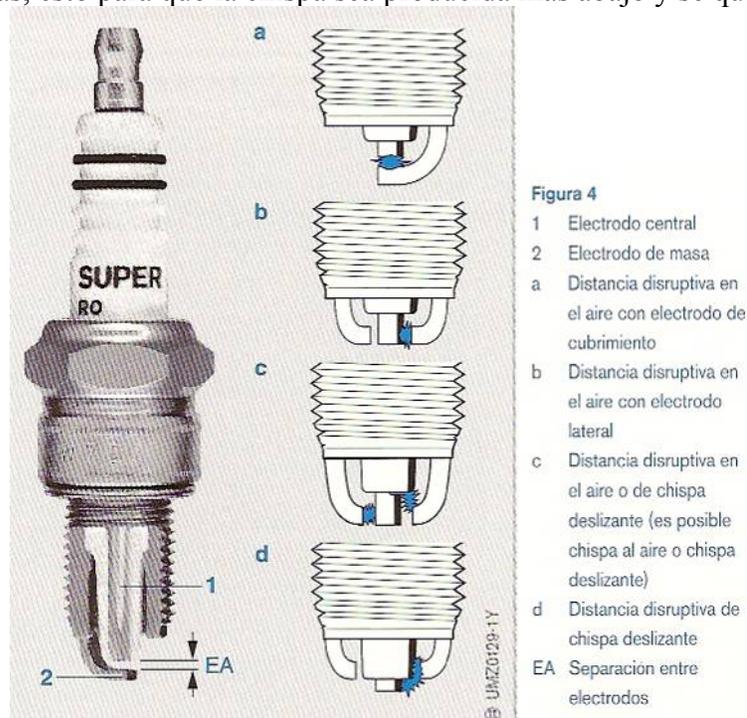


Figura 3. 35 Bujía de automóvil. Imagen modificada de [23]

La posición de los electrodos de masa determina el tipo de chispa. Si el electrodo de masa se encuentra enfrente del electrodo central, se habla de una bujía de chispa en el aire (a, b). Si los

electrodos de masa están ajustados a los costados, se habla de bujías de encendido de chispa deslizante al aire (c) o de genuinas bujías de chispa deslizante (d).

### 3.1.26 SISTEMA DE ENCENDIDO.

Existen varios métodos. La mayoría son usando un motor eléctrico conectado al rotor del motor. La energía es proporcionada por la batería. La bobina de encendido es un autotransformador de alto voltaje al cual se le conecta un conmutador que interrumpe la corriente del primario y es así como induce la chispa de alto voltaje. En la Figura 3.36 se observa la entrada del conector en donde pasa la corriente. La chispa está sincronizada con la etapa de compresión de uno de los cilindros, esta chispa es dirigida a un cilindro específico en la secuencia utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El distribuidor eléctrico se le conoce a aquel que va conectado directo a las bujías y tiene más de una salida, como el mostrado en la Figura 3.37.



Figura 3. 36 Bobina de encendido de alto voltaje. Imagen tomada de [33]



Figura 3. 37 Distribuidor eléctrico completo. Imagen tomada de [31]

Para motores grandes se ocupa aire comprimido. Se mantiene las válvulas cerradas para que la presión aumente y así tenga la fuerza para poder girar al motor.

### 3.1.27 SÚPER CARGADOR.

Compresor mecánico ligado al cigüeñal. Es usado para comprimir el aire de entrada al motor y puede ser pequeño como el mostrado en la Figura 3.38. La ventaja que presenta es que se obtiene una compresión mayor de aire dentro del cilindro desde bajas revoluciones. La gran desventaja es el consumo de potencia que toma del motor.



Figura 3. 38 Súper cargador Jackson. Imagen tomada de [33]

El súper cargador Jackson promete un incremento de potencia de un 40% desde el momento que se pisa el acelerador.

La diferencia de un turbo (Figura 3.39) y un súper cargador (Figura 3.38) es que el segundo comprime el aire y por lo tanto aumenta la potencia del motor desde muy bajas RPM, y el turbo sólo funciona a altas RPM.



Figura 3. 39 Turbo de un automóvil. Imagen tomada de [31]

### 3.1.28 ESTRANGULADOR O ACELERADOR.

Es una mariposa montada sobre el flujo de entrada de aire al motor que controla la cantidad de aire que entra al motor. El mostrado en la Figura 3.40 pertenece a un Nissan Micra

Es común ver en los autos del 2005 estranguladores con un chicote o cable que es accionado por el pedal del acelerador, sin embargo ya se empieza a reemplazar por motores eléctricos controlados por “encoders” en el pedal para saber el requerimiento de apertura que se requiere, pero también, controlar la velocidad de apertura.

También existen sistemas para autos deportivos o de carreras en donde cada cilindro tiene su propia válvula de apertura, y los hay muy pequeños para ser adaptados bajo el capote sin problema y en autos de cuatro cilindros. Un ejemplo es el sistema TODA en donde se requiere una computadora de inyección e inyectores adicionales para cada una como se muestra en la Figura 3.41.

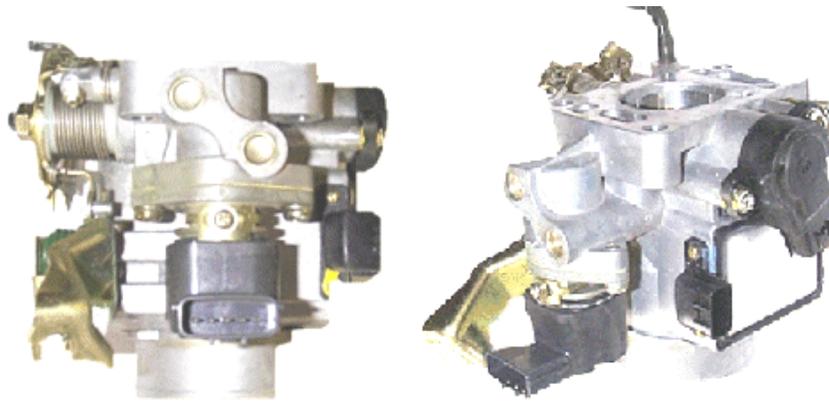


Figura 3. 40 Estrangulador con sensor masa del Nissan Micra. Imagen modificada de [31]



Figura 3. 41 Estrangulador independiente para motor Honda Civic. Imagen tomada de [33]

### 3.1.29 SONDA LAMBDA.

La sonda lambda se encarga de la regulación de la mezcla correcta de aire/combustible dentro del motor.

Es un sensor que va colocado en la salida de la cámara de combustión antes de entrar al catalizador como se muestra en la Figura 3.42 y en la Figura 3.11 de un catalizador. La sonda lambda funge como sensor en un ciclo de un sistema de control como se muestra en la Figura 3.42, en donde al sentir demasiado oxígeno saliendo por el escape, se ajusta el sistema para que la siguiente explosión se inyecte mayor relación de combustible para poder tener una explosión mayor, y de igual manera de forma contraria regula que se inyecte menor gasolina si ésta no está detonando por completo.

Su uso no se limita sólo a lograr de una forma efectiva la depuración de gases del escape, sino además algunas sondas lambdas detectan cambios de tensión o resistencia mandando así una señal.

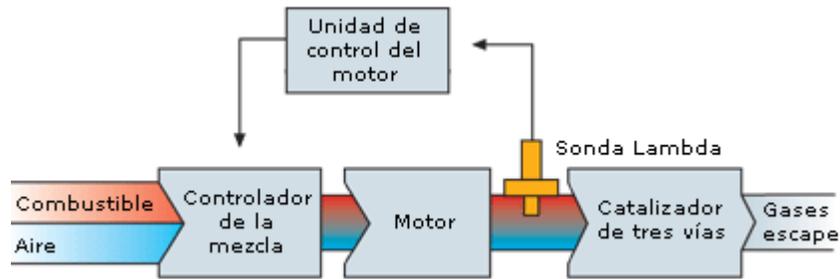


Figura 3. 42 Ubicación y función de la sonda lambda. [34]

Cuando la mezcla de aire y combustible no ha sido ajustada con precisión, se produce un aumento de emisiones. Sólo cuando la relación de la mezcla es de 1 Kg. de combustible a 14,7 Kg. de aire, se puede garantizar una combustión completa y el catalizador puede convertir los gases de escape nocivos en gases que son respetuosos con el medio ambiente. [34]

Y para conseguir este objetivo es necesario que el motor reciba en cada momento las cantidades exactas de aire y combustible. Esta relación exacta de aire y combustible se denomina con la letra griega Lambda ( $\lambda$ ) y se muestra en la Figura 3.43 al igual que los voltajes de salida de la sonda lambda dependiendo de si es una mezcla rica o pobre.

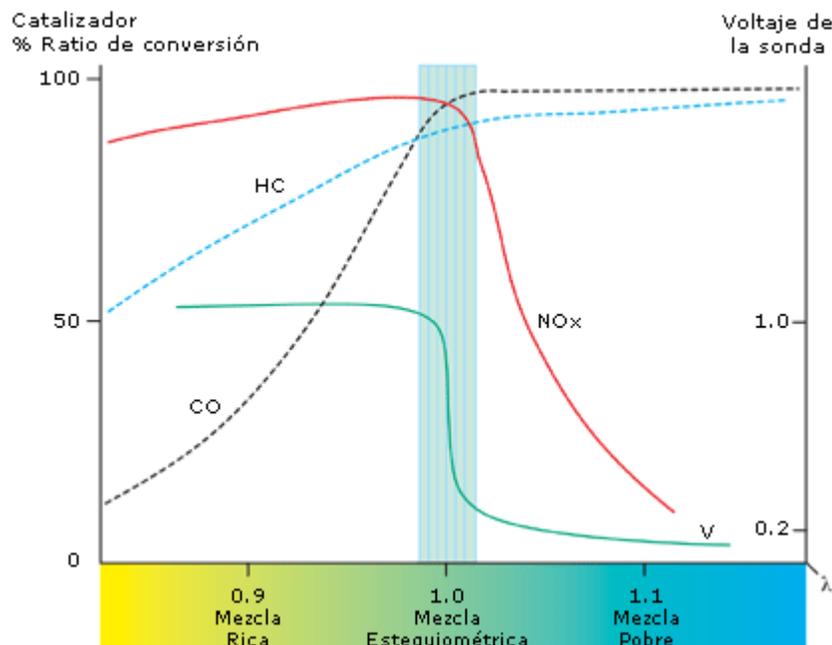


Figura 3. 43 Gráfica del funcionamiento de la sonda lambda marca NGK. Imagen modificada de [34]

En todo proceso de combustión se busca alcanzar una mezcla estequiométrica uniforme, pero esto a diferentes alturas (diferentes concentraciones de oxígeno) no es posible si no se tiene una forma de medir la cantidad de oxígeno, es por eso que el sistema de inyección de combustible logra regular la cantidad de combustible y aire necesario para ser ingresado al pistón.

En la Figura 3.44 se muestra el modelo comercial de Bosch® de sondas lambda. Este puede ser colocado ya sea una, o dos veces. Esto quiere decir que puede llevar doble sensor para ver el rendimiento del catalizador.



Figura 3. 44 Sonda Lambda. Imagen modificada de [29]

### 3.1.30 VÁLVULA.

La función de las válvulas en un motor de combustión interna es admitir la entrada de la mezcla aire/combustible a la cámara de combustión y permitir la salida de los gases quemados posteriores a la combustión.

En algunos motores se usan taqués cortos y en otras varillas, pero ambos comparten los tres elementos mostrados en la Figura 3.45.



Figura 3. 45 Válvula de entrada o de escape con su resorte y guía. Imagen modificada de [31]

## 3.2 SOBREALIMENTACIÓN DEL MOTOR.

### 3.2.1 SOBREALIMENTACIÓN DINÁMICA.

La cantidad de aire que pueda entrar al cilindro es la que determina el par motor. Es por eso que se puede aumentar dicho par, comprimiendo aire antes de su llegada al cilindro.

No sólo influye la forma de administrar aire, sino también el conducto de admisión y de escape influye en dicha carga. El efecto de sobrealimentación se basa en el aprovechamiento de la dinámica del aire aspirado. Estos efectos dinámicos se logran en el tubo de admisión y depende de las condiciones geométricas en éste, pero también del número de revoluciones en el que opere el motor.

Existen dos tipos de sobrealimentación dinámica, uno por medio de tubo oscilante y la otra por resonancia.

El efecto de sobrealimentación por medio del tubo oscilante va a depender de la geometría del tubo de admisión y del número de revoluciones del motor. La longitud y el diámetro de los tubos oscilantes individuales se ajustan de tal manera a las fases de distribución por válvulas, que en el margen de régimen deseado, una onda de presión reflejada en el extremo del tubo oscilante entra a través de la válvula de admisión del cilindro (1 mostrado en la Figura 3.46) abierta y así se tiene un mejor llenado. Los tubos oscilantes largos y delgados producen un alto efecto de sobrealimentación en el margen de régimen inferior. Tubos oscilantes cortos y anchos repercuten favorablemente en el transcurso del par motor en el margen de régimen superior. [20]

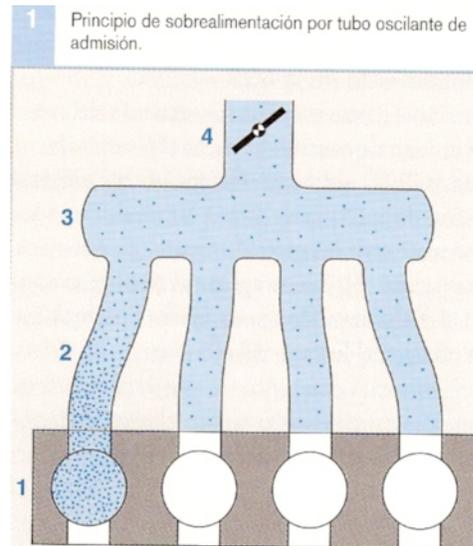


Figura 3. 46 Principio de sobrealimentación por tubo oscilante de admisión.  
Modificada de [20]

A determinado número de revoluciones del motor, las oscilaciones producidas por los gases entran en resonancia. Eso ocasiona un aumento adicional de la presión y un efecto adicional de sobrealimentación.

“En los tubos de admisión de resonancia (ver Figura 3.47), los grupos de cilindros (1) que tienen iguales intervalos de encendido se unen mediante tubos de admisión cortos (2) a un depósito de resonancia (3) para cada grupo. Estos depósitos comunican con la atmósfera o con un depósito colector (5) a través de tubos de admisión de resonancia (4) y actúan como resonadores de Helmholtz. La separación en dos grupos de cilindros con dos tubos de admisión de resonancia impide un empalme de los fenómenos de flujo de dos cilindros vecinos en el orden de encendido.” [20]

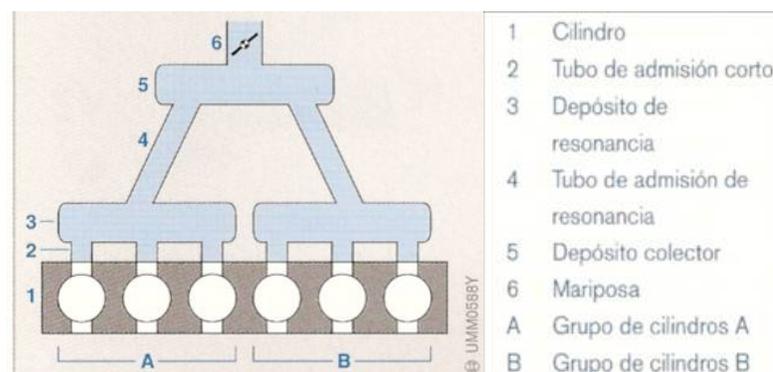


Figura 3. 47 Principio de sobrealimentación por resonancia. Imagen modificada de [20]

Los grandes volúmenes de los colectores necesarios en parte pueden, sin embargo, causar defectos dinámicos a causa de su efecto acumulador, al tener lugar rápidas modificaciones de carga como se muestra en la Figura 3.48.

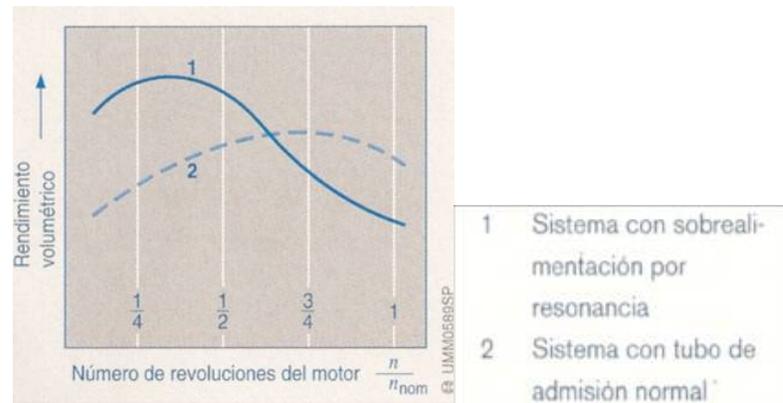


Figura 3. 48 Aumento del llenado de aire máximo (rendimiento volumétrico) por sobrealimentación dinámica. Imagen modificada de [20]

Ambos sistemas mencionados anteriormente aumentan el llenado máximo obtenible. Un transcurso casi ideal del par motor lo hace posible una geometría variable del tubo de admisión, con la que son posibles diferentes variaciones por medio de válvulas de mariposa en función del punto de funcionamiento del motor.

El sistema de tubos mostrado en la Figura 3.49 se puede conmutar entre dos tubos oscilantes diferentes. En el margen de régimen inferior, la válvula de mariposa de conmutación (1) está cerrada y el aire aspirado fluye por el tubo oscilante largo (3) hacia los cilindros. A altas revoluciones y abierta la válvula de conmutación, el aire aspirado toma el camino por el tubo de admisión corto y ancho (4). De este modo es posible un mejor llenado de los cilindros a altos número de revoluciones. [20]

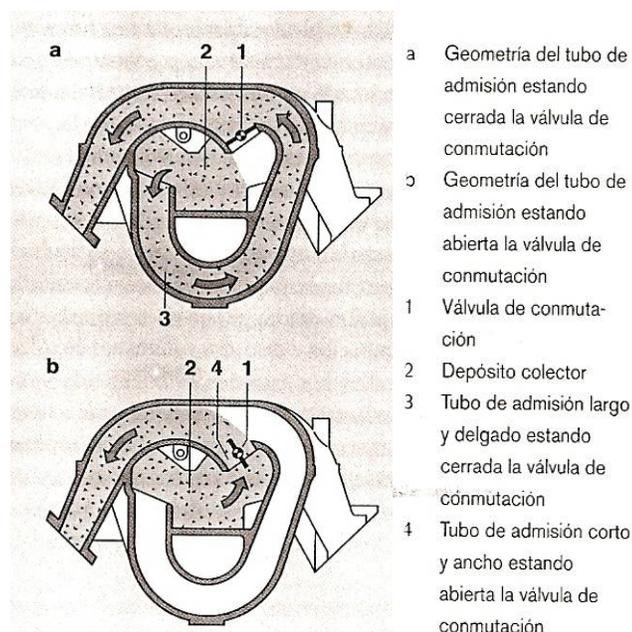


Figura 3. 49 Sistema de tubo oscilante de admisión. Imagen modificada de [20]

### 3.2.2 SOBREALIMENTACIÓN MECÁNICA.

Existen compresores de accionamiento mecánico del tipo de desplazamiento positivo con distintas formas de construcción (ej. Compresores roots, compresor de aletas, compresor espiral, compresor helicoidal), o de tipo dinámico (ej. Compresor radial). En la figura 3.50 se muestra un compresor helicoidal en donde el aire aspirado (1) es comprimido y expulsado (2) hacia el motor.

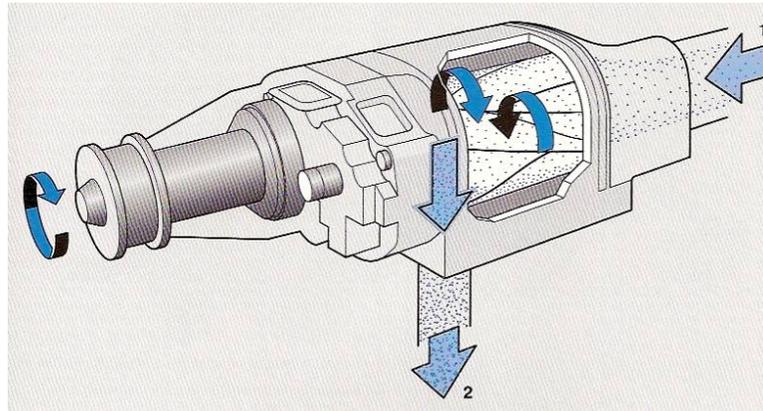


Figura 3. 50 Principio de funcionamiento del compresor helicoidal. Imagen modificada de [20]

Al estar ligado el compresor con el cigüeñal, el compresor mecánico se acelera sin demora alguna cuando aumenta el número de revoluciones. La desventaja es que tiene un consumo mayor de combustible al ser un arrastre a la potencia del motor. Aunque esta desventaja se mitiga si a bajas cargas del motor, se puede desconectar el compresor mediante un acoplamiento controlado por la computadora del motor.

### 3.2.3 TURBO ALIMENTACIÓN POR GASES DE ESCAPE.

Este tipo de alimentación es muy común en pequeños motores para mantener la potencia y elevarla a altas revoluciones. Anteriormente se aplicaba para aumentar el peso por unidad de potencia, pero hoy en día se ocupa para aumentar el par motor máximo a números de revoluciones bajos y medianos.

En la Figura 3.51 se observa la turbina impulsada por los gases (3) y el compresor (1), cuyas aletas están sobre un eje común (2). El aire comprimido (5) va dirigido a los cilindros.

Las turbinas regulables (VTG) ofrecen la posibilidad de limitar el flujo másico de gases del escape a un alto número de revoluciones (Figura 3.52). Estos tipos de compresores son usados en motores diesel, y aunque la publicación de BOSCH menciona que aún no son aplicados en motores de gasolina, PORSCHE© lo ha podido adaptar a su nuevo modelo para darle mayores prestaciones de potencia controlada.

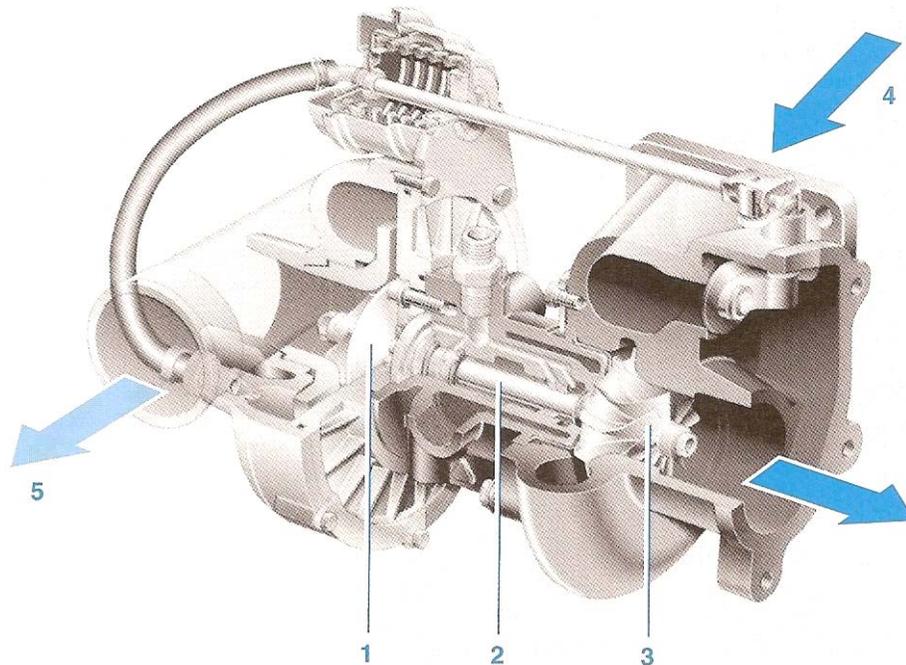


Figura 3.51 Turboalimentador por gases de escape para automóvil. Imagen modificada de [20]

Mediante una variación de la geometría (ver Figura 5.52), los álabes (3) adaptan la presión de gases. A bajo número de revoluciones dejan libre una pequeña sección de flujo, de manera que el flujo másico de gases alcanza una velocidad en la turbina y hace girarla a un alto número de revoluciones. [35]

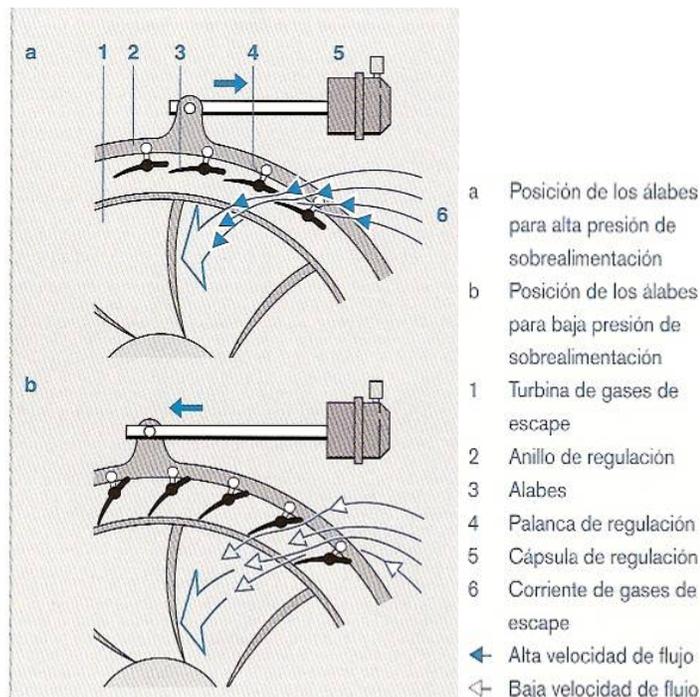


Figura 3.52 Geometría variable de la turbina del sobrealimentador VTG. Imagen modificada de [20]

Por el movimiento de giro del anillo de regulación (Figura 3.53 (2)) se logra una variación en el ángulo de los álabes. Con ellas o se logra el ángulo deseado en los álabes o por palancas individuales de regulación (4) fijadas a las mismas. El giro del anillo de regulación se efectúa neumáticamente mediante depresión o sobre presión, a través de una cápsula de regulación (5).

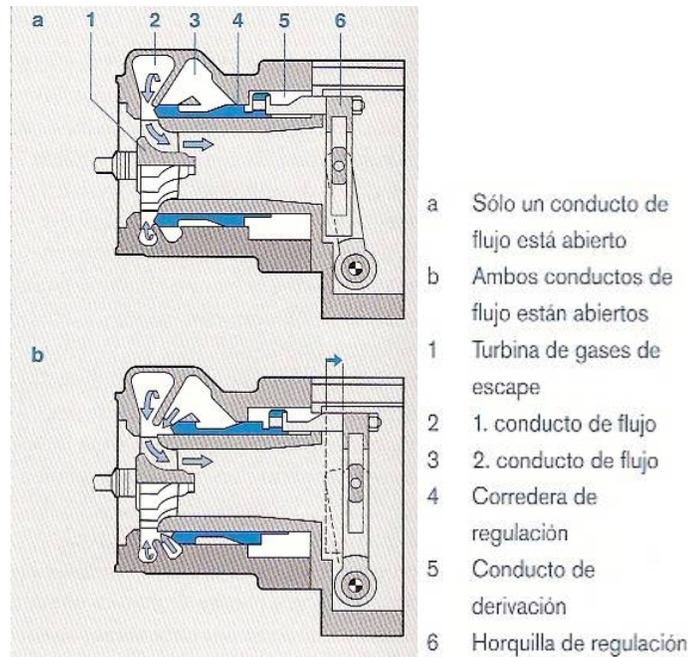


Figura 3. 53 Geometría de la turbina del sobrealimentador VST. Imagen modificada de [20]

El sobrealimentador con turbina variable de corredera (VST) se adapta al “tamaño de la turbina” abriendo sucesivamente dos conductos de flujo (Figura 3.53, 2 y 3) con ayuda de una corredera de regulación (4).

La pequeña sección de apertura ocasiona una alta velocidad de flujo de los gases de escape y con ella un alto número de revoluciones de la turbina (1). Al alcanzarse la presión de sobrealimentación admisible, la corredera de regulación abre de modo continuo el segundo conducto de flujo, reduciéndose la velocidad de los gases y la presión.

Con ayuda del conducto de derivación (5) integrado es posible conducir parte del flujo másico por delante de la turbina. El ajuste de la corredera de regulación lo efectúa el control del motor mediante una cápsula neumática de presión.

### 3.2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TURBO ALIMENTACIÓN POR GASES DE ESCAPE.

Los gases de escape pueden ser recirculados para aprovechar esa energía, pero todo tiene un costo, y en este caso es un costo mecánico.

Se puede ver en la Figura 3.54 cómo el par motor de un sobrealimentado (4) tiene un mejor transcurso en comparación con el de aspiración natural (3).

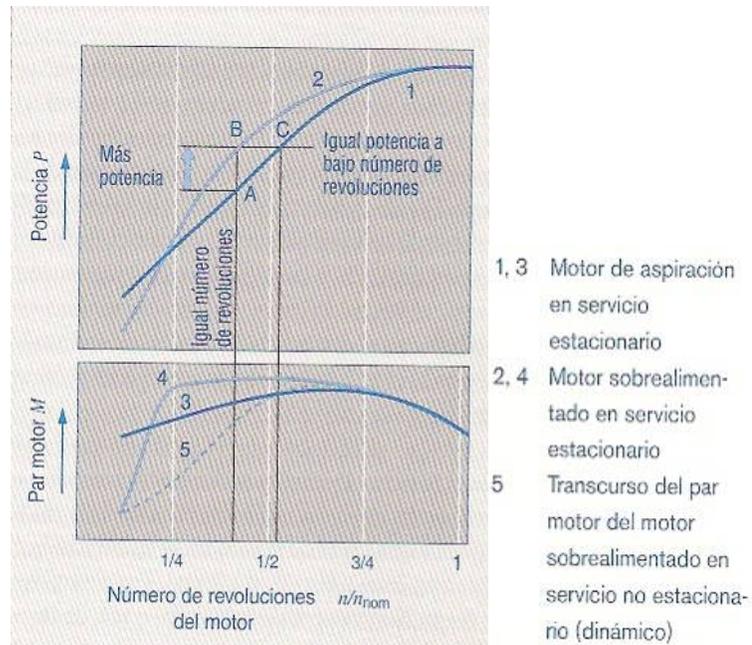


Figura 3. 54 Gráfica de transcurso de potencia y del par de un motor con turbo sobrealimentador por gases de escape en comparación de uno aspirado. Imagen modificada de [20]

Como desventaja del uso de la turbina es la baja potencia a un menor número de revoluciones. En esta etapa del motor los gases de escape no son lo suficientes para accionar la turbina. Al acelerar partiendo de un número de revoluciones bajos resulta un “vacío propio del turbo sobrealimentador”. Éste puede aminorarse aprovechando la sobrealimentación dinámica.

Para concluir se debe de mencionar algo muy importante, y esto es el enfriamiento del aire comprimido antes de entrar a los pistones, ya que el aire se calienta durante su compresión. Como el aire caliente tiene menor densidad que el aire frío, el calentamiento repercute desventajosamente en el llenado de los cilindros. El enfriamiento del aire proporciona un aumento de llenado dentro de la recámara de los cilindros, y por lo consiguiente, un aumento de par motor y de potencia.

Ventajas de enfriar el aire antes de ser introducido a los cilindros:

1. Menor tendencia a la detonación.
2. Mejor rendimiento térmico y por tanto menor consumo de combustible.
3. Menor carga térmica de los pistones.
4. Menor emisión de  $\text{NO}_x$ .

### 3.3 FUNCIONAMIENTO.

“El motor de gasolina de Otto es un motor de combustión por encendido externo que quema una mezcla de aire y combustible, transformando así la energía química contenida en el combustible en energía cinética.”

### 3.3.1 PROCESO DE CUATRO TIEMPOS.

El motor de cuatro tiempos como su nombre lo indica consta de 4 pasos descritos en la Figura 3.55.

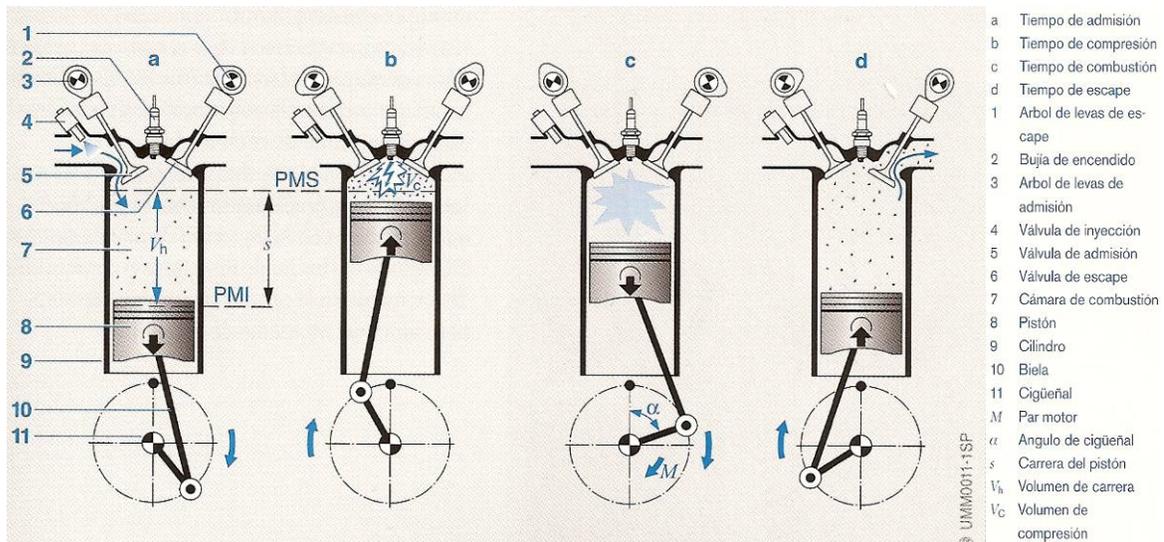


Figura 3. 55 Ciclo de trabajo del motor de gasolina de cuatro tiempos. Imagen modificada de [20]

El pistón (8) ejecuta en el cilindro (9) una fuerza que provoca un movimiento cíclico ascendente y descendente. Este movimiento le dio el nombre al motor como “motor alternativo”.

La biela (10) convierte este movimiento de vaivén en un movimiento rotacional al ser conectado al cigüeñal (11).

Durante este proceso, la válvulas (5 y 6) regulan el intercambio de gases.

1er tiempo: Admisión.

Del punto muerto superior (PMS), el pistón se mueve hacia abajo y aumenta el volumen en la cámara de combustión (7).

En el punto muerto inferior (PMI) el volumen alcanzado dentro de la cámara de combustión es el máximo posible ( $V_h + V_c$ ).

2do tiempo: Compresión.

Las válvulas están cerradas y el pistón se mueve de manera ascendente comprimiendo el aire y la mezcla de combustible inyectada. En los motores de inyección en el tubo de admisión, la mezcla de aire y combustible se encuentra ya al fin de la carrera de aspiración en la cámara de combustión. En los sistemas de inyección directa, el combustible no se inyecta sino hasta el fin del tiempo de compresión.

3er tiempo: Combustión y trabajo.

Un poco antes de que el pistón alcance el PMS, la bujía (2) inicia el encendido de la mezcla. Como las válvulas siguen cerradas, la presión fuerza al pistón a descender y así realizar el trabajo mecánico.

4to tiempo: Escape.

Antes del PMI se abre la válvula de escape y los gases calientes salen ayudados también por el empuje del pistón.

Cada dos vueltas del cigüeñal comienza un nuevo ciclo de trabajo con la carrera de aspiración. Es por eso que las cadenas con el cigüeñal y el árbol de levas tienen una relación de 2:1.

### **3.3.2 FASES DE DISTRIBUCIÓN POR VÁLVULAS.**

En motores con un solo árbol de levas, un mecanismo de balancines transmite el movimiento elevador de las levas a las válvulas del cilindro. Las fases de distribución determinan el tiempo adecuado para la apertura y el cierre de las mismas con referencia a la posición del cigüeñal. Es por eso que las fases se indican en grados del cigüeñal.

El cigüeñal acciona el árbol de levas por medio de una correa dentada. No puede ser una banda sin dientes ya que podría desfasarse y no ser exacto el movimiento de las válvulas referenciado con el cigüeñal. Un ciclo de trabajo dura en el proceso de un motor de cuatro tiempos como se dijo anteriormente, dos vueltas del cigüeñal.

Existen motores con doble árbol de levas posicionados sobre las cabezas del motor, o también motores con un árbol de levas, colocado ya sea en la parte superior o a un costado. Pero en ambos casos se respeta la relación 2:1.

La forma de unir el cigüeñal con el árbol de levas puede variar, pueden estar conectados por medio de una cadena o de una banda dentada bien ajustada, esto para evitar su deslizamiento y perder la posición de giro. La banda debe de ser dentada ya que no se puede en ningún momento cambiar de posición ya que de lo contrario cambiaría el momento en que se abriera la válvula tanto de salida como de entrada, alterando por consecuente el ciclo de combustión interna y el funcionamiento del motor en general.

En los motores con doble árbol de levas, estos deben de estar unidos por medio de una cadena o banda dentada para coordinar la apertura y la salida de los gases. Ver Figura 3.56.

Al poseer el motor doble árbol de levas le proporciona más válvulas tanto de entrada como de salida mejorando la velocidad y cantidad de aire entrante y como punto más importante, el aire saliente. Ya que eso ayudará a que salgan en su mayoría los gases quemados y quedando únicamente el aire limpio que entra al motor.

La desventaja del doble árbol de levas es el incremento del costo del motor, mayores partes móviles y un pequeño aumento en peso del motor. Es así como los motores de bajo precio carecen de un doble árbol de levas.

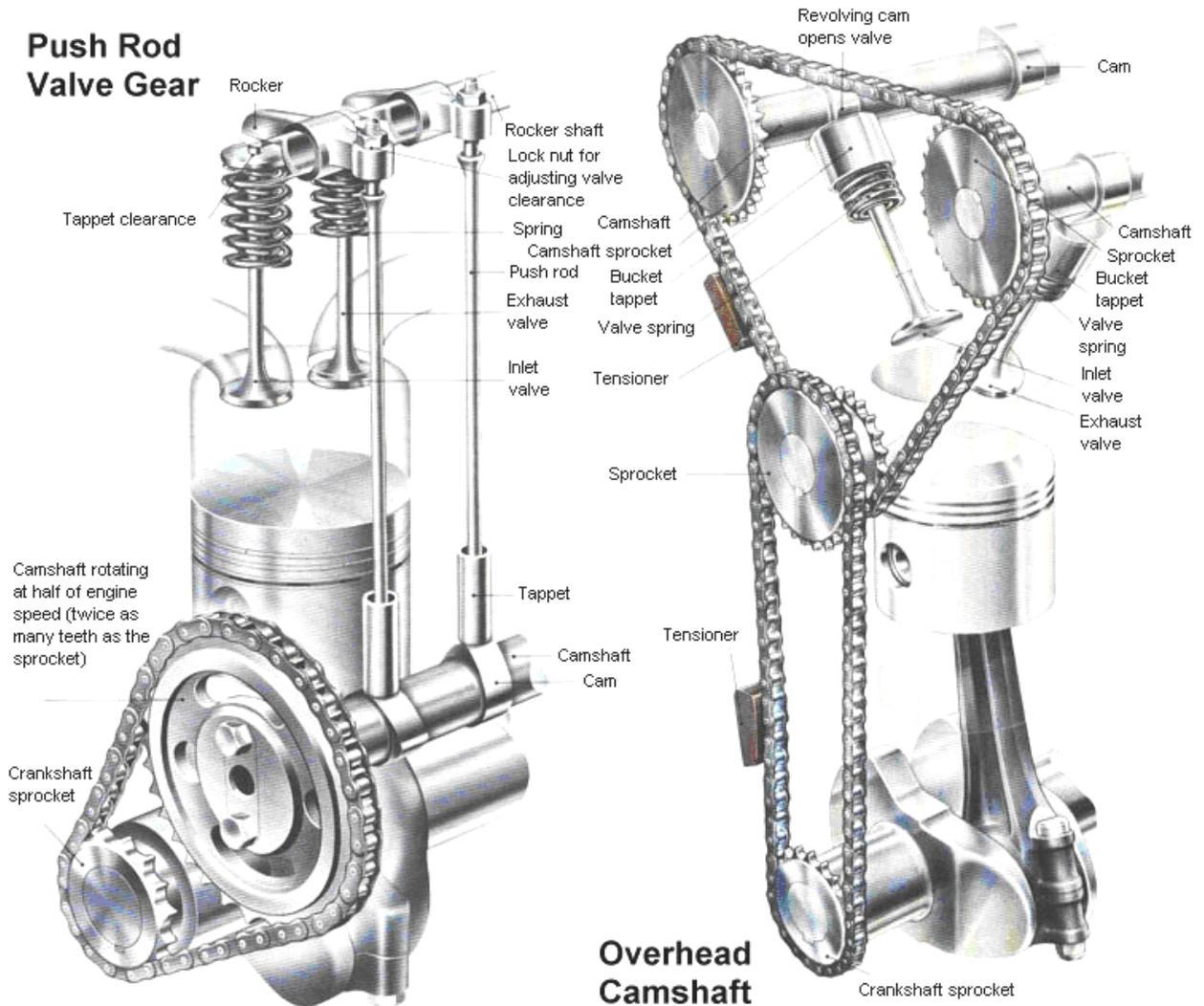


Figura 3. 56 Relación de las válvulas, árbol de levas y cigüeñal. Imagen modificada de [auto.howstuffworks.com](http://auto.howstuffworks.com)

### 3.3.3 COMPRESIÓN.

La compresión máxima del volumen del cilindro es  $\varepsilon = (V_h + V_c) / V_c$ . Esta compresión del motor influye en el par motor generado, la potencia suministrada, en el consumo de combustible y en la emisión de sustancias contaminantes.

La relación de compresión de un motor de gasolina es  $\varepsilon = 7 \dots 13$ . En motores de diesel  $\varepsilon = 14 \dots 24$ . Si se elevara la compresión del motor de gasolina con los combustibles actuales, la temperatura producida dentro del cilindro provocaría una detonación no controlada y perjudicial para el motor.

### 3.3.4 RELACIÓN ENTRE AIRE Y COMBUSTIBLE.

Para una combustión completa, las proporciones de la mezcla han de encontrarse en el punto exacto, este punto se le denomina mezcla estequiométrica, Esto significa que debe de haber 1 Kg. de combustible por cada 14.7 Kg. de aire, esto en una relación únicamente.

La relación de aire y combustible se designa por la letra griega lambda ( $\lambda$ ). Aunque también se le puede llamar coeficiente de aire. En una mezcla estequiométrica,  $\lambda$  tiene un valor de 1.0.

Un enriquecimiento de la mezcla con combustible ocasiona valores de  $\lambda$  menores de 1. Al modo contrario, cuando se tiene un exceso de aire se llama mezcla pobre y tiene valores de  $\lambda$  mayores a 1. La mezcla topa el límite de funcionamiento y deja de ser inflamable cuando  $\lambda > 1.6$ .

### 3.3.5 DISTRIBUCIÓN DE LA MEZCLA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

En la Figura 3.57 sección a) se muestra una distribución homogénea de la mezcla, y en la sección b) una Carga estratificada.

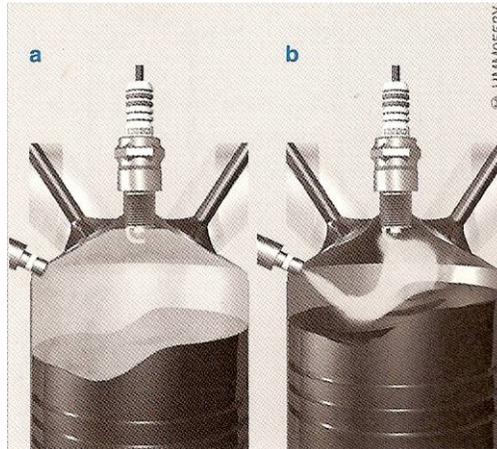


Figura 3. 57 Distribución de la mezcla en la cámara de combustión. Imagen modificada de [20]

La mezcla se encuentra con una distribución homogénea en motores de inyección en el tubo de admisión. Motores con mezcla pobre se hacen funcionar con una distribución homogénea de la mezcla.

La carga estratificada es ocupada en motores de inyección directa, en donde se tiene una mezcla muy pobre hasta el momento de inyección de gasolina, después se posee una mezcla estequiométrica en el punto de encendido de la bujía, lo que produce un buen encendido. Esto hace posible un funcionamiento con bajos consumos de combustible.

La carga estratificada es sólo posible en motores de inyección directa de gasolina. Ella resulta del hecho de inyectarse el combustible directamente en la cámara de combustión antes del momento de encendido.

### 3.4 PAR MOTOR Y POTENCIA.

La fuerza que produce la biela al ser impulsada al PMI se transforma en par. Además de la fuerza, el par motor es importante. El par motor es en general el resultado de multiplicar la fuerza por el brazo de palanca. El brazo de palanca activo es el componente de la palanca que se encuentra vertical a la fuerza. El par motor máximo se calcula a  $90^\circ$  después del PMS.

El ángulo de encendido ha de estar de manera que la inflamación de la mezcla tenga lugar en el sector del cigüeñal en que asciende el brazo de palanca. Es así como se genera el par máximo posible.

La potencia  $P$  suministrada por el motor aumenta a medida que se incrementa el par  $M$  y el número de revoluciones  $n$ .  $P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$

En la Figura 3.58 se muestra el transcurso del par motor y de la potencia en función del número de revoluciones que es típico para un motor de gasolina. Estos diagramas se muestran siempre en informes de revistas de automóviles. El par motor se encuentra a un número medio de revoluciones. Lo que se desea hoy en día es poner el par máximo a números bajos de revoluciones en un margen de 2000 RPM, puesto que es más ventajoso este régimen al ser el de menor consumo [36].

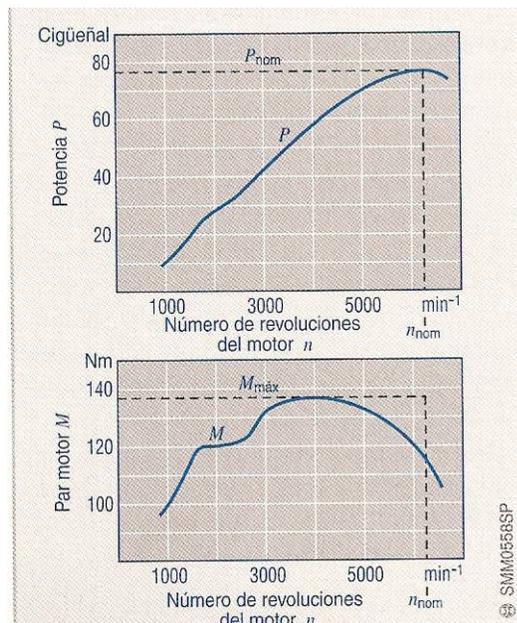


Figura 3. 58 Transcurso ejemplar del par motor y de la potencia en un motor de gasolina de inyección en el tubo de admisión. Imagen modificada de [20]

La característica de la potencia y la del par motor de combustión hacen necesario un cambio de velocidades para la adaptación a las exigencias de la marcha normal, Es aquí en donde tendrá su auge transmisiones continuamente variables donde mantiene las RPM a un máximo de 4,500.

### 3.5 INTEGRACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN MOTOR.

Cada componente del motor tiene una razón de estar ahí, ya sea por protección al mismo o por perfeccionar su desempeño. Las máquinas de combustión son complejas y poseen varios componentes como los mencionados en la sección 3.1 Componentes., pero para tener una mejor idea es mejor observar las Figura 3. 59 y 3.60 que muestra un motor Porsche© boxer S 2006, y las tablas 3.1 y 3.2.

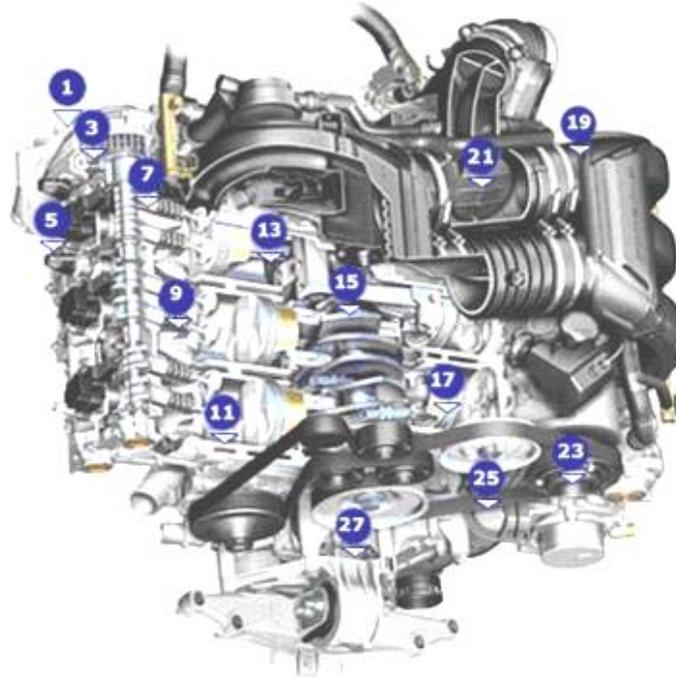


Figura 3. 59 Componentes principales de un motor (a). Imagen modificada y basada en [8]

En la Tabla 3.1 se muestran los componentes del motor de la Figura 3.59.

Número	Componente	Número	Componente
1	Bomba de Aceite	15	Cigüeñal
3	Ajuste de árbol de levas	17	Cámara de combustión
5	Control de válvula de apertura	19	Tubo de admisión con resonancia
7	Taqués hidráulicos ajustables	21	Válvula de flujo de entrada doble
9	Resorte de válvula	23	Polea del aire acondicionado
11	Sujetador de banda	25	Banda especial
13	Biela forjada	27	Bomba de alimentación de aceite

Tabla 3. 1 Componentes de un motor Porsche Boxter S (a). Tabla creada a partir de [8]

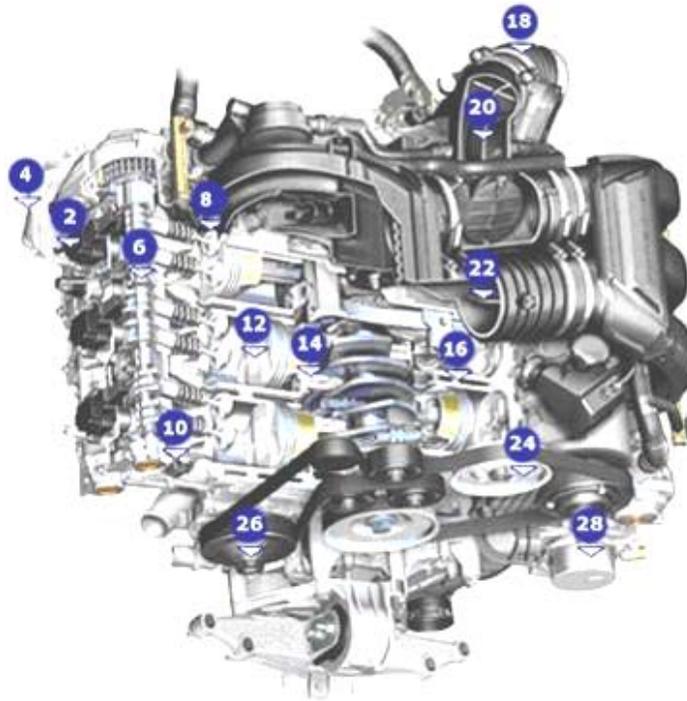


Figura 3. 60 Componentes principales de un motor (b). Imagen modificada y basada en [8]

En la Tabla 3.2 se muestran los componentes del motor de la Figura 3.60.

Número	Componente	Número	Componente
2	Cable individual de Ignición	16	Camisa de agua
4	Válvula de control para el ajuste de válvulas	18	Mariposa electrónica
6	"loft" de entrada	20	Tubo de entrada de aire doble
8	Válvula de admisión	22	Válvula de resonancia
10	Válvula de escape	24	Polea del motor de dirección hidráulica
12	Pistón de aluminio forjado	26	Polea de bomba de agua
14	Rodamiento del puente del cigüeñal	28	Bomba de aceite secundaria.

Tabla 3. 2 Componentes de un motor Porsche Boxter S (b). Tabla creada a partir de [8]

El conocer los motores nos ayuda a saber cuales son los cambios y avances que se han desarrollado y cuales son los puntos que aun se pueden mejorar, en espera de que los precios de producción bajen o de que el combustible actual suba de precio permitiendo así el uso de nuevas tecnologías que hasta la fecha no son rentables.

En este capítulo se aprendió sobre la importancia de los componentes más críticos en un motor, dando como resumen la ubicación de ellos en la Figura 3.59 y 3.60 para dar al lector una idea clara de lo que se intenta explicar en este documento, que es la importancia de buscar la mayor eficiencia del combustible.

## **4. COMBUSTIÓN Y COMBUSTIBLES.**

Los combustibles los hemos usado desde ya hace varios años, y son fundamentales hoy en día para mover automóviles, generar calor y otras funciones más. El problema que la mayoría de los combustibles usados hoy en día no son amigables con el medio ambiente y no son renovables, por lo que las máquinas que funcionan con ellos tendrán que ser modificadas para el día en que ya no tengamos dicho recurso.

El diccionario Webster da una definición de combustión con la que se puede tomar como punto de partida este capítulo: “Rápida oxidación generando calor, o luz y calor; también, lenta oxidación acompañada por un relativo calor y no luz.”[37]

### **4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA COMBUSTIÓN.**

Se pueden distinguir los siguientes tipos de combustión:

Completa o perfecta.- Es aquella en donde el combustible se quema por completo.

Estequiométrica.- Es aquella que se ha realizado sin exceso de aire.

Incompleta.- Es aquella que los gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados, como monóxido de carbono y resto de combustible sin oxidar, como hidrógeno, partículas de carbón, etc. Estas combustiones pueden efectuarse con exceso o faltante de aire.

Cabe aclarar que la combustión estequiométrica sólo puede ser realizada en el laboratorio, ya que es necesario que la mezcla sea homogénea, sino se tendrán zonas con exceso de aire y otras con faltante de aire.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS COMBUSTIBLES.

El petróleo es la materia prima de la cual se derivan varios productos. Se pueden fabricar plásticos, asfalto, combustibles y otros productos de la vida cotidiana. El problema es el costo de exploración y extracción lo que hace que su costo se eleve año con año, además de que es un producto no renovable. Algunos expertos aseguran que existe suficiente petróleo en el planeta para seguir este ritmo de consumo para los siguientes 50 o hasta 80 años, en comparación con el carbón que sus reservas son para 1500 años y para el gas natural de 120 años. Existen varios mantos que aún no han sido explotados.

Al ser un producto no renovable, el petróleo es muy cotizado. Es un producto el cual es fundamental para la producción de combustible, el cual es el corazón del transporte actual. El 88% de toda la energía que se usa en el mundo deriva del petróleo. En la Tabla 4.1 se muestran los derivados del petróleo que en su mayoría es para la fabricación de combustible.

El petróleo es una mezcla de compuestos orgánicos denominados hidrocarburos. Los hidrocarburos están constituidos por familias de compuestos llamados alcanos, alquinos, ciclo alcanos y compuestos aromáticos. [38]

Los que contienen anillos como los de benceno se denominan hidrocarburos aromáticos. Los que no tienen tales sistemas se denominan hidrocarburos alifáticos. Los hidrocarburos alifáticos que sólo contienen enlaces simples entre los átomos de carbono se denominan hidrocarburos saturados. En los enlaces simples se comparten dos electrones. Los hidrocarburos alifáticos que contienen enlaces dobles o triples (en los que se comparten 4 ó 6 electrones respectivamente), además de enlaces simples, se denominan hidrocarburos insaturados.

Fracción	Intervalo de tamaño de las moléculas	Intervalo de puntos de ebullición	Usos
Gas	C1 – C4	0 a 30 °C	Gas combustible.
Gasolina de proceso Directo	C5 – C12	30 a 200°C	Combustible para automóviles.
Queroseno	C12 – C16	180 a 300°C	Combustible para aviones a reacción y motores diesel.
Gasóleo	C16 – C18	>300°C	Combustible para motores diesel, materia prima para pirolisis.
Materia prima para lubricantes	C18 – C20	>350°C	Aceite lubricante, materia prima para pirolisis.
Cera parafinica	C20 – C40	Sólidos de bajo punto de fusión	Velas, papel encerado
Asfalto	>C40	Residuos pegajosos	Asfalto para carretera, alquitrán para techos

Tabla 4. 1 Derivados de la destilación del petróleo. Tabla basada en [38]

Los combustibles no derivados del petróleo con gran importancia son: alcohol metil, o metanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , y alcohol Etil, o etanol,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Cuando las reglas lo permiten, el metanol es usado como combustible para autos de carreras.

#### 4.2.1 DIESEL.

El diesel se obtiene de un largo arreglo de pesos moleculares y propiedades físicas. Varios métodos son usados para clasificarlos, algunos usando una escala numérica y otros por su uso. En general, entre mejor sea la refinación, menor es su peso molecular, menor es su viscosidad, y más elevado es su costo. Las escalas numéricas tienen un rango de uno (1) a seis (6), con subcategorías usando el alfabeto. El número más bajo tiene un peso molecular menor y por lo tanto menos viscosidad, estos son los combustibles usados en los motores de automóvil. Los de número más alto son usados en residencias como medio de calefacción u hornos industriales. En cuanto a su uso se divide en dos tipos de diesel, el ligero  $\text{C}_{12.3}\text{H}_{22.2}$  con peso molecular de 170 y el pesado  $\text{C}_{14.6}\text{H}_{24.8}$  con peso molecular de 200. El diesel pesado puede ser usado en camiones con sistemas de inyección con mayor presión y con **sistemas calentados de inyección**.

##### 4.2.1.1 Índice de cetano.

En la gasolina es muy común escuchar el término octanos, y nos referimos a él para describir la potencia que proporciona dicha gasolina. En el caso de diesel es lo mismo, pero el término es cetano.

Los motores diesel, como se explicó previamente en el capítulo 2, funcionan de manera diferente que los de gasolina, y su ignición depende de la compresión de la mezcla combustible/aire. La ignición de esta mezcla ocurre a compresiones mayores de 13:1. Como la mezcla no ocurre sino hasta el momento de ignición, la compresión no tiene problemas, es por ello que el número de cetanos es en ocasiones bajo y compensado con óxidos orgánicos y peróxidos que favorecen la compresión.

#### 4.2.2 BIODIESEL.

El biodiesel es un ester que puede ser hecho de sustancias tales como aceites vegetales y grasa animal. El biodiesel puede ser usado en su Estado puro o combinado con diesel convencional derivado del petróleo. Aceite vegetal fue usado como combustible diesel en 1900, cuando Rudolf Diesel demostró que un motor de diesel puede trabajar con aceite de maní. Para que los aceites vegetales puedan ser usados como combustible diesel, los aceites deben de ser altamente procesados, principalmente por su alta viscosidad. La transesterificación (producción del ester) de aceites vegetales o grasa animal, usando alcohol en la presencia de un catalizador, es el proceso más popular. Por cada 100 unidades de biodiesel producido usando este método, existen 11 unidades de glicerina por producto.

Aceites vegetales no procesados pueden ser usados en motores modificados de diesel. Dichos motores tienen una producción limitada y por ende son más caros, sin embargo su número está creciendo en Europa. El principal beneficio del biodiesel puede ser catalogado como estratégico (incrementa la autosuficiencia para los países importadores de petróleo), económico (incrementa

la demanda de los productos del campo), y ambiental (biodegradable y mejora la calidad del aire, particularmente en disminuir emisiones de sulfuro y casi cero carbón). Las emisiones disminuirían en cantidades de monóxido de carbono, hidrocarburos y partículas contaminantes.

Los Estados Unidos, Nueva Zelanda, Canadá y distintos países de la Unión Europea han desarrollado extensas pruebas en camiones biodiesel, autos, camionetas, tractores y pequeños barcos. Las pruebas incluyen el uso de biodiesel puro y varias mezclas con diesel convencional.

Aparte de los países desarrollados, el programa de biodiesel que comenzó en el 2002 en Brasil fue notable por su meta de reemplazar parte del consumo del diesel para los transportes de dicho país [39]. La desventaja es que el costo de producción de dicho combustible es mayor que el convencional.

#### **4.2.2.1 Biodiesel en Estados Unidos.**

El interés en el biodiesel por parte de los Estados Unidos fue estimulado por el acta de aire limpio de 1990, combinada con regulaciones que requieren la reducción de sulfuro de contenido en el combustible diesel y reducir las emisiones. El acta de la política de energía de 1992 establece como meta el reemplazo del 10% de motores de combustible derivado del petróleo por combustibles alternos para el año 2000 (una meta la cual no se alcanzó) e incrementar por un 30% para el año 2010 (algo que muy probablemente tampoco se logrará) [39]. Sin embargo ya se tienen laboratorios y pruebas realizándose para buscar otros combustibles que sustituyan permanentemente en un futuro a los derivados del petróleo.

#### **4.2.2.2 Biodiesel en Europa.**

Dos factores han contribuido para una agresiva expansión de Europa hacia el biodiesel. La reforma de las políticas comunes del campo de reducir el excedente fue lo más importante.

Esta política del campo, que provee de un subsidio suficiente para la producción de siembra no alimenticia, estimula el uso de tierra para agricultura no alimentaria. Como factor secundario, los impuestos altos al combustible en países de Europa normalmente constituyen el 50% o más del precio del diesel. En 1995, la producción de biodiesel del Oeste de Europa fue de 1.1 millones de toneladas al año, principalmente producidas por el proceso de “transestificación”. Esto añadido a más de 88,000 toneladas de glicerina necesaria para producirlo anualmente, creando un gran excedente. Alemania se ha limitado a la producción de biodiesel con el uso de glicerina. Cuando no es posible vender el producto de glicerina, el excedente es incinerado; sin embargo esto crea un riesgo ambiental y resulta un costo no contemplado [39]. Alemania se está concentrando en producir biodiesel usando carbón prensado (este método lo usó hace años en la segunda guerra mundial) para evitar el problema de excedente de glicerina.

#### **4.2.2.3 Biodiesel en Japón.**

Alrededor de 1995, Japón decidió explorar la factibilidad del biodiesel iniciando un estudio de 3 años. Las plantas de biodiesel usando aceites vegetales reciclados recolectados en Tokio fue el método planeado; se esperaba que 10% de los vehículos federales usara combustible alternativo para dar un ejemplo al automovilista privado e industrias. El periodo de 3 años de estudio indicó que

el costo de la producción de biodiesel en Japón es 2.5 veces el de la producción de diesel derivado del petróleo. El programa únicamente ha alcanzado su objetivo informativo [39].

#### 4.2.2.4 Biodiesel en Canadá.

En el inicio de 1990, la producción canadiense de colza (canola-**Canadian Oil Low Acid**) se incrementó en respuesta a los altos precios del mercado en relación a granos de cereal e incrementó el costo del manejo de granos y costos de transportación. Su producción alcanzó la cresta en 1994 y 1995, limitado a tierras de cultivo apropiadas y siembra rotativa.

Existe un potencial de uso de baja calidad de aceite derivados de colza sobrecalentada o dañada por la nevada sin daño alguno en la calidad de la producción de biodiesel. Por lo que Canadá podrá utilizar su residuo de semillas quemadas por nevadas para la producción de biodiesel [39].

#### 4.2.2.5 Biodiesel en Brasil.

En 1998, varias iniciativas fueron implementadas en Brasil, apuntando la introducción de biodiesel en la matriz de energía brasileña. La iniciativa incluye (1) pruebas realizadas en Brasil, usando la llamada mezcla B20 (20% ester y 80% diesel), en específicas rutas de autobuses urbanos, (2) la construcción de pequeñas plantas piloto para la producción de biodiesel a partir de grasa y aceite de palma (ampliamente producida en Brasil), y (3) producción en laboratorio y pruebas de biodiesel usando fríjol de soya aceite/caña de azúcar etanol. Por lo que su caña de azúcar la ocuparán para producir biodiesel. El gobierno federal de Brasil subsecuentemente decidió establecer un grupo de trabajo de especialistas en los sectores involucrados, creando el Programa Nacional de Biodiesel en 2002. Este programa analizará el uso del excedente de aceite de fríjol de soya, que es producido en gran escala en Brasil y su posibilidad de exportarlo.

La competitividad económica del biodiesel ha sido evaluada; estudios en Brasil muestran que el costo de la producción del biodiesel es mayor que el costo de Diesel convencional. (Tabla 4. 2)

Input	(Amount)			
	Kilograms	Tons	Price (R \$/ton)	Cost
Soy oil	1015	1.015	169.64	172.19
Methanol <sup>b</sup>	140	0.14	93.57	13.10
Catalyzer <sup>c</sup>	12	0.012	125.00	1.50
Input cost				186.79
Production cost (115% of input cost)				401.59
Total cost (U.S. \$/ton)				588.38

<sup>a</sup>Data from the Brazilian Reference Center on Biomass (CENBIO). Exchange rate, Brazilian real (R)/U.S. dollar, \$2.8/1 (July 2002). Diesel price in São Paulo pump stations is around R \$1.00/liter (about U.S. \$350/ton).

<sup>b</sup>Methanol cost based on prices at pump stations in California (U.S. \$0.88–1.10/gallon).

<sup>c</sup>Catalyzer cost based on Brazilian market price.

Tabla 4. 2 Costo de producción por tonelada de Ester a partir de Aceite de soya en Brasil. Imagen modificada de [39]

### 4.2.3 GASOLINA.

La gasolina es el combustible más usado para los vehículos automotrices, y la forma de obtenerla es por medio de varios procesos aplicados a la materia prima: el petróleo.

La gasolina es una mezcla líquida derivada del petróleo que consiste primordialmente de hidrocarburos que son usados como combustible en motores de combustión interna. La volatilidad varía a diferentes temperaturas, y a diferentes combustibles. El más denso es el diesel y el más volátil es el benceno. Ver Figura 4.1

Por medio de la Figura 4.1 observamos que la gasolina se evapora a mucha menor temperatura que el diesel, lo cual beneficia a la formación de la mezcla aire/gasolina para así obtener un menor residuo de combustible líquido sin quemar (esta gráfica ayuda a comprender el porqué se debe de calentar un motor diesel antes de ejercerle trabajo).

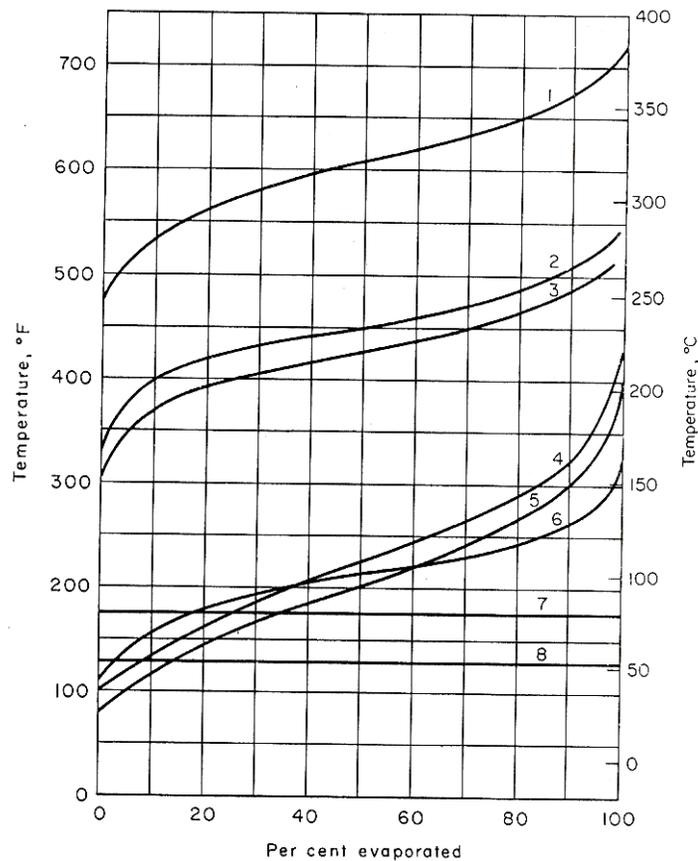


Figura 4.1 Curva típica de destilación ASTM. Imagen tomada de [39]

Para la Figura 4.1: 1, Diesel; 2, destilado; 3, keroseno; 4, gasolina de verano; 5, gasolina de invierno; 6, gasolina de aviación; 7, alcohol etílico; 8, benceno.

La palabra gasolina fue definida en 1865 de la palabra gas y el sufijo químico -ina. En el vocabulario moderno fue usado por primera vez en 1871. La palabra reducida como gas fue adoptada al inglés americano en 1905. Aunque gasolina originalmente se refiere a cualquier líquido ofrecido a la venta o usado como combustible para un motor de combustión interna de gasolina, esto no incluye al diesel o al gas licuado [39].

La gasolina es más volátil que el diesel o el keroseno, no sólo por los constituyentes de la fórmula, sino por los aditivos que son agregados a ella. El control final de la volatilidad es debido a la mezcla con butano. La volatilidad deseada depende de la temperatura ambiente: en climas calientes, los componentes de gasolina con un mayor peso molecular y por lo tanto menor volatilidad son usados. En la Figura 4.2 se muestra los combustibles y su compresión máxima, dependiendo de su compresión será el grado en el que se pueden diseñar el radio de compresión del motor. Es por esta razón que los motores de alto rendimiento que usan un radio de compresión arriba de 12 necesitan combustibles con un alto número de octanos. En Australia el límite de volatilidad cambia cada mes y difiere en diferentes centros de distribución, aunque la mayoría de los países simplemente tienen verano e invierno y tal vez algo entre los dos como límites de volatilidad.

La máxima volatilidad de la gasolina en varios países se ha reducido en años recientes para reducir las emisiones.

Los aromáticos tienen su estructura central al benceno,  $C_6H_6$ , y su función no sólo es darle un olor característico a la gasolina, sino también ayuda para evitar el “knocking” durante la combustión.

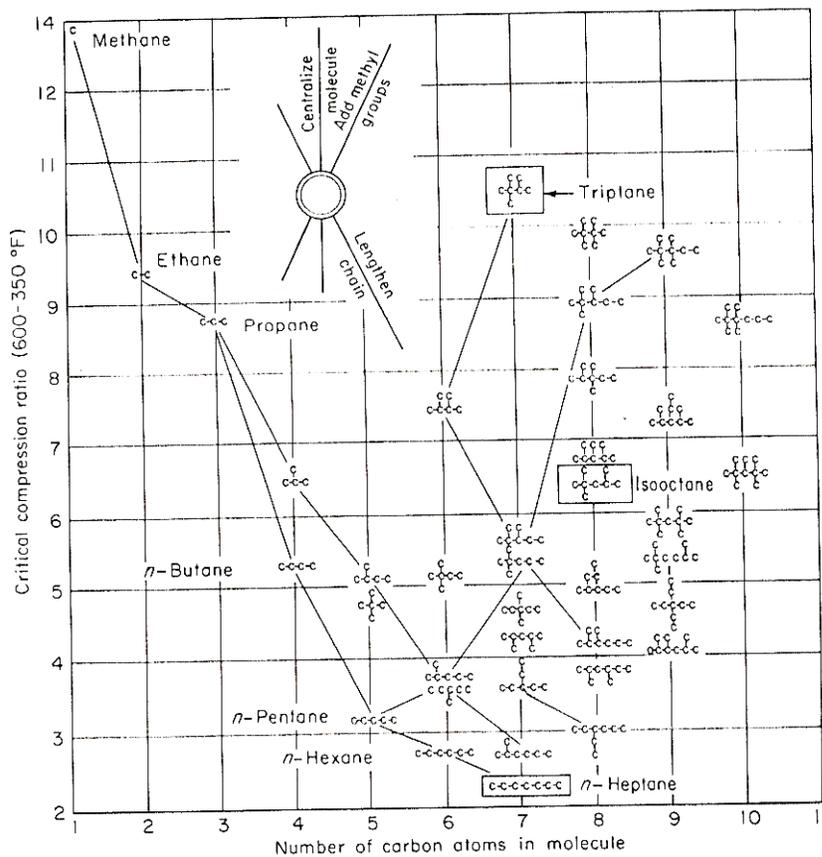


Figura 4.2 Efecto de la estructura del combustible en tendencias de detonación. Imagen modificada de [39]

El número de carbonos es importante para saber si el combustible puede ser comprimido a altas presiones sin que se produzca una explosión no controlada. Como se puede ver en la Figura 4.2

entre más octanos tenga el combustible, mayor será la compresión que soportará sin que detone por la misma. Es por eso que el benceno y otros compuestos en la gasolina son añadidos puesto que ayudan a impedir la autoignición de la mezcla.

Los estándares de la volatilidad pueden ser cambiados (permitiendo un mayor número de componentes de la gasolina ser liberados a la atmósfera) durante emergencias anticipando escasez de gasolina. Un ejemplo es el de Estados Unidos el 31 de Agosto del 2005 en respuesta del huracán Katrina, donde usaron los estándares de la “gasolina de invierno”, que sobrepasa el límite estándar de la “gasolina de verano”. Una gasolina más volátil daña el ozono y contamina el aire (contiene menos aditivos cuya gasolina ha sido reducida su volatilidad artificialmente) aunque provee con menor dificultad las necesidades de gasolina de una nación.

#### **4.2.3.1 Origen de la gasolina.**

Se ha estimado que el planeta contiene mas de  $6.4 \times 10^{15}$  toneladas del carbón orgánico, pero solamente cerca del 18% de éste contribuye a la producción del petróleo [40].

La preocupación de que el petróleo se acabe se debe a la mala interpretación de los términos de medición de la industria de la relación Reserva/Producción (R/P). El R/P está basado en el concepto de reservas de petróleo “probadas”. Las reservas probadas son aquellas cantidades de petróleo que geológicamente o de manera ingenieril pueden ser recuperadas con cierto grado de certidumbre sobre ciertas bases económicas.

#### **4.2.3.2 Composición típica de la gasolina.**

Parece haber una percepción de que todas las gasolinas del mismo número de octano son químicamente similares, y por reglas generales pueden ser promulgadas como “contenido de energía”, “velocidad de flama”, “temperatura de combustión”, etc. Nada de esto está lejano de la verdad. El comportamiento de las gasolinas con ciertos octanos puede ser predecible, usando mezclas previas probadas en laboratorio para ver su comportamiento y usarlas así como un patrón. Las refinerías pueden diseñar y reconfigurar el proceso para producir eficientemente un amplio rango de gasolinas, dependiendo del mercado y los requerimientos regulados.

Es importante hacer notar que la “gasolina oxigenada” tiene una fracción de hidrocarburo que no es muy diferente de la gasolina tradicional, pero esa fracción de hidrocarburo de “gasolina reformulada” (que también posee oxigenantes) es significativamente diferente a la gasolina tradicional.

La técnica para obtener los octanos de mezclas es diferente a medirlo de un combustible puro, la cual requiere ajustes de condiciones para la prueba fuera de los límites aceptables del método de medición. Generalmente, los octanos actuales del combustible puro son similares a los alquenos, pero hay más de 30 números de octanos abajo del “proyecto API 45 de mezcla de Octanos” [41].

Existen algunas otras propiedades de los oxigenantes que deben ser consideradas cuando van a ser usadas como combustibles, particularmente su habilidad de formar “azeotropos” muy volátiles que causan los vapores de combustible aumenten su presión, la naturaleza química de

las emisiones, y su tendencia a separarse en agua-oxigenante. Las gasolinas reformuladas resuelven ese problema con mejor logro que las gasolinas oxigenadas.

Antes de pensar en agregar aromáticos a la gasolina para producir un combustible alto en octanos, hay que recordar que tienen propiedades adversas, por ejemplo, los elastómeros, pudieran generar smog, y resultar en un incremento de emisiones de benceno tóxico. El arte de formular correctamente la gasolina que no cause que los motores cascabeleen, no causen vapores en verano pero que sean fáciles de prender en invierno, que no formen depósitos, que se quemem limpiamente sin residuos y que no se disuelvan o envenenen el catalizador del automóvil o al usuario, está basado en conocer la composición de la gasolina.

#### **4.2.3.3 Hidrocarburos.**

Los hidrocarburos (HCs) son aquellas moléculas que sólo contienen hidrógeno y carbón, ambos son moléculas de combustibles que pueden provocar una explosión (oxidado) para formar agua ( $H_2O$ ) o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Si la combustión no es completada se forma monóxido de carbono (CO). Como el monóxido de carbono puede ser explotado para producir  $CO_2$ , es considerado también un combustible.

El modo que el hidrógeno y los carbonos permanecen unidos determina a qué familia de hidrocarburos pertenecen. Si son de cadena abierta y tienen enlaces simples son llamados hidrocarburos saturados o alcanos debido a que no pueden absorber o aceptar un hidrógeno adicional.

Si los carbonos presentan uno o más enlaces dobles son llamados hidrocarburos no saturados (olefinas o alquenos), y éstos pueden ser convertidos en hidrocarburos saturados adicionando un hidrógeno al doble lazo.

Los hidrocarburos que presentan uno o más enlaces triples entre los átomos de carbón son llamados acetilenos o alquinos.

La gasolina contiene más de 500 hidrocarburos que pueden tener entre 3 y 12 carbonos, y la gasolina puede estar en el rango de ebullición entre  $30^{\circ}C$  y  $220^{\circ}C$  a presión atmosférica.

#### **4.2.3.4 Oxigenantes.**

Los oxigenantes son, en términos muy sencillos, hidrocarburos prensados. Éstos tienen oxígeno que no proveen energía, pero su estructura provee de un razonable valor antidetonante, así son buenos substitutos de los compuestos aromáticos, y también pueden reducir la formación de smog.

La mayoría de los oxigenantes son alcoholes ( $C_x-O-H$ ) o éteres ( $C_x-O-C_y$ ), y contienen de uno a seis carbonos. Las ventajas relativas de compuestos aromáticos y oxigenantes como ecológicamente-amigable y octanos-reforzadores de bajos niveles de toxicidad todavía se están investigando.

Los oxigenantes son adicionados a la gasolina para reducir las emisiones contaminantes, pero son sólo eficientes si las fracciones de los hidrocarburos son cuidadosamente modificados para utilizar la propiedad del octanaje y la volatilidad de los oxigenantes.

Si la fracción de los hidrocarburos no es correctamente modificado, los oxigenantes pueden incrementar la indeseable nube de smog y las emisiones tóxicas. Los oxigenantes no necesariamente reducen todas las toxinas de las emisiones, ni son pensados para eso.

Inicialmente, los oxigenantes fueron añadidos a fracciones de hidrocarburos, y éstos fueron conocidos por “gasolinas oxigenadas”. En 1995 una fracción de dichos hidrocarburos fueron modificados y se les llamó “gasolinas reformuladas” *RFG* de sus siglas en ingles (Reformulated Gasoline), y existen especificaciones diferentes para el estado de California, sin embargo, ambos requieren oxigenantes para proveer de octanos.

La gasolina reformulada para su uso en el estado de California requiere que los compuestos de la gasolina reformulada sean modificados para reducir: volatilidad, bencenos y la emisión de tóxicos. También hay que tener en cuenta que los aromáticos pueden ser reducidos para cumplir los criterios [42].

Los oxigenantes que son añadidos a la gasolina funcionan de dos maneras. Primero tienen una mezcla alta de octanos, y así pueden reemplazar a los aromáticos de alto octanaje en el combustible. Estos aromatizantes son responsables de las desproporcionadas cantidades de emisiones de CO y HC. Esto se conoce como “Efecto de sustitución de aromáticos”. Los oxigenantes también causan que los motores sin sofisticados sistemas se aproximen a la mezcla estequiométrica, reduciendo así las emisiones de CO (2% de oxígeno puede reducir el CO por un 16%) y HC (2% de oxígeno puede reducir HC por un 10%) [43], y otros investigadores [44] han observado reducciones similares que ocurren cuando oxigenantes son añadidos para reformular la gasolina, pero también se ha notado[45] que los niveles de  $\text{NO}_x$  se incrementan, así como toxinas regulares [46].

Sin embargo, en vehículos con sistemas de inyección, el volumen de combustible es incrementado para tener la mezcla estequiométrica en los niveles óptimos. El oxígeno en el combustible no contribuye con energía, en consecuencia, el combustible tiene menor contenido de energía. Para la misma eficiencia y poder de salida, la mayoría de los combustibles que generan la explosión, y el pequeño incremento en eficiencia que los oxigenantes proveen generalmente no compensan por completo al oxígeno.

Existen un sin número de mecanismos químicos envueltos en la reacción de la pre-flama de la combustión de motores de gasolina. Aunque ambos alquilos y oxigenantes son efectivos para suprimir el golpe de la explosión, el modo químico por el cual reaccionan es completamente diferente.

#### **4.2.3.5 Índice de octano.**

Desde 1912 el radio de compresión del motor de combustión interna por chispa ha sido limitado por el indeseado “knock” que daña los motores. El golpeteo que se produce es una descripción de cuando el motor está usando bajo o alto nivel de octano en el combustible. Los ingenieros han culpado a este golpeteo como limitante de mejorar la potencia e incrementar la eficiencia del uso de gasolina si esto pudiera ser evitado.

Kettering asignó a Thomas Midgley Jr. para encontrar la causa del golpeteo. [47] Sus datos obtenidos no fueron concluyentes ya que había varias variables como el tiempo de ignición, la posición de las bujías, la temperatura del motor, etc.

En 1927 Edgar Gram., sugirió usar dos hidrocarburos que pudieran ser producidos en cierta pureza y cantidad [48]. Había un octano llamado 2, 4, 4-trimetil pentano que ahora lo llamamos iso-octano. El octano tenía un alto valor anti-golpeteo y con esto se comprobó su influencia en el golpeteo.

Habiendo decidido una referencia estándar de combustible, una variedad de motores y condiciones de prueba aparecieron, pero hoy en día el más común es el de la Investigación de Número de Octanos (RON), y el número de octanos del motor (MON).

Si no tuviéramos el número de octanos no se sabría que radio de compresión y que potencia puede desarrollar un motor, sin saber esto, se podría comprimir demasiado la gasolina a un grado en que la explosión ocurriera antes del tiempo de la chispa, poniendo al motor fuera de tiempo y produciendo un cascabeleo. [49]

La temperatura de auto ignición de un hidrocarburo está relacionada con su composición molecular. Las moléculas grandes de hidrocarburo, de cadena lineal, tienen temperaturas de auto ignición mucho más bajas que las moléculas más pequeñas de cadena ramificada, dado que la gasolina consiste principalmente en moléculas pequeñas, tiene una temperatura de auto ignición relativamente alta y para que su ignición se realice con eficiencia en un motor, se requiere una fuente de encendido: la chispa de una bujía, no obstante, el interior de los modernos motores de gasolina alcanza temperaturas muy altas y puede haber auto ignición antes de que la chispa encienda el combustible, esto perjudica el rendimiento del motor, cuando hay encendido prematuro el motor muestra un golpeteo y en condiciones severas, detonaciones. Cambiar la longitud de la biela altera el radio de compresión y por lo tanto puede provocar dicha compresión un calentamiento que será mayor y suficiente para encender la mezcla de gasolina/aire antes que la bujía.

El índice de octano de una gasolina es una medida de su capacidad para arder uniformemente sin preencendido ni detonaciones del motor. Éste se determina comparando sus características de detonación en un motor de prueba de un sólo cilindro con las que tienen mezclas de heptano e iso-octano; el heptano detona mucho y se le asigna un índice de octano de cero, mientras que el iso-octano arde uniformemente y recibe un índice de octano 100, así pues, si una gasolina tiene las mismas características de detonación de una mezcla de 13% de heptano y 87% de iso-octano, se le asigna un índice de octano 87.

El índice de octanos en una gasolina puede elevarse aumentando hidrocarburos ramificados y aromáticos o mejoradores de octanaje, algunos de ellos mostrados en la Tabla 4.3 en donde el Tolueno ocupa el primer lugar en combustibles de alta compresión al poseer mayor número de octanos.

Con ciertos aditivos se puede subir el octanaje, si esto se realiza, se puede aumentar el radio de compresión y por ende, la eficiencia del motor. Lamentablemente esto tiene un costo tanto económico como ambiental. Pero nuevas gasolinas están en producción y el índice de octanos cada vez es mayor.

Nombre	Índice de octano
Heptano	0
Hexano	25
Pentano	62
1-Penteno	91
iso-Octano	100
Benceno	106
Metanol	107
Etanol	108
Alcohol ter-butílico	113
Metil ter-butil éter (MTBE)	116
Tolueno	118

Tabla 4. 3 Índice de octanos en hidrocarburos y aromáticos. Tabla basada en datos de [49]

#### 4.2.3.6 Mejoramiento del octanaje.

Si se le agrega tetraetilo de plomo a un galón de gasolina se puede incrementar hasta 15 puntos el índice de octanos. Pero debido a los contaminantes y lo perjudicial que es el plomo se optó por dejarla de usar. Los automóviles con convertidor catalítico no pueden usar gasolina con plomo ya que el platino se cubre con dicho material e impide su funcionamiento. Ahora se agregan otros mejoradores como son: alcohol ter-butílico, MTBE, metanol y etanol, el mejorador de octano más popular es el MTBE debido a su alto índice de octanos.

Las gasolinas oxigenadas como su nombre lo implica, contienen oxígeno lo que permite que arda de manera más completa, y por lo tanto con una mayor eficiencia, además de reducir la emisión de monóxido de carbono hasta en un 17%. El lado negativo es que este combustible proporciona menos energía que la no oxigenada. Su punto positivo es que aumenta el octanaje de la gasolina y reduce los contaminantes de los gases del escape.

En ciudades muy contaminadas se emplea gasolinas reformuladas que no es más que un combustible con menor grado de volatilidad para evitar que los vapores de gasolina contaminen al ozono. El problema surge en ciudades muy contaminadas con inviernos muy fríos, en donde una gasolina volátil es necesaria para arrancar un automóvil.

Se han sugerido también plantaciones de petróleo, unas 2.000 variedades de plantas del género Euphorbia atrapan y almacenan energía solar como hidrocarburos, en lugar de carbohidratos, la posibilidad de extraer y utilizar estos compuestos como un sustituto del petróleo será tema de los investigadores. [49]

## **4.2.4 ENERGÍAS ALTERNAS.**

### **4.2.4.1 Electricidad.**

La electricidad no es un combustible, sin embargo es usado como energía alternativa para mover transportes. La electricidad puede ser usada para alimentar autos eléctricos y de celdas de combustible. Cuando es usado para alimentar vehículos eléctricos (EV`s por sus siglas en inglés), la electricidad es almacenada en baterías, que puede ser recargada al ser conectada a un enchufe eléctrico. La electricidad para recargar las baterías puede venir de hidroeléctricas o termoeléctricas. El principal beneficio de vehículos impulsados por electricidad es una baja emisión de contaminantes al momento de uso, aunque las emisiones generadas en la producción de electricidad en las plantas de energía pueden ser directamente atribuidas al vehículo.

El aspecto económico de usar vehículos eléctricos incluye el alto costo inicial, que puede ser amortizado por un bajo costo de mantenimiento. Cuando es comparado con costo de la gasolina, el costo de una cantidad equivalente de combustible para un vehículo eléctrico es menor. El mantenimiento de los vehículos eléctricos es menor debido a que tienen menor cantidad de partes móviles a las cuales darles servicio o reemplazo.

### **4.2.4.2 Etanol.**

El etanol (alcohol etílico,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) es un grupo de componentes químicos (alcoholes) con moléculas que contienen un grupo de hidroxilo (OH) unido a un átomo de carbono. El etanol es producido a través de la fermentación de productos agrícolas tales como la caña de azúcar y maíz entre otros.

La mayoría del etanol del mundo es producido de la caña de azúcar, principalmente en Brasil. En Estados Unidos, el etanol es producido del maíz. El etanol es usado en vehículos de alto octanaje (debido al radio de compresión). Más de cuatro millones de autos corren con etanol puro, hidratado en Brasil, y toda la gasolina en el país es mezclado con etanol anhidro (20-26% etanol), como resultado de un programa de gobierno para generar etanol de la caña de azúcar propuesto en los años 70. En los Estados Unidos, existe un programa similar que está comenzado y el número de vehículos que usan etanol está incrementando.

El etanol hace un excelente combustible para motores: posee un número de octanos que exceden a los octanos de la gasolina y una presión de vapor que es más baja que el de la gasolina, que resulta en una emisión menor de vapores.

La flamabilidad del etanol en el aire es mucho más baja que aquellos de la gasolina, que reduce el número de accidentes por incendio del vehículo. El etanol anhidro (deshidratado) posee menor y mayores valores de energía de 21.2 y 23.4 mega joules (MJ)/litro, respectivamente; para la gasolina los valores son 30.1 y 34.9 MJ/litros. Debido a que el etanol en Brasil es producido de la caña de azúcar, posee el menor costo de producción en el mundo. Esto es debido no sólo a los altos niveles de productividad y agricultura, pero también al extremadamente favorable balance de energía de la producción de alcohol. En los Estados Unidos, el etanol es producido del maíz y representa un gran consumo de combustibles fósiles, con un menor balance de energía, aunque existe una controversia entre especialistas.

La Tabla 4.4 muestra una comparación del balance de energía en Brasil (de la caña de azúcar) y los Estados Unidos (del maíz). El etanol puede ser producido de celulosa como el bagazo, fibra de arroz, etc., por un proceso que aún está en desarrollo.

Product	Source	Fossil fuel consumption in ethanol production (MJ/liter of ethanol) <sup>b</sup>	Final energy balance <sup>c</sup>
Ethanol from sugarcane <sup>d</sup>	Macedo (2000)	1.89 <sup>b</sup>	11.2:1
Ethanol from corn			
Existing plants <sup>e</sup>	Pimentel (1991)	42.6	Negative
Laboratory tests <sup>f</sup>	Pimentel (1991)	25.6	Negative
Existing plants <sup>e</sup>	Unnasch (2000)	11.8	1.8:1
With allocation to coproducts <sup>g</sup>	Unnasch (2000)	7.19	2.9:1

<sup>a</sup>Lower ethanol energy value: 21.2MJ/liter.

<sup>b</sup>Fossil fuel consumption in ethanol production corresponds to diesel oil use in the agricultural phase and during transport, to coal and natural gas use in corn-based ethanol plants, and to natural gas use for fertilizer production.

<sup>c</sup>Final energy balance corresponds to the low energy content in 1 liter of ethanol divided by the total fossil fuel consumption to produce 1 liter of ethanol.

<sup>d</sup>Includes bagasse surplus production (Brazil); see footnote b.

<sup>e</sup>Large plants in the United States.

<sup>f</sup>Using membrane technology.

<sup>g</sup>Considering the coproduction of corn oil and animal feed products, the allocation of energy inputs corresponds to 1096 kcal/liter of ethanol.

<sup>h</sup>In sugarcane-origin ethanol plants, there is no fossil fuel consumption in the plant (all fuel consumed in the plant is sugarcane bagasse, the by-product of sugarcane crushing); fossil fuel consumption corresponds to the agricultural phase and fertilizer production.

Tabla 4. 4 Balance de energía obtenido de caña de azúcar y de maíz. Tabla tomada de [50]

En los Estados Unidos, debido al soporte que tiene la producción de maíz y el apoyo del Departamento de Energía y Agricultura, la producción de los vehículos de etanol se ha incrementado. Las automotrices empezaron en 1997 a producir automóviles y camionetas que puedan usar ya sea etanol o gasolina.

**Experiencia de Brasil.**- El programa brasileño de alcohol (PROALCOOL) para producir etanol a partir de la caña de azúcar fue establecido en los años 70, debido a la crisis del petróleo, apuntando a reducir la importación del crudo así como también ser una solución al problema de la fluctuación del precio de azúcar en el mercado internacional. El programa posee una visión ambiental, económica, y aspectos sociales fuertemente positiva, y se ha convertido en el programa más importante de energía a nivel mundial. En 1970, cerca de 50 millones de toneladas de azúcar fueron producidas. En 2002, la producción de caña de azúcar alcanzó los 300 millones de toneladas, produciendo 19 toneladas de azúcar y 12 billones de litros de alcohol (etanol). En 2002, la tierra cultivada por caña de azúcar en Brasil era aproximadamente 4.2 millones de hectáreas (60% en el Estado de Sao Paulo, donde la caña de azúcar ha reemplazado, en una gran extensión, la plantación de café).

El promedio de productividad del cultivo de la caña de azúcar es de 70 toneladas/hectárea, pero en Sao Paulo hay molinos con una productividad de 100 toneladas de caña por hectárea. El costo de la producción de etanol estuvo cerca de \$100/barril en la etapa inicial del programa en 1980.

Después de eso, cayeron rápidamente, a mitad de ese valor en 1990, debido a escalas económicas y avances tecnológicos, seguidos por un declive más lento en años siguientes.

Considerando el valor ahorrado al evitar la importación del crudo por el desplazamiento del mismo debido al uso de etanol, es posible demostrar que el programa de alcohol ha sido un camino eficiente para intercambiar la deuda en dólares en subsidios de moneda nacional, que era pagado por los usuarios del combustible líquido de fósiles.

La decisión de usar caña de azúcar para producir etanol aparte del azúcar fue política y económica que involucró la inversión del gobierno. Dicha decisión fue tomada en Brasil en 1975, cuando el gobierno federal decidió fomentar la producción de alcohol para remplazar la gasolina, con la idea de reducir la importación de petróleo, que colocaba ataduras en el balance de los tratados externos. En este tiempo, el precio de azúcar en el mercado internacional fue declinando rápidamente y se volvió ventajoso cambiar de azúcar a producción de alcohol. [50]

Entre 1975 y 1985, la producción de la caña de azúcar cuadruplicó y el alcohol se convirtió en un importante combustible usado en el país. En 2002, había 321 unidades produciendo azúcar y/o alcohol (232 en el centro-sur de Brasil y 89 en el noreste Brasil). Una evaluación oficial del total de inversión en el sector industrial y de agricultura para la producción de etanol para el uso automotriz concluido en el periodo 1975-1989, un total de \$4.92 billones (en 2001 dólares americanos) fue invertido en el programa. Ahorrando una importación de petróleo de \$43.5 billones (2001 dólares americanos) de 1975 al 2000. Como se muestra en la Tabla 4.5 el costo de la gasolina es mayor en Brasil que en Estados Unidos, sin embargo es Brasil posee un menor precio de etanol, dándole una ventaja en un futuro cercano.

Fuel	Prices			
	Brazil		United States	
	Low	High	Low	High
Gasoline	20.92	24.69	11.49	20.38
Natural gas	7.63	7.94	6.21	6.48
Diesel	8.67	9.75	8.81	10.41
Ethanol <sup>c</sup>	16.39	17.76	17.92	21.90
Methanol	na <sup>d</sup>	na <sup>d</sup>	12.93	16.14

<sup>a</sup>Data from Brazilian Petroleum National, the Alternative Fuels Data Center, the U.S. Gas Price Watch, and the Ministry of Science and Technology. Calculations by the Brazilian Reference Center on Biomass.

<sup>b</sup>All prices in U.S. dollars (\$/m<sup>3</sup>); average prices taken between January and July, 2002. Exchange rate, Brazilian real (R)/U.S. dollar, 2.8/1.

<sup>c</sup>Brazilian ethanol from sugarcane and U.S. ethanol from corn.

<sup>d</sup>na, Not available.

Tabla 4. 5 Comparativa de precios de combustible para el transporte en Brasil y EE.UU.  
Tabla modificada de [50]

En Brasil el etanol es usado en dos formas: Como un incrementador de octanos en la gasolina en la forma 20-26% etanol anhidro (99.61 Gay-Lussac y 0.4% agua) y gasolina, en una mezcla llamada “gasohol”, o usado también en motores de etanol puro en la forma de etanol deshidratado. El incremento de producción y el uso del etanol en Brasil fue posible debido a tres acciones de gobierno durante el lanzamiento del programa de etanol. Primero fue decidido que la

compañía estatal de petróleo, Petrobras, debiera garantizar la compra de una cantidad fija de etanol; segundo, incentivos económicos fueron ofrecidos por agroindustriales deseosos de producir cierta cantidad de etanol, en la forma de préstamo con intereses bajos, de 1980 a 1985; tercero, fueron tomadas acciones para hacer atractivo el etanol a los consumidores al venderlo en las bombas de combustible a un 59% del precio de la gasolina. Esto fue posible debido a que el gobierno en ese tiempo dictaba los precios de la gasolina.

El subsidio de la producción de etanol ha sido discontinuado y el etanol se vende a un 60-70% del precio de la gasolina en una estación de gas, debido a significativas reducciones del costo de producción. Estos resultados muestran una competitividad del etanol con la gasolina. Considerando la alta tasa de consumo para los autos de etanol, el precio del etanol en una estación de combustible pudiera ser cuando mucho a un 80% del precio de la gasolina [50].

**Experiencia de Estados Unidos.-** En el 2000, 19.7 millones de barriles de crudo y productos de petróleo fueron consumidos en los Estados Unidos por día (25% de la producción mundial); más de la mitad de esta cantidad fue importada. Los Estados Unidos tiene el menor precio de energía en el mundo. En 2001, combustibles de mezcla de etanol representaron más del 12% de las ventas de motores de gasolina, con 1.77 billones de galones producidos del maíz. El maíz es usado como una fuente principal de alimentación, en contraste con las prácticas de Brasil, donde todo el etanol es producido de la caña de azúcar, que es considerablemente menos caro que el maíz. El Congreso de los Estados Unidos estableció un programa de Etanol en 1979 para estimular las economías rurales y reducir la dependencia de Estados Unidos de importar petróleo. El etanol está siendo usado para incrementar la eficiencia de la gasolina debido a que se puede aumentar el radio de compresión.

California actualmente usa 3.8 billones de galones/año de MTBE, comparado con el total de uso de EE.UU. de 4.5 billones de galones/año. MTBE, como el etanol, es un oxigenante que permite menores emisiones contaminantes de la gasolina. Bajo ley, en áreas con una alta contaminación (ciudades de California), la gasolina debe de contener al menos 2% de oxígeno. Estos requerimientos aplican para cerca del 70% de la gasolina vendida en California. El uso de MTBE es discontinuada en 2003, siendo reemplazada por el etanol, el cual no representa riesgo de contaminación de los abastecimientos de agua. Su producción en este país se incrementó de 150 millones de galones en 1980 a más de 1700 millones de galones en 2001, de acuerdo a la asociación de combustibles renovables. En el periodo de 1992-2001, la demanda de EE.UU. para el etanol se incrementó de 50 a 100 mil barriles/día, donde la demanda de MTBE se incrementó de 100 a 270 mil barriles/día.

De acuerdo a la asociación de combustibles renovables, la producción de etanol en los Estados Unidos presenta ciertas ventajas:

Genera un derrame de \$4.5 billones de ingresos a las granjas.

1. Más de 900,000 granjeros son miembros de cooperativas de la producción del etanol; estas cooperativas son responsables del 50% de la capacidad de producción desde 1990.
2. Produce más de 200,000 empleos directos o indirectos.
3. Reduce el costo de intercambio por ·2 billones/año.

**Europa.-** En la Unión Europea, actualmente sólo 0.01 billones de metros cúbicos de etanol se usan como combustible. En 1994, la Unión Europea decidió permitir concesión de impuestos para el desarrollo de etanol como combustible y otros bio-combustibles, como resultado un

número de proyectos ha sido anunciados en Suecia y España. Francia posee uno de los más desarrollados programas de combustibles de alcohol en la Unión Europea. La ley de 1996 requiere la adición de oxigenantes como compuestos del combustible, y al etanol le fue dado una excepción de impuesto.

La Comisión Europea (EC) se encarga actualmente de una directiva que pueda forzar a miembros del Estado a requerir 2% de motores de bio-combustibles. Francia, Austria y Alemania han experimentado actualmente con biodiesel, y otros países, incluyendo Suecia, España y Francia usan etanol o etil ter-butyl éter (ETBE) en gasolina. Suecia es el primer país de Europa que ha implementado un proyecto mayor introduciendo combustibles E85 en vehículos [50].

**Australia.**- Existe una planta bajo desarrollo que permitirá a Australia producir 350 millones de litros de etanol anualmente en el año 2010. El incremento de producción, equivalente a aproximadamente el 7% del mercado actual de petróleo, dará un total de 1% del líquido en el mercado. El ministro de agricultura intenta asegurar que los bio-combustibles contribuyan al 2% del combustible de transporte de Australia para el 2010 [50].

Se anunció que el gobierno no forzará el uso de ciertos niveles de etanol. El gobierno les ha preguntado a los azucareros un plan de crecimiento de cosechas para su transformación en etanol y que sea un país sustentable. Los azucareros también anunciaron una campaña de educación que beneficiara al etanol. Los granjeros esperan ganar el apoyo de los demás granjeros del resto del país.

**Nueva Zelanda.**- Se ha anunciado que su flota de vehículos será cambiada a una mezcla de petróleo y etanol. A diferencia de los demás países, no se fomentará el cultivo de caña de azúcar por la contaminación que ésta pudiera provocar, mejor optarán por cereales para su producción [50].

**África del Sur.**- Existen cuatro mayoristas en la producción en Sudáfrica. Los más grandes producen hasta 400 millones de litros/año de etanol del carbón. Esta capacidad fue desarrollada durante los años 50s para reducir la dependencia de la importación del crudo [50].

La producción sintética del etanol puede llegar a 400 millones de litros/año, pero usualmente fluctúa con la demanda mundial, y con el mercado de Brasil en particular. Desde los 90s, el esfuerzo de introducir etanol derivado del carbón en gasolina ha representado fallas debido a que las compañías automotrices se quejan de la baja calidad del etanol. Los alcoholes derivados del carbón no son puros. El aditivo original derivado contiene únicamente 65% de etanol, el cual provoca problemas en el motor. En 1990, los problemas de calidad parecen haber sido resueltos a través de desarrollo de una mezcla de etanol del 85%, y el carbón derivado es usado en Sudáfrica como una mezcla de 12% con gasolina [50]. También producen el etanol a partir del gas natural, pero es muy caro.

**Tailandia.**- En el 2000, Tailandia lanzó un programa para mezclar un 10% de etanol con gasolina. La meta era la producción de 730 millones de litros/año para el 2002. Uno de los grupos más grandes de azúcar anunció que invertiría Bt800 en una planta de etanol. Este grupo aplicará para una licencia para la producción del etanol. Se espera la producción de 160,000 litros de etanol/día [50].

**Japón.-** Con el propósito de reducir las emisiones de los automóviles, Japón está considerando introducir una política que enfatizará el uso de la mezcla de etanol con gasolina. Esta política es un resultado de la presión de cortar las emisiones contaminantes que conllevan al calentamiento global. Siendo Japón el segundo consumidor más grande de gasolina en el mundo, importa el crudo para producir la gasolina y no posee terreno para plantaciones adicionales y así generar el biocombustible, por lo que es uno de los países que no le beneficiará en su economía el ingreso de automóviles con consumo de combustible orgánico.

Por ende, el uso de bio-combustibles podría crear un mercado de exportación para los países productores. La casa de cambio de Mitsui & Co. está planteando el uso de etanol en Japón. Mitsui estima un mercado para Japón a una mezcla del 10% de aproximadamente 6 millones kilolitros/año. Debido a un amplio margen de gasolina a bajo costo derivado de la importación del crudo (un ejemplo es cuando el presidente Fox compró gasolina a China), los japoneses aún habrían de usar el etanol como combustible. El interés de Japón en energía verde se incrementó en 1997 con el Protocolo de Kyoto, que está en efecto desde el 2002. Este protocolo apunta a la reducción de emisiones de dióxido de carbón por un 5.2% para el 2012 [50].

**Malawi.-** Como Zimbabwe, Malawi estaba al frente del desarrollo de combustible de alcohol; Malawi ha mezclado etanol con gasolina continuamente desde 1982, y ha eliminado el plomo. Debido a otros costos, el precio de la gasolina es de aproximadamente 56 centavos/litro en gasolineras. La compañía de etanol de Malawi Ltd., produce cerca de 10-12 millones de litros/año, otorgando un 15% a la mezcla de gasolina [50].

**China.-** China también está muy interesada en introducir el programa de alcohol. Un programa piloto fue introducido en la provincial de Jilin en 2001, y en 2002, una delegación China de la provincia de Heilonjiang visitó Brasil. El gobierno chino está preocupado acerca del incremento del consumo de petróleo en el país (cerca de 7-7.5%/año entre 2000 y 2005) [50] y el alcohol-gasolina como mezcla parece ser una interesante opción debido a la generación de empleos y el potencial de reducir la contaminación en grandes ciudades de China.

China se encuentra corto en combustible y produce sólo el 70% de lo que la nación demanda [50], y el país se encuentra con una economía de muchos granjeros. Para poder combatir ambos problemas, China está considerando un nuevo programa para lanzar su primera planta de etanol. A pesar de los fabulosos números que arroja este proyecto, éste no está contemplado a empezar de manera inmediata. Aunque el etanol es amigable con el ambiente, es aún caro de producir en China y hay dificultades en transportarlo. China espera que el costo se va a reducir en los siguientes 5 años, haciendo el etanol una opción viable para el país.

China está animando el uso de combustibles alternativos en el “Plan de los cinco años”, que incluye pruebas de la producción de etanol.

**India.-** India es una de las más grandes productoras de caña de azúcar en el mundo (300 millones de toneladas, similar a la producción de Brasil) y tiene un vasto potencial en producir etanol como combustible, el cual reduciría significativamente la contaminación del aire y la importación de petróleo y sus productos. La destilería india tiene una capacidad instalada de más de 3 billones de litros (la producción de Brasil es en promedio 13 billones de litros de alcohol por año), pero sólo opera al 50% de su capacidad [50]. También, la industria azucarera india se ha topado con un futuro incierto, con grandes volúmenes de acciones, un no atractivo balance de exportaciones y un margen de operación estrecho.

Existe también el problema relacionado con el pago de las importaciones de petróleo. Por ende, hay un gran interés en el etanol como una gran oportunidad de negocio, principalmente para producir etanol anhidro para ser usado como mezcla de 5% etanol-gasolina.

El gobierno de Delhi está revisando el etanol, el gobierno espera en hacer el etanol más atractivo a las compañías petroleras que el etanol mezclado con petróleo. Oficiales del gobierno están actualmente preocupados por los azucareros, que han encontrado dificultades en vender sus siembras.

India produce 18.5 millones de toneladas de azúcar en años pasados (anualmente). Se espera que, si la prueba sale exitosa, la mezcla del 5% etanol-gasolina será vendida en todo el país [50]. El gobierno planea liberar el precio del petróleo.

#### **4.2.4.3 Hidrógeno.**

El hidrógeno ( $H_2$ ) es un gas que tiene un considerable potencial como combustible alternativo para la transportación, pero en este punto, existe una presencia de mercado reducida. El más importante aspecto es su uso en celdas de combustible en autos eléctricos en el futuro. Autos de celdas de combustible están en desarrollo por la mayoría de fabricantes, pero el hidrógeno aún no tiene una estructura de distribución. Las celdas de combustible producen electricidad. Similar a una batería, una celda de combustible convierte la energía producida por una reacción química directamente en potencia eléctrica usable.

Sin embargo, como las baterías, las celdas de combustible necesitan una fuente externa de combustible (típicamente hidrógeno) y genera electricidad mientras el combustible sea distribuido, significando que nunca necesita una recarga eléctrica.

Por dentro de la mayoría de las celdas de combustible, el oxígeno e hidrógeno se combinan en un tanque por medio de una reacción electroquímica para producir electricidad y agua caliente. Como un simple mecanismo electroquímico, una celda de combustible no quema el combustible, permitiendo operar sin contaminación carburante. Esto también hace que sea una celda silenciosa, confiable y muy eficiente en cuanto al consumo.

Un impedimento para el uso de este combustible es la producción y el almacenaje de hidrógeno. El método predominante de fabricar hidrógeno hoy en día involucra el uso de gas natural. Combustibles derivados del petróleo pueden ser usados, pero esto puede comprometer el mayor objetivo de usar combustibles adicionales, por ejemplo, la reducción del uso del petróleo.

La producción del hidrógeno es mediante una reacción de transformación de un combustible actual por una reacción química que extrae el hidrógeno del combustible, produciendo una mezcla de gases de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno.

El hidrógeno debe ser separado del CO para ser alimentado a la celda de combustible. Esta reacción puede ser realizada en un sistema estacionario (y el vehículo cargará una presión alta de hidrógeno en un tanque a presión o a bordo en un sistema de convertidor de combustible por lo que el vehículo cargará con un tanque convencional para alimentar al sistema.

Ambas posibilidades están bajo estudio en varios países. De acuerdo a algunos especialistas, el etanol deberá ser el combustible de opción debido a sus bajas emisiones y porque es producido a través de una fuente renovable de biomasa.

Aunque las celdas de combustible fueron anunciadas hace años, no hay noticias nuevas: la primera fue producida en 1839 [50]. Celdas de combustible impulsaron la aeronave espacial Gemini en 1960, continúan alimentando a la estación espacial, y han sido usadas por los astronautas y la administración espacial (NASA) en otras misiones del espacio. Aunque la operación es simple, han sido bastante costosas.

Un estudio extensivo y desarrollo ha prometido el vasto uso de las celdas de combustible en un futuro cercano. La mayoría de las compañías automotrices poseen autos con celdas de combustible en pruebas. Por el kilowatt, el costo de las celdas de combustible aun cuesta más que combustibles comunes, pero un gran número de compañías están escogiendo las celdas debido a sus beneficios. Una producción en masa espera que bajen los costos de fabricación.

De acuerdo al laboratorio de energía renovable de EE.UU. los precios del hidrógeno dependen de la distancia a transportar y el tipo de hidrógeno (de 17 a 55 centavos/100 ft<sup>3</sup>) [50].

#### **4.2.4.4 Metanol.**

El metanol o alcohol metílico es un alcohol (CH<sub>3</sub>OH) que ha sido usado como un combustible alternativo en vehículos que trabajan con M85 (mezcla de 85% metanol y 15% gasolina). Sin embargo el metanol no es comúnmente usado en nuestros días debido a que las automotrices no están construyendo vehículos impulsados por metanol.

El metanol puede ser usado para hacer metil-ter-butíl éter (MTBE), un oxigenante que es mezclado con gasolina para incrementar el octanaje y reducir la emisión de contaminación. Sin embargo, la producción de MTBE y su uso han declinado debido al factor que el MTBE contamina mantos acuíferos subterráneos. En un futuro, el metanol podría ser un importante combustible, en adición con el etanol, para producir el hidrógeno necesario para alimentar vehículos de celdas de combustible; dicho proceso está aún en desarrollo.

El metanol es predominantemente producido por la reformación de gas natural para crear un gas sintético, el cual es alimentado en un reactor en la presencia de un catalizador para producir metanol y vapor de agua. También una variedad de elementos aparte del gas natural se han usado, hoy en día, la economía favorece al gas natural. El gas sintético se refiere a la combinación de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>).

Los vehículos de etanol al igual que los de metanol emiten pequeñas cantidades de contaminantes aéreos, como son los hidrocarburos, partículas y NO<sub>x</sub>, mientras que los de gasolina emiten mayores cantidades de los mismos. Sin embargo el manejo del etanol es mucho más peligroso comparado con el etanol debido a su alto impacto negativo en la salud.

La demanda mundial de metanol es cerca de 32 millones de toneladas al año y está incrementando modestamente por un 2-3%/año [51], pero con cambios significativos en la industria. Desde los inicios de los años 80s, nueva tecnología a eficientazo los sitios de producción. El mapa de demanda ha cambiado en Europa; el metanol hace un par de años era

mezclado con la gasolina (cuando su costo era la mitad de la gasolina), pero ahora no es competitivo debido a los precios del petróleo.

La demanda aumenta debido también a la gasolina reformulada y el hecho que Estados Unidos promueve el uso de MTBE derivado del metanol. Dicho país produce casi un cuarto del abastecimiento del metanol, pero hay una significativa cantidad de metanol en el mundo. La Figura 4.3 muestra la producción mundial de metanol, indicando la capacidad excesiva.

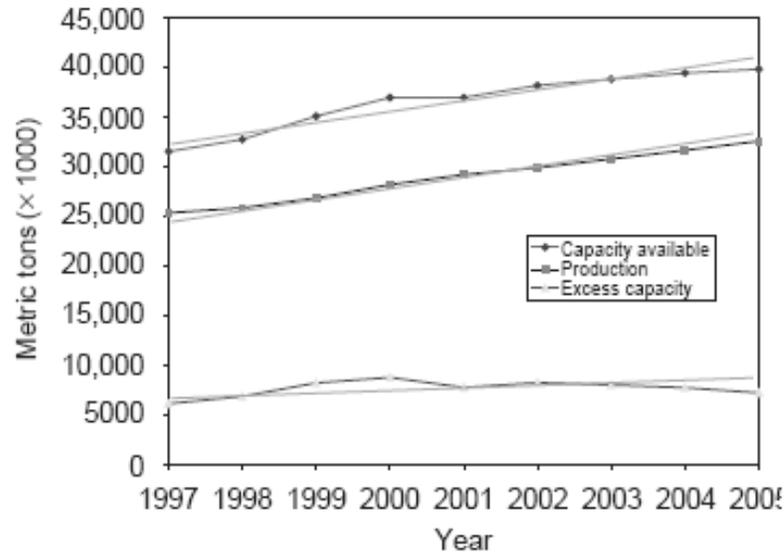


Figura 4.3 Suplemento mundial de metanol. Imagen modificada de [51]

El mercado más grande para el metanol en los Estados Unidos es para la producción de MTBE; hay cerca de 50 plantas en el país. Está estimado que 3.3 billones de galones de MTBE fueron usados en 1996 para el aire limpio en el uso de gasolina reformulada en el 30% del mercado de Estados Unidos. MTBE desplaza a cualquier otro combustible para vehículos alterno al usar 10 veces más a la gasolina que otros en combinación con ella.

Los precios del metanol en los Estados Unidos han variado significativamente desde 1989; se duplicaron para 1994 y regresaron a precios de 1993 en 1996. En el 2002, el precio del metanol alcanzó los 64 centavos/galón, significativamente mayor que precios europeos (61.7 centavos/galón) y precios de Asia (55.9 centavos/galón).

#### 4.2.4.5 Gas natural.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ), pero también contiene hidrocarburos tales como el etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) y propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y otros gases tales como el nitrógeno, helio, dióxido de carbono, hidrógeno sulfuro y vapores de agua. Se produce ya sea de pozos en conjunto con la producción de petróleo crudo. El gas natural es consumido de forma residencial, comercial, industrial, y en diferentes mercados. El interés en el gas natural es una alternativa de combustible y también a sus propiedades de combustión limpia, con bajo sulfuro y otras partículas. Las emisiones de carbón del gas natural son menores en comparación a aquellas con partículas dañinas.

Debido al estado gaseoso natural de este combustible, debe de ser almacenado a bordo de un vehículo con el gas en estado compresible o en un estado líquido. El gas natural comúnmente se distribuye por tuberías. Las reservas de gas natural están mejor distribuidas que las del petróleo. De acuerdo a BP Global, las reservas para el fin del 2000 sumaron 5304 trillones de pies cúbicos, con un 37.8% de las reservas en la Unión Soviética, 35% en el Medio Este, 6.8% en Pacífico de Asia, 6.8% en el Norte de América, 4.6% en el sur y centro de América, y 3.5% en Europa [50].

En contraste, las reservas de petróleo están fuertemente concentradas en países árabes, que contienen 65.3% de las reservas para finales del 2000. Las reservas de gas disponibles hoy en día durarán unos 60 años al índice de consumo actual.

Aun cuando la producción y el consumo se incrementa con el tiempo, el pasado nos sugiere que las reservas se incrementarán, especialmente a la tecnología empleada para producir gas natural.

El consumo del gas natural como combustible se incrementa más que el consumo que cualquier otro combustible en el 2000, con un consumo global alcanzando el 4.8%, el valor más alto desde 1996. Esto fue debido al alto incremento del uso de dicho gas por un 5.1% en los Estados Unidos y Canadá, que juntos representan más del 30% de la demanda mundial. El consumo chino se incrementó por un 16%, aunque China aún representa sólo el 1% del consumo mundial. En la Unión Soviética el consumo se incrementó en 2.9%, lo más alto de la década.

La producción de gas subió 4.3% mundialmente, más que el doble que el promedio de la última década. Este incremento es debido al desarrollo de Estados Unidos y Canadá, donde la producción fue de 3.7% en 1994. El incremento subió en Turkmenistán, Nigeria y Oman en un 50% y 10% en 11 países. Rusia siendo el segundo mayor productor produce 68 bcf/día y consume cerca de 53 bcf/día. Europa produce menos de 30 bcf/día pero consume cerca de 1.5 veces más. El balance es prácticamente parejo en el sur y centro de América (con poco menos de 10bcf/día) y es casi parejo en el Pacífico de Asia (30 bcf/día, más el consumo que la producción) y el Medio Este (20 bcf/día, mayor la producción que el consumo).

África produce más de 10 bcf/día pero consume menos de la mitad. En el mercado de Estados Unidos, el precio del gas natural es cerca de \$1.5/millones de unidades térmicas inglesas (MMBtu) debajo del precio del petróleo, que fluctúa alrededor de \$2.1 a 3.5/MMBtu para el final del 2002 (de acuerdo al Departamento de Energía de EE.UU.) [52]

#### **4.2.4.6 Propano.**

El gas de petróleo licuado (LPG) consiste primordialmente en propano ( $C_3H_8$ ) con otros hidrocarburos tales como propileno, butano y butileno, en varias mezclas. Sin embargo, en general, la mezcla es puramente propano. Los componentes del LPG son gases en temperaturas y presiones normales. Los vehículos impulsados por propano expulsan menos carbón comparado con la gasolina y el diesel en los vehículos. LPG es un derivado de dos fuentes: gas natural procesado y refinado de petróleo. Cuando el gas natural es producido, contiene metano y otros hidrocarburos ligeros que son separados en una planta de gases. De los gases que se obtienen, se tiene mayor mercado para el propano.

Aproximadamente 1.3 billones de barriles de propano son producidos mundialmente [50]. Aunque los Estados Unidos es el consumidor más grande de propano, el consumo de Asia se está

incrementando. De acuerdo a la Asociación Mundial de Gas LP, durante 1999 China logró una tasa de crecimiento arriba de 20% en el consumo de propano, principalmente en el sector residencial y comercial. Otro notable incremento fue dado por India, Irán y Corea del Norte.

#### 4.2.4.7 Energía solar.

La energía solar usa cierta tecnología para producir calor y electricidad usando los rayos del sol. La electricidad producida por la energía solar a través de celdas fotovoltaicas puede ser usadas en automóviles eléctricos convencionales. En la Figura 4.4 se muestra un auto solar que promueve el uso de energía alternativa.

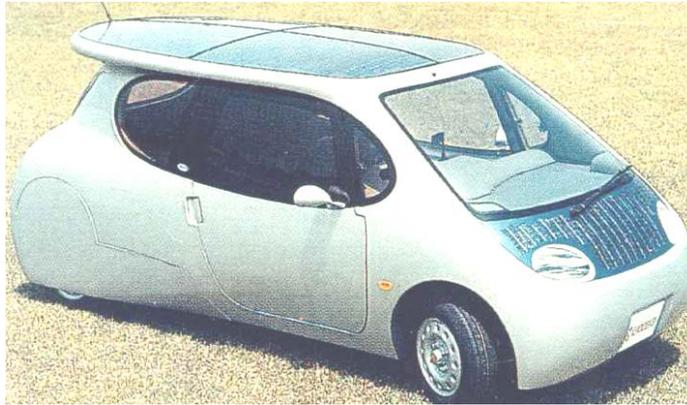


Figura 4. 4 Auto solar. Imagen tomada de [53]

Al usar energía solar directamente para alimentar los vehículos se contamina tiene una contaminación casi nula (sólo el desperdicio de las baterías). Esta energía se ha investigado principalmente para el uso en vehículos de competencia y de demostración pensando que en un futuro la tecnología este disponible para más usuarios.

Los vehículos solares no están disponibles para el público en general, y no son actualmente considerados para producción. La energía solar es 100% renovable y un vehículo puede caminar con este combustible emitiendo cero contaminantes.

Las investigaciones sobre energía solar ahora apuntan no sólo a su uso, sino también al final del proceso, esto quiere decir, lo que se hará con las baterías cuando su ciclo de vida haya finalizado. Este sigue siendo el gran problema y aún no se ha encontrado la solución y es por eso que los autos híbridos no tienen el auge que se esperaba de ellos.

### 4.3 COMPARACIÓN DE COMBUSTIBLES

Se han mencionado diferentes combustibles que pudieran ser usados en el futuro y combustibles que se usan actualmente. Todos tienen sus ventajas y desventajas, y es por eso que se realiza la siguiente tabla que para nuestros días presenta dichas ventajas y desventajas.

En la Tabla 4.6 de mencionan los puntos favorables y los no favorables de los combustibles más usados, esto con el fin de dar una idea del rumbo de investigaciones futuras.

En la Tabla 4.7 se muestran los combustibles que se encuentran en desarrollo.

	<b>FAVORABLES</b>	<b>NO FAVORABLES</b>
<b>NAFTERO</b>	Posibilidad de usar catalizadores para anular casi totalmente la contaminación.	Monóxido de carbono. Combustible no renovable. Bajo rendimiento.
<b>DIESEL</b>	No contamina con monóxido de carbono Económico. Bajo consumo.	Contaminantes pesados: ácido sulfúrico, cadmio, aluminio, etc.
<b>GAS NATURAL</b>	Sólo emite dióxido de carbono y agua, y muy bajo nivel de contaminantes como el CO y el N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Económico.	Al ser un derivado del petróleo, sus reservas están acotadas, se calcula existencias solo hasta 2050. Bajo rendimiento.
<b>GAS LICUADO DE PETROLEO</b>	Silencioso. Funciona también en nafteros con una mínima reforma. Menor contaminación.	Derivado de petróleo, sus reservas están acotadas. Pocas estaciones de servicios que lo expendan.

Tabla 4. 6 Ventajas y desventajas de los combustibles más usados. Tabla basada en [54]

	<b>FAVORABLES</b>	<b>NO FAVORABLES</b>
<b>ETANOL (bioalcohol)</b>	Es renovable de origen agrícola. Puede obtenerse a partir de muchas clases de vegetales. Poco contaminante, emite menos compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos que la nafta.	El motor a nafta necesita grandes cambios para ser adaptado. No arranca con temperaturas menores de 10 ° C. Bajo rendimiento. Caro.
<b>BIOACEITES (vegetales)</b>	Proceden del cultivo por lo que son renovables. Muy poco contaminante.	Materia prima cara. Los motores convencionales de combustión necesitan grandes cambios para que funcionen con este tipo de aceite.
<b>BIODIESEL (aceite modificado estermetilico)</b>	En su producción se obtiene harina de alto contenido en proteínas para la ganadería, procedente de los restos de las cáscaras de semillas. Reduce el humo negro y las emisiones en motores Diesel. No emite óxido de azufre responsable de la lluvia ácida.	El costo tres veces superior al gasoil. Se debe cambiar el aceite con más asiduidad porque se diluye en el cárter. Necesita aditivos para arrancar a bajas temperaturas.
<b>HIDRÓGENO</b>	No contamina, sólo emite vapor de agua. Puede ser usado tanto en motores de combustión como en los eléctricos. Alto rendimiento.	Tiene grandes problemas técnicos de almacenamiento, se debe controlar su temperatura para evitar riesgos de explosión y los depósitos deben ser más grandes.

Tabla 4. 7 Ventajas y desventajas de las nuevas tendencias de combustible. Basada en [54]

En la Tabla 4.8 se pueden ver los valores comerciales para los diferentes combustibles dados en mega joules/kilogramo.

	Total	Neto
Hidrógeno	141.9	120.0
Monoxido de carbono	10.2	-
Dioxido de carbono	32.8	-
Dioxido de sulfuro	9.16	-
Gas Natural	53.1	48.0
Gas LP	49.8	46.1
Gasolina de Avión	46.0	44.0
Gasoline de automóvil	45.8	43.8
Keroseno	46.3	43.3
Diesel	45.3	42.5

Tabla 4. 8 Valores comerciales de energía (mega joules/kilogramo) [54]

#### 4.4 RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA.

La combustión estequiométrica química de los hidrocarburos con oxígeno puede ser escrita como:

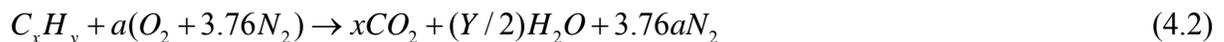


Casi siempre por simplicidad, el remanente de aire se asume como si fuera nitrógeno, el cual puede ser añadido a la ecuación cuando la composición del escape es requerido.

Como regla general, el máximo poder alcanzado es cuando se posee una mezcla rica, y la máxima economía se alcanza cuando se posee una mezcla pobre.

La cantidad estequiométrica de oxidante es sólo la cantidad necesitada para quemar completamente la cantidad de combustible. Si se provee de una cantidad mayor a la estequiométrica entonces la mezcla es pobre, y si de lo contrario, se añade menos oxidante se llama mezcla rica.

Algunos autores como Turns, Stephen plantean en la fórmula la integración del Nitrógeno, quedando una variación a la formula escrita anteriormente. [37]



donde

$$a = x + y/4 \quad (4.3)$$

Por simplicidad se toma la composición de aire como 21 por ciento de O<sub>2</sub> y 79 por ciento de N<sub>2</sub>, por ende por cada mole de O<sub>2</sub> existen 3.76 moles de N<sub>2</sub>.

#### 4.4.1 RADIO DE MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA AIRE-COMBUSTIBLE (A/F).

La relación aire-combustible comúnmente se le conoce como A/F debido a sus siglas en inglés, y se expresa de la siguiente manera:

$$(A/F)_{stoic} = \left( \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (4.4)$$

donde  $MW_{air}$  y  $MW_{fuel}$  son los pesos moleculares del aire y el combustible respectivamente.

El radio equivalente,  $\Phi$ , es comúnmente usado para indicar la cantidad de combustible y saber si una mezcla es rica, pobre, o estequiométrica. El radio de equivalencia se define como:

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (4.5)$$

Con esto volvemos a ver que para mezclas ricas en combustible,  $\Phi > 1$ , y para mezclas con escaso combustible,  $\Phi < 1$ , y para una mezcla estequiométrica  $\Phi = 1$ .

#### 4.5 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

La contaminación atmosférica puede tener carácter local como lo muestra la Figura 4.5, o efectos ligados al foco contaminante y se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio general del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores. El gas metano es muy perjudicial para el medio ambiente ya que tiene una capacidad de retención de calor 300 veces mayor a la del  $CO_2$ .



Figura 4. 5 Emisiones de un automóvil. Imagen modificada de [www.visionengineer.com](http://www.visionengineer.com)

Los contaminantes gaseosos más comunes son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre. Su principal fuente es la quema de combustible fósil.

El auto eléctrico no produce ningún contaminante emitido de su motor, pero sin embargo se produce contaminación emitida para generar dicha electricidad. Un auto eléctrico sí produce contaminación, pero demasiada pequeña en comparación con los vehículos de combustión

interna, por lo que se argumenta que si un vehículo equipado con un motor de combustión interna con iguales o menores emisiones que un vehículo eléctrico entonces puede ser considerado como un vehículo de “Emisiones Cero”.

En la Figura 4.6 se muestran las miles de toneladas de dióxido de carbono emitidas al medio ambiente en el año 2003. Se puede notar que Estados Unidos encabeza la lista de países contaminantes y posiblemente esta razón por la cual no accede a firmar el protocolo de Kioto.

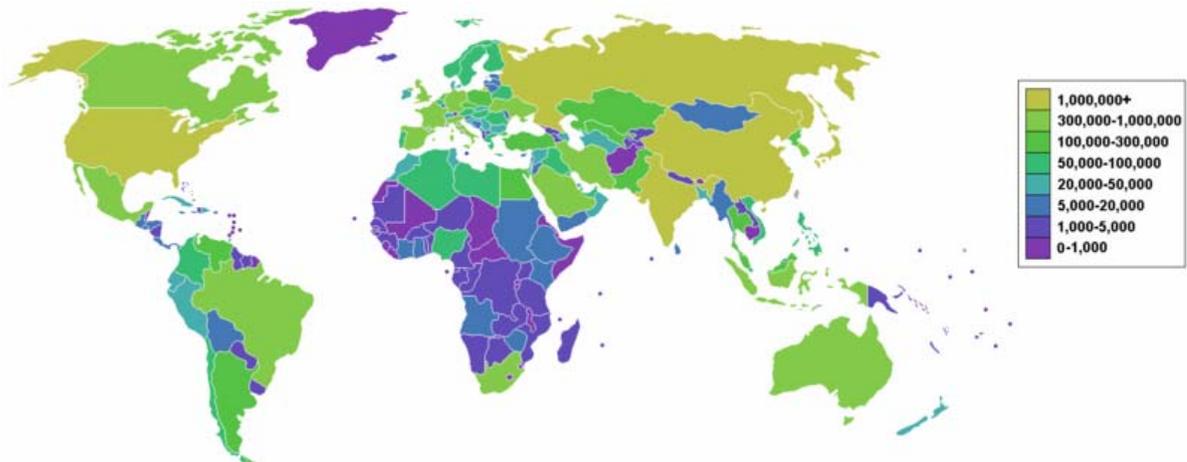


Figura 4. 6 Emisión de dióxido de carbono en miles de toneladas 2003.

Grafico generado por Jrockley y Distantbody en [www.worldmapper.com](http://www.worldmapper.com) y [wikipedia.com](http://wikipedia.com) basado en [millenniumindicators.un.org/unsd/mifre/mi\\_series\\_results.asp?rowID=749&fID=r15&cgID=](http://millenniumindicators.un.org/unsd/mifre/mi_series_results.asp?rowID=749&fID=r15&cgID=)

## **5. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.**

El diseñar un sistema que de alguna manera regenere la energía de escape en energía útil ha sido el tema de investigación en años recientes. Lamentablemente no se ha logrado reducir el consumo a la misma velocidad con que se incrementa el uso de hidrocarburos como combustible, dando como resultado la inminente terminación de la gasolina a como hoy en día la conocemos. Se utilizarán energías alternas y combustibles obtenidos de alguna otra fuente, y con los errores aprendidos en el pasado se trabajará en un raciocinio controlado y así evitar la insuficiencia del combustible.

En este capítulo se habla de los métodos desarrollados para reducir el consumo de combustible marcando sus beneficios y desventajas que alguna vez o actualmente presentan. Los métodos parten de dos caminos: el control de la temperatura y el control de la mezcla.

Al término de este capítulo se muestra la propuesta sugerida por el autor. Esto va acompañado de una comprobación del porqué no existe riesgo aparente en esta idea y además acompañado de información de los gases de escape los cuales son los que se intentan utilizar para recuperar su energía y así reducir el consumo de combustible.

### **5.1 RENDIMIENTO DEL MOTOR.**

Existen muchas formas para reducir el consumo de combustible, se puede reducir el peso del vehículo, darle menor resistencia al aire, evitar fricciones de la partes móviles o reducir el desperdicio de energía que ocurre durante la combustión.

El consumo de combustible en relación a la potencia generada se le conoce como rendimiento del motor. Si se incrementa el rendimiento dará como resultado una reducción de combustible, el cual tiene otros beneficios como la reducción de contaminantes.

### 5.1.1 RENDIMIENTO TÉRMICO.

Un motor de combustión interna no puede convertir toda la energía proporcionada por el combustible en fuerza motriz. Una gran parte de la energía se desprende del motor en forma de calor, y el resto de las pérdidas son debidas a fricción y otros factores que impiden que un motor aproveche al menos la mitad de la energía del combustible. Los diagramas de volumen y presión se utilizan para describir la eficiencia de los motores y describir su comportamiento en cada uno de sus ciclos. En la Figura 5.1 se muestra la curva de un motor ideal llegando hasta el punto 3, y en la curva B se muestra el motor real.

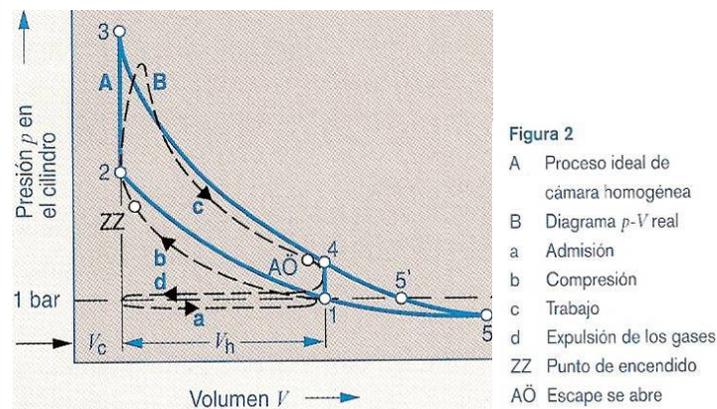


Figura 5. 1 Diagrama p-V de un motor Ciclo Otto. Imagen modificada de [36]

Para hablar de una eficiencia ideal, se debe hablar también de un proceso ideal, (curva A) descritos según las leyes de Boyle/Mariotte y Gay-Lussac. “El pistón se mueve del PMI al PMS (1-2), la mezcla de aire y combustible se comprime sin aportación de calor (Boyle/Mariotte). Posteriormente se quema la mezcla aumentando la presión (2-3), permaneciendo constante el volumen (Gay-Lussac). Del PMS (3) se mueve el pistón en dirección hacia el PMI (4). El volumen de la cámara de combustión aumenta. La presión del gas quemado disminuye sin que se ceda calor (Boyle/Mariotte). A continuación se enfría de nuevo la mezcla quemada permaneciendo constante el volumen (Gay-Lussac), hasta alcanzarse otra vez el estado inicial (1).” [36]

Existe un detalle que cabe aclarar. El área limitada por los puntos 1-2-3-4 indica el trabajo conseguido durante el ciclo de trabajo. En el punto 4 se abre la válvula de escape y el gas que se encuentra todavía bajo presión se escapa del cilindro. Si el gas lograra expandirse hasta el punto 5, la superficie abarcada por los puntos 1-4-5 sería energía considerada como útil.

Es por esta razón que algunos autos para aumentar su eficiencia hacen uso del uso de un turbosobrealimentador por gases de escape para aprovechar todavía en parte la zona que se encuentra encima de la línea atmosférica (1 bar.), quedando así la zona aprovechable de energía 1-4-5’.

Como en el funcionamiento de un motor no se pueden cumplir dichas condiciones básicas de una cámara homogénea ideal, el diagrama p-V efectivo (curva B) se diferencia del diagrama p-V ideal.

Es por eso que se proponen en este tema de tesis medidas para aumentar el rendimiento térmico. El rendimiento térmico aumenta con la compresión de la mezcla, esto quiere decir, que entre mayor sea el radio de compresión, se tendrá una mayor eficiencia. Dada la ecuación de eficiencia

$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$  al aumentar el valor de compresión  $r$  aumenta el coeficiente y se reduce la fracción,

aumentando por consiguiente el valor de  $\eta$ . Otra forma es aumentar el radio de calor específico  $k$  y lograr un mayor valor de la eficiencia. Con una compresión más alta es mayor la presión en el cilindro al fin de la fase de compresión, aumentando también el área abarcada en el diagrama p-V. Esto eleva el punto 3, por lo que nos permite aumentar el área y por lo tanto la eficiencia. Lo único que hay que estar pendiente es la resistencia del combustible a la detonación, puesto que al incrementar la presión también aumenta la temperatura pudiendo ocasionar la auto-ignición.

En los sistemas de inyección en el tubo de admisión, la gasolina es inyectada delante de la válvula de admisión cerrada. Al formarse la mezcla aire combustible, el combustible comienza a evaporarse en finas gotas de gasolina, esto se debe a que absorbe la energía en forma de calor (si la hubiera) del tubo de admisión. En el caso de la inyección directa, la gasolina absorbe el calor encerrado en la cámara de combustión, que entonces se enfría. De este modo, la mezcla de aire combustible comprimida tiene una temperatura más baja comparada con la de la inyección en el tubo de admisión y por lo tanto puede comprimirse en mayor grado.

Ahora bien, se debe aclarar una cosa. Los milisegundos que tarda la gasolina en hacer contacto con la cámara de combustión no son suficientes para elevar mucho su temperatura, y tampoco para enfriar la cámara de combustión y así aumentar el trabajo térmico. Otro punto a considerar es que en los nuevos sistemas de inyección se abre previamente la válvula de salida, para auxiliar la salida de los gases quemados y así evitar residuos dentro de la cámara de combustión. Por lo que el autor recomienda que se haga una mejora en el enfriamiento del motor, y así evitar que se mantenga a altas temperaturas que evitan la compresión de la mezcla al máximo. Esto se puede lograr con materiales cerámicos o sistemas avanzados de enfriamiento. Otra forma de reducir esta temperatura máxima es utilizando en mayor grado la energía del motor transformada en energía mecánica, lográndolo con mejores combustibles y su quema total, alcanzando así una mezcla casi homogénea que será quemada en su totalidad.

De aquí se propone lo siguiente:

- Recirculación de gases calientes del escape, dentro del motor.
- Inyección del combustible a una temperatura mayor
  - En el tubo de admisión
  - Inyección directa

Esto dará como resultado un incremento de eficiencia mínimo pero real, además de disminuir contaminantes en la salida del motor y aumentar el tiempo de vida del convertidor catalítico al no arrojar residuos de combustible sin quemar. Esto es lo que se pretende dar como contribución para reducir no sólo el consumo de combustible sino también disminuir la cantidad de contaminantes producidos por el motor.

Trabajos de investigación se realizan en universidades de Estados Unidos, una de ellas el Instituto Tecnológico de Massachussets, el cual aplica sus innovaciones y prototipos en el transporte urbano de la localidad.

### 5.1.2 PÉRDIDAS.

El calor producido por la combustión calienta las paredes del cilindro. Una parte de la energía térmica es radiada, por lo tanto se desperdicia. Lo mismo pasa con una mala inyección directa de gasolina, ya que va envuelta en gases que no participan en la combustión. También se producen pérdidas debido a la combustión incompleta del combustible inyectado y que se condensa en las paredes dentro del cilindro. El calor residual de los gases del escape también ocasiona pérdidas de calor.

El rendimiento del proceso de cámara de combustión aumenta a medida que se incrementa el coeficiente de aire  $\lambda$ . En resumen, la eficiencia es mayor en el rango de  $\lambda = 1.1 \dots 1.3$ . El exceso de aire ayuda a tener una mayor eficiencia, aunque para una depuración eficaz de los gases de escape usando un catalizador de tres vías, es absolutamente necesaria una mezcla homogénea ( $\lambda=1$ ).

Como se aprecia en la Figura 5.2 existen pérdidas ajenas al proceso termodinámico, algunas debido a cambio de carga, ya que en el primer tiempo al momento de aspirar aire fresco, este aire es regulado por la mariposa, y este retraso ocasiona una carga en el motor. Otra pérdida más es en el tubo de admisión cuando se produce un vacío. Claro que la inyección directa de gasolina reduce esas pérdidas por bombeo (o pérdidas por estrangulación), ya que la mariposa está ampliamente abierta, al igual que el relentí y el régimen de carga parcial, regulándose el par motor mediante la masa de combustible que ha de ser inyectada.

En el cuarto tiempo de trabajo se deben expulsar los gases residuales, lo que exige también un trabajo utilizado en algo diferente al tren motriz.

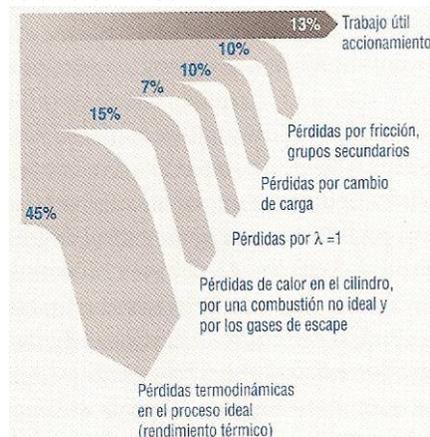


Figura 5. 2 Rendimiento de un motor de gasolina  $\lambda=1$ . Imagen modificada de [36]

Se producen pérdidas por fricción a causa del rozamiento de todas las piezas movidas en el motor y en los grupos secundarios, aunque es por eso que los componentes como rodamientos, anillos del pistón, y paredes más lisas ayudan a reducirlo.

## 5.2 EFICIENCIA DE UN MOTOR DE GASOLINA.

En un ciclo Otto ideal, la mezcla combustible/aire es comprimida de un volumen,  $V_1$ , a un volumen,  $V_2$ , durante la fase de compresión. El gas traza la línea 1,2 en el diagrama p-V de la Figura 5. 1, donde r es el radio de compresión,  $V_1/V_2$ .

En la misma figura se realiza un comparativo de la eficiencia de un motor a gasolina y de un motor disel.

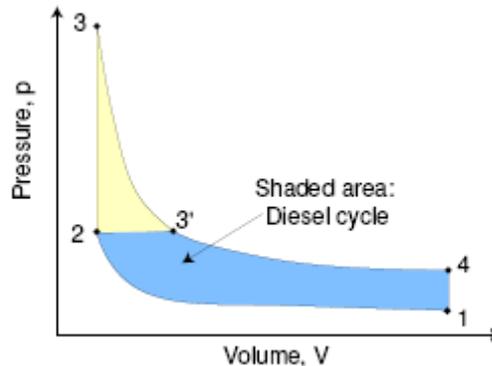


Figura 5. 3 Diagrama p-V del ciclo Otto. Imagen modificada de [www.stanford.edu/class/ee293a/FEP4\\_Text\\_X.pdf](http://www.stanford.edu/class/ee293a/FEP4_Text_X.pdf)

Para obtener la eficiencia de un motor a gasolina se utiliza el diagrama p-V. Este es útil ya que muestra la relación de la presión con el volumen, de aquí se desprende la fórmula:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \quad (5.1)$$

donde  $\gamma$  es el radio específico de calor ( $\gamma = C_p/C_v$ ).

y de la ley de los gases (bajo condiciones ideales):

$$\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_1 V_1}{T_1} \quad (5.2)$$

$$T_2 = T_1 \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad (5.3)$$

$$T_2 = T_1 r^{\gamma-1} \quad (5.4)$$

donde r es el radio de compresión.

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad (5.5)$$

Debido a que la compresión es adiabática (debido a la rapidez con que ocurre, no hay transferencia de calor entre el interior y el exterior del cilindro), el trabajo es igual al incremento de energía interna del gas U.

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta U = m C_v \Delta T \\ \Delta W &= \Delta H = m C_p \Delta T \end{aligned} \quad (5.6)$$

Al final de la fase de compresión (punto 2) una chispa enciende la mezcla, la cual idealmente, se asume que prende instantáneamente. Existe un incremento de temperatura y la presión se eleva al valor indicado al punto 3 del diagrama. No existe cambio en volumen durante esta adición de calor o combustión. La cantidad de calor es:

$$Q_{2,3} = \mu C_v (T_3 - T_2) \quad (5.7)$$

El comportamiento durante la expansión es similar durante la compresión:

$$W_{3,4} = \mu C_v T_3 (1 - r^{1-\gamma}) \quad (5.8)$$

La salida útil del motor es  $W_{3,4} - W_{1,2}$ , mientras la energía de entrada es  $W_{2,3}$ . Por lo tanto la eficiencia es:

$$\eta = \frac{W_{3,4} - W_{1,2}}{W_{2,3}} = \frac{T_3(1 - r^{1-\gamma}) - T_2(1 - r^{1-\gamma})}{T_3 - T_2} = (1 - r^{1-\gamma}) = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (5.9)$$

Si  $\gamma$  o  $r$  se hace grande, la eficiencia aumenta.

Usando la Ecuación 5.9 se puede escribir:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \eta_{carnot} \quad (5.10)$$

La eficiencia derivada sobre la curva está trazada en comparación con el radio de compresión en la ecuación 5.10. Nótese que la eficiencia teórica del motor Diesel es menor que la de Otto debido, en forma, a que la combustión debe ocurrir lentamente, a una presión constante, y no a volumen constante como en motores de chispa. Debido a que el área total está encerrada por p-V el trazo es menor, se tiene

$$\eta = 1 - r^{1-\gamma} \left[ \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right] \quad (5.11)$$

donde  $r_c \equiv V_3/V_2$  se llama “radio cortante” y es el radio de expansión durante el período de combustión.

En práctica, los motores Diesel operan con una mayor eficiencia que aquellos de ciclo Otto, principalmente debido a que éste último debe operar a substancialmente menor radio de compresión para poder operar y así evitar el golpeteo (“knocking”).

En la Figura 5.4 se ve claramente esta afirmación, en donde el radio de compresión para el diesel es mayor que para los motores de gasolina, dando por ende una mayor eficiencia.

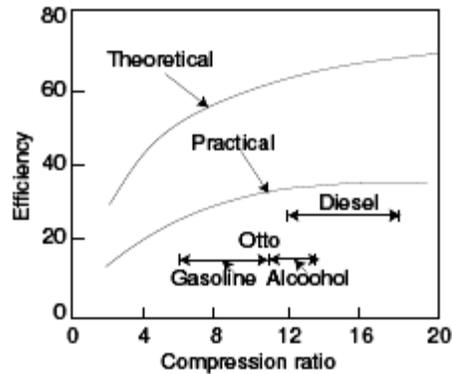


Figura 5. 4 Eficiencia ideal de Otto y Diesel en referencia a su radio de compresión. Imagen modificada de [www.stanford.edu/class/ee293a/FEP4\\_Text\\_X.pdf](http://www.stanford.edu/class/ee293a/FEP4_Text_X.pdf)

La fórmula de la eficiencia para el ciclo termodinámico ideal muestra que la eficiencia puede ser incrementada elevando  $\gamma$  ( $C_p/C_v$ ), y elevando el radio de compresión.

Si la mezcla es más pobre, mayor es la eficiencia. Esto es en parte a que si la mezcla se quema más lentamente tiende a realizar el ciclo ideal de Otto. En contraparte si la mezcla se vuelve demasiado pobre, la ignición se convierte errática, el motor se pone duro y tiende a soltar explosiones por el escape.

Para la gasolina, la mezcla estequiométrica de aire/combustible tiene un radio de 14.7:1. Sin embargo, el máximo poder logrado es con una mezcla rica (12:1 a 13:1) mientras que la máxima eficiencia requiere mezclas pobres (16:1 a 18:1).

Cuando se acelera se cambia el tipo de mezcla y deja de ser estequiométrica, haciéndola más rica y por lo tanto dando más potencia. Si se quisiera permanecer a un cierto margen de eficiencia se puede cambiar el tiempo de ignición de las bujías por el sistema de control eléctrico, esto se hace actualmente, sin embargo, un ingenioso motor de compresión variable está siendo desarrollado por Mercedes-Benz en Alemania. El cilindro está equipado con dos pistones, uno conectado al cigüeñal en la manera tradicional y uno adicional que sienta libremente arriba del primero. Un volumen variable de aceite puede ser inyectado entre ambos regulando el espacio y consecuentemente ajustando el radio de compresión. Esto lograría una mayor eficiencia si se utiliza una mezcla  $\gamma=1.3$ .

## 5.3 MÉTODOS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE UN MOTOR

Desde que surgió la preocupación por el rendimiento del vehículo se han estudiado las posibles formas de hacer rendir el tanque de combustible más que en un inicio, y de esto tratará esta sección, en donde se hablará de los diferentes métodos para incrementar la eficiencia en un motor.

### 5.3.1 CONTROL DE LA TEMPERATURA.

Un sistema que se ocupa para mejorar el rendimiento del calor es el control de las temperaturas máximas del monobloque. Inclusive se ha pensado en un motor de cerámica que es algo ideal

termodinámicamente hablando, pero demasiado frágil como para ser una realidad. Sin embargo eso no quita el dedo del renglón y eso ha provocado que los motores sean de aleaciones ligeras.

### 5.3.1.1 Inyección de agua al motor.

La inyección de agua, como un líquido aparte o una emulsión con gasolina, o como un vapor ha sido investigado ampliamente. Si los motores se pueden calibrar para operar con pequeñas cantidades de agua, el golpeteo (knock) puede ser suprimido, emisiones de hidrocarburos pueden ser pequeñamente disminuidas, emisiones de NOx disminuirán, el CO no cambia significativamente, y el consumo de energía y combustible son incrementados [55].

Este sistema no es nuevo, ya que fue usado en la Segunda Guerra Mundial por aviones para proveer un gran incremento de potencia por periodos cortos de tiempo. El alto calor específico y la temperatura de vaporización del agua significa que la temperatura de combustión decrecerá. Ha sido probado que un 10% de adición de agua al metanol reduce la potencia y la eficiencia por un 3%, y dobla la cantidad de emisiones no quemadas, pero reduce el NOx por un 25% [56].

Un decremento en la temperatura de combustión reducirá teóricamente la eficiencia máxima posible en un motor de ciclo Otto que esté operando correctamente, pero puede incrementar la eficiencia en los motores que están experimentando combustión anormal en motores existentes, así que puede ser una fase de investigación para nuevos motores.

Algunos aviones aún usan fluidos que incrementan la potencia. La mezcla agua-metanol es usada para proveer un incremento de potencia por periodos cortos, hasta un 40% más (asumiendo una resistencia mecánica adecuada para el motor). La mezcla 40/60 o 45/55 agua-metanol es usada para dar mayor potencia a los motores de aviación debido a su temperatura. El metanol es sólo un pre-quemado metano, consecuentemente sólo posee la mitad de la energía del contenido de la gasolina, pero posee una temperatura de vaporización que es significativamente más fría en la carga.

La mezcla de agua-metanol tiene un mayor costo beneficio que la gasolina, ya que el agua además de ser barata enfría las paredes de la cámara de combustión disminuyendo la temperatura y así aumentando la diferencia entre la temperatura de entrada con la de salida. La alta sensibilidad de combustibles de alcohol tiene que ser considerado en el diseño y configuración del motor.

Los fluidos que aumentan la potencia son más económicos que usar combustible regular. Cuando un motor turbocargado tiene que operar a un alto incremento de potencia, la mezcla tiene que ser enriquecida para mantener el motor operando sin golpeteos. El combustible extra enfría las paredes del cilindro y la carga, evitando así el golpeteo que está asociado con las altas temperaturas.

El efecto primordial de inyectar líquido que incremente la potencia (boost) es permitir que el motor se enfríe y que la mezcla dentro de la cámara de combustión pueda ser comprimida a una mayor presión sin detonar, de esta manera se tiene un ratio de compresión mayor e incremento de potencia. Esto finalmente se traduce en un menor consumo de combustible.

En la práctica, la mezcla de combustible es usualmente débil cuando se usa fluido de potencia para la inyección, y el ratio de mezcla es de 100 partes de gasolina por 25 partes de fluido de potencia. Con ese ratio, el resultado de rendimiento corresponde a subir efectivamente un 25% el combustible original. Tratar de incrementar la potencia arriba de 40% es difícil, ya que el motor se puede ahogar por el líquido en exceso [57].

Para poder gozar del beneficio de un incremento de ganancia al inyectar agua, el control del motor y del sistema de inyección debe ser capaz de monitorear el golpeteo y ajustar la mezcla estequiométrica y la ignición para obtener beneficios significativos. Los motores de aviación son diseñados para acomodar inyección de agua, pero los automóviles no. Si se modifica el motor para cumplir con los requerimientos de reducción de contaminantes y controlar la temperatura, no es necesaria la inyección de agua.

### 5.3.1.2 Recuperación y Regeneración.

Un **recuperador** es un intercambiador de calor que recupera energía térmica de los gases de salida y la transforma en energía para ser utilizada dentro del sistema. Se puede transferir energía sustrayéndola de un fluido a otro (aire o combustible).

El uso de un regenerador como el mostrado en el esquema de la Figura 5.5 será la base del diseño para transmitir la energía calorífica de los gases de salida al combustible antes de su inyección. Su beneficio se explica más adelante.

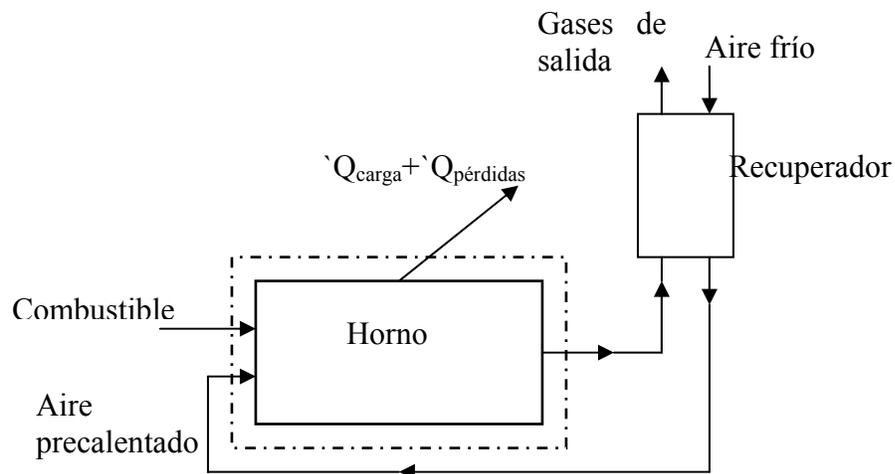


Figura 5. 5 Esquema de un horno con aire precalentado por recuperación o regeneración.

Un **regenerador** también transfiere energía de los gases de salida al aire de entrada, pero, en este caso, un medio de almacenamiento de energía, tal como un cerámico o acero corrugado, es altamente calentado por los gases de salida y enfriado por el aire fresco.

Para conocer los límites a los cuales se puede calentar el combustible sin que se auto-encienda es necesario conocer su “energía mínima de ignición” mostrada en la Tabla 5.1, la cual no se debe igualar.

Combustible	Límites de Flamabilidad		Mezcla estequiométrica (A/F)s	Energía mínima de Ignición	
	$\Phi_{\min}$	$\Phi_{\max}$		$\Phi=1$ ( $10^{-5}$ J)	Mínimo Absoluto ( $10^{-5}$ J)
Acetileno, $C_2H_2$	0.19	$\infty$	13.3	3	-
Monóxido de carbón, CO	0.34	6.76	2.46	-	-
n-Decano, $C_{10}H_{22}$	0.36	3.92	15.0	-	-
Etano, $C_2H_6$	0.50	2.72	16.0	42	24
Etileno, $C_2H_4$	0.41	>6.1	14.8	9.6	-
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	0.14	2.54	34.5	2.0	1.8
Metano, $CH_4$	0.46	1.64	17.2	33	29
Metanol, $CH_3OH$	0.48	4.08	6.46	21.5	14
n-Octano, $C_8H_{18}$	0.51	4.25	15.1	44.3	-
Propano, $C_3H_8$	0.51	2.83	15.6	30.5	26
Diesel, C <sub>10.8</sub> H <sub>18.7</sub>			14.4		
Gasolina, C <sub>8.26</sub> H <sub>15.5</sub>	0.8		14.37	44	

Tabla 5. 1 Límites de flamabilidad y energía mínima de ignición de varios combustibles.  
Tabla creada en bases a [18]

### 5.3.1.3 Recirculación de gases del escape (EGR)

El uso de “Exhaust Gas Recirculation” (EGR) por sus siglas en inglés es una estrategia para reducir la cantidad de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) formado y liberado de la combustión, una cantidad de gases del producto quemado es recirculado e introducido con el aire y combustible. El efecto de los gases recirculantes es reducir la temperatura máxima en la zona de combustión. La reducción de esta temperatura da como resultado menor formación de NO<sub>x</sub>.

Enseguida se muestra un ejemplo del uso de gases recirculantes en un motor y sus beneficios.

En el ejemplo siguiente se muestra el uso del EGR así como el beneficio de la disminución de la temperatura y de la presión. Si se considera un motor de ignición por chispa cuyos procesos han sido idealizados como compresión politrópica del punto muerto superior (estado 1) al punto muerto inferior (estado 2) y un volumen constante en la combustión (estado 2 a 3) respectivamente como es mostrado en la Figura 5.6

Lo que se desea es determinar el efecto del EGR (de 0 a 20 % expresado como un porcentaje de volumen de aire y combustible) afectando directamente al estado 3. El radio de compresión del motor ( $CR \equiv V_1/V_2$ ) es 8.0, el exponente politrópico es 1.3, y la presión y temperatura inicial están fijadas en el estado 1 a 0.5 atm y 298 K respectivamente, no tomando en cuenta en la

siguiente fase el gas recirculante. El combustible es iso-octano y el radio de equivalencia es una unidad.

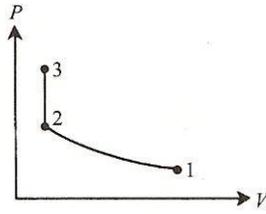


Figura 5. 6 Gráfica P-v con valores de  $\Phi = 1.0$ ,  $P_1 = 0.5$  atm,  $T_1 = 298$  K. Figura tomada del libro [37]

Para resolver este problema se debe determinar la temperatura y presión inicial para el estado deseado que es el de la combustión (estado 2). Se aplica la relación politrópica:

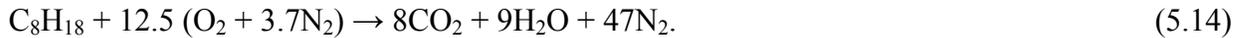
$$T_2 = T_1(V_1/V_2)^{n-1} = 298(8)^{0.3} = 556 \text{ K} \quad (5.12)$$

Donde n es el exponente politrópico.

$$P_2 = P_1(V_1/V_2)^n = 0.5(8)^{1.3} = 7.46 \text{ atm (755,885 Pa)} \quad (5.13)$$

donde n es el exponente politrópico

Para analizar el proceso de combustión, se empleará la referencia [37] en donde se ocupa el código de UVFLAME. Para realizar esto se debe de calcular  $H_{\text{reac}}$  (KJ/kmol – combustible),  $N_{\text{reac}}/N_{\text{combustible}}$ , y  $MW_{\text{reac}}$ . Cada una de estas cantidades variará con respecto a la variación de EGR. Para calcular esto se debe antes calcular la composición de los gases recirculados, asumiendo que son consistentes.



$$\chi_{\text{CO}_2} = \frac{8}{8+9+47} = \frac{8}{64} = 0.1250$$

$$\chi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{9}{64} = 0.1406 \quad (5.15)$$

$$\chi_{\text{N}_2} = \frac{47}{64} = 0.7344$$

Usando el Anexo 3, se evalúa la entalpía molar específica de los gases recirculados en  $T_2$  (556 K):

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\text{EGR}} &= 0.1250(-382,707) + 0.1406(-232,906) + .7344(7588) \\ &= -75,012.3 \text{ KJ / kmol}_{\text{EGR}}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

La entalpía específica molar del aire a  $T_2$  es:

$$\bar{h}_A = 0.21(7853) + 0.79(7588) = 7643.7 \text{ KJ / kmol}_{\text{aire}} \quad (5.17)$$

La entalpía del combustible en  $T_2$  es calculada del coeficiente en la curva dado en la Tabla 5.2. Nótese que la entalpía generada por los componentes es igual a 1, (ej.  $0.21+0.79=1$ ).

$$\bar{h}_F = -161,221 \text{ KJ} / \text{kmol}_{\text{combustible}} \quad (5.18)$$

Ahora se procede a calcular la entalpía de los reactantes en el estado 2:

$$H = N_F \bar{h}_F + N_A \bar{h}_A + N_{EGR} \bar{h}_{EGR} \quad (5.19)$$

donde por definición:

$$N_{EGR} \equiv (N_A + N_F) \%EGR / 100\% \quad (5.20)$$

de la mezcla estequiométrica dada,  $N_A = 12.5(4.76) = 59.5 \text{ kmol}$  :

$$N_{\text{reac}} = (1)\bar{h}_F + (59.5)\bar{h}_A + 60.5(\%EGR)\bar{h}_{EGR/100\%} \quad (5.21)$$

los valores de  $H_{\text{reac}}$  para varios porcentajes EGR se muestran en la Tabla 5.2.

$$MW_{\text{reac}} = \frac{N_F MW_F + N_A MW_A + N_{EGR} MW_{EGR}}{N_F + N_A + N_{EGR}} \quad (5.22)$$

donde da como resultado:

$$\begin{aligned} MW_{\text{reac}} &= \sum_{EGR} \chi MW_i \\ &= 0.1250(44.011) + 0.1406(18.016) + 0.7344(28.013) \\ &= 29.607 \text{ kg} / \text{kmol}_{EGR} \end{aligned} \quad (5.23)$$

%EGR	$N_{EGR}$	$N_{\text{tot}}$	$MW_{\text{reac}}$	$H_{\text{reac}}(\text{kJ}/\text{kmol}_{\text{combustible}})$	$T_{\text{ad}}(=T_3)(\text{K})$	$P_3(\text{atm})$
0	0	60.50	30.261	+293,579	2,804	40.51
5	3.025	63.525	30.182	+66,667	2,742	39.41
10	6.050	66.55	30.111	-160,245	2,683	38.38
15	9.075	69.575	30.045	-387,158	2,627	37.12
20	12.100	72.60	29.98	-614,070	2,573	36.51

Tabla 5. 2 Valores de temperatura, presión y número de moles a diferentes %EGR. Tabla modificada de [37]

En la grafica de la Figura 5.7 se muestra la influencia del %EGR en la temperatura. De esto podemos concluir por lógica que aún cuando se introduce una temperatura mayor a la usual dentro del cilindro, al haber menor cantidad de oxígeno en la cámara se introduce menos combustible, en otras palabras, la relación baja y por lo tanto se quema menos combustible produciendo una explosión más pequeña y por lo tanto emitiendo una temperatura menor.

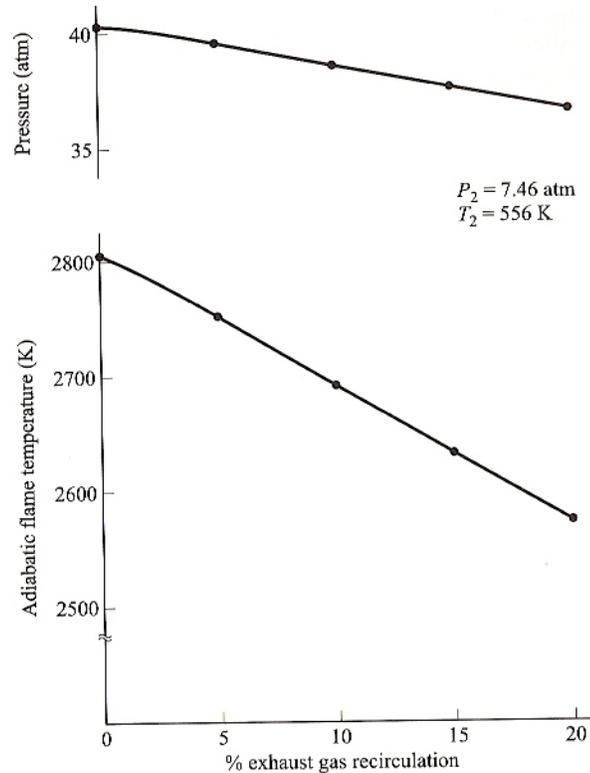


Figura 5. 7 Temperatura de la flama y presión pico para volúmenes constantes de combustión, con productos de combustión reciclados. Imagen modificada de [37]

El decremento de temperatura tiene un efecto dramático en la formación de  $\text{NO}_x$ . Cabe aclarar que la temperatura de los gases de reciclaje tiende a variar, por lo que éstas no son pruebas concluyentes si no tan sólo una idea o aproximación de lo que podría ocurrir. Si se desea ver el comportamiento real se debe de hacer una prueba en laboratorio automotriz especializado.

### 5.3.2 CONTROL DE LA MEZCLA.

#### 5.3.2.1 Configuración del tubo de admisión.

El cambio de carga de un motor no sólo está influido por los tiempos de distribución de válvulas, sino también por la conducción de admisión y de gases de escape. Debido a la carrera del pistón en el cilindro se generan oscilaciones periódicas de presión en el tubo de admisión. Estas ondas de presión pasan por el tubo de admisión y son reflejadas en los extremos del tubo.

Una configuración del tubo de admisión adaptada a los tiempos de distribución de válvulas, da lugar a que poco antes del cierre de admisión, alcance una cresta de presión en la válvula de admisión. Este efecto de recarga transporta al cilindro un mayor caudal de gas fresco. Análogamente ocurre con la conducción de gases de escape. Si la adaptación entre tubo de admisión y conducción de gases de escape se elige de tal forma que exista una caída de presión positiva durante el empalme de válvulas, se obtiene un buen cambio de carga con repercusiones benéficas sobre la emisión de contaminantes, sobre la potencia y el consumo de combustible. La inyección multipunto es un medio para disminuir las emisión de contaminantes en los motores de combustión interna [58].

### 5.3.3.2 Estratificación de la carga.

Casi siempre se provee al motor de una carga homogénea, pero mediante una estratificación controlada de la carga puede influirse en gran manera sobre el proceso de combustión.

Los motores de carga por etapas están previstos de tal forma que cerca de la bujía de encendido se encuentra una mezcla rica de encendido, (ver Figura 3. 57) sin embargo el transporte de mezcla principal se realiza con una mezcla pobre. Aprovechando esta ventaja se puede diseñar un sistema de premezcla en donde se introduzca una mezcla pobre al pistón de manera pulverizada, de esta manera está garantizada una ignición segura.

No sólo se aprovecha de mejor manera el combustible, sino que también se consiguen valores de emisión de  $\text{NO}_x$  menores.

También un movimiento de carga controlado y un movimiento de rotación apropiado al entrar la mezcla en la cámara de combustión, puede permitir una cierta estratificación de la carga. Esta estratificación no es muy elevada y es difícil de controlar, la estratificación varía bastante en función de las condiciones de servicio del motor [58].

### 5.3.2.3 Preparación de la mezcla.

Para una combustión favorable en un motor de combustión interna es preferible una mezcla homogénea. Para esto se requiere una buena pulverización del combustible y así obtener unas micro gotas lo más pequeñas posibles.

Las mezclas no preparadas muestran una emisión destacadamente mayor de hidrocarburos no quemados (HC), esto se debe a que es menos eficiente la quema de las partículas gruesas de combustible y pequeñas gotitas de combustible se depositan en el tubo de admisión. Una distribución uniforme deficiente de la mezcla tiene una influencia negativa sobre la emisión de contaminantes. Esto provoca que se disminuya la potencia y aumente el consumo de combustible. Por lo que uno de los objetivos de este capítulo es proponer un sistema que ayude al inyector a tener un chorro pulverizado dando como resultado teórico una mejor quema del combustible. Esto está basado en las investigaciones de inyectores como BOSCH© que buscan que sus productos inyecten el combustible en forma de nebulosa para que las partículas de combustible se mezclen con mayor facilidad con el aire.

### 5.3.2.4 Encendido de la mezcla.

El sistema de encendido de la mezcla es muy importante, y no sólo varía en qué tipo de encendido es, sino también en la cantidad de electrodos que tiene la bujía y la distancia de los mismos para prolongar el arco eléctrico. Una elevada energía significa condiciones de inflamación estables con repercusiones positivas sobre la estabilidad del proceso de combustión de ciclo en ciclo. Las reducidas fluctuaciones cíclicas conducen a una mejor suavidad de funcionamiento del motor y a menor emisión de hidrocarburos no quemados.

Los sistemas de encendido con una larga duración de chispa y, por tanto, con mayor transmisión de energía a la mezcla son los más apropiados para la inflamación de mezclas pobres.

“La influencia del momento de encendido sobre el consumo de combustible es inversa a la influencia sobre la emisión de contaminantes” [58]. Esto quiere decir que entre más se retrase el

tiempo de encendido menor porcentaje de combustible se quemará y mayor contaminación se emitirá.

Un momento de encendido adelantado significa por lo tanto un consumo de combustible menor (ya que se inyecta en menor cantidad pero se aprovecha casi al máximo), un mayor par motor y una emisión de contaminantes reducida.

### 5.3.3 USO DE NUEVOS MATERIALES.

Una nueva característica del 911 Turbo es que las puertas están fabricadas de aluminio, sobre y debajo de la ligera aleación del techo. Gracias a una técnica especial de producción, las puertas ofrecen la misma seguridad en un choque que las puertas de acero en los modelos Carrera. Pero al mismo tiempo pesan sólo 11 kilos, reduciendo el peso del auto en un total de 14 kilos. Con su nuevo peso de 1585 Kg., el nuevo Turbo, posee más equipo y es 5 Kg. más ligero que su antecesor. [8]

Se tiene un plan de la reducción del 15% del peso del vehículo con el uso del magnesio para el año 2020 el cual proveerá de grandes beneficios. Esto puede tener un gran impacto en el consumo de combustible (incrementando la eficiencia aproximadamente 2 millas/galón), costo anual en gasolineras (reduciendo por mas de \$22 Billones de dólares), importaciones de combustible (reduciéndose 700 M barriles), y emisiones de dióxido de carbono (reducción de 200 billones de libras). Con la misma transmisión, el desempeño del vehículo (aceleración/frenado, giro/curvas) puede ser mejorado. Además de ser un complemento para los nuevos vehículos híbridos que contarán con 5-7 velocidades, con lo que aumentará su eficiencia. [59]

La visión del 2020 propone usar 30 veces más el magnesio al usado actualmente, aunque se debe investigar más sobre su maleabilidad y velocidad de producción, el cual aún está en desarrollo. Algo que aún preocupa es su oxidación la cual puede ser retenida con un recubrimiento que evita su corrosión por mucho tiempo, casi deteniéndola.

Existen varias ventajas para usar este material, pero el factor que interesa en este capítulo es la reducción de uso del combustible. Esto se puede ver en la Figura 5. 8.

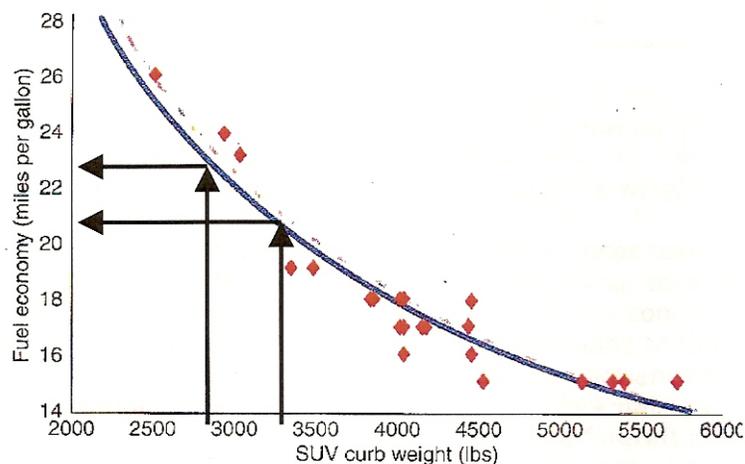


Figura 5. 8 Economía de combustible vs. Peso en un SUV [60]

En la Figura 5.9 se muestra que entre mayor peso posea el vehículo, mayor cantidad de combustible consume. Es por eso que se desean utilizar materiales livianos.

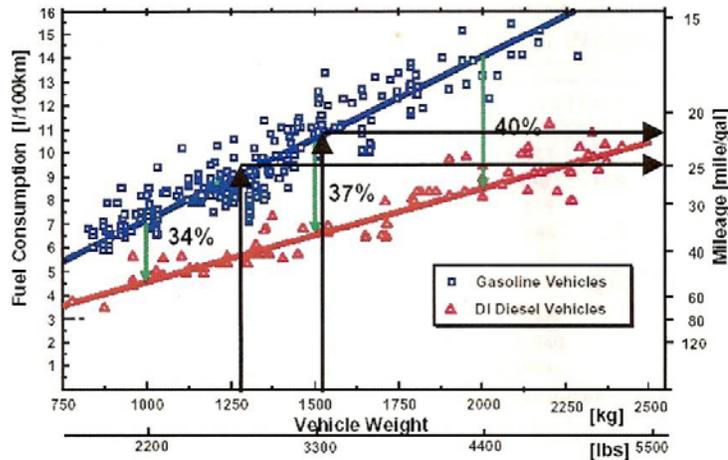


Figura 5.9 Economía vs. Peso en un auto. Imagen modificada de [60]

De acuerdo a [61], 500 libras de reducción en un vehículo de 3360 libras produce una eficiencia de combustible del 12% (de 20.5- 23 mpg). En el artículo Pischinger [62], la misma reducción de peso produce un incremento de eficiencia de 20% (de 22-26 mpg). Una regla de dedo es generalmente aceptada en la industria Norte Americana de automóvil es que el 10% de reducción de peso produce un 7% de eficiencia de combustible; por lo que 15% de reducción de masa (500 lb.) producirá un incremento de eficiencia de 10%. Esta es la base para la visión 2020, y está estimado de manera conservativa; podría ser 50% más alta.

NEW MATERIALS DISTRIBUTION				MATERIALS CHANGE (lb.)				WEIGHT SAVE
MATERIAL	WT.(lb)	%	Original	Final	TOTAL	Substitution	Downsize	TOTAL (lb.)
▪ Steel + Cast Iron	1,533	53.0	2,145	1,533	-632	-500	-132	-382
▪ Aluminum	130	5.2	278	130	-148	-130	-18	- 58
▪ Polymer/composites	255	8.6	255	255				
▪ Others	380	13.5	423	380	-43		-43	-43
▪ Rubber and Glass	232	8.2	249	232	-17		-17	-17
					-840	-630	-210	-500
▪ <i>Magnesium</i>	<u>350</u>	<i>12.2</i>	<u>10</u>	<u>340</u>				
<b>TOTAL</b>	<b>2,860</b>		<b>3,360</b>	<b>2,860</b>				
Total downsized chassis, suspension and powertrain 210 lb.								
Total substitution of 340 lb. magnesium for 500 lb steel/cast iron and 130 lb. of aluminum for a 290 lb. weight reduction								

Figura 5.10 Nueva distribución de materiales para la reducción de 500 lb. (a 2860 lb.) Imagen modificada de [60]

Se muestra todo lo que puede ser reemplazado por magnesio, pero por el momento no se producen todas las piezas propuestas en magnesio, por lo que se realizó un estudio de las piezas que se producen actualmente.

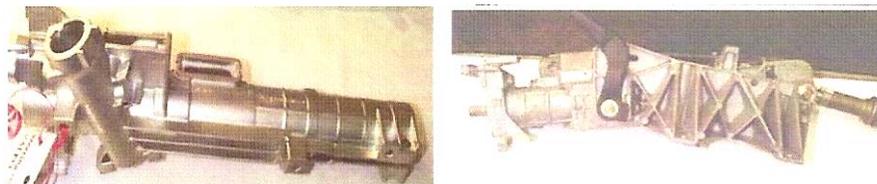


Figura 5.11 Columna de dirección, ejemplo de componente de chasis. Imagen modificada de [60]

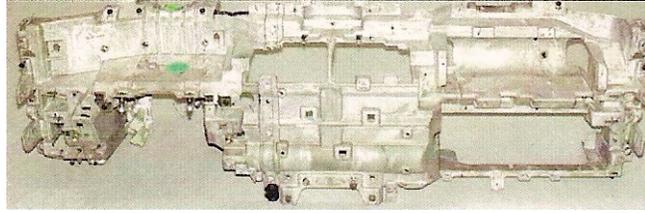


Figura 5. 12 Cadillac CTS, ejemplo de interiores. Imagen modificada de [60]

Las piezas mostradas en esta página son piezas que actualmente se están produciendo y están en uso, teniendo que haber pasado primero por pruebas de calle y de laboratorio para su producción en masa.

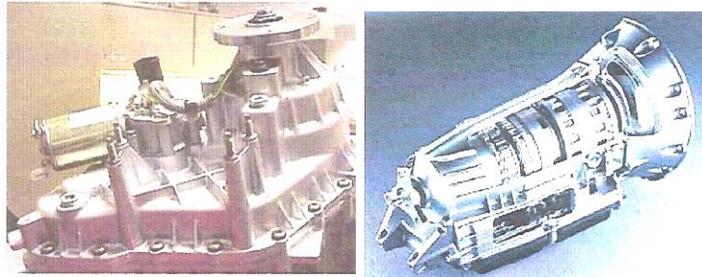


Figura 5. 13 “Transfer Case” para 4x4 y un transmisión de 7 velocidades DCX. Imagen modificada de [60]



Figura 5. 14 Cajuela del VW Lupo 3L y techo convertible del Cadillac XLR, ejemplo de exteriores. Imagen modificada de [60]

El costo del Mg debe de ser aún menor que el Al para amortizar los costos de recubrimiento anti-corrosión y de sujeción (aún cuando el costo para Abril 2005 era el mismo). El Mg pesa 2/3 el peso del Al.

#### 5.4 DATOS DE LOS GASES DE SALIDA DE UN AUTOMÓVIL.

Conocer la temperatura, el radio de compresión y la composición de los gases de salida de un automóvil es importante para diseñar el sistema que aumente la eficiencia de un automóvil pero que no incremente de ninguna manera la emisión de contaminantes.

Basados en la investigación de la Universidad de Colorado [63], se tiene un applet el cual usa las formulas mencionadas en los capítulos anteriores para calcular temperaturas, energías, y en este caso la composición de los gases de salida.

El componente que más atención debemos poner es el monóxido de carbono, mostrado en la Figura 5.15 (CO) debido a su efecto nocivo para el medio ambiente y la salud humana. Más adelante se disminuirá la temperatura y se verán los cambios en los residuos.

**Fuels:**

CH4 Methane  
 C3H8 Propane  
 C8H18 Octane  
 CH3OH Methanol  
 C2H5OH Ethanol  
 H2 Hydrogen  
 C12.5H22.2 Diesel  
 C8H15 Gasoline

Equivalence Ratio:

Product Temperature [K]:  (<1000 K)

**Product Composition:**

Molar Composition		Mass Composition	
[mole product/mole air]		[kg product/kg air]	
CO2	0.144	CO2	0.218
H2O	0.105	H2O	0.065
N2	0.79	N2	0.764
O2	0.0	O2	0.0
CO	0.028	CO	0.027
H2	0.056	H2	0.0040

Figura 5. 15 Composición de los gases de salida de gasolina. Resultados obtenidos del applet en JAVA de [63]

Se puede ver en la Figura 5.16 la eficiencia térmica de 0.464, siendo de .499 la ideal.

**Four Stroke Gas Otto Cycle**

---

Intake Pressure (kPa)	<input type="text" value="50"/>
Intake Temperature (K)	<input type="text" value="300"/>
Exhaust Pressure (kPa)	<input type="text" value="100"/>
Compression ratio	<input type="text" value="10"/>
Gamma	<input type="text" value="1.3"/>
qin (kJ/kg gas)	<input type="text" value="2500"/>
Compute Cycle	<input type="button" value="Enter"/>

State	1	2	3	4
Pressure (kPa):	50.0	997.63	4888.88	245.02
Temperature (K):	329.2	656.9	3219.1	1613.4
Exhaust Temp. (K) =	1312.0		Volumetric Efficiency =	0.915
Residual Mass Fraction =	0.0502		Net Imep (kPa) =	668.75
Ideal Thermal Eff. =	0.499		Net Thermal Eff. =	0.464

Figura 5. 16 Valores de presiones y salida de un ciclo Otto. Resultados obtenidos del applet en JAVA de [63]

## 5.5 ANALISIS DE AUTOIGNICIÓN DEL COMBUSTIBLE EN EL TUBO DE INYECCIÓN.

El propósito de esta sección es diseñar un sistema que ahorre combustible, una forma como se comentó es formando una nebulosa de combustible de tal manera que sea tan ligera que se mezcle con el aire casi en su totalidad, logrando de esta manera un mejor aprovechamiento del combustible. Esto se puede lograr elevando la temperatura del combustible previo a su inyección y favoreciendo la evaporación. Para lograr esto se propone utilizar la temperatura de los gases de salida utilizando un flujo cruzado de los tubos (sin que se mezclen).

En esta sección se probará que mientras el combustible se encuentre contenido en el tubo de inyección sin contacto alguno con una chispa, no podrá ser encendido aún cuando se le someta a una mayor presión.

En un automóvil se poseen las siguientes dimensiones promedio del tubo de inyección: 100 cm de largo, 0.5 cm. de diámetro. Se posee el máximo de combustible a una temperatura inicial de 25 °C a presión atmosférica. Calculemos entonces que pasaría si se mezclará el combustible con aire caliente antes de ser inyectado y si no fuera mezclado.

El peso específico del agua es de 1,000 Kg./m<sup>3</sup> mientras que la gasolina tiene 750 Kg./m<sup>3</sup>. El volumen máximo que podría contener el tubo es de: .0000196 m<sup>3</sup>, por lo que únicamente podría tener como máximo un peso de 0.01472625 Kg. de combustible.

Primero debemos de calcular el área del tubo de inyección para posteriormente calcular el volumen donde se contiene el combustible. Se sabe también que la presión de los inyectores es de 200 bar a 1500 bar en los nuevos inyectores, por lo que se calculará también con estos datos. Si sabemos que 1 Bar = 100 KPa.

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = 0.19635 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$$

Se ocupa la siguiente formula para saber la energía.

$$P_F = \frac{m_F (R_u / MW_F) T}{V_{tubo}}$$

$$= \frac{0.01472625 (8315 / 114.8) (20 + 273)}{1(0.0000196)} \quad (5.24)$$

$$= 16188175.0871 \text{ Pa}$$

Una fracción molar de gasolina es:

$$x_F = \frac{P_F}{P} = \frac{16188175.0871}{101325} \quad (5.25)$$

$$= 159.7648$$

Al tener este valor mayor que uno sabemos que el contenido del tubo no es flamable, y esto por obvias razones, como bajos valores de presión, temperatura y oxígeno.

No hay cabida en demostrar nuevamente que en ausencia de oxígeno el combustible no es flamable, así que esta sección se enfocará en calcular si la nueva mezcla es flamable en la máxima compresión del pistón.

El pistón comprime la mezcla del exterior sin compresor alguno a una presión de 1 atm. y el radio de compresión promedio es de: 10 a 1, claro que existen motores aún más eficientes que pueden alcanzar compresiones de 12 a 1, sin embargo es necesario usar combustibles con mayor índice de octanaje y el costo es mayor.

Si se sabe que un motor de dos litros con una radio de compresión de 1 a 10 entonces se puede calcular el volumen al final de la carrera.

Si son 2000 cc en cuatro cilindros, entonces se tiene 500 cc en cada uno (teórico). Este es el volumen máximo que podría albergar de mezcla el cilindro, por lo que si se comprime en una relación de 1 a 10 se termina con un volumen de 50 cc, que es igual a  $0.00005 \text{ m}^3$ .

La mezcla estequiométrica nos dice que debe de haber 14.37 de aire por cada uno de gasolina.

esto es:

$$14.37 = (M_a/M_f) \quad (5.26)$$

Como el aire y el combustible no pesan lo mismo se debe calcular cuánto volumen ocupa el aire y cuánto el combustible para después saber sus masas.

$$\text{Aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Gasolina} = 750 \text{ kg/m}^3$$

Por lo que:

$$14.37 = \left( \frac{14.37 * 1.2}{1 * 750} \right) \frac{A}{F} \quad (5.27)$$

$$\frac{14.37(1.2)A}{750F} = 43.49 \frac{F}{A}$$

Se comprueba esta relación de volúmenes con la mezcla estequiométrica:

$$43.49 \text{ Lt } (1.2) = 52.19$$

$$1 \text{ Lt } (750) = 750$$

$$750/52.19 = 14.37, \text{ por lo tanto si se cumple.}$$

Ahora hay que calcular con los valores reales de nuestro motor:

$$43.49 (0.00005) * (1.2) = 0.0026094 \text{ Kg de gasolina}$$

$$0.00005 * (750) = 0.0375 \text{ Kg de aire}$$

Se comprueba que conserva la relación:

$M_a/M_f = 0.0375/0.0026094 = 14.37$  Por lo que si son correctos los cálculos.

Ahora con la masa de combustible dentro del cilindro, se procede a calcular la temperatura máxima a la cual se puede inyectar la gasolina en el tubo de admisión (Se recuerda al lector que si se inyecta en el tubo de admisión el combustible se comprime junto con el aire, por lo que la temperatura se incrementa).

Con este dato ahora sí podemos calcular:

$$\begin{aligned}
 P_F &= \frac{m_F (R_u / MW_F) T}{V_{cilindro}} \\
 &= \frac{0.0026094 (8315 / 114.8) (20 + 273)}{0.00005} \\
 &= 1107538 Pa
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

La presión a la que se encuentra con una entrada de mezcla de alrededor de 300 K y ratio de compresión de 10 es de: 997.63 kPa y una temperatura de 656.9 K

Una fracción molar de la gasolina es:

$$\begin{aligned}
 x_F &= \frac{P_F}{P} = \frac{1107.54}{997.63} \\
 &= 1.11
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

Aun es mayor que 1, por lo tanto no existe riesgo de explotar.

Ahora hay que ver hasta que temperatura sería necesaria incrementar la gasolina para que está explotara al ser comprimida (recordemos que la temperatura se está tomando como el de la mezcla, aun cuando éste es menor).

$$P_F = 3.78 * T \tag{5.30}$$

Para que ocurra una auto ignición es necesario alcanzar el valor de 14.64 para la gasolina que se obtiene del anexo.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\min} &= \frac{14.64}{(A/F)} = 0.51 \\
 \Phi_{\max} &= \frac{14.64}{(A/F)} = 4.25
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

Realizando todos los cálculos y usando la temperatura de 3219.1 K y una presión de 4888.88 kPa aun así no se enciende la mezcla de manera espontánea, por lo que podemos concluir que sí es posible inyectar el combustible a una mayor temperatura.

Ahora bien, si a esto se le suma que en los motores de inyección directa la mezcla no se realiza sino unos instantes antes de la detonación por la chispa, entonces se puede mejorar aún más la eficiencia.

Esto por varias razones, al inyectar el aire con menor temperatura se posee una mayor cantidad de oxígeno que se puede comprimir, por lo que ayuda a la detonación por chispa. Y si la temperatura que se inyecta en el combustible no afecta a esta compresión ni a su detonación, entonces el ciclo es casi ideal, al ser detonado casi en su totalidad el combustible, la comprobación de que la gasolina inyectada en forma de nebulosa es más eficiente se comprueba más adelante.

	<b>Metanol</b>	<b>Etanol</b>	<b>TBA</b>	<b>MTBE</b>	<b>Gasolina</b>
Valor típico de mezcla / $(R+M)/2$	112	110	98	105	87-93
Porcentaje del peso del oxígeno.	50	35	22	18	0
A/F	6.5	9.0	11.2	11.7	14.5
Gravedad específica.	0.796	0.794	0.791	0.746	0.74
Valor más bajo de calentamiento, MJ/kg.	20.0	26.8	32.5	35.2	44.0
Vapor latente de vaporización, MJ/kg.	1.16	0.84	0.57	0.34	0.35
Temperatura de ebullición, °C.	65	78	83	55	27-227

Tabla 5. 3 Propiedades oxigenantes. Valores obtenidos de [37]

También se debe de conocer la temperatura a la cual puede elevarse el combustible para que éste no se evapore por completo. Las temperaturas pueden ser tomadas de la anterior Tabla y la Figura 4. 1.

## **5.6 DISEÑO PROPUESTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.**

Se sabe que entre menor sea la temperatura dentro de la cámara de combustión, mayor será la eficiencia, y esto está ligado al momento de la chispa, si se adelanta demasiado la temperatura sube, por lo que se desea que sea en el momento preciso lo más cercano al ciclo de Otto Ideal. Esto será posible gracias a que la gasolina se encontrará vaporizada casi por completo lo que garantizará su mezcla con el aire y su quema con el momento de la chispa. Es de esta manera que se podrá inyectar el combustible un poco antes de los 0° lo que disminuirá la temperatura, esto mostrado en la Figura 5.17.

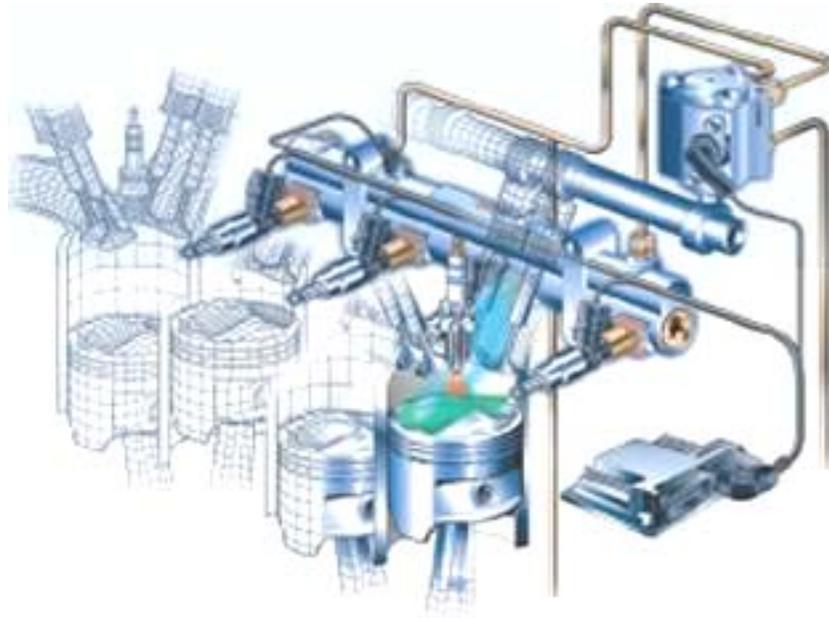


Figura 5. 17 Sistema de inyección directa precalentado. Imagen modificada de [65]

Con este sistema mostrado en la figura anterior se puede ver que se ocupa un sistema de inyección directa el cual es una carga estratificada. Se ha mostrado a lo largo del documento que es la forma más eficiente de incendiar la mezcla.

Se proponen dos maneras de realizarlo, una utilizando los gases del escape en sistema EGR (mostrado en la Figura 5.18) y una sin dicho sistema (mostrado en la Figura 5.19).

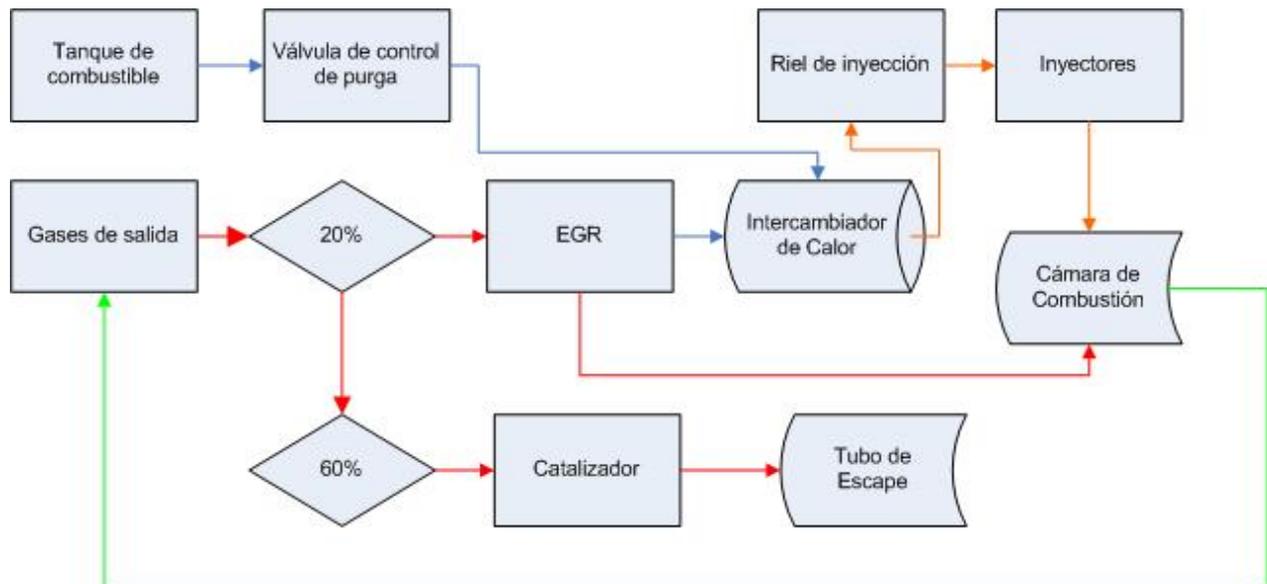


Figura 5. 18 Diagrama usando los gases EGR.

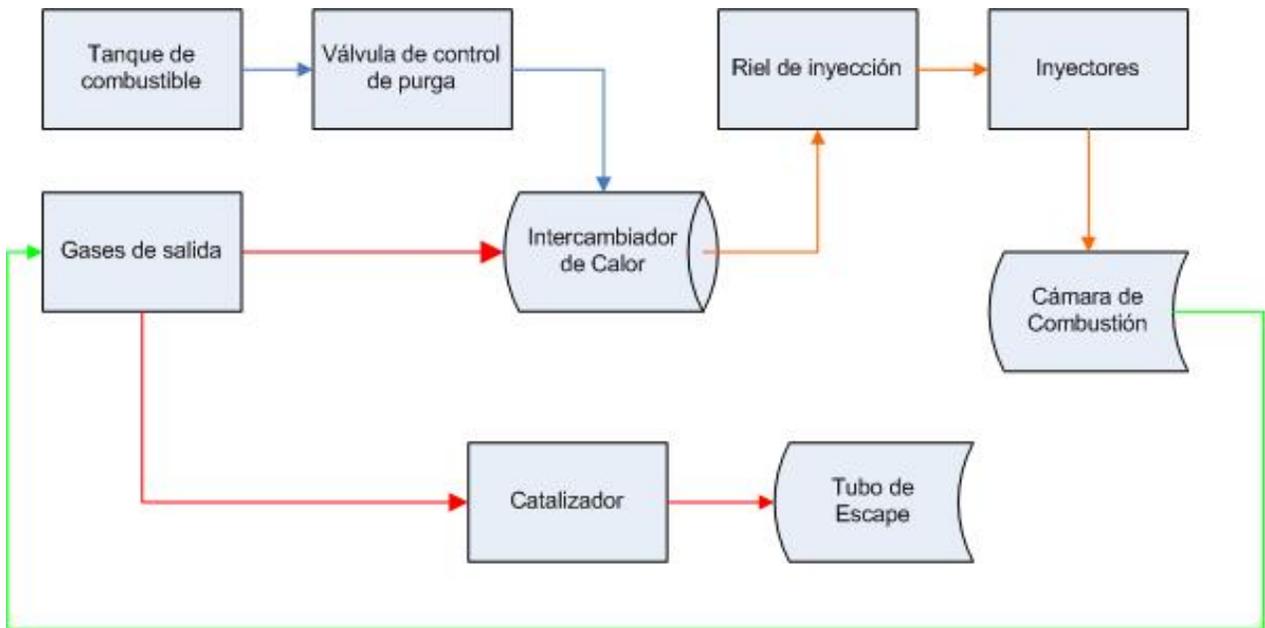


Figura 5. 19 Diagrama sin el uso de EGR.

La manera que aquí se propone es de colocar un intercambiador de calor lo más cercano a los gases de salida que sea posible, y qué mejor que en el múltiple de salida, el cual arroja el aire caliente de salida y donde se puede aprovechar al máximo dicha temperatura para calentar el tubo.

Un múltiple de salida típico es el mostrado en la Figura 5.20, donde la salida de gases de los cuatro cilindros se juntan en uno sólo para ser dirigidos al escape. En este punto se proponen dos diseños.



Figura 5. 20 Múltiple de escape a modificar. Imagen modificada de [www.submarineboat.com/sub/engine\\_drive.html](http://www.submarineboat.com/sub/engine_drive.html)

Existen dos maneras de colocar el intercambiador de calor:

<b>Sin interferencia al flujo</b>	<b>Con interferencia al flujo</b>
No se interfiere en el flujo	Se interfiere en el flujo
Es fácil de montar	Se deben de hacer modificaciones al múltiple de salida
La operación es reversible sin cambio alguno	No es reversible
Se realiza el intercambio de calor por convección a través de ambas paredes	Mayor eficiencia de intercambio de calor

Tabla 5. 4 Diferencia entre los dos sistemas propuestos.

Colocado por fuera del múltiple para evitar provocar turbulencia con los gases de salida, y de esta manera ocurre un intercambio de calor más lento, pero sin interferencias con el flujo.

Colocar por dentro el tubo de combustible por donde se calentara con mayor rapidez y en un menor trayecto, logrando así la tan deseada nebulosa de combustible la cual dará el resultado deseado.

En la Figura 5.21 se puede observar cómo el tubo que lleva el combustible hacia los pistones se introduce en el múltiple de salida y está colocado contra flujo para así obtener el máximo intercambio de calor. Logrando así el resultado deseado, aunque cabe aclarar que aun se debería de hacer un análisis de cómo afecta esto a los gases de salida.

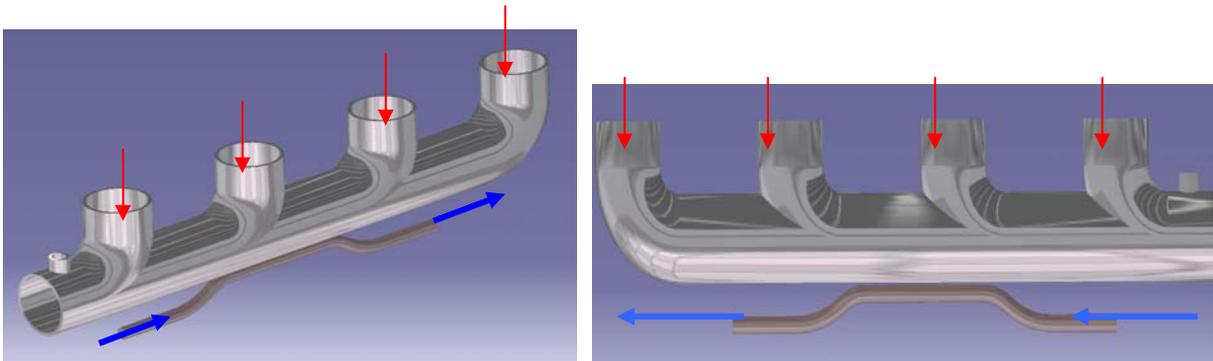


Figura 5. 21 Diseño propuesto 1.

En la Figura 5.22 se observa cómo el intercambio de calor ocurre dentro del múltiple de salida en contra flujo, quedando ésta como la mejor opción.

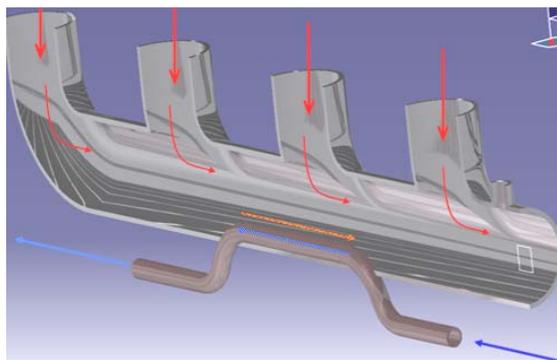


Figura 5. 22 Diseño propuesto 2

Al recolectar únicamente parte del calor desprendido por el escape (no se puede quitar aún ya que el catalizador necesita trabajar a altas temperaturas) se logran dos objetivos:

La Figura 5.23 muestra el combustible siendo vaporizado dentro de la cámara de combustión a temperatura ambiente, mientras que la Figura 5.24 se muestra a una temperatura de 100 °C.

Calentar el combustible.- el cual se quemará casi en su totalidad alcanzando la eficiencia máxima posible en un ciclo.

Calentar el aire dentro del cilindro.-



Figura 5. 23 Inyección a 1.15 ms a 75° BTDC y 5 MPa en el riel de inyección a temperatura ambiente. Imagen modificada de [66]



Figura 5. 24 Inyección a 1.15 ms a 75° BTDC y 5 MPa en el riel de inyección a 100° C. Imagen modificada de [66]

Al lograr una mejor quema del combustible se evitan los golpeteos antes mencionados en el motor, el cual evita un calentamiento arriba del estándar el cual nos da un decremento de contaminantes.

Sólo se puede observar que se vaporiza de una mejor manera el combustible, aunque sólo se mediría en pruebas de laboratorio los resultados de dicha propuesta.

Simulando el applet a una temperatura de 656 K se logra como resultado la cantidad de diferentes gases (algunos de ellos nocivos para la salud). Si dicha temperatura puede ser disminuida por medio de una mejora del ciclo termodinámico será posible disminuir las emisiones contaminantes. El único valor que variamos es la temperatura y mantenemos el combustible y su radio equivalente constante.

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en la Universidad de Colorado [67].

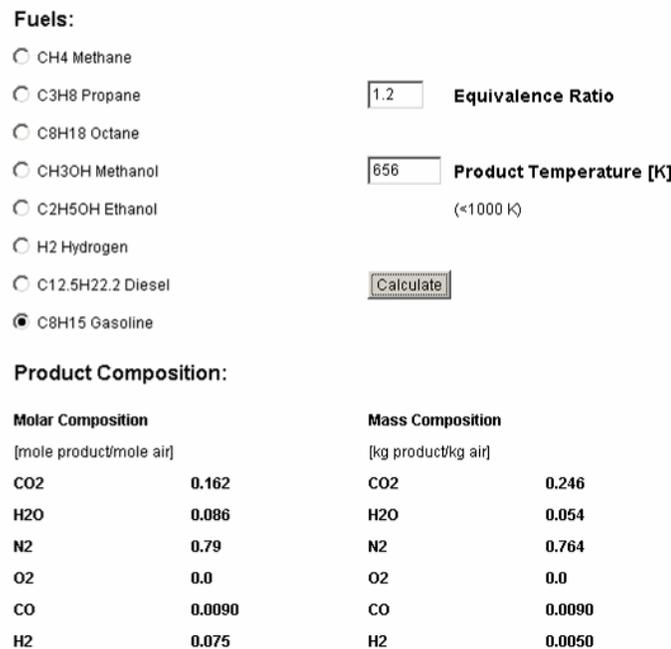


Figura 5. 25 Residuos de combustión a 656 K.[67]

El residuo que nos preocupa es el CO, el cual se muestra en la Figura 5.25 con una composición de masa de 0.0090 mol/mol de aire.

Ahora, faltaría nada más comprobar con pruebas en laboratorio y en uso diario en donde nos arrojará mejores resultados, pero si la reducción de temperatura de estos componentes baja a 616 K entonces se tiene los resultados mostrados en la Figura 5.26.

**Fuels:**

CH4 Methane  
 C3H8 Propane  
 C8H18 Octane  
 CH3OH Methanol  
 C2H5OH Ethanol  
 H2 Hydrogen  
 C12.5H22.2 Diesel  
 C8H15 Gasoline

Equivalence Ratio:

Product Temperature [K]:  (<1000 K)

**Product Composition:**

Molar Composition		Mass Composition	
[mole product/mole air]		[kg product/kg air]	
CO2	0.165	CO2	0.251
H2O	0.083	H2O	0.052
N2	0.79	N2	0.764
O2	0.0	O2	0.0
CO	0.0060	CO	0.0060
H2	0.078	H2	0.0050

Figura 5. 26 Residuos de combustión a 616 K. Datos obtenidos de [67]

Se puede observar que sólo se disminuyó 40 grados, pero gracias a esta reducción se logra una disminución de emisiones de CO a 0.0060 mol/mol de aire.

Esto es  $0.0060/0.0090 = 66.66\%$  por lo que se obtiene una reducción de monóxido de carbono de 33.33%.

Una **reducción de 33.33%** de CO con sólo disminuir 40 grados en la temperatura de combustión. Esta reducción es posible si se evita el golpeteo. Un motor el cual queme la mezcla de manera completa sin dejar residuos provoca una reducción de temperatura, por lo que, haciendo pruebas de laboratorio posteriores, se pueden obtener valores más orientados a la realidad y no sólo números y programas, los cuales nos arrojan resultados alentadores, como es la reducción de un tercio en CO.

Kamura y Takada en 1998 reportaron un aumento de potencia del 10% y un 35% de mejora de uso de combustible en manejo urbano. Todo esto por medio de una inyección tardía del combustible obteniendo una carga estratificada. [66]

Esto nos hace pensar en futuras investigaciones que proveerán de incrementos aún mayores hasta igualar el ciclo Otto ideal.

En la Figura 5.27 se introducen los datos del motor, y generando varias corridas hasta que se encontró que adelantando el momento de la chispa se logra la mayor eficiencia.

**CALCULATE**

<b>Burn Parameters</b>	<b>Engine 1</b>	<b>Geometric Parameters</b>	<b>Engine 1</b>
Spark Angle	<input type="text" value="-10.0"/>	s - stroke [mm] (> 29 mm)	<input type="text" value="100.0"/>
Duration of burn	<input type="text" value="40.0"/>	b - bore [mm] (> 29 mm)	<input type="text" value="100.0"/>
a (usually 5)	<input type="text" value="5"/>	l = connecting rod [mm]	<input type="text" value="150.0"/>
n (usually 3)	<input type="text" value="3"/>	r - compression ratio	<input type="text" value="10"/>
Initial Temperature [K]	<input type="text" value="300"/>	Engine speed [rpm]	<input type="text" value="3000"/>
Initial Pressure [atm]	<input type="text" value="1"/>		
Cylinder Wall Temperature [K]	<input type="text" value="325"/>		
<b>Fuel Parameters</b>			
Equivalence Ratio	<input type="text" value="1.2"/>		
Fuel 1	<input type="text" value="Gasoline"/>		
<b>Parametric Run Data</b>			
Chose the variable to be parametrized:	<input type="text" value="Spark Angle"/>		
Enter the number of values:	<input type="text" value="7"/>		
Enter the data values separated by a comma:	<input type="text" value="-40,-20,-10,-5,0,5,10"/>		

Figura 5. 27 Parámetros para el rendimiento de un motor. Datos obtenidos de [68]

Esto arroja una eficiencia de 0.505 en el motor de gasolina, éste es el valor máximo que se puede tener con un ángulo de ignición de  $10^\circ$  antes del punto muerto superior.

La carga estratificada será un éxito ya que el combustible se vuelve más volátil a temperaturas elevadas, y a mayor volatilidad se garantiza una mejor combustión. Todo esto va ligado uno con el otro.

Las eficiencias de el motor también depende del combustible como ya se mencionó. Datos de eficiencias generadas por la universidad de colorado muestran que el metano es un excelente combustible. Ver Figura 5.28.

Fuel	Efficiency	Mean Pressure [kPa]	Net Work [J]	Net Power [kW]
Gasoline	0.505	2357.66	1851.7	46.29
Light Diesel	0.506	2319.45	1821.69	45.54
Methane	0.511	2067.29	1623.64	40.59
Propane	0.507	2248.6	1766.05	44.15
Octane	0.506	2289.39	1798.08	44.95
Methanol	0.51	2099.09	1648.62	41.22
Ethanol	0.508	2192.82	1722.24	43.06
Hydrogen	0.509	2148.14	1687.14	42.18

Figura 5. 28 Eficiencias del rendimiento de un motor. Datos obtenidos de [68]

Los sistemas de carga estratificada poseen una eficiencia mayor en el consumo de combustible, es por eso que este sistema puede funcionar si se añade al ya utilizado. Nuevamente se menciona que faltaría hacer las pruebas en campo para comprobar la eficiencia final, teniendo en cuenta las pérdidas por fricción y otras. Pero con los datos proporcionados se espera conseguir una mayor eficiencia y lo más importante, el uso de esta tecnología para otros combustibles que sustituirán a la gasolina o derivados del petróleo.

En la Figura 5.29 se muestra que en  $-10^\circ$  la eficiencia se encuentra en el tope. Si analizamos este suceso nos parece razonable, ya que permite que el combustible se encienda antes permita que la mayoría del combustible de queme, si el momento de encendido es posterior al punto muerto superior ( $0^\circ$ ) entonces la eficiencia baja.

Si este sistema de adelanto (ya usado actualmente) se conjunta con las demás ideas ya propuestas se logra ir obteniendo mayor y mayor eficiencia aunque sea en cantidades pequeñas.

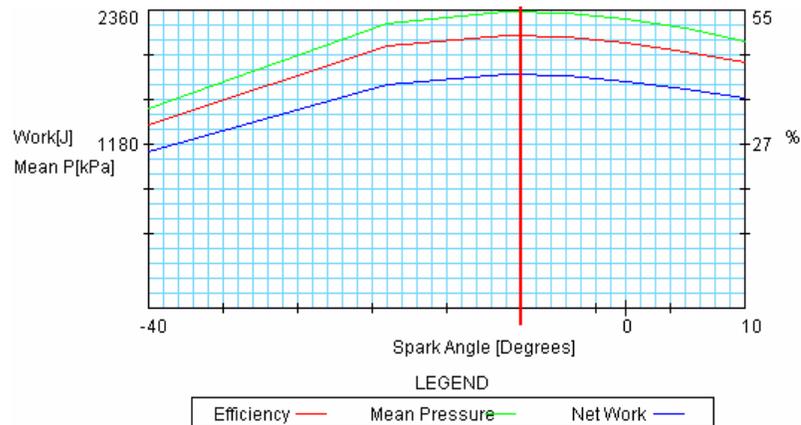


Figura 5. 29 Gráfica de eficiencia máxima de un motor a gasolina a un ángulo de  $-10^\circ$ . Grafica usando los valores de la Figura 5.28 usando el applet de JAVA de [68]

### 5.6.1 ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE.

Las válvulas de inyección son las que permiten el paso del aire limpio (y de la gasolina en un sistema de inyección en el tubo de admisión). Los inyectores son los que se encargan de impulsar la gasolina con cierta presión.

La electro válvula impele el combustible continuamente del depósito a través del filtro de combustible hacia el motor. El regulador de presión del combustible cuida de que exista una presión definida en el circuito de combustible. La magnitud de la presión depende del sistema de inyección. Ahora bien, para mantener la presión mínima necesaria, el caudal impelido por la electro bomba es mayor que el requerido, el combustible excedente refluye al depósito.

En el caso de que el combustible alcanzara altas temperaturas, el sistema BOSCH está diseñado para retener la presión del sistema todavía algún tiempo después de desconectarse la electro bomba de combustible. Así se impide la formación de burbujas de vapor en el sistema de combustible después de parar el motor.

Por medio de estos sistemas inteligentes se puede poseer los inyectores con presión todo el tiempo y así controlar la cantidad de combustible que debe ser inyectado en el momento preciso. Un sistema de estos se puede apreciar en la Figura 5.30.

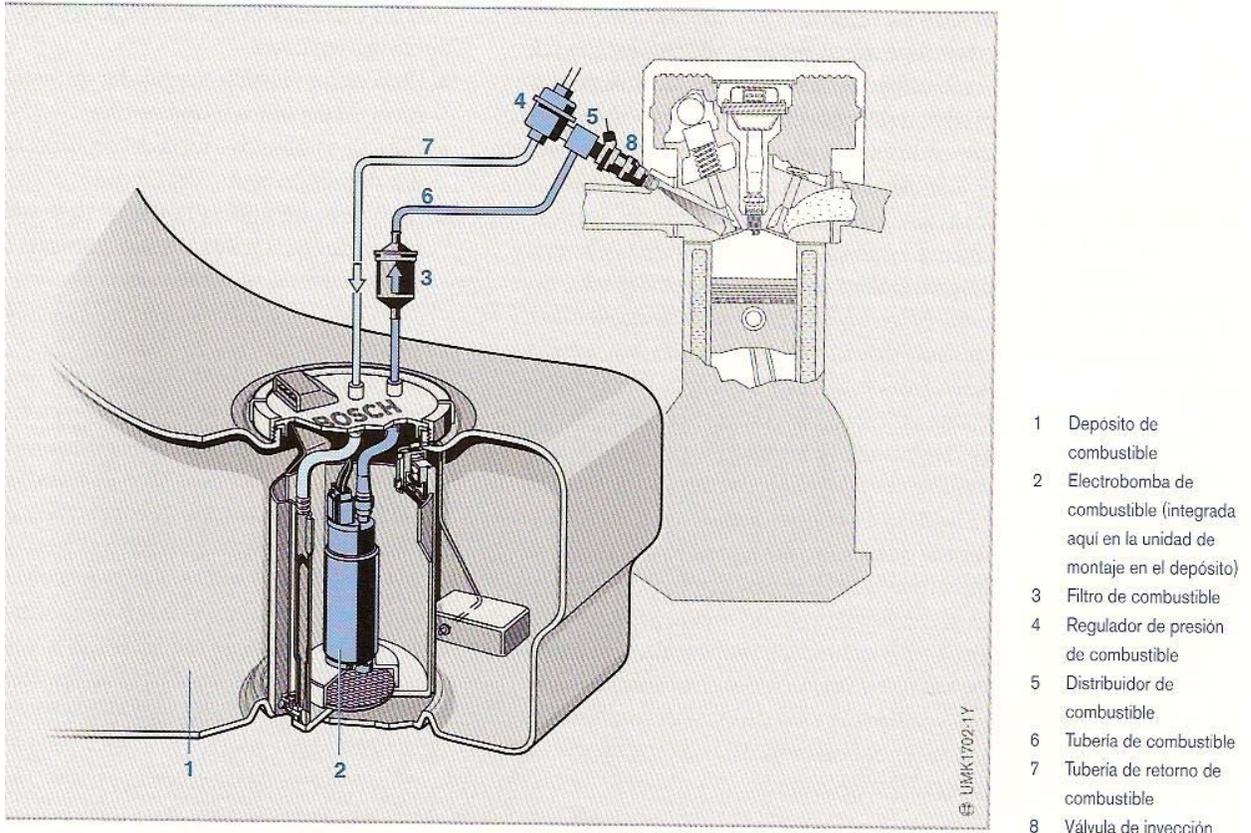
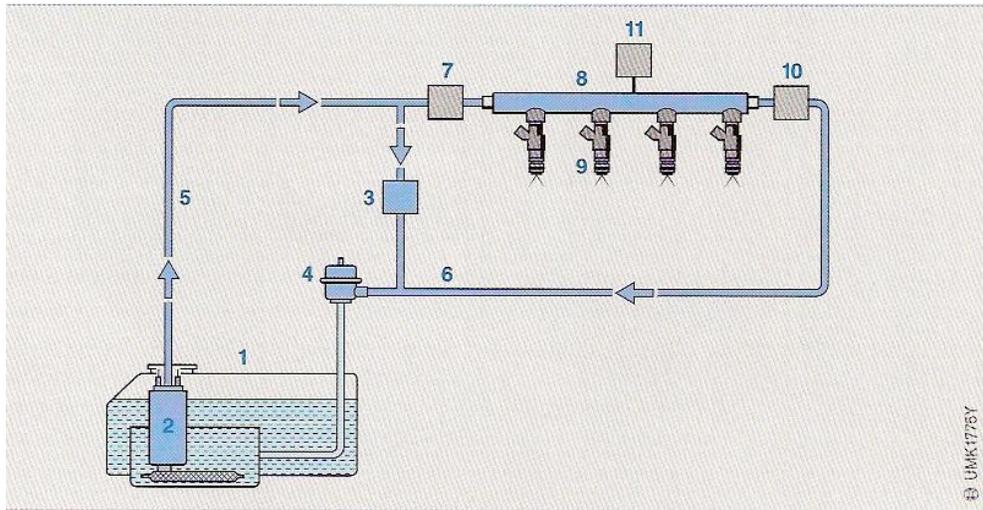


Figura 5. 30 Alimentación de combustible para un motor a gasolina de inyección en el tubo de admisión. Imagen modificada de [69]

El sistema que se propone puede ser aplicado en ambos sistemas de inyección, en el del tubo de admisión que gracias a las altas temperaturas del fluido se impedirá que se formen gotas de combustible en las paredes del tubo provocando un cambio de mezcla en la siguiente inyección, y de inyección directa.

Lo que se propone es un paso intermedio al calentar el combustible a la temperatura máxima de inyección, en donde dicho combustible caliente debe ser en un sistema de inyección directa para evitar así que se comprima con el aire y éste pueda explotar antes del momento de la chispa.

El esquema que se propone se muestra en la Figura 5.31 y es utilizando un riel de inyección compartido, en donde todos los inyectores posean la misma presión y temperatura del combustible (previamente elevada) para que cada bujía queme por igual el combustible.



Circuito de baja presión con:

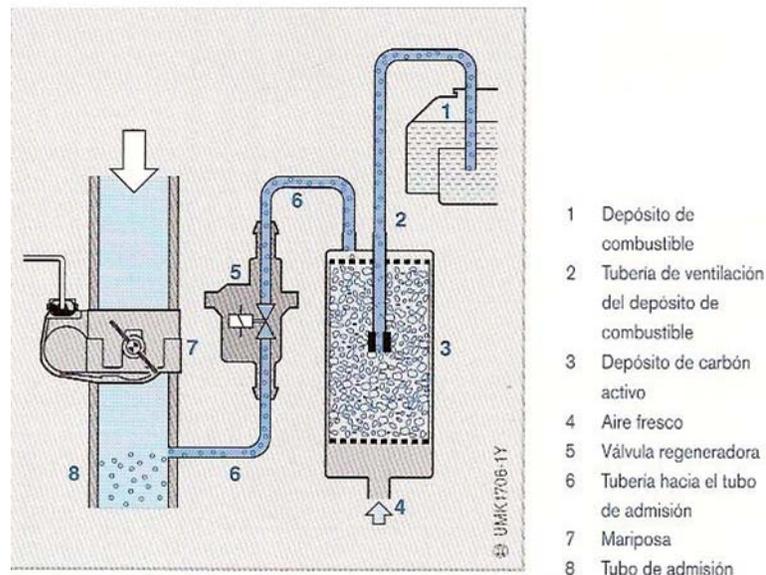
- 1 Depósito de combustible
- 2 Electrobomba de combustible con válvula limitadora de presión y filtro de combustible integrados
- 3 Válvula de cierre
- 4 Regulador de presión
- 5 Tubería de combustible
- 6 Tubería de retorno de combustible

Circuito de alta presión con:

- 7 Calentamiento de gasolina
- 8 Rail
- 9 Válvulas de inyección de alta presión
- 10 Válvula de control de la presión
- 11 Sensor de presión de combustible

Figura 5. 31 Esquema del sistema propuesto. Imagen modificada de [69]

En la Figura 5.32 se muestra la solución a los vapores generado por el combustible. De esta manera se asegura una presión y volumen constante al momento de ser inyectado al cilindro.



- 1 Depósito de combustible
- 2 Tubería de ventilación del depósito de combustible
- 3 Depósito de carbón activo
- 4 Aire fresco
- 5 Válvula regeneradora
- 6 Tubería hacia el tubo de admisión
- 7 Mariposa
- 8 Tubo de admisión

Figura 5. 32 Sistema de retención de vapores de combustible. Imagen modificada de [69]

También se propone un ionizador de gasolina el cual ayudará a romper la estructura del hidrocarburo el cual fomentará su disolución y su quema completa dentro del cilindro.

### 5.6.1 DIFERENCIA ENTRE INYECCIÓN DIRECTA E INYECCIÓN EN EL TUBO DE ADMISIÓN.

La diferencia esencial de la inyección directa en comparación con la inyección en el tubo de admisión radica en ser más alta la presión del combustible y notablemente más corto el tiempo disponible para introducir el combustible directamente en la cámara de combustión. En la Figura 5. 33 se muestran los requisitos que debe cumplir la válvula de inyección. En la inyección en el tubo de admisión hay a disposición dos vueltas del cigüeñal para inyectar el combustible en el tubo de admisión. A un número de revoluciones de  $6000 \text{ min}^{-1}$ , eso corresponde a una duración de inyección aproximada de 20 ms.

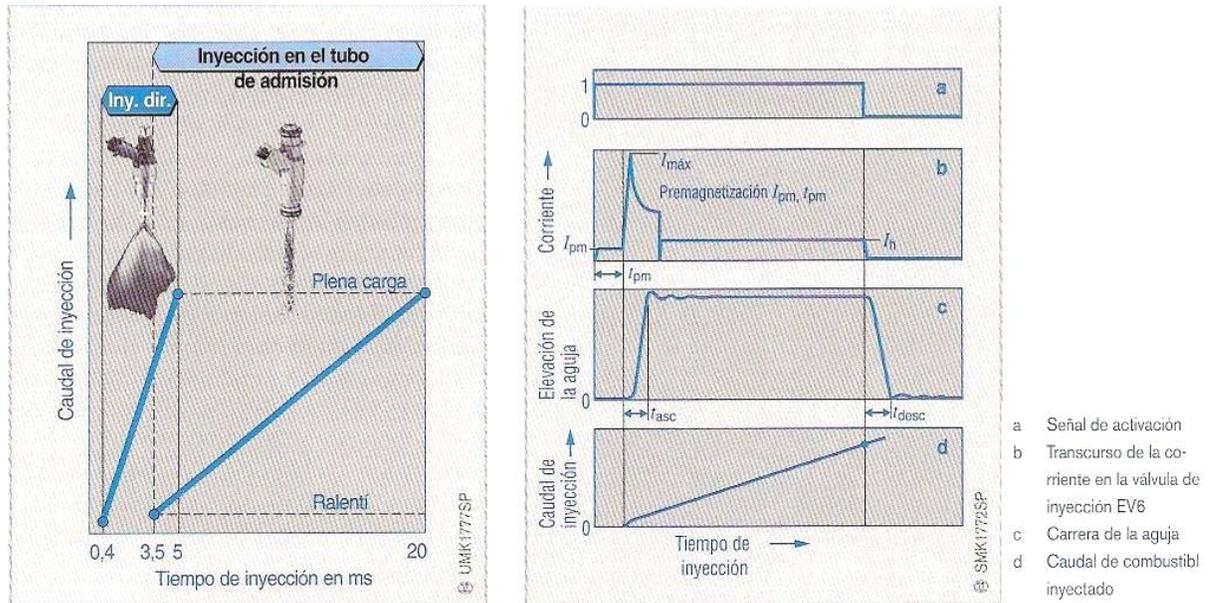


Figura 5.33 Comparación entre inyección directa e inyección en el tubo de admisión con el transcurso de señal de activación de la válvula de inyección a alta presión. Imagen de [69]

En la inyección directa de gasolina, el requerimiento de combustible en ralentí en relación con el de plena carga es muchísimo menor que en la inyección en el tubo de admisión (factor 1:12). De ello resulta una duración de la inyección en ralentí de aproximadamente 0.4 ms.

Algunos factores que influyen son la temperatura y la profundidad de penetración. “Una mezcla con gasolina es inflamable en el margen de  $\lambda = 0.6 \dots 1.6$  en función de la temperatura, presión y geometría de la cámara de combustión del motor. **A bajas temperaturas** el combustible **no se vaporiza** por completo. Por eso en estas condiciones hay que **inyectar más combustible** para obtener una mezcla inflamable.”[69]

El tamaño de gotas del combustible inyectado depende de la presión de inyección y de la presión reinante en la cámara de combustión. Con una presión de inyección en aumento se puede lograr gotas de tamaño más pequeño, que se vaporicen con mayor rapidez. Pero, con un aumento de presión no sólo se pulveriza más la gasolina, sino que se logra una distancia mayor del chorro lo que incrementa la profundidad de penetración, es decir, el recorrido que cubre cada gota hasta su vaporación total.

Este combustible puede condensarse y humectar la pared del cilindro y no se vaporiza antes del encendido, por lo que no produce ninguna combustión o ésta es incompleta.

## 5.6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Es claro que la reducción del uso de combustible y de emisión de contaminantes es el objetivo de esta tesis. Para ello se idearon diferentes maneras para tratar de lograrlo, dando como resultado ideas irrealizables y propuestas ingeniosas las cuales en teoría pudieran funcionar con los parámetros establecidos.

En este capítulo analizamos el chorro de combustible inyectado en el cilindro, y mostramos que a mayor temperatura mayor será la nebulosa y de menor tamaño serán las partículas de combustible. [66]

El siguiente paso fue comprobar que el combustible no encendiera previo a la inyección debido al aumento de temperatura y de presión dentro del mismo. Pero al no haber presencia de oxígeno no se corre dicho problema.

Ahora bien, se conocen ya los datos y el camino a seguir, por lo que faltaba saber la forma de elevar la temperatura del aire. Es el punto en donde se propone calentar el combustible que se encuentra en el riel de inyección, obteniendo el calor proveniente de los gases de salida del motor, punto en donde se encuentran a mayor temperatura.

La idea es utilizar el sistema EGR, pero existen dos inconvenientes: no todos los automóviles lo poseen y segundo, no todo el tiempo está en funcionamiento y menos al inicio del encendido del motor.

Por lo que la propuesta queda utilizando el diagrama de la Figura 5.19 en donde el combustible es bombeado a través de un intercambiador de calor y dirigido al riel de los inyectores, los cuales proveerán de un chorro en forma de nebulosa con partículas de combustible más finas que promoverán su mezcla con el aire contenido en el cilindro. Esto no sólo ayuda a la formación de una mezcla homogénea y la quema de la mayoría del combustible, sino también a la disminución de la temperatura y por ende a la disminución de contaminantes emitidos a la atmósfera. [67]

## 6. CONCLUSIONES.

Desde el uso del motor de combustión interna, el hombre ha intentado mejorar las máquinas, primero se centró en la potencia, al querer desarrollar más fuerza obtenida de un motor, esto ayudó a que el ciclo fuera más eficiente, pero fue como una consecuencia alterna y no como objetivo principal.

Posteriormente se enfocó en la seguridad, tema muy importante cuando los automóviles eran ya demasiados y los accidentes comunes. Se aplicaron nuevos diseños de frenos, bolsas de aire y varios sistemas que no ayudaron en incrementar la eficiencia, pero si la seguridad del interior del auto. Se redujo también el peso del automóvil, su masa en general, esto gracias al uso de materiales como plásticos y metales ligeros como aluminio y magnesio. Estos materiales redujeron el peso considerablemente y lo siguen haciendo. Esto ayuda a aumentar la relación peso/potencia la cual nos garantiza una disminución en el uso de combustible.

Hoy en día, se tienen dos problemas, el uso desmesurado de materia prima no renovable (petróleo) y la contaminación. Ambos problemas son por el uso de la gasolina de manera errónea, y se dice errónea ya que quemar combustible y no aprovecharlo al máximo, siendo que ya es escaso, es una falta de visión que nos arroja a un futuro muy incierto, la escasez del combustible en unas 5 décadas (varia según diferentes autores).

Por las razones anteriores decidimos realizar este trabajo de investigación, con el objetivo de:

Proveer información sobre los avances tecnológicos existentes, que unidos de cierta manera pueden reducir el consumo del combustible.

Algo importante que hay que mencionar es el que aún cuando la eficiencia de un motor no llegara posiblemente a más de un 3% de eficiencia con pruebas de laboratorio, si se reducirá enormemente la emisión de contaminantes emitido a la atmósfera, uno de los más dañinos, el CO.

Uno de los logros fue la documentación y uso que se le puede dar a la reducción de temperatura del motor y así lograr la disminución de contaminantes, esto como se observa en el capítulo anterior, ya que una disminución pequeña de apenas unos grados reduce la emisión de contaminantes enormemente, logrando así la reducción de un 33% la emisión del mortal monóxido de carbono.

Se habló durante el capítulo de componentes que un múltiple de entrada con curvas que provoquen una agitación del aire ayudará a que la mezcla se forme de manera correcta y que la mayoría sea llevada a la entrada del motor. Si gotas de combustible se condensaran y quedaran en las paredes del múltiple de entrada, éstas provocarían la variación de la mezcla en el siguiente ciclo, ó sea, en la siguiente combustión. Y si dichas gotas de combustible quedaran dentro del cilindro sin ser quemadas, entonces serían expulsadas a la salida sin haber sido quemadas contaminando el aire y dañando el catalizador.

Este documento lo escribimos para mostrar las necesidades del planeta de un cambio en el uso de los combustibles, es cierto que aún se seguirá usando algún tipo de combustible volátil en los próximos años, eso antes de cambiar por completo a las celdas de combustible, sin embargo, para la generación de fuerza motriz o de energía eléctrica va a ser necesaria la gasolina, metanol o algún otro. Si se utiliza el metanol, puede ser utilizado el mismo concepto aquí propuesto para que el consumo del combustible que entra a la cámara de combustión sea total y que no existan residuos.

Algo que observamos y que vale la pena mencionar, es que en los autos de hoy en día la contaminación que produce el motor, ocurre durante los primeros dos minutos de movimiento. Esto se debe a que la temperatura de los gases de escape aún no son suficientes como para calentar el catalizador y realizar el proceso químico del mismo. Si los gases de escape calientes después de la marcha se utilizan también para calentar una batería térmica, entonces se tendrá en el próximo arranque un catalizador tibio y una entrada de aire no fría que permitirá reducir el consumo de gasolina y lo más importante, la reducción de contaminantes acortando el tiempo de dos minutos a 40 segundos. [18]

La verdad un minuto menos de mala carburación en un automóvil no es mucho, pero en ciudades donde existen miles de autos, este impacto es bastante para la atmósfera, y para el consumo de combustible claro está.

El automóvil es y será el vehículo de preferencia para el medio de transporte, ya que mueve a las personas de un lugar a otro y se posee control del mismo, cosa que no ocurre con transportes públicos. Es por eso que se debe pensar en incrementar la eficiencia del ciclo actual, y probar nuevos combustibles que serán los que impulsen a los vehículos de futuro.

## **6.1 MODIFICACIONES Y RECOMENDACIONES.**

Para trabajos posteriores se recomienda la utilización de materiales con mezclas cerámicas que ayuden con el problema de transferencia de calor. Así como diseños de cabezas de pistón para cargas estratificadas y camisas de la cámara de combustión que sean lisas para evitar la acumulación de lubricantes y que éstos sean quemados y expulsados al aire.

Durante nuestros estudios observamos que la temperatura de los gases de escape se reducirían, lo que provocaría una emisión menor de contaminantes, y al ser una combustión mejorada, se podría reducir en 15%, pasando ese porcentaje al trabajo útil de accionamiento que es de 13% (descontando todas las pérdidas posibles incluyendo tren motriz).

El 10% en pérdidas por fricción no pueden ser reducidas por este método, eso deberá ser, otro tema de investigación, sin embargo, se puede mejorar un poco el 10% en pérdidas de carga, si la detonación del combustible comienza un poco antes del punto muerto superior para que en ese punto exista una quema total del combustible. Si se reduce ese ángulo y aún así se logra quemar todo el combustible por medio de una carga estratificada, entonces ese porcentaje también disminuirá.

Cuando en el tubo de admisión se produce un vacío contra el cual trabaja el motor, eso es una pérdida de fuerza motriz. Ésta se reduce cuando la inyección directa de gasolina reduce la pérdida por bombeo (pérdida por estrangulación), ya que la mariposa está ampliamente abierta también en relenti y a régimen de carga parcial, regulándose el par motor mediante la masa de combustible inyectada.

Ahora bien, un catalizador de tres vías sólo funcionará eficazmente para la depuración de los gases de escape cuando la mezcla sea absolutamente  $\lambda=1$ . Esto lleva a que el rendimiento es máximo en el margen de  $\lambda=1.1 \dots 1.3$  con una mezcla homogénea. Esto en palabras significa que un exceso de aire da un rendimiento mejor.

De las recomendaciones que se dan destaca el tener mezclas con exceso de aire para tener el rendimiento máximo en mezclas homogéneas. Esto da dos opciones, el de tener una mezcla homogénea, o una carga estratificada. Ambas poseen virtudes.

La carga estratificada posee la cualidad de ser rica, y que se pulverice en el electrodo de la bujía para su encendido. La mezcla homogénea dentro de la cámara posee la cualidad de que si es rica en aire entonces podrá tener un mejor rendimiento.

Si se combinan ambos métodos de inyección se llega a un Homogéneo-estratificado, la cual consta de dos descargas de combustible, una mezcla pobre distribuida de manera homogénea en toda la cámara (la cual busca el mejor rendimiento) y una segunda descarga de manera estratificada la cual será la mecha para la combustión total de la cámara.

Si se utiliza una mala combustión y se inyecta x cantidad de combustible, aún cuando se eficiente esto y se inyecte la misma cantidad, el consumo de combustible seguirá siendo el mismo, sin embargo a la hora de arrancar el motor en frío se puede tener un ahorro de combustible con carga pobre, teniendo así un ahorro de combustible del 40%. [69]

Cuando se arranca en frío se empobrece la mezcla y se reduce la evaporación del combustible y produce una gran humectación (condensación del combustible) debido a las paredes frías del múltiple de admisión. Para compensar esto se inyecta una mayor cantidad de combustible el cual no será quemado en su totalidad y es desperdiciado, pero mantiene al motor en el régimen de trabajo requerido.

Mientras el motor no haya alcanzado aún su temperatura de servicio, es necesario también un enriquecimiento de la mezcla después del proceso de arranque. Eso rige también para la

inyección directa de gasolina. El funcionamiento pobre con carga estratificada no es posible, según el diseño del motor y el procedimiento de combustión, hasta haber alcanzado el motor la temperatura de servicio.

¡Sin embargo, con el diseño propuesto si es posible! Esto se debe a que no será necesario usar una mezcla rica en demasía, sino que se inyectará combustible con una temperatura elevada que favorezca su evaporación y pulverización y así evitar al máximo posible su condensación al momento de pasar por las paredes aun frías. Si se logra trabajar en relentí en los primeros minutos cuando el automóvil que se encuentra frío, entonces se podrá reducir ese 40% al momento del arranque, el cual, hasta el momento no se obtiene. En palabras menos técnicas, si se aplica este sistema propuesto a un automóvil de gasolina que será movido por 10 minutos para ir a un lugar cercano en clima frío, se reduce la contaminación y el uso de combustible de la siguiente manera:

$2+8=10$  minutos = 100% de uso actual de combustible, los dos primeros minutos consumen más que los 8 minutos consecutivos. Por lo que los dos primeros minutos están consumiendo un 40% más que los dos minutos consecutivos. Si se tiene un ahorro de 40% en ellos entonces se tendrá un uso de combustible de:  $12\%+80\%=92\%$  de consumo en comparación con el arranque en frío. Esto es un 8% de ahorro de combustible en un tiempo de 10 minutos.

Por supuesto que esto disminuye conforme el tiempo es mayor, ya que el ahorro en porcentaje es menor, sin embargo disminuye el problema de la contaminación en la misma magnitud.

## 6.2 CONCLUSIONES GENERALES.

Por medio de documentos de investigación se comprobó que el incremento de temperatura dentro de la cámara de combustión no afecta positivamente a la quema de combustible, sin embargo abrió brecha a ocupar la temperatura no en el interior del cilindro, sino antes de él, y que el combustible inyectado con una temperatura mayor sea en pulverizado y así evitar la formación de pequeñas gotas de gasolina.

Se habla mucho de incrementar la eficiencia, pero hay que tener bien claro que se quiere obtener mejor eficiencia, si aumentar la eficiencia significa aumentar potencia es correcto, sin embargo también significa un menor consumo de combustible. Con un  $\lambda=0.95\dots0.85$  se obtiene la potencia máxima del motor, y con un  $\lambda=1.1\dots1.2$  se logra un menor consumo de combustible.

Es por esta razón que se propone la combinación de una mezcla homogénea, pobre dentro de la recámara del pistón, y una carga estratificada al final de la carrera para la eficiencia máxima posible hasta el momento.

Para esto se requiere de una buena pulverización del combustible (diseño propuesto) para evitar que se precipiten gotas de combustible en el tubo de admisión o en la pared de la recámara de combustión. Esta nebulosa mal pulverizada forma grandes gotas que no pueden quemarse totalmente y ocasionan elevadas emisiones de HC.

De esta manera se logra un éxito en reducción de  $\text{NO}_x$ , ya que con una mezcla pobre aumentan las emisiones, pero es por eso que la combinación de ambos sistemas provee una quema casi total

de combustible dejando menores partículas contaminantes. No está de más colocar un catalizador acumulador de  $\text{NO}_x$  previo al catalizador de tres vías.

El incrementar la eficiencia del uso del combustible no sólo ayuda a la disminución del consumo mundial del líquido, sino también la disminución de contaminantes como se demostró en el capítulo anterior.

El objetivo era en un inicio el incrementar la eficiencia del motor de gasolina. Se observó que una manera es utilizando combustibles de mayor octanaje, radios de compresión mayores, materiales más ligeros, etc. Sin embargo eso requiere una modificación del motor con otras consecuencias, un ejemplo es que al comprimir más la gasolina ésta debe poseer un mayor número de aromatizantes y otras sustancias que eviten la auto ignición, logrando así una emisión de contaminantes mayor.

Se planteó ya sea recircular los gases de salida e introducirlos a la cámara de combustión (EGR) o utilizarlos para calentar el aire limpio de entrada. Ambas propuestas no son factibles ya que reducen el consumo, pero de igual manera la potencia del motor.

La metodología fue muy sencilla, se estudió los avances tecnológicos actuales y cuál es la línea de investigación a seguir. De esta manera se manifestó en la tesis que el ciclo termodinámico no es tema de investigación, sino la búsqueda de reducción de fricciones, peso de los materiales, aprovechamiento de los gases de salida y el tipo de inyección tanto del combustible como del aire. De este punto se sostuvo la tesis la cual busca la manera de mejorar el sistema de inyección, aunado ya a los actuales sistemas patentados por las diferentes compañías.

Como se explicó en el capítulo cuatro y cinco la mezcla de aire combustible juega un papel importante en la eficiencia, siendo la mezcla rica de combustible menos eficiente en uso del combustible. Sin embargo la propuesta de colocar una tubería metálica (cobre de preferencia) que transporte el combustible y que ésta se encuentre expuesta a un intercambio de temperatura de los gases de salida provocará que el combustible eleve su temperatura, favoreciendo a su vaporización al momento de ser inyectado dentro de la cámara de combustión. Esto además puede ser sumado a cualquier otro avance tecnológico, como es el del retardo de inyección o la apertura de las válvulas a mayores revoluciones.

El avance automotriz es claro; usar motores más pequeños que desarrollen una mayor potencia a mayores revoluciones, que serían usadas en intervalos pequeños. Para ejemplificar mejor colocaré un ejemplo sencillo: el uso de motores de cuatro cilindros en camionetas SUV de 7 pasajeros de la marca Toyota. El motor proporcionará mayor potencia pasando las 6,000 RPM's y otorgando un excelente consumo (en comparación de marcas americanas con motores de 6 y 8 cilindros).

Si combinamos los avances tecnológicos existentes con el modelo propuesto en el capítulo 5 se obtiene un sistema híbrido de tecnologías, que da como resultado el uso del “evaporador” de combustible propuesto, seguido por un sistema de inyección retardada y sumado a una apertura de válvulas variable y bujías de doble arco dan como resultado una mayor potencia, eficiencia del combustible o uso del combustible así como una emisión de contaminantes menor. Este, al parecer del autor sería la combinación ideal de avances tecnológicos.

Dicho sistema propuesto tiene como función elevar la temperatura del combustible para así favorecer el rompimiento de las moléculas y su mezcla homogénea con el aire, que al momento de ser inyectado puede ser colocado en cualquier motor con cualquier combustible que detone sobre los pistones.

Como sugerencia del autor se exhorta a elaborar pruebas y a ocupar este diseño como prototipo para utilizar esa energía calorífica que es despedida por el motor y ocuparla para elevar la temperatura del combustible antes de ser inyectado. Si se eleva la temperatura tiende el combustible a vaporizarse, efecto que se desea tener dentro de la cámara de combustión y de esta manera facilitar la mezcla de aire/combustible.

Inclusive se propusieron dos diseños y se eligió el más conveniente por la facilidad de instalación y no tener que modificar el motor actual. De esta manera se logra incrementar la temperatura del combustible y favorecer la quema del mismo, y disminuir en consecuencia los residuos tóxicos, entre ellos el monóxido de carbono.

Con esto se logró lo siguiente:

- Disminuir el consumo de combustible (un pequeño porcentaje estimado, a falta de pruebas de laboratorio) al utilizar la energía calorífica que se expide por el escape del motor, dando como efecto el calentamiento del combustible y favoreciendo así su evaporación. Quedando así completado el objetivo planteado de utilizar la energía de salida del motor que se libera a la atmósfera (contribuyendo al calentamiento global).
- Mostrar que incrementar la temperatura del aire de entrada no ayuda al motor, sino al contrario, pero en el caso del sistema EGR se probó que el consumo de combustible es menor si se sacrifica un porcentaje de potencia.
- Dar un diseño adaptable a cualquier vehículo sin modificación aparente para su implementación.
- Disminuir los contaminantes expedidos por el escape del motor al mejorar la quema de combustible, el cual es el mayor aporte de esta tesis. Y es de una gran importancia ahora con los problemas de contaminación que existe, en donde invertir en la disminución de contaminantes es ahora una necesidad.

Puedo concluir que el calentar el combustible para auxiliar su evaporación dentro de la cámara de combustión es una realidad, y un parámetro que se debe analizar en laboratorio.

El esfuerzo del autor logró realizar pruebas con gente de la industria de intercambiadores de calor (BOHN) en donde se logró obtener el diseño ideal con los datos y resultados siguientes:

1 tubo de cobre de 5/8 de diámetro con una longitud de 12" y una aleta disipadora de calor (de aluminio) es sometido a un flujo de aire limpio a una temperatura de 600 K (620 °F) con 20 CFM (pies cúbicos por minuto) que es el valor mínimo para la prueba.

Se utiliza un fluido “estándar” con una temperatura de entrada de 25 °C (77 °F) con un flujo de 0.03 GPM (Galones por minuto)

Esto por supuesto arrojó como resultado un intercambio de calor, pero muy benéfico para la idea del autor, ya que se elevó la temperatura del líquido a 81 °C (178 °F). Esto es un aumento de temperatura de 56 grados centígrados. Sin afectar o robarle demasiado calor al aire (que una temperatura elevada es necesaria para catalizador) quedando con una temperatura de salida de 592 K, sólo 8 grados perdidos.

Con esto se concluye que el sistema propuesto si ayuda a calentar el combustible, y que un combustible con temperatura mayor tiene mayor vaporización que uno frío. Un vapor vaporizado se quema mejor que uno no vaporizado o con micro gotas y esto ayuda a la reducción de consumo de combustible y la reducción de gases contaminantes.

Es por esto que el autor no sólo recomienda, sino que también exhorta a la realización de pruebas controladas de laboratorio en motores actuales para comprobar resultados y obtener datos actuales y reales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Legend 1 from Mercedes-Benz website.
- [2] Mercedes-Benz U.S.A. Mercedes-Benz.
- [3] GIVENS, L., “A *Technical History of the Automobile*,” *Automotive Engineering*, vol. 98, nos. 6-8, SAE International Inc.
- [4] DR. GERHARD SCHMIDT, *speech*, Ford Motor Company vice president of Research and Advanced Engineering.
- [5] <http://media.ford.com>
- [6] <http://www.msnbc.msn.com/id/12801929/>
- [7] <http://autospeed.drive.com.au/cms/article.html?&A=1083>
- [8] [www.Porsche.com](http://www.Porsche.com)
- [9] DIARIO EL CLARÍN, (2006) [www.clarin.com/diario/2006/09/04/elpais/p-01401.htm](http://www.clarin.com/diario/2006/09/04/elpais/p-01401.htm)
- [10] COPYRIGHT EDITORA EL SOL, S.A. DE C.V. (Feb 19, 2005)
- [11] JONATHAN LEVY, *speech*, Harvard University School of Public Health, Boston, Massachusetts, United States.
- [12] DR. GÖSCHE, *Discurso del Prof. L en el Symposium de Vienna (28/04/2006)*, Viena.

- [13] STEPHEN R. TURNS, (2006) *Thermodynamics: concepts and applications*, Cambridge University Press.
- [14] MICHAEL J. MORAN, HOWARD N. SHAPIRO, (2000) *Fundamentals of engineering thermodynamics*, Wiley & Sons,
- [15] HOWELL/BUCKIUS, (1992) *Fundamentals of engineering thermodynamics*, McGraw-Hill
- [16] CHARLES FAYETTE TAYLOR, (1985) *The internal-combustion engine in theory and practice, Volume I: Thermodynamics, Fluid Flow, Performance*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press.
- [17] HOWELL/BUCKIUS, (1996) *Principios de termodinámica para ingenieros*, McGraw-Hill.
- [18] JOHN B. HEYWOOD, (1988) *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill,.
- [19] COLIN R. FERGUSON, ALLAN T. KIRKPATRICK, (2001) *Internal combustion engines applied thermo sciences*, John Wiley & Sons.
- [20] Gestión del motor de gasolina, Fundamentos y componentes, BOSCH, técnica del automóvil, Edición 2002.
- [21] <http://www.importcatalytic.com>
- [22] "Catalytic converter." (2001) WordNet 1.7.1. Princeton University, Answers.com.
- [23] BOSCH, (2002) *Depuración catalítica de los gases de escape, Gestión del motor de gasolina, Fundamentos y componentes*, técnica del automóvil
- [24] <http://www.mne.psu.edu/tcl/images/piston>
- [25] [engine.en.alibaba.com](http://engine.en.alibaba.com)
- [26] [www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com)
- [27] [www.cadillacfaq.com](http://www.cadillacfaq.com)
- [28] [www.zsmotor.net](http://www.zsmotor.net)
- [29] [www.boschautoparts.co.uk](http://www.boschautoparts.co.uk)
- [30] [www.bosch.com.mx](http://www.bosch.com.mx)
- [31] [www.modacar.com](http://www.modacar.com)
- [32] [museodelautomovil.com.mx](http://museodelautomovil.com.mx)

- [33] <http://www.modacar.com/products/Honda/Civic/MODATHB/throttle.html>
- [34] [http://www.ngk.es/La\\_Sonda\\_Lambda.1065.0.html](http://www.ngk.es/La_Sonda_Lambda.1065.0.html)
- [35] BOSCH, *Gestión del motor de gasolina, Sistemas de control de llenado*, (2002) técnica del automóvil.
- [36] BOSCH, (2002) *Gestión del motor de gasolina, Fundamentos del motor de gasolina, Rendimiento del motor*.
- [37] STEPHEN R. TURNS, (2000) *An Introduction to Combustion: concepts and applications*, 2nd ed., McGraw-Hill.
- [38] CHARLES FAYETTE TAYLOR, (1985) *The internal-combustion engine in theory and practice, Volume II: Combustion, Fuels, Materials*, Design.Cambridge, Mass., M.I.T. Press.
- [39] S. T. COELHO AND J. GOLDEMBERG, *Alternative Transportation Fuels: Contemporary Case Studies*, Article Number: NRGY: 00177, University of Sao Paulo, Brazil.
- [40] I.R.HILLS, G.W.SMITH, AND E.V.WHITEHEAD, *Hydrocarbons from Fossil Fuels and their Relationship with Living Organisms*, J.Inst.Petrol.
- [41] B.P.TISSOT Y D.H.WELTE, *Petroleum Formation and Occurrence*, Capitulo I Springer-Verlag.
- [42] Knocking Characteristics of Pure Hydrocarbons. (1958) ASTM STP 225.
- [43] L.M.GIBBS, *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*, (1995) Transportation Fuels, Automotive Gasoline, John Wiley and Sons.
- [44] TECHNICAL BULLETIN NO.4, (Mayo 1991) *Mass Exhaust Emissions Results from Reformulated Gasolines*, Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program.
- [45] TECHNICAL BULLETIN NO.5, (Junio 1991) *Exhaust Emissions of Toxic Air Pollutants using RFGs*, Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program.
- [46] TECHNICAL BULLETIN NO.1, (Diciembre 1990) *Initial Mass Exhaust Emissions from Reformulated Gasolines*, Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program, Coordinating Research Council Inc.
- [47] T.MIDGLEY, JR, *Problem + Research + Capital = Progress*, Ind. Eng. Chem., v.31 p.504-506
- [48] G. EDGAR, *Measurement of the Knock Characteristics of Gasoline in terms of a Standard Fuel*, Ind. Eng. Chem., v.19 p.145-146

- [49] C.K.WESTBROOK, W.J. PITZ, (1991) *The Chemical Kinetics of Engine Knock*, Energy and Technology Review.
- [50] S. T. COELHO AND J. GOLDEMBERG, *Alternative Transportation Fuels: Contemporary Case Studies*, Article Number: NRGY: 00177, University of Sao Paulo, Brazil.
- [51] [www.methanol.org](http://www.methanol.org)
- [52] [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov)
- [53] [www.censolar.es](http://www.censolar.es)
- [54] E.M.GOODGE, (1980) *Alternative Fuels, MacMillan*. ISBN 0-333-25813-4, Apéndice 4.
- [55] J.A.HARRINGTON, (1982) *Water Addition to Gasoline - Effect on Combustion, Emissions, Performance, and Knock*, SAE Technical Paper 820314.
- [56] E.M.GOODGE, (1980) *Alternative Fuels, MacMillan*. ISBN 0-333-25813-4, Capítulo 7.
- [57] G.D.HOBSON, *Modern Petroleum Technology - 5th edition*, Editor, , Wiley. ISBN 0 471 262498, Capítulo 19.
- [58] BOSCH, *Técnica de los gases de escape*, Control del motor para motores de gasolina, Edición 2000.
- [59] USCAR, *Magnesium in Automotive: A N.A. Strategic Vision to Archive 15% weight Reduction by 2020*
- [60] *Automotive Engineering Industries*, May 2005, p86-87.
- [61] RICHARD OSBORN, *General Motors Corporation, private communication*.
- [62] FRANK R. FIELD III AND JOEL P. CLARK, (January 1997) *A practical Road to Lightweight Cars*, reported in Technology Review.com
- [63] [www.engr.colostate.edu/~allan/engines](http://www.engr.colostate.edu/~allan/engines)
- [64] [http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page12/4s\\_gas\\_otto/Ottomain.html](http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page12/4s_gas_otto/Ottomain.html)
- [65] Modificado de [boshautopartes.co.uk](http://boshautopartes.co.uk)
- [66] ROBERT HENNESSEY, ARTURO FUENTES AND RYAN WICKER, *Effect of Injection Timing on Piston Surface Fuel Impingement and Vaporization in Direct Injection*, Spark Ignition Engines SAE, The University of Texas at El Paso
- [67] <http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page9/Combustion/combustion.html>
- [68] <http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page9/Parametric/engine.html>

- [69] BOSCH, (2002) *Gestión del motor de gasolina, Inyección directa de gasolina*, técnica del automóvil.
- [70] BOSCH, (2002) *Gestión del motor, Formación de la mezcla*, rendimiento del motor, técnica del automóvil.

## ANEXO A

Chemically Correct Mixture									
$m_m$	$F_c$ Vol	$F_c$ Mass	$r_m$	$C_p$ (60°F)	$k$ (60°F)	$\frac{a}{\sqrt{T}}$	$F_c Q_c$	$\frac{1}{1 + F \frac{m_a}{11f}}$	$Q_v$
21	0.418	0.0292	0.85	0.243	1.64	62.3	1510	0.704	81.2
27.7	0.105	0.0581	1.00	0.256	1.39	49.9	1248	0.904	86.4
29.0	0.0598	0.0623	1.03	0.249	1.38	48.6	1270	0.943	91.5
29.6	0.0419	0.638	1.04	0.250	1.38	48.5	1270	0.961	93.5
29.8	0.0323	0.0647	1.05	0.250	1.38	48.4	1270	0.967	94.0
28.8	0.0837	0.075	0.96	0.250	1.38	48.7	1555	0.923	110.0
28.7	0.418	0.404	0.85	0.241	1.43	49.3	1755	0.705	94.7
28.85	—	—	—	0.240	1.40	49.0	—	1.0	—

Fuel Alone				Chemically Correct Mixture								
$Q_c$ (Volume)		$Q_c$ (Mass)		$m_m$	$C_p$	$\frac{a}{\sqrt{T}}$	$F_c$ Vol	$F_c$ Mass	$r_m$	$F_c Q_c$	$\frac{1}{1 + F \frac{m_a}{m_f}}$	$Q_v$
High	Low	High	Low									
92	91	1,170	1,160	29.4	0.245†	48.4	1.47	1.50	0.915	1740	0.405	53.9
289	262	6,550	5,980	25.0	—	52.6	0.476	0.266	0.864	1580	0.681	83.0
550	532	11,350	10,980	27.1	—	51.6	0.218	0.137	0.942	1505	0.821	94.4
532	477	16,500	14,800	26.9	—	51.6	0.220	0.092	0.940	1390	0.818	85.6
574	514	17,000	15,200	27.3	—	50.3	0.200	0.058	0.957	882	0.890	59.9
1129	1021	24,100	21,800	27.3	—	49.6	0.095	0.058	1.00	1265	0.916	88.2
163	153	2,470	2,320	27.0	—	—	0.813	0.700	0.913	1620	0.549	68.2

## A. Liquid Fuels; Pure Compounds

Name	Chemical Formula	Liquid Fuel						Fuel Vapor	
		$m_f$	Specific Gravity (60°F)	$H_{10}$ at 77°F	$C_p$ 60–80°F	$Q_{ch}$ (High)	$Q_c$ (Low)	$C_p$ at 60°F	$k$
Normal pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	0.631	−157	0.557	21,070	19,500	0.397	1.07
Normal hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	0.664	−157	0.536	20,770	19,240	0.398	1.06
Normal heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100	0.688	−157	0.525	20,670	19,160	0.399	1.05
Normal octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114	0.707	−156	0.526	20,590	19,100	0.400	1.05
Isooctane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114	0.702	−141	0.515	20,570	19,080	0.400	1.05
Normal decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142	0.734	−155	0.523	20,450	19,000	0.400	1.04
Normal dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170	0.753	−154	0.521	20,420	18,980	0.400	1.03
Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	112	—	−145	0.525	—	19,035	0.400†	1.05†
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	0.884	−186	0.411	17,990	17,270	0.277	1.08
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH	32	0.796	−474	—	9,760	8,580	0.41	1.11†
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46	0.794	−361	—	12,780	11,550	0.46	1.13

B. Liquid Fuels; Typical Mixtures

Gasoline	$C_8H_{17}$	113	0.702	-150	0.50	20,460	19,020		
Gasoline	—	126†	0.739	-142	0.48	20,260	18,900		
Kerosene	—	154†	0.825	-125	0.46	19,750	18,510	~0.4	~1.05
Light Diesel oil	$C_{12}H_{26}$	170	0.876	-115	0.45	19,240	18,250		
Med. Diesel oil	$C_{13}H_{28}$	184	0.920	-105	0.43	19,110	18,000		
Heavy Diesel oil	$C_{14}H_{30}$	198	0.960	-100	0.42	18,830	17,790		

C. Solid Fuels

C to $CO_2$	C	12	—	—	—	14,520	14,520	—	—
C to CO	C	12	—	—	—	4,340	4,340	—	—

D. Gaseous Fuels; Pure Compounds

Name	Chemical Formula	Fuel Alone					
		$m_f$	$\frac{\rho}{\rho_a}$	$C_p$	$Q_{ch}$ (High)	$Q_c$ (Low)	$k$
Hydrogen	$H_2$	2	0.069	3.41	61,045	51,608	1.41
Methane	$CH_4$	16	0.552	0.526	23,861	21,480	1.31
Ethane	$C_2H_6$	30	1.03	0.409	22,304	20,400	1.20
Propane	$C_3H_8$	44	1.52	0.388	21,646	19,916	1.13
Butane	$C_4H_{10}$	58	2.00	0.397	21,293	19,643	1.11
Acetylene	$C_2H_2$	26	0.897	0.383	20,880	20,770	1.26
Carbon monoxide	CO	28	0.996	0.25	4,345	4,345	1.404
Air	—	29	1.00	0.24	—	—	1.40

E. Gaseous Fuels; Typical Mixtures

Name	Fuel Alone										$m_f$	$\frac{\rho_f}{\rho_a}$
	Composition by Volume											
	$CO_2$	CO	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$H_2$	$CH_4$	$N_2$	$O_2$	$C_3H_8$	$C_6H_6$		
Blast-furnace gas	11.5	27.5	—	—	1.0	—	60.0	—	—	—	29.6	1.02
Blue water gas	5.4	37.0	—	—	47.3	1.3	8.3	0.7	—	—	16.4	0.57
Carb. water gas	3.0	34.0	—	6.1	40.5	10.2	2.9	0.5	—	2.8	18.3	0.63
Coal gas	3.0	10.9	—	1.5	54.5	24.2	4.4	0.2	—	1.3	12.1	0.42
Coke-oven gas	2.2	6.3	—	3.5	46.5	32.1	8.1	0.8	—	0.5	13.7	0.44
Natural gas	—	—	15.8	—	—	83.4	0.8	—	—	—	18.3	0.61
Producer gas	4.5	27.0	—	—	14.0	3.0	50.9	0.6	—	—	24.7	0.86

Used in Internal-Combustion Engines

Chemically Correct Mixture Vapor and Air								
$m_m$	$F_c$	$r_m$	$C_p$ (60°F)	$k$	$\frac{a}{\sqrt{T}}$	$F_c Q_c$	$\frac{1}{1 + F_c \frac{m_a}{m_f}}$	$Q_v$
30.1	0.0657	1.05	0.25	1.360	47.3	1280	0.975	95.4
30.1	0.0658	1.05	0.25	1.357	47.3	1265	0.976	94.5
30.2	0.0660	1.06	0.25	1.355	47.2	1265	0.980	94.7
30.3	0.0665	1.06	0.25	1.355	47.2	1270	0.983	95.5
30.3	0.0665	1.06	0.25	1.355	47.2	1268	0.983	95.4
30.4	0.0668	1.06	0.25	1.353	47.1	1270	0.984	95.6
30.5	0.0672	1.06	0.25	1.350	47.0	1275	0.985	96.0
30.5	0.0678	1.05	0.25	1.355	47.2	1290	0.983	97.5
30.4	0.0755	1.01	0.248	1.350	47.5	1285	0.974	95.7
29.4	0.155	1.06	0.245	1.380	47.7	1410	0.876	94.5
30.2	0.111	1.06	0.262	1.340	46.9	1320	0.936	94.7
30.3	0.0670	1.06				1275	0.984	95.6
30.3	0.0668	1.06				1265	0.987	94.8
30.4	0.0667	1.06	~0.25	~1.35	~47	1240	0.988	91.0
30.5	0.0666	1.06				1220	0.989	88.5
30.6	0.0664	1.06				1215	0.989	88.3
30.7	0.0670	1.06				1210	0.990	90.5
29.0	0.0868	1.00‡	0.24	1.40	49	1260	1.0	96.3
29.0	0.1736	0.825‡	0.24	1.40	49	750	1.0	57.3

## ANEXO B

Lista de componentes en idioma ingles-español

<b>Block</b>	<b>Bloque</b>
Block, Blocks	Bloque, bloques
Big Block	Bloque grande
Small Block	Bloque pequeño
Cylinder	Cilindro
Cylinder Block	Bloque de cilindros
Cylinder Block Assembly	Conjunto de bloque de cilindros
Combustion Chamber	Cámara de combustión
<b>Cylinder Head</b>	<b>Culata de cilindros</b>
Cam Cap Gasket	Junta de tapa de levas
Cam Holder Seal	Sello de soporte de levas
Cam Housing	Carcasa de levas
Cam Housing Gasket	Junta de carcasa de levas
Cam Housing Plug	Tapón de carcasa de levas
Cam Housing Seal	Sello de carcasa de levas
Cam Retainer Gasket	Empaquetadura de retenedor de levas
Cam Tower	Torre de levas
Case Stud Washer	Arandela de espárrago de carcasa
Cover Plate	Placa de cubierta
Cover Plate Gasket	Junta de placa de cubierta
Cylinder Head Bolts	Pernos de culata
Cylinder Head Nuts	Tuercas de culata
Cylinder Head Plug	Tapón de culata
Cylinder Head Shim	Cuña de culata
Cylinder Head Studs	Espárragos de culata

Cylinder Head Valves	Válvulas de culata
Cylinder Head Valve Seat	Asiento se válvula
Engine Case Stud	Espárrago de carcasa de motor
Head	Culata
Head Bolt Washer	Arandela de perno de culata
Prechamber	Antecámara
Prechamber Collar	Collar de antecámara
Prechamber Seal Ring	Anillo de sello de antecámara
Spark Plug Insert	Accesorio de inserción de bujía
Tappet Guide	Guía ahusada
Tappet Guide Hold Kit	Kit de soporte de guía ahusada
Valve Cover	Tapa de válvulas
Valve Cover Mount	Soporte de cubierta de válvulas
Valve Cover Nut	Tuerca de cubierta de válvulas
Valve Cover Screw	Tornillo de cubierta de válvulas
Valve Cover Spacer	Espaciador de cubierta de válvulas
Valve Cover Washer	Arandela de cubierta de válvulas
Valve Guide	Guía de válvula
Valve Guide Clip	Sujetador de Guía de válvula
<b>Camshaft</b>	<b>Árbol de levas</b>
Camshaft Cap Stud	Espárrago de tapa de levas
Camshaft Follower	Seguidor de levas
Camshaft Gear Spacer	Espaciador de mecanismo de levas
Camshaft Guide	Guía de levas
Camshaft Position Sensor	Sensor de posición de levas
Camshaft Adapter	Adaptador de eje de levas
Camshaft Bearing	Cojinete de eje de levas
Camshaft Bolt	Perno de eje de levas
Exhaust Valve	Válvula de escape
Exhaust Valve Kit	Kit de válvula de escape
Intake Valve	Válvula de entrada
Intake Valve Kit	Kit de válvula de entrada
Lock Plate	Placa de fijación
Push Rods	Taqués
Pushrod	Taqué
Pushrod Cover Seal	Sellos de cubierta de taqués
Pushrod Guide	Guía de taqué
Rocker Arm	Brazo balancín
Rocker Arm Bushing	Buje de brazo balancín
Rocker Arm Retainer	Retenedor de brazo balancín
Rocker Arm Spring	Resorte de brazo balancín
Rocker Guide	Guía de balancín
Rocker Shaft	Eje de balancines
Rocker Shaft Nut	Tuerca de eje de balancín
Rocker Shaft Thrust Ring	Anillo de empuje de eje de balancines
Rocker Shaft Tower	Torre de eje de balancines
Valve Adjust Bolt	Perno de ajuste de válvula
Valve Adjust Shim	Cuña de ajuste de válvula

Valve Damper	Silenciador de válvula
Valve Keeper	Abrazadera de válvula
Valve Rotocap	Tapa rotativa de válvula
Valve Springs	Resortes de válvula
Valve Spring Set	Juego de resortes de válvula
Valve Thrust Nut	Tuerca de empuje de válvula

**Piston, Pistons**

Piston, Assembly  
Piston Rings  
Piston Rings Set  
Piston Pin

**Pistón, pistones**

Pistón (conjunto)  
Anillos de pistón, segmentos, aros  
Juego de anillos del pistón  
Bulón del pistón

**Connecting Rod**

Connecting Rod, Assembly  
Connecting Rod Bearings  
Connecting Rod Bolts  
Connecting Rod Nuts

**Biela**

Biela (conjunto)  
Casquillos de biela  
Pernos de biela  
Tuercas de biela

**Crankcase**

Air Guide Deflector  
Case Bolt O-Ring  
Case Stud O-Ring  
Crankcase  
Crankcase Hardware Kit  
Crankcase O-Ring  
Crankcase Vent Hose  
Engine Sealant  
Engine Shroud Screw  
Oil Dipstick  
Oil Dipstick Funnel  
Oil Dipstick Seal  
Water Jacket Cover

**Cárter del motor**

Resistencia autorreguladora  
Anillo O de perno de carcasa  
Anillo O de espárrago de carcasa  
Cárter superior  
Kit de Hardware del cárter  
Anillo O del cárter  
Manguera de desfogue del cárter  
Sello de motor  
Tornillo de aro de refuerzo de motor  
Varilla medidora de aceite  
Embudo de varilla medidora de aceite  
Sello de varilla medidora de aceite  
Cubierta de camisa de agua

**Crankshaft, Assembly**

Crank Pulley Lock Plat  
Crank Pulley Spacer  
Crankshaft  
Crankshaft Bearings  
Crankshaft Damper  
Crankshaft Key  
Crankshaft Position Sensor  
Crankshaft Pulley  
Crankshaft Spacer  
Cylinder Sleeve  
Fitted Sleeve

**Cigüeñal (conjunto)**

Placa de fijación de polea del cigüeñal  
Espaciador de polea del cigüeñal  
Cigüeñal  
Casquillos de cigüeñal  
Amortiguador del cigüeñal  
Chaveta del cigüeñal  
Sensor de posición del cigüeñal  
Polea del cigüeñal  
Espaciador del cigüeñal  
Camisa de cilindro  
Camisa ajustada

**Flywheel**

Flex Plate

**Volante**

Placa flexible

Flex Plate Bolts	Pernos de placa flexible
Flex Plate Dowel	Clavija de placa flexible
Flex Plate Lock Plate	Placa de fijación de placa flexible
Flywheel	Volante
Flywheel Adapter	Adaptador del volante
Flywheel Bolt	Perno de volante
Flywheel Conversion	Conversión del volante
Flywheel Glandnut	Tuerca de prensa de volante
Flywheel Lock Plate	Placa de fijación de volante
Flywheel Ring Gear	Corona dentada del volante
Flywheel Shim	Cuña de volante
Pilot Bearing	Cojinete piloto
Pilot Bearing Seal	Sello del cojinete piloto
Pilot Bushing	Buje piloto
Release Arm Boot	Manguito del brazo de liberación
Ring Gear	Corona dentada
<b>Engine Mounts</b>	<b>Soportes de motor</b>
Engine Mount	Soporte de motor
Engine Mount Bracket	Brazo de soporte de motor
Engine Mount Bushing	Buje de soporte de motor
Engine Mount Cap	Cabezal de soporte de motor
Engine Mount Isolator	Aislante de soporte de motor
Engine Mount Spacer	Espaciador de soporte de motor
Engine Mount Stop	Tope de soporte de motor
Engine Mount Strut	Puntal de soporte de motor
Engine Shock	Amortiguador del motor
Engine Shock Mount	Soporte del amortiguador del motor
Engine Torque Rod	Barra de torsión de motor
Engine Vibration Damper	Amortiguador de vibración de motor
Heat Insulator	Aislador de calor

## **ANEXO C**

Propiedades termodinámicas de los Gases.

Carbon monoxide (CO),  $MW = 28.010$ , enthalpy of formation @ 298 K  
(kJ/kmol) =  $-110,541$

$T(K)$	$\bar{c}_p$ (kJ/kmol-K)	$(\bar{h}^o(T) - \bar{h}_f^o(298))$ (kJ/kmol)	$\bar{h}_f^o(T)$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^o(T)$ (kJ/kmol-K)	$\bar{g}_f^o(T)$ (kJ/kmol)
200	28.687	-2,835	-111,308	186.018	-128,532
298	29.072	0	-110,541	197.548	-137,163
300	29.078	54	-110,530	197.728	-137,328
400	29.433	2,979	-110,121	206.141	-146,332
500	29.857	5,943	-110,017	212.752	-155,403
600	30.407	8,955	-110,156	218.242	-164,470
700	31.089	12,029	-110,477	222.979	-173,499
800	31.860	15,176	-110,924	227.180	-182,473
900	32.629	18,401	-111,450	230.978	-191,386
1,000	33.255	21,697	-112,022	234.450	-200,238
1,100	33.725	25,046	-112,619	237.642	-209,030
1,200	34.148	28,440	-113,240	240.595	-217,768
1,300	34.530	31,874	-113,881	243.344	-226,453
1,400	34.872	35,345	-114,543	245.915	-235,087
1,500	35.178	38,847	-115,225	248.332	-243,674
1,600	35.451	42,379	-115,925	250.611	-252,214
1,700	35.694	45,937	-116,644	252.768	-260,711
1,800	35.910	49,517	-117,380	254.814	-269,164
1,900	36.101	53,118	-118,132	256.761	-277,576
2,000	36.271	56,737	-118,902	258.617	-285,948
2,100	36.421	60,371	-119,687	260.391	-294,281
2,200	36.553	64,020	-120,488	262.088	-302,576
2,300	36.670	67,682	-121,305	263.715	-310,835
2,400	36.774	71,354	-122,137	265.278	-319,057
2,500	36.867	75,036	-122,984	266.781	-327,245
2,600	36.950	78,727	-123,847	268.229	-335,399
2,700	37.025	82,426	-124,724	269.625	-343,519
2,800	37.093	86,132	-125,616	270.973	-351,606
2,900	37.155	89,844	-126,523	272.275	-359,661
3,000	37.213	93,562	-127,446	273.536	-367,684
3,100	37.268	97,287	-128,383	274.757	-375,677
3,200	37.321	101,016	-129,335	275.941	-383,639
3,300	37.372	104,751	-130,303	277.090	-391,571
3,400	37.422	108,490	-131,285	278.207	-399,474
3,500	37.471	112,235	-132,283	279.292	-407,347
3,600	37.521	115,985	-133,295	280.349	-415,192
3,700	37.570	119,739	-134,323	281.377	-423,008
3,800	37.619	123,499	-135,366	282.380	-430,796
3,900	37.667	127,263	-136,424	283.358	-438,557
4,000	37.716	131,032	-137,497	284.312	-446,291
4,100	37.764	134,806	-138,585	285.244	-453,997
4,200	37.810	138,585	-139,687	286.154	-461,677
4,300	37.855	142,368	-140,804	287.045	-469,330
4,400	37.897	146,156	-141,935	287.915	-476,957
4,500	37.936	149,948	-143,079	288.768	-484,558
4,600	37.970	153,743	-144,236	289.602	-492,134
4,700	37.998	157,541	-145,407	290.419	-499,684

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), MW = 44.011, enthalpy of formation @ 298 K  
(kJ/kmol) = -393,546

$T(K)$	$\bar{c}_p$ (kJ/kmol-K)	$(\bar{h}^o(T) - \bar{h}_f^o(298))$ (kJ/kmol)	$\bar{h}_f^o(T)$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^o(T)$ (kJ/kmol-K)	$\bar{g}_f^o(T)$ (kJ/kmol)
200	32.387	-3,423	-393,483	199.876	-394,126
298	37.198	0	-393,546	213.736	-394,428
300	37.280	69	-393,547	213.966	-394,433
400	41.276	4,003	-393,617	225.257	-394,718
500	44.569	8,301	-393,712	234.833	-394,983
600	47.313	12,899	-393,844	243.209	-395,226
700	49.617	17,749	-394,013	250.680	-395,443
800	51.550	22,810	-394,213	257.436	-395,635
900	53.136	28,047	-394,433	263.603	-395,799
1,000	54.360	33,425	-394,659	269.268	-395,939
1,100	55.333	38,911	-394,875	274.495	-396,056
1,200	56.205	44,488	-395,083	279.348	-396,155
1,300	56.984	50,149	-395,287	283.878	-396,236
1,400	57.677	55,882	-395,488	288.127	-396,301
1,500	58.292	61,681	-395,691	292.128	-396,352
1,600	58.836	67,538	-395,897	295.908	-396,389
1,700	59.316	73,446	-396,110	299.489	-396,414
1,800	59.738	79,399	-396,332	302.892	-396,425
1,900	60.108	85,392	-396,564	306.132	-396,424
2,000	60.433	91,420	-396,808	309.223	-396,410
2,100	60.717	97,477	-397,065	312.179	-396,384
2,200	60.966	103,562	-397,338	315.009	-396,346
2,300	61.185	109,670	-397,626	317.724	-396,294
2,400	61.378	115,798	-397,931	320.333	-396,230
2,500	61.548	121,944	-398,253	322.842	-396,152
2,600	61.701	128,107	-398,594	325.259	-396,061
2,700	61.839	134,284	-398,952	327.590	-395,957
2,800	61.965	140,474	-399,329	329.841	-395,840
2,900	62.083	146,677	-399,725	332.018	-395,708
3,000	62.194	152,891	-400,140	334.124	-395,562
3,100	62.301	159,116	-400,573	336.165	-395,403
3,200	62.406	165,351	-401,025	338.145	-395,229
3,300	62.510	171,597	-401,495	340.067	-395,041
3,400	62.614	177,853	-401,983	341.935	-394,838
3,500	62.718	184,120	-402,489	343.751	-394,620
3,600	62.825	190,397	-403,013	345.519	-394,388
3,700	62.932	196,685	-403,553	347.242	-394,141
3,800	63.041	202,983	-404,110	348.922	-393,879
3,900	63.151	209,293	-404,684	350.561	-393,602
4,000	63.261	215,613	-405,273	353.161	-393,311
4,100	63.369	221,945	-405,878	353.725	-393,004
4,200	63.474	228,287	-406,499	355.253	-392,683
4,300	63.575	234,640	-407,135	356.748	-392,346
4,400	63.669	241,002	-407,785	358.210	-391,995
4,500	63.753	247,373	-408,451	359.642	-391,629
4,600	63.825	253,752	-409,132	361.044	-391,247
4,700	63.881	260,138	-409,828	362.417	-390,851

Hydrogen (H<sub>2</sub>), MW = 2.016, enthalpy of formation @ 298 K (kJ/kmol) = 0

$T(K)$	$\bar{c}_p$ (kJ/kmol-K)	$(\bar{h}^o(T) - \bar{h}_f^o(298))$ (kJ/kmol)	$\bar{h}_f^o(T)$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^o(T)$ (kJ/kmol-K)	$\bar{g}_f^o(T)$ (kJ/kmol)
200	28.522	-2,818	0	119.137	0
298	28.871	0	0	130.595	0
300	28.877	53	0	130.773	0
400	29.120	2,954	0	139.116	0
500	29.275	5,874	0	145.632	0
600	29.375	8,807	0	150.979	0
700	29.461	11,749	0	155.514	0
800	29.581	14,701	0	159.455	0
900	29.792	17,668	0	162.950	0
1,000	30.160	20,664	0	166.106	0
1,100	30.625	23,704	0	169.003	0
1,200	31.077	26,789	0	171.687	0
1,300	31.516	29,919	0	174.192	0
1,400	31.943	33,092	0	176.543	0
1,500	32.356	36,307	0	178.761	0
1,600	32.758	39,562	0	180.862	0
1,700	33.146	42,858	0	182.860	0
1,800	33.522	46,191	0	184.765	0
1,900	33.885	49,562	0	186.587	0
2,000	34.236	52,968	0	188.334	0
2,100	34.575	56,408	0	190.013	0
2,200	34.901	59,882	0	191.629	0
2,300	35.216	63,388	0	193.187	0
2,400	35.519	66,925	0	194.692	0
2,500	35.811	70,492	0	196.148	0
2,600	36.091	74,087	0	197.558	0
2,700	36.361	77,710	0	198.926	0
2,800	36.621	81,359	0	200.253	0
2,900	36.871	85,033	0	201.542	0
3,000	37.112	88,733	0	202.796	0
3,100	37.343	92,455	0	204.017	0
3,200	37.566	96,201	0	205.206	0
3,300	37.781	99,968	0	206.365	0
3,400	37.989	103,757	0	207.496	0
3,500	38.190	107,566	0	208.600	0
3,600	38.385	111,395	0	209.679	0
3,700	38.574	115,243	0	210.733	0
3,800	38.759	119,109	0	211.764	0
3,900	38.939	122,994	0	212.774	0
4,000	39.116	126,897	0	213.762	0
4,100	39.291	130,817	0	214.730	0
4,200	39.464	134,755	0	215.679	0
4,300	39.636	138,710	0	216.609	0
4,400	39.808	142,682	0	217.522	0
4,500	39.981	146,672	0	218.419	0
4,600	40.156	150,679	0	219.300	0
4,700	40.334	154,703	0	220.165	0

## ANEXO D

### Propiedades de los Combustibles.

Selected properties of hydrocarbon fuels: enthalpy of formation,<sup>a</sup> Gibbs function of formation,<sup>a</sup> entropy,<sup>a</sup> and higher and lower heating values all at 298.15 K and 1 atm; boiling points<sup>b</sup> and latent heat of vaporization<sup>c</sup> at 1 atm; constant-pressure adiabatic flame temperature at 1 atm,<sup>d</sup> liquid density<sup>e</sup>

Formula	Fuel	<i>MW</i> (kg/kmol)	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{g}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{s}^\circ$ (kJ/kmol-K)	HHV <sup>†</sup> (kJ/kg)	LHV <sup>†</sup> (kJ/kg)	Boiling pt. (°C)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	$T_{ad}^\ddagger$ (K)	$\rho_{liq}^*$ (kg/m <sup>3</sup> )
CH <sub>4</sub>	Methane	16.043	-74,831	-50,794	186.188	55,528	50,016	-164	509	2,226	300
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	26.038	226,748	209,200	200.819	49,923	48,225	-84	—	2,539	—
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethene	28.054	52,283	68,124	219.827	50,313	47,161	-103.7	—	2,369	—
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	30.069	-84,667	-32,886	229.492	51,901	47,489	-88.6	488	2,259	370
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propene	42.080	20,414	62,718	266.939	48,936	45,784	-47.4	437	2,334	514
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propane	44.096	-103,847	-23,489	269.910	50,368	46,357	-42.1	425	2,267	500
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1-Butene	56.107	1,172	72,036	307.440	48,471	45,319	-63	391	2,322	595
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>n</i> -Butane	58.123	-124,733	-15,707	310.034	49,546	45,742	-0.5	386	2,270	579
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	1-Pentene	70.134	-20,920	78,605	347.607	48,152	45,000	30	358	2,314	641
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	<i>n</i> -Pentane	72.150	-146,440	-8,201	348.402	49,032	45,355	36.1	358	2,272	626
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzene	78.113	82,927	129,658	269.199	42,277	40,579	80.1	393	2,342	879
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	1-Hexene	84.161	-41,673	87,027	385.974	47,955	44,803	63.4	335	2,308	673
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	<i>n</i> -Hexane	86.177	-167,193	209	386.811	48,696	45,105	69	335	2,273	659
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	1-Heptene	98.188	-62,132	95,563	424.383	47,817	44,665	93.6	—	2,305	—
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	<i>n</i> -Heptane	100.203	-187,820	8,745	425.262	48,456	44,926	98.4	316	2,274	684
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	1-Octene	112.214	-82,927	104,140	462.792	47,712	44,560	121.3	—	2,302	—
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	<i>n</i> -Octane	114.230	-208,447	17,322	463.671	48,275	44,791	125.7	300	2,275	703
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	1-Nonene	126.241	-103,512	112,717	501.243	47,631	44,478	—	—	2,300	—
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	<i>n</i> -Nonane	128.257	-229,032	25,857	502.080	48,134	44,686	150.8	295	2,276	718
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	1-Decene	140.268	-124,139	121,294	539.652	47,565	44,413	170.6	—	2,298	—
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	<i>n</i> -Decane	142.284	-249,659	34,434	540.531	48,020	44,602	174.1	277	2,277	730
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	1-Undecene	154.295	-144,766	129,830	578.061	47,512	44,360	—	—	2,296	—
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	<i>n</i> -Undecane	156.311	-270,286	43,012	578.940	47,926	44,532	195.9	265	2,277	740

Curvefit coefficients for fuel specific heat and enthalpy<sup>a</sup> for reference state of zero enthalpy of the elements at 298.15 K, 1 atm

$$\bar{c}_p \text{ (kJ/kmol-K)} = 4.184(\alpha_1 + \alpha_2\theta + \alpha_3\theta^2 + \alpha_4\theta^3 + \alpha_5\theta^{-2}),$$

$$\bar{h}^\circ \text{ (kJ/kmol)} = 4184 (\alpha_1\theta + \alpha_2\theta^2/2 + \alpha_3\theta^3/3 + \alpha_4\theta^4/4 - \alpha_5\theta^{-1} + \alpha_6),$$

where  $\theta \equiv T \text{ (K)}/1000$

Formula	Fuel	MW	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_8^b$
CH <sub>4</sub>	Methane	16.043	-0.29149	26.327	-10.610	1.5656	0.16573	-18.331	4.300
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propane	44.096	-1.4867	74.339	-39.065	8.0543	0.01219	-27.313	8.852
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	Hexane	86.177	-20.777	210.48	-164.125	52.832	0.56635	-39.836	15.611
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Isooctane	114.230	-0.55313	181.62	-97.787	20.402	-0.03095	-60.751	20.232
CH <sub>3</sub> OH	Methanol	32.040	-2.7059	44.168	-27.501	7.2193	0.20299	-48.288	5.3375
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ethanol	46.07	6.990	39.741	-11.926	0	0	-60.214	7.6135
C <sub>8.26</sub> H <sub>15.5</sub>	Gasoline	114.8	-24.078	256.63	-201.68	64.750	0.5808	-27.562	17.792
C <sub>7.76</sub> H <sub>13.1</sub>		106.4	-22.501	227.99	-177.26	56.048	0.4845	-17.578	15.232
C <sub>10.8</sub> H <sub>18.7</sub>	Diesel	148.6	-9.1063	246.97	-143.74	32.329	0.0518	-50.128	23.514

<sup>a</sup>SOURCE: From Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1988, by permission of McGraw-Hill, Inc.

<sup>b</sup>To obtain 0 K reference state for enthalpy, add  $\alpha_8$  to  $\alpha_6$ .

Curvefit coefficients for fuel vapor thermal conductivity, viscosity, and specific heat<sup>a</sup>

$$\left. \begin{array}{l} k \text{ (W/m-K)} \\ \mu \text{ (N-s/m}^2\text{)} \cdot 10^6 \\ c_p \text{ (J/kg-K)} \end{array} \right\} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 + a_6 T^5 + a_7 T^6$$

Formula	Fuel	T-range (K)	Property	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	
CH <sub>4</sub>	Methane	100–1,000 70–1,000	$k$	-1.34014990E-2	3.66307060E-4	-1.82248608E-6	5.93987998E-9	-9.14055050E-12	-6.78968890E-15	-1.95048736E-18	
			$\mu$	2.96826700E-1	3.71120100E-2	1.21829800E-5	-7.02426000E-8	7.54326900E-11	-2.72371660E-14	0	
			$c_p$	See Table B.2							
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propane	200–500 270–600	$k$	-1.07682209E-2	8.38590325E-5	4.22059864E-8	0	0	0	0	
			$\mu$	-3.54371100E-1	3.08009600E-2	-6.99723000E-6	0	0	0	0	
			$c_p$	See Table B.2							
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	<i>n</i> -Hexane	150–1,000 270–900	$k$	1.28775700E-3	-2.00499443E-5	2.37858831E-7	-1.60944555E-10	7.71027290E-14	0	0	
			$\mu$	1.54541200E+0	1.15080900E-2	2.72216500E-5	-3.26900000E-8	1.24545900E-11	0	0	
			$c_p$	See Table B.2							
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	<i>n</i> -Heptane	250–1,000 270–580 300–735 755–1,365	$k$	-4.60614700E-2	5.95652224E-4	-2.98893153E-6	8.44612876E-9	-1.22927E-11	9.0127E-15	-2.62961E-18	
			$\mu$	1.54009700E+0	1.09515700E-2	1.80066400E-5	-1.36379000E-8	0	0	0	
			$c_p$	9.46260000E+1	5.86099700E+0	-1.98231320E-3	-6.88699300E-8	-1.93795260E-10	0	0	
			$c_p$	-7.40308000E+2	1.08935370E+1	-1.26512400E-2	9.84376300E-6	-4.32282960E-9	7.86366500E-13	0	
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	<i>n</i> -Octane	250–500 300–650 275–755 755–1,365	$k$	-4.01391940E-3	3.38796092E-5	8.19291819E-8	0	0	0	0	
			$\mu$	8.32435400E-1	1.40045000E-2	8.79376500E-6	-6.84030000E-9	0	0	0	
			$c_p$	2.14419800E+2	5.35690500E+0	-1.17497000E-3	-6.99115500E-7	0	0	0	
			$c_p$	2.43596860E+3	-4.46819470E+0	-1.66843290E-2	-1.78856050E-5	8.64282020E-9	-1.61426500E-12	0	
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	<i>n</i> -Decane	250–500 300–700 700–1,365	$k$	-5.88274000E-3	3.72449646E-5	7.55109624E-8	0	0	0	0	
			$\mu$	Not available							
			$c_p$	2.40717800E+2	5.09965000E+0	-6.29026000E-4	-1.07155000E-6	0	0	0	
			$c_p$	-1.35345890E+4	9.14879000E+1	-2.20700000E-1	2.91406000E-4	-2.15307400E-7	8.38600000E-11	-1.34404000E-14	
CH <sub>3</sub> OH	Methanol	300–550 250–650	$k$	-2.02986750E-2	1.21910927E-4	-2.23748473E-8	0	0	0	0	
			$\mu$	1.19790000E+0	2.45028000E-2	1.86162740E-5	-1.30674820E-8	0	0	0	
			$c_p$	See Table B.2							
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ethanol	250–550 270–600	$k$	-2.46663000E-2	1.55892550E-4	-8.22954822E-8	0	0	0	0	
			$\mu$	-6.33595000E-2	3.20713470E-2	-6.25079576E-6	0	0	0	0	
			$c_p$	See Table B.2							

<sup>a</sup>SOURCE: Andrews, J. R., and Biblarz, O., "Temperature Dependence of Gas Properties in Polynomial Form," Naval Postgraduate School, NPS67-81-001, January 1981.

## **ANEXO E**

Componentes de Magnesio Usado en Vehículos (lb)

	Original Weight Original Material	Magnesium Weight	Weight Saved
<b>CHASSIS</b>			
1A Frame Cross Member	20 steel	10	10
Engine Cradle	22 Al	12	10
Brackets Adjustable Pedal	2 steel	1	1
Brake/Accelerator	2.5 steel	2	1
Fuel Tank Barrier	8.7 steel	5	3.7
ABS Mounting Bracket	1.3 iron	0.9	0.4
4 Wheels	65 Al	39	26
Steering Wheel	2.5 Al	1.5	1
Column Brackets	2 steel	1.5	0.5
Columns	4 Al	3	1
<b>INTERIOR</b>			
Seats Stanchions (2)	24 steel	13	11
Frames (4)	44 steel	16	20
Console	8 steel	5	3
Instrument Panel X-car beam	25 steel	15	10
Brackets	1 steel	0.5	0.5
Knee Bolster	10 steel	6	4
Glove Box Door	1 steel	0.7	0.3
<b>POWERTRAIN</b>			
Cam Cover (2)	7 Al	5	2
Cylinder Head Cover	7 Al	5.7	2
Oil Pan	9 Al	6	3
Engine Mounting Brackets	6 iron	3	3
Clutch Housing	14 Al	7	7
Automatic Transmission	42 Al	30	12
Intake Manifold	22 plastic	12	10
Engine Block I 6	56 Al	33	23
Engine Block I 4	42 Al	23	19
Air Intake Housings	6 plastic	4	2
Power Steering Pump Bracket	1.5 Al	1.2	0.3
Oil Pump Housing	3 Al	2	1
Alternator Bracket	5 Al	2.5	2.5
Transfer Case	25 Al	15	10
<b>BODY STRUCTURE</b>			
Lift gate Inner	22 steel	12	10
Door Inner Panels (4)	86 steel	39	47
Mirror Housing	3 zinc	2	1
Targa Roof Frame Opening	11 steel	6	5
Wiper Motor/support Assembly	3.5 Al	2	1.5
Radiator Support/GOR	32 steel	12	20
Front of Dash Structure	40 steel	22	18
Windshield Surround (frame)	22 steel	12	10
Headlight Retainer	1.5 steel	1	0.5
<b>TOTAL</b>	<b>654</b>	<b>349</b>	<b>305</b>

**If all the parts were  
on 1 vehicle (having  
an I-6 engine and auto  
Transmission)**