

Análisis del comportamiento de un motor de combustión interna a gasolina

Análisis del comportamiento de un motor de combustión interna a gasolina de 4 cilindros 1800
cc del vehículo Chevrolet Optra Limited

Jorge Esteban Erazo López

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Jorge Esteban Erazo López, Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Universidad Internacional
SEK; Santiago Celi.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

porcho123@hotmail.com

Dedicatoria

A Dios que en su infinita bondad me ha permitido cumplir un objetivo anhelado y por otorgarme salud para seguir realizando cada proyecto en mi vida.

A mis padres por haberme dado la vida, compartiendo así su amor incondicional y dándome un ejemplo de vida; mi madre que con cada gesto de ternura y devoción ha sido mi soporte y mi padre que con su sacrificio y calidad humana me ha motivado a continuar en mi labor profesional, juntos han hecho posible que culmine con éxito mi carrera.

A mis docentes por brindarme su apoyo, conocimientos y experiencias que me han ayudado a crecer como ser humano y en el ámbito profesional, finalizando así una etapa y dando comienzo a otra; al Ingeniero Santiago Celi en la colaboración para el desarrollo de esta tesis, además al Ingeniero Yamandú Yáñez por su tiempo compartido e impulsar mi desarrollo profesional.

A mis amigos por el apoyo mutuo durante este recorrido académico, donde nació una amistad verdadera, misma que se seguirá cultivando con el pasar de los años; Diego, Daniel, Fernando y Paul por haber contribuido en la realización de este trabajo; a Tany quien ha sido una fuente de inspiración con sus palabras de aliento su cariño y amor sincero que me ha transmitido en este tiempo compartido.

Jorge Esteban Erazo López

Agradecimientos

A Dios por poner a las personas correctas en mi camino para poder salir a delante y nunca dejarme caer en los momentos difíciles.

A mis padres por su ayuda constante cariño, consejos, ayuda y comprensión.

Un sincero agradecimiento a mis profesores por sus enseñanzas y soporte durante mi época universitaria, por formarme para ser un buen profesional y un mejor ciudadano.

Jorge Esteban Erazo López

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo realizar un estudio del motor de combustión interna del vehículo Chevrolet Optra Limited 2008 1.8 CC, para analizar los datos proporcionados por el fabricante y presentar los datos calculados que fueron tomados de referencias bibliográficas.

La introducción de este proyecto cuenta con información técnica sobre los motores de combustión interna, datos técnicos del motor Holden GM Family E-TEC II e información sobre el vehículo Chevrolet Optra Limited 1800 cc.

En el método se analizará los cálculos termodinámicos como las presiones en los cuatro ciclos del motor, las temperaturas de combustión, pérdidas mecánicas, potencia efectiva del motor así como también el estudio de la velocidad, desplazamiento y aceleración del tren alternativo.

En los resultados se incluirá un análisis explicativo de las gráficas y curvas características del funcionamiento del motor Holden GM Family E-TEC II utilizando los datos calculados en la parte del método.

Tabla de Contenidos

Contenido

Introducción	16
Motor de Combustión Interna:.....	16
Elementos de Inflación.	17
Aire.	17
Combustible.	17
Combustión.	18
Ciclo de Funcionamiento	18
Admisión.....	19
Compresión.....	20
Expansión.....	21
Escape	21
Expansión en el ciclo real	22
Relación diámetro/carrera.....	23
Chevrolet Optra.....	25
Método	27
Cálculo Termodinámico del Motor de Combustión Interna	27
Carácter de los procesos de admisión	27
Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire (l_0).....	27
Coeficiente de exceso de aire (α).....	28
Cantidad total de mezcla (M_1).....	30
Combustible la masa de la mezcla en kg. (G_1).....	31

Cantidad de cada uno de los componentes de los productos de combustión	31
Cantidad total de productos de la combustión (M_2)	32
Diferencia de los productos de combustión (ΔM)	33
Parámetros del proceso de admisión	33
Densidad de la carga de Admisión	34
Presión al final de la admisión (P_a)	35
Temperatura de calentamiento de la carga (Δt)	36
Cantidad de gases residuales (γ_r)	37
Coefficiente de llenado (η_v)	40
Diversos factores que influyen sobre el coeficiente de llenado	41
Compresión en el ciclo real	42
Coefficiente Politrópico (n_1)	43
Grado de expansión (n_2)	44
Carácter del proceso de compresión	44
Presión de compresión (P_c)	45
Temperatura de compresión (T_c)	46
Combustión en el ciclo real	46
Temperatura de combustión (T_z)	46
Presión en la combustión (P_z)	47
Coefficiente de grado de combustión (λ)	48
Escape en el ciclo real	48
Temperatura al final de la expansión (T_b)	49
Presión al final de la expansión (P_b)	49

Presión media del ciclo potencia y rendimiento económico de un motor.	50
Presión media indicada de un ciclo.....	50
Motor encendido por chispa (P_{ian}).....	50
Presión media indicada del ciclo real (P_i)	50
Potencia indicada de un motor (N_i)	51
Trabajo indicado (L_i).....	52
Presión media correspondiente a pérdidas mecánicas (P_m).....	52
Presión media efectiva (P_e)	53
Pérdidas mecánicas en el motor (N_m)	53
Potencia efectiva (N_e).....	54
Rendimiento mecánico (η_m)	54
Presión de las pérdidas mecánicas	55
Economía y rendimiento de un motor.....	55
Gasto específico indicado de combustible (g_i).....	56
Gasto de combustible (g_e)	56
El rendimiento indicado (η_i).....	57
Rendimiento efectivo (η_e).....	57
Rendimiento efectivo máximo y consumos específicos	59
Valores orientativos de presión media efectiva máxima	60
Cálculos del pistón.....	61
Tensión de la cabeza del pistón (σ_i)	61
Esfuerzo específico del combustible sobre la cabeza del pistón. (q_p).....	62
Altura de la parte cilíndrica de la cabeza del pistón al aro de fuego (h).....	62

Coeficiente que caracteriza la unión de la superficie del extremo de la cabeza del pistón (k)	63
Fuerza máxima de presión del pistón (P_{zmax})	63
Velocidad angular en ralentí (W).....	63
Definición de la presión entre el bulón y las orejas del pistón qo se toman las siguientes medidas de construcción del pistón	64
Diámetro exterior del bulón (db)	64
Distancia entre las superficies internas de las orejas del pistón (b).....	64
Longitud de trabajo de las orejas (L_o)	64
Longitud del bulón (L_b).....	65
Holgura entre la pared del cilindro y la cabeza del pistón en estado frio (Δc)	65
Holgura entre la pared del cilindro y la falda del pistón (Δf)	65
Diámetro de la cabeza y de la falda del pistón (D_c)	65
Diámetro de la cabeza y de la falda del pistón (D_f).....	66
Diámetro interior del bulón (d_i).....	66
Longitud de los casquillos de la biela ($L_{p.b}$).....	66
Longitud del bulón entre la oreja del pistón (L_t)	66
Relación entre los diámetros (S).....	67
Cálculo de los segmentos (t).....	67
Bielas.....	67
Análisis de construcción	67
Cálculo general de las válvulas.....	67
Válvula de admisión	68

Diámetro menor de la superficie de la válvula (d_2).....	68
Diámetro superior de la superficie de la válvula (d_1).....	68
Altura máxima a la que se eleva la válvula (h).....	68
Válvula de escape	69
Diámetro menor de la superficie de la válvula (d_2).....	69
Diámetro superior de la superficie de la válvula (d_1).....	70
Altura máxima a la que se eleva la válvula (h).....	70
Área de la sección de paso de la válvula de admisión es (f_{v45°).....	71
Área de la sección de paso de la válvula de escape es (f_{v45°).....	71
Cilindrada de un vehículo	72
Cilindrada Total (VH).....	72
Volumen Muerto (V_c).....	72
Volumen Total del Cilindro	72
Relación de Compresión (ξ).....	73
Resultados	74
Cálculos Proceso de Admisión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)	74
Cálculos Proceso de Compresión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II).....	75
Cálculos Proceso de Combustión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II).....	76
Cálculos Proceso de Expansión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)	77
Diagrama Presión vs Volumen del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	78
Diagrama Presión vs Ángulo del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	81
Diagrama Velocidad del émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	84

La Figura 19. Indica la gráfica de velocidad del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal, con velocidades positivas de 359,24 cm/s y velocidades negativas de -360,58 cm/s. Estas velocidades se originan debido al movimiento del émbolo en el PMS y el PMI en el ciclo de combustión.....	84
La velocidad del embolo se considera positiva cuando esta parte de los puntos muertos y es negativa, cuando se acerca después de alcanzar la máxima velocidad.....	84
En los puntos muertos la velocidad es de cero porque en estos puntos el pistón cambia de sentido.....	84
Diagrama Aceleración del émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	87
Fórmulas y resultados del diagrama	88
Diagrama Desplazamiento del Émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	90
Diagrama Fuerza tangencial vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	92
Diagrama Fuerza de émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	95
Diagrama Fuerza normal vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	97
Diagrama Fuerza de la biela vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	100
Diagrama Fuerza de la manivela vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II).....	103

Discusión	105
Conclusiones:	106
Recomendaciones:	106
Bibliografía	107
Libros	107
Net-biografías	107
Anexos	109

Índice de Figuras

Figura 1. Tiempo de Admisión	20
Figura 2. Tiempo de Compresión	20
Figura 3: Tiempo de Expansión.....	21
Figura 4. Tiempo de Escape.....	22
Figura 5. Expansión en el ciclo real.....	23
Figura 6. Comparación entre cilindros de distinto S/D, con la misma cilindrada e igual relación de compresión volumétrica.	24
Figura 7. Chevrolet Optra Limited.....	25
Figura 8. Variación de la temperatura T_a en función del coeficiente γ_r	39
Figura 9. Variación de $T_a = f(\Delta T)$	40
Figura 10. Variación del coeficiente en función de la temperatura ΔT	41
Figura 11. Variación de la presión P_a , los coeficientes γ_r y η_v en función de la carga del motor.....	42
Figura 12. Variación de exponente Politrópico de compresión (n_1) en función de la frecuencia de rotación	43
Figura 13. Variación del rendimiento mecánico en función de la carga.	55
Figura 14. Relación entre las pérdidas mecánicas P_m y la velocidad media del pistón V_p . ..	55
Figura 15. Concentraciones de tensiones en el pistón.	62
Figura 16. Gráfica Presión vs Volumen.....	79
Figura 17. Grafica de Presión vs Ángulo.....	81
Figura 18. Grafica de Velocidad de émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal	84
Figura 19. Aceleración del émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal.....	87
Figura 20. Desplazamiento del émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal	90
Figura 21. Fuerza Tangencial vs Angulo de giro del cigüeñal.	92

Figura 22. Fuerza del Émbolo vs Ángulo de giro del cigüeñal	95
Figura 23. Fuerza de la normal vs Ángulo de giro del cigüeñal.....	97
Figura 24. Fuerza de la Biela vs Ángulo de giro del Cigüeñal.....	100
Figura 25. Fuerza de la manivela vs Ángulo de giro del cigüeñal.....	103

Índice de Tablas

Tabla 1	24
Tabla 2	26
Tabla 3	30
Tabla 4	35
Tabla 5	35
Tabla 6	37
Tabla 7	39
Tabla 8	47
Tabla 9	59
Tabla 10	60
Tabla 11	61
Tabla 12	73
Tabla 13	74
Tabla 14	75
Tabla 15	76
Tabla 16	77
Tabla 17	79
Tabla 18	80
Tabla 19	82
Tabla 20	83
Tabla 21	85
Tabla 22	86
Tabla 23	88
Tabla 24	89

Tabla 25	91
Tabla 26	91
Tabla 27	93
Tabla 28	94
Tabla 29	96
Tabla 30	96
Tabla 31	98
Tabla 32	99
Tabla 33	101
Tabla 34	102
Tabla 35	104
Tabla 36	105

Introducción

El presente trabajo pretende estudiar las características mecánicas, cinemáticas y termodinámicas del motor de combustión interna a gasolina Holden GM Family E-TEC II.

Se realizará el cálculo de las presiones, temperaturas, pérdidas, esfuerzos, potencias y rendimiento económico del motor, con el cual usaremos la información del libro de Motores de Jovaj y Motores alternativos de Desantes.

El objetivo es analizar el motor de combustión interna a gasolina Holden GM Family E-TEC II, en sus procesos de cinemática, termodinámica y mecánica para evaluar la operación en cada uno de ellos.

Como objetivos específicos se tiene:

Determinar las presiones y temperaturas que resultan de procesos termodinámicos del trabajo del ciclo Otto o gasolina del motor Holden GM Family E-TEC II, Chevrolet Optra 1.8.

Establecer el comportamiento cinemático del tren alternativo (biela, pistón y cigüeñal) que realiza el motor Holden GM Family E-TEC II, Chevrolet Optra 1.8.

Obtener los diagramas y curvas características de torque, potencia, fuerza, aceleración, deformación y velocidad del motor Holden GM Family E-TEC II, Chevrolet Optra 1.8.

Investigar información sobre los motores de combustión interna de gasolina.

Motor de Combustión Interna:

El motor de combustión interna está formado por un conjunto de elementos sincronizados entre sí, que transforman la energía calorífica del combustible en energía mecánica. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 4)

Según este proceso se distinguen diversas maneras que caracterizan a los motores por la forma como aprovechan la expansión resultante de los gases al quemarse el combustible en su interior para transformar el movimiento en energía mecánica. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 4)

Así se tiene los siguientes:

- Motor de gasolina
- Motor diésel

Elementos de Inflación.

Aire.

Es un gas compuesto de 21% de oxígeno y 78% de nitrógeno aproximadamente, suministra el oxígeno necesario para quemar el combustible en los motores de gasolina o diésel. El oxígeno se une fácilmente como otros materiales formando óxidos, a éste proceso se lo llama oxidación. Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 5)

El aire tiene dos propiedades importantes:

1. Es compresible, un metro cúbico de aire se puede comprimir al volumen de un decímetro cúbico o menos.
2. Al comprimirse el aire se calienta por efecto de la presión de sus moléculas.

Combustible.

Es todo cuerpo que al combinarse con el oxígeno del aire arde con desprendimiento de calor. En los motores de combustión interna, el combustible es un derivado del petróleo crudo que contiene hidrocarburos, susceptible de formar mezclas carburantes. Los más empleados son la gasolina y el petróleo diésel. Si hay escasez de aire, el combustible no

dispone de suficiente oxígeno, entonces no puede quemarse del todo. Si hay exceso de aire, el nitrógeno del aire, ocupa un mayor volumen que no participa en la combustión y sólo contribuye a contrarrestarla. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 5)

Combustión.

Es el proceso de combinación violenta de oxígeno con el combustible. La mayor parte de los materiales se inflaman a una determinada temperatura, cediendo calor dependiendo la velocidad de la combustión de la aportación de oxígeno. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 5)

Algunos materiales al inflamarse se combinan súbitamente con el oxígeno existente a su alrededor, esparciendo una onda de presión tan fuerte que puede ser capaz de destruir los recipientes que los contiene, por lo tanto, resulta muy peligroso, es así que se le designa como explosión, la cual también aparece cuando la mezcla aire gasolina se somete a una elevada presión. En los motores de combustión interna se aprovechan estos fenómenos para su funcionamiento. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 5)

Ciclo de Funcionamiento

Se denomina ciclo al conjunto de operaciones sucesivas que realizan las piezas móviles del motor, al final de las cuales se encuentran nuevamente en su posición inicial dispuestas a repetir su ejecución. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 6)

Estas operaciones permiten en los motores de combustión interna:

- El llenado de mezcla (o aire) en el cilindro.

- La compresión de la mezcla (o aire).
- El desarrollo de la carrera de fuerza mediante la combustión de la mezcla (o de combustible).
- La evacuación de los gases resultantes.

Cada una constituye un tiempo y en conjunto se les denomina ciclo. El ciclo de funcionamiento consta de cuatro tiempos:

- Admisión.
- Compresión.
- Explosión.
- Escape.

Admisión

Comienza cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS), como se muestra en la Figura 1. Se abre la válvula de admisión y el pistón baja provocando una succión, la cual ayuda a precipitar el aire, dentro del cilindro hasta llenarlo. Cuando el pistón llega al punto muerto inferior (PMI), se cierra la válvula de admisión. La válvula de escape permanece cerrada. Durante este tiempo el cigüeñal ha girado media vuelta (180°) con una carrera del pistón. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

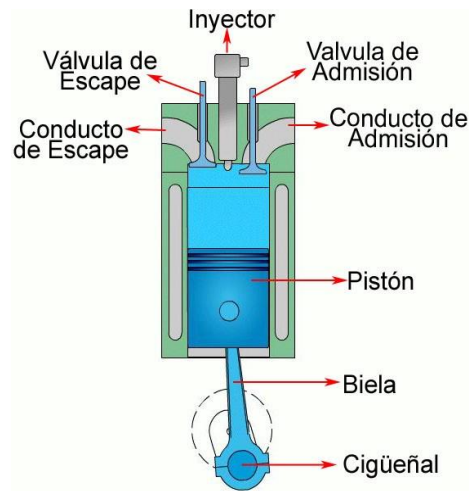


Figura 1. Tiempo de Admisión

Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

Compresión

Las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, el pistón sube, comprimiendo el aire o (mezcla carburante) en el interior del cilindro y aumentando la presión y temperatura hasta comprimirlo totalmente en la cámara de combustión, como se muestra en la Figura 2. El cigüeñal ha girado media vuelta (180°) con una carrera del pistón. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

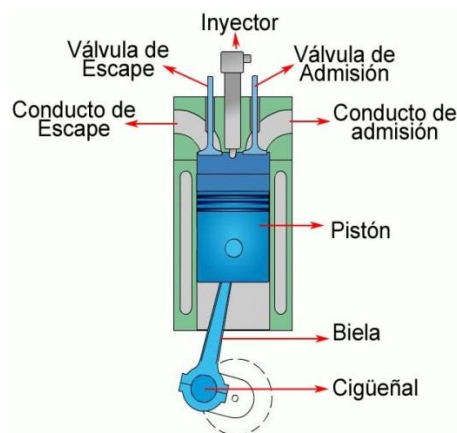


Figura 2. Tiempo de Compresión

Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

Expansión

Al finalizar la carrera de compresión el aire (mezcla carburante) queda comprimido en la cámara de combustión. Cuando se alcanza la temperatura ideal por efecto de la alta compresión y estando el pistón en el PMS, se inyecta el combustible (salto de chispa) en el cilindro por un medio auxiliar. En ese momento se produce la combustión y los gases resultantes, en su expansión, empujan al pistón hacia abajo hasta llegar al PMI, como se muestra en la Figura 3. El cigüeñal ha girado media vuelta (180°) con una carrera del pistón, ésta es la única que se denomina útil por ser la que produce fuerza. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

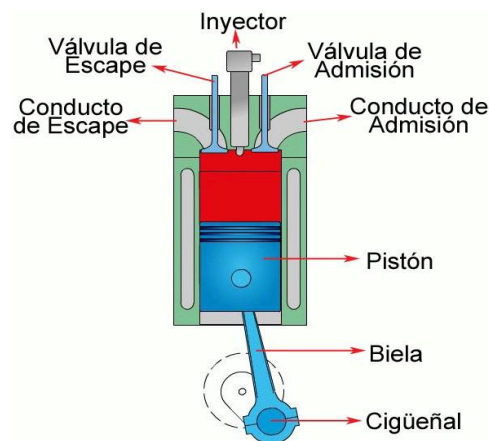


Figura 3: Tiempo de Expansión

Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

Escape

El pistón sube desde el PMI y se abre la válvula de escape que permite la salida de los gases al exterior expulsados por el pistón, al llegar al PMS se cierra la válvula de escape, como se muestra en la Figura 4. El cigüeñal ha girado media vuelta (180°) con una carrera del pistón, girando dos vueltas con cuatro carreras del pistón, completando un ciclo de trabajo. (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 10)

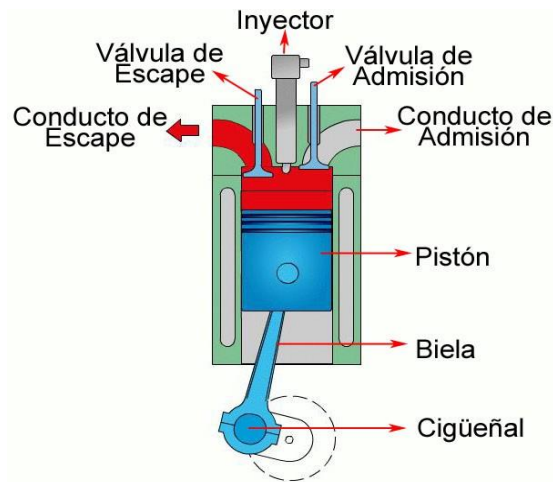


Figura 4. Tiempo de Escape

Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 9)

La utilización del ciclo en los motores determina que en la parte superior del cilindro se ubica la culata del motor con dos válvulas. Una de ellas, donde la admisión permite el ingreso de mezcla o aire al cilindro y otro de escape que permite la salida de gases al exterior. El pistón se desplaza con carreras ascendentes y descendentes en el cilindro. Un extremo de la biela está conectado al pistón y otro al cigüeñal. Este conjunto: pistón, biela y cigüeñal, aprovecha la fuerza producida por una acción expansiva de los gases resultantes de la combustión y convierte el movimiento rectilíneo alternativo del pistón en movimiento circular continuo del cigüeñal. Fuente: (Esguar, Combustión Teoría de Motores de Combustión Interna, 2014, pág. 6)

Expansión en el ciclo real

En este ciclo de expansión o carrera de trabajo se realiza todo el trabajo mecánico debido a la energía térmica que se desprende de la combustión. El ciclo real de la expansión comienza durante la combustión, como se muestra en la Figura 5. En el punto C, y termina cuando comienza el proceso de escape de los gases. Se considera que el proceso de cuatro tiempos termina en el PMI, como se muestra en la Figura 5. En el punto B. Al principio de la

misma hay un gran desprendimiento de calor y brusca elevación de presión. (Jovaj M. ,
Motores del automóvil, 1982)

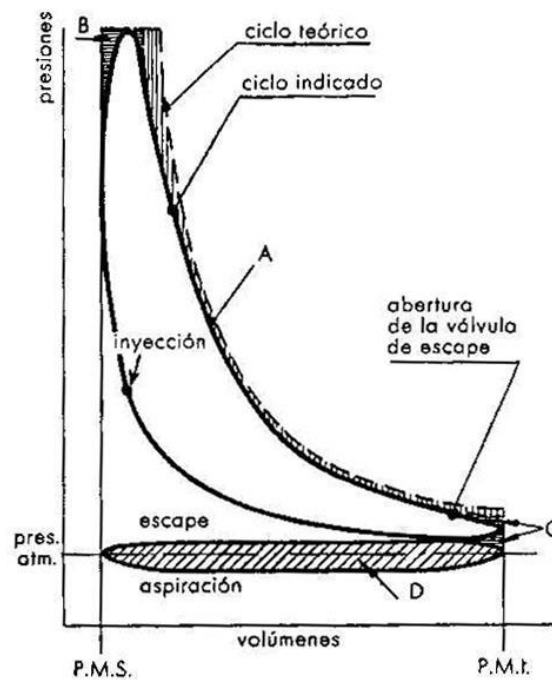


Figura 5. Expansión en el ciclo real.

Fuente: (jeroitim.blogspot.com, 2012)

Relación diámetro/carrera

La tendencia actual en los motores de vehículos de turismo es hacerlos ligeramente súper cuadrados. En nuestro caso, tenemos que $S = 86$ mm, y $D = 81$ mm; $S > D$; se concluye que tiende a ser un motor alargado.

Tabla 1

Ventajas e inconvenientes de cada tipo de motor según la relación S/D

Denominación	S/D	Ventajas	Inconvenientes
Súper cuadrados	<1	Pueden girar muy deprisa Mucho espacio para válvulas	Cámara poco compacta Muchas pérdidas de calor Cigüeñal robusto por ser menor
Cuadrados	= 1	En torno a este valor esta muchos motores	
Alargados	> 1	Cámara compacta	No puede girar muy deprisa

Nota: Datos sobre las ventajas e inconvenientes de cada tipo de motor según la relación S/D obtenida de (Payri & Desantes, Motores de combustión interna alternativos, 2011, pág. 46)

Comparación entre cilindros de distinto S/D

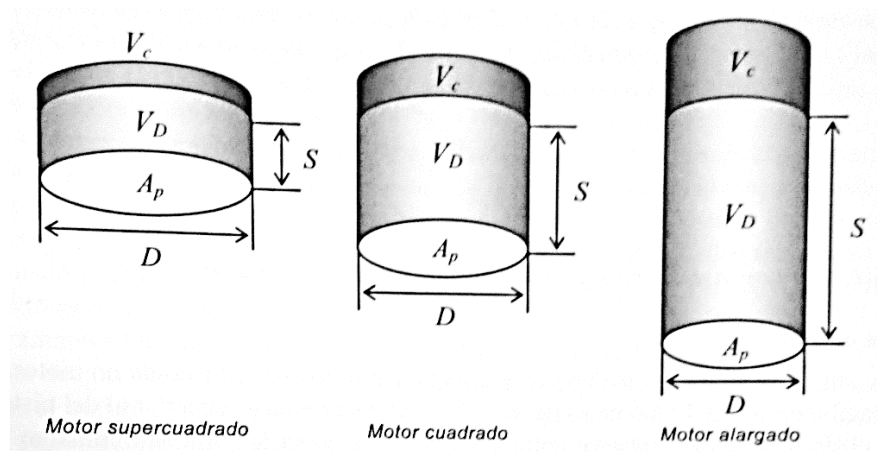


Figura 6. Comparación entre cilindros de distinto S/D, con la misma cilindrada e igual relación de compresión volumétrica.

Fuente: (Payri & Desantes, Motores de combustión interna alternativos, 2011, pág. 46)

Chevrolet Optra



Figura 7. Chevrolet Optra Limited

Fuente: (*dailypage.us*, 2015)

El Chevrolet Optra, Figura 6, es un automóvil del segmento C, producido por el fabricante estadounidense General Motors, bajo la dirección de la división asiática Daewoo desde el año 2001. (Mecanica facil.net, 2015)

El Optra Advance toma básicamente la parte frontal del Optra LT, cuenta a su vez con motorizaciones de 1800 c.c. con 122 HP y 16 válvulas, con los que se obtienen grandes rendimientos y con un consumo promedio de 32 km/gal en vías asfaltadas. El automóvil es impulsado por un motor de 1.8 litros Holden GM Family E-TEC II, disponible en modelos de producción, con una potencia máxima aumentada desde 90 kW hasta 127 kW mediante un compresor volumétrico. Su aceleración de 0 a 100 km/h es estimada en 8 segundos y es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 215 km/h. (Mecanica facil.net, 2015)

Datos del vehículo Chevrolet Optra:

Tabla 2

Datos técnicos Chevrolet Optra 1.8

Tipo	4 Cilindros en línea	Unidades
Cilindraje	1799	cm ³
Diámetro	81.6	Mm
Carrera	86	Mm
Potencia Máxima	121/ 5800	HP/rpm
Torque Máximo	165 /4000	Nm/rpm
Relación de compresión	9,8:1	

Nota: Datos técnicos para el cálculo termodinámico del motor del vehículo Chevrolet Optra 1.8, fueron tomados de (globalbuypower, 2015)

Método

Cálculo Termodinámico del Motor de Combustión Interna

Carácter de los procesos de admisión

La cantidad de aire - combustible que se necesita para el llenado de los cilindros, depende de las siguientes consideraciones:

- Resistencia hidráulica, ya que dificultan el paso de la carga fresca.
- Residuos de gases quemados (M_{γ}) de la anterior combustión.
- Elevamiento de la temperatura de la carga fresca por medio de las paredes del cilindro y el sistema de admisión con una frecuencia de temperatura (ΔT), la misma que provoca la disminución de la densidad de la carga fresca.

Composición química de los combustibles

Los motores de combustión interna trabajan con combustibles líquidos y gaseosos, los cuales son obtenidos de la destilación del petróleo como la gasolina, keroseno, aceite, diésel, gas-oil, aceite solar, etc. La composición química de la combustión se denomina al contenido macizo o volumétrico en el combustible, ésta composición química se expresa en unidades de masa. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Para 1kg de combustible líquido compuesto de carbono (C), hidrógeno (H), y oxígeno (O_c), con ausencia de azufre se puede escribir. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 42)

$$C + H + O_c = 1\text{Kg} \quad (1)$$

Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire (lo)

En este tipo de motor el oxígeno necesario para la combustión se encuentra en el aire que se introduce al cilindro durante el proceso de admisión. Se considera que el volumen de masa de oxígeno en el aire es 23% aproximadamente y en volumen es 21%, así se obtiene la

cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de 1kg de combustible, Ecuación (1).

(Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 43)

Para los valores de C, H, O_c.

En Kg (l_o), en base a la Ecuación (2), (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 48)

$$l_o = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} * C + 8H - O_c \right) \quad (2)$$

Dónde:

l_o = Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire.

$$l_o = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} * 0.855 + 8 * 0.145 \right)$$

$$l_o = 14.956 \text{ kg}$$

En kmol (L_o), Ecuación (3), (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 48)

$$L_o = \frac{1}{0.21} \left(\frac{C}{21} + \frac{H}{4} - \frac{O_c}{32} \right) \quad (3)$$

Dónde:

L_o = Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire.

$$L_o = \frac{1}{0.12} \left(\frac{0.855}{21} + \frac{0.145}{4} \right)$$

$$L_o = 0.516 \text{ kmol}$$

Coefficiente de exceso de aire (α)

La relación entre la cantidad real de aire que ingresa al cilindro del motor y la cantidad de aire teóricamente necesaria para la combustión de 1 kg de carburante. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 49)

$$\alpha = \frac{l}{l_o} ; \alpha = \frac{L}{L_o} \quad (4)$$

Siendo la mezcla estequiométrica $L=L_o$ en kmol y $l=l_o$ en kg.

Si $\alpha < 1$. Se tiene una disminución de aire y por lo tanto una mezcla rica.

Si $\alpha > 1$. Se tiene un aumento de aire y la mezcla por lo tanto se empobrece.

La máxima potencia de los motores en general se obtiene enriqueciendo la mezcla ligeramente para: α (0.85 – 0.90). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 50)

Se toma un $\alpha = 0.90$; se aplica en la Ecuación (5), (6), (8), (9) y (13), ya que este valor permite un mejor llenado de aire.

$$l = \alpha * l_o \quad (5)$$

$$l = 0.9 * 14.956$$

$$l = 13.460 \text{ kg}$$

$$L = \alpha * L_o \quad (6)$$

$$L = 0.9 * 0.516$$

$$L = 0.464 \text{ kmol}$$

Tabla 3

Composición química elemental de la gasolina.

Parámetros	Gasolina	Unidades
Composición másica elemental		
C	0,855	
H	0,145	
Oc	--	
Masa molecular media	110 - 120	
Poder calorífico del combustible	44	MJ/kg
Poder calorífico de la mezcla para $\alpha = 1$	83,9	MJ/kmol
Cantidad de aire teóricamente necesaria para quemar por completo 1kg de combustible	0,516	kmol
Característica del combustible β	0,402	

Nota: Los datos presentes en la tabla 5 se utilizan para realizar los cálculos de la gasolina que usa el vehículo y fueron tomados de (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 62)

Cantidad total de mezcla (M_1)

Está constituida por la cantidad de vapores de combustible y aire, la combustión completa de 1 kg de carburante, en base a la Ecuación (7). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 51)

$$M_1 = \alpha L_o + \frac{1}{\mu_c} \quad (7)$$

Dónde:

α = Coeficiente de exceso de aire.

L_o = Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire.

μ_c = masa molecular media, está entre un rango de (110 – 120), siendo ésta 114 y se aplica en la Ecuación (7), y es la masa admisible para el motor Holden GM Family E-TEC II. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 62)

$$M_1 = (0.9) * 0.516 + \frac{1}{114}$$

$$M_1 = 0.473 \text{ kmol}$$

Combustible la masa de la mezcla en kg. (G₁)

Para cualquier combustible de la masa de la mezcla (en Kg), Ecuación (8).

(Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 51)

$$G_1 = 1 + \alpha * l_o \quad (8)$$

Dónde:

α = Coeficiente de exceso de aire.

l_o = Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg de aire.

$$G_1 = 1 + (0.9) * 14.956$$

$$G_1 = 14.460 \text{ kg}$$

Cantidad de cada uno de los componentes de los productos de combustión

Cuando el combustible arde totalmente, los productos de la combustión están constituidos por anhídrido carbónico (M_{CO_2} vapor de agua (M_{H_2O}), óxido sobrante (M_{CO}), hidrógeno (M_{H_2}) y nitrógeno (M_{N_2}) que se ha formado como resultado de la reacción química. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 51)

Para la obtención de todos los componentes se necesita del coeficiente K, que es la relación entre el número de moléculas de hidrógeno y del monóxido de carbono, de acuerdo a experimentos realizados con la gasolina, la relación en base a las Ecuaciones (9), (10), (11), (12) y (13). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 56)

$K = (0.45 - 0.50)$, en el desarrollo de los cálculos escogemos $K = 0.5$, se aplica en las Ecuaciones (9) y (11), y se usa para los componentes de la combustión del motor. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 56)

$$M_{CO} = 0.42 * \left(\frac{1-\alpha}{1+K}\right) * L_o \quad (9)$$

$$M_{CO} = 0.42 \left(\frac{1-0.9}{1+0.5}\right) * 0.516$$

$$M_{CO} = 0.014 \text{ kmol}$$

$$M_{CO_2} = \frac{C}{2} - M_{CO} \quad (10)$$

$$M_{CO_2} = \frac{0.885}{2} - 0.014$$

$$M_{CO_2} = 0.057 \text{ kmol}$$

$$M_{H_2} = 0.42 * K * M_{CO} \quad (11)$$

$$M_{H_2} = 0.42 * 0.5 * 0.014$$

$$M_{H_2} = 0.0072 \text{ kmol}$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - M_{H_2} \quad (12)$$

$$M_{H_2O} = \frac{0.145}{2} - 0.0072$$

$$M_{H_2O} = 0.065 \text{ kmol}$$

$$M_{N_2} = 0.79 * \alpha * L_o \quad (13)$$

$$M_{N_2} = 0.79 * 0.9 * 0.516$$

$$M_{N_2} = 0.367 \text{ kmol}$$

Cantidad total de productos de la combustión (M_2)

La cantidad de cada componente que integra los productos de la combustión se determinan por (kmol), referida a 1 kg de combustible, Ecuación (14). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 51)

$$M_2 = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{H_2} + M_{H_2O} + M_{N_2} \quad (14)$$

Entonces:

$$M_2 = 0.014 + 0.057 + 0.0076 + 0.065 + 0.367$$

$$M_2 = 0.511 \text{ kmol}$$

Diferencia de los productos de combustión (ΔM)

La variación de número de moles en la mezcla del carburante, llamado incremento de volumen, en base a la Ecuación (15). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 63)

$$\Delta M = M_2 - M_1 \tag{15}$$

$$\Delta M = 0.511 - 0.473$$

$$\Delta M = 0.038 \text{ kmol}$$

Parámetros del proceso de admisión.

La cantidad de carga fresca que ingresa en el proceso de admisión, es decir, el llenado del cilindro, depende de los siguientes factores:

- Resistencia hidráulica en el sistema de admisión, que hace disminuir la presión de la carga suministrada en la magnitud Δp .
- Existencia de cierta cantidad de M_r de productos quemados (gases residuales) en el cilindro, que ocupan parte de su volumen.
- Calentamiento de la carga por las superficies de las paredes del sistema de admisión y del espacio interior del cilindro en la magnitud ΔT , como consecuencia del cual disminuye la densidad de la carga introducida. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 87).

Según datos experimentales obtenidos al investigar motores de automóviles, para la apertura completa de la válvula en el régimen nominal, la velocidad de movimiento de la

carga en la sección de paso es ω_{ad} igual a (50 – 130) m/s, el coeficiente de amortiguación y de resistencia ($\beta^2 + \xi$) igual a (2.5 – 4), en base a la Ecuación (16). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 88).

Densidad de la carga de Admisión

La densidad de la carga en la admisión está determinada por la Ecuación (16).

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0} \quad (16)$$

Dónde:

P_0 = Presión inicial (Pa)

Siendo:

$P_0=0.103$ (MPa), que corresponde al peso del aire sobre unidad de superficie a nivel del mar, se aplica en la Ecuación (16) y (19).

$T_0 = 285$ °k., es la temperatura inicial, la cual es asumida según condiciones de altura a 2785m sobre el nivel del mar.

$R = 286,9$, constante universal de los gases.

$$\rho_0 = \frac{103120}{286.9 * (285)}$$

$$\rho_0 = 1.209 \text{ kg/m}^3$$

El motor Holden GM Family E-TEC II, requiere de los siguientes parámetros, que serán aplicados en la Ecuación (18). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 88)

- Cilindraje de 1000 a 3000 cm³.
- $\omega_{ad} = (50 – 130)$ m/s. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 88)

Tabla 4

Interpolación de datos

Cilindraje	Velocidad de movimiento de la carga
1000 cm ³	50 m/s
1800 cm ³	$\omega_{ad} = 89.29 \frac{m}{s}$
3000 cm ³	130 m/s

Nota: Datos obtenidos de motor Holden GM Family E-TEC II

Coefficiente de amortiguación y de resistencia ($\beta^2 + \xi$):

Tabla 5

Interpolación de datos

Cilindraje	Coefficiente de amortiguación y de resistencia
1000 cm ³	2.5
1800 cm ³	$(\beta^2 + \xi) = 3.01$
3000 cm ³	4

Nota: Datos obtenidos de motor Holden GM Family E-TEC II

Presión al final de la admisión (Pa)

Está determinado por la presión de ingreso de aire P_o a los cilindros y menos algunos factores que influyen en esta presión sea neta, como en los coeficientes de resistencia del sistema y de amortiguación de la velocidad de la carga (ω_{ad}) así como también de la densidad de la carga (ρ_o), se aplica en la Ecuación (17). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 88)

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi) * \frac{\omega_{ad}}{2} * \rho_o * 10^{-6} \quad (17)$$

Dónde:

P_a = Presión de admisión (MPa)

P_o = Presión inicial (Pa)

$(\beta^2 + \xi)$ = Coeficiente de amortiguación y de resistencia (adimensional)

ω_{ad} = la velocidad del aire en la entrada del sistema de admisión (m/s)

ρ_o = Densidad de la carga de Admisión (kg/m³)

Entonces:

$$P_a = 0.103 - 3.01 * \frac{89.29^2}{2} * 1.209 * 10^{-6}$$

$$P_a = 0.088 \text{ Mpa}$$

Temperatura de calentamiento de la carga (Δt)

Los gases entran por el conducto de admisión y cuando están dentro del cilindro toman contacto con las paredes que se encuentran calientes entonces se incrementa la temperatura. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

El grado de temperatura depende de:

- Velocidad de movimiento
- Velocidad de admisión
- Diferencia entre las paredes y la carga

Si se aumenta la temperatura de densidad de carga crece y el calentamiento en el motor debe hacerse hasta un cierto límite. Un calentamiento excesivo hace que el llenado de los cilindros sea de forma defectuosa. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

$\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, se aplica en la Ecuación (18), y se usa para los cálculos térmicos, la temperatura se toma de datos experimentales y cálculos indirectos. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 97).

Cantidad de gases residuales (γ_r)

En el proceso de escape no se logra desalojar todos los gases quemados, ocupando éstos un cierto volumen de presión y temperatura. Dichos gases residuales se expanden y se mezclan con la carga fresca durante la admisión haciendo que se disminuya el llenado del cilindro. Depende de la calidad de limpiado y de barrido del cilindro por la carga fresca.

(Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 90)

En los motores a gasolina, a plena carga (0,06 - 0, 1), determinados desde cilindrajes de 1000 a 3000 cm³ con lo cual procedemos a la realización de una Interpolación a 1800cm³ correspondiente al cilindraje del vehículo, se aplica en la Ecuación (18). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 90)

Tabla 6

Interpolación de datos

Cilindraje	Coefficiente de gases residuales
1000 cm ³	0.06
1800 cm ³	$\gamma_r = 0.076 \frac{m}{s}$
3000 cm ³	0.1

Nota: Datos obtenidos de motor Holden GM Family E-TEC II

Temperatura al finalizar la admisión (T_a)

Es la temperatura de la mezcla de carga fresca con las fases residuales, será mayor que la temperatura del aire en la entrada pero menor que la temperatura de los gases residuales, Ecuación (18). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 93)

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \gamma_r * T_r}{1 + \gamma_r} \quad (18)$$

Dónde:

T_a = Temperatura en el ciclo de admisión (°k)

T_o = 288 °k, temperatura inicial, asumida según condiciones de altura 2785m sobre el nivel del mar. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 93)

ΔT = Incremento de la temperatura (°C)

γ_r = Coeficiente de gases residuales (adimensional)

T_r = Temperatura de los gases residuales (°k)

Siendo:

Se puede asumir que la temperatura de los gases residuales en los motores a gasolina es T_r igual a (900 – 1000) °K, determinados desde cilindrajes de 1000 a 3000 cm³ con lo cual procedemos a la realización de una Interpolación a 1800cm³ correspondiente al cilindraje del vehículo, Tabla 7. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 91)

Tabla 7

Interpolación de datos

Cilindraje	Temperatura de los gases residuales
1000 cm ³	900
1800 cm ³	Tr= 940 °K
3000 cm ³	1000

Nota: Datos obtenidos de motor Holden GM Family E-TEC II

Entonces:

$$T_a = \frac{288 + 15 + 0.076 * 940}{1 + 0.076}$$

$$T_a = 347,99 \text{ °K}$$

Ta, °K

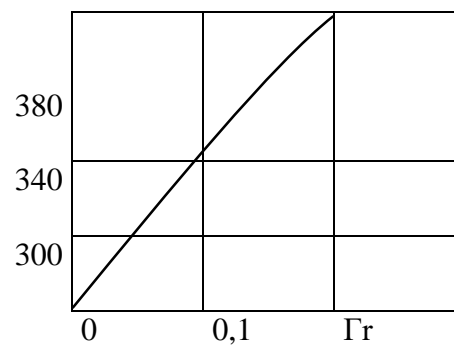
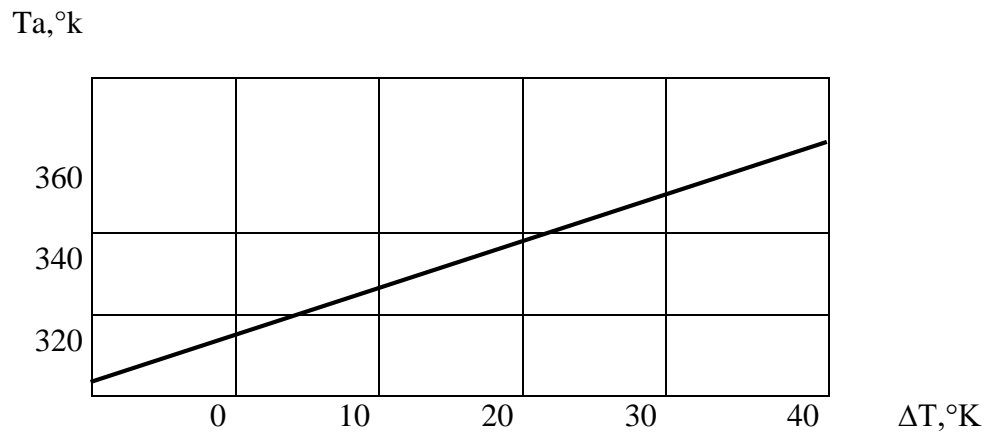


Figura 8. Variación de la temperatura T_a en función del coeficiente γ_r .

Fuente. (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 94)

Figura 9. Variación de $T_a = f(\Delta T)$

Fuente. (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 94)

Coeficiente de llenado (η_v)

El grado de perfección del ciclo de admisión se determina por el coeficiente de llenado o rendimiento volumétrico; es la razón entre cantidad de carga fresca que se encuentra en el cilindro al inicio de la compresión real, es decir, se cierra los órganos de intercambio de gas (válvula) y aquella cantidad de carga fresca que podría llenar la cilindrada (volumen de trabajo del cilindro) en las condiciones de admisión, en base a la Ecuación (19). (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 96).

La reacción en los motores a gasolina va del rango de $(\epsilon) = (7 - 10)$, mientras que para el prototipo, la relación de compresión ($\epsilon = 8.8$). , se aplica en las Ecuaciones (19), (22), (23), (26), (28) y (37). (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 79)

$$\eta_v = \frac{\epsilon}{\epsilon-1} * \frac{P_a}{P_o} * \frac{T_o}{T_a(1+\gamma_r)}, \quad (19)$$

Dónde:

η_v = Coeficiente de llenado

T_o = Temperatura de proceso de admisión

T_a = Temperatura al finalizar la admisión

P_a = Presión de admisión

P_o = Presión de admisión sin sobrealimentación

γ_r = Cantidad de gases residuales

$$\eta_v = \frac{9.8}{9.8-1} * \frac{0.086}{0.103} * \frac{285}{359*(1+0.076)}$$

$$\eta_v = 0.69$$

Diversos factores que influyen sobre el coeficiente de llenado

Sobre el valor del coeficiente de admisión influyen:

- Presión de admisión (P_a)
- Temperatura de admisión (T_a)
- Calentamiento de la carga (ΔT)
- Coeficiente de gases residuales (γ_r)
- Temperatura (T_{ur})
- Presión (P_r)
- Relación de compresión (ϵ)

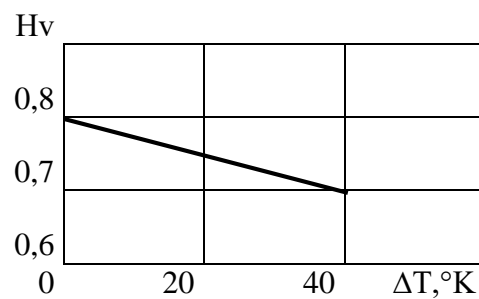


Figura 10. Variación del coeficiente en función de la temperatura ΔT .

Fuente: (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982)

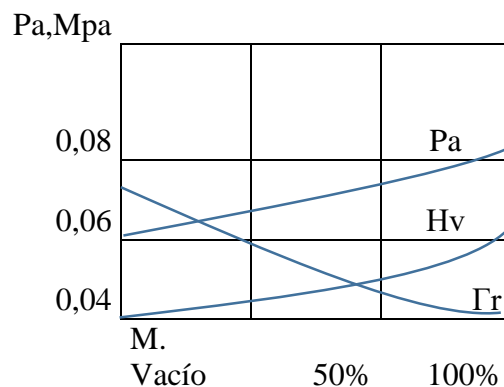


Figura 11. Variación de la presión Pa, los coeficientes γ_r y η_v en función de la carga del motor.

Fuente: (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 102)

Compresión en el ciclo real.

En el ciclo de compresión se elevan la temperatura y la presión de la mezcla, la misma que depende de los parámetros termodinámicos del ambiente al comenzar la compresión del ciclo real y del carácter del intercambio de calor. (Jovaj M., *Motores del automóvil*, 1982, pág. 79)

Procesos del ciclo real (ϵ)

Está determinado por la relación existente entre el volumen del cilindro, más el volumen de la cámara de combustión, sobre el volumen de la cámara de combustión. (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 79)

Relación de compresión geométrica, referida al volumen total, Ecuación (20). (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 79)

$$\epsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (20)$$

Relación de compresión real, Ecuación (21). (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 79)

$$\epsilon' = \frac{V_{h'} + V_c}{V_c} \quad (21)$$

Dónde:

V_h' = volumen de trabajo para la posición en el instante de comenzar el proceso de combustión.

V_c = Volumen de la cámara de combustión.

Una buena relación de compresión mejora el rendimiento del motor, conduciendo a un incremento de la potencia y a una mejor combustión de la mezcla aire - gasolina.

Coefficiente Politrópico (n_1)

El exponente politrópico influye en el sistema de refrigeración cuando el líquido refrigerante y las superficies conductoras del calor están a baja temperatura, el calor se extrae de la carga más intensamente y no será más bajo. (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982)

El empleo de pistones y culatas de aluminio incrementan la conductividad del calor y no tendrá valores más bajos debido a la mayor transferencia térmica del aluminio comparada con la de fundición. El exponente politrópico no depende de (ϵ), o insignificamente se incrementa al elevar dicho parámetro, al elevar la frecuencia de rotación se reduce el tiempo de intercambio de calor de la mezcla con las superficies que transmite el calor. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 115)

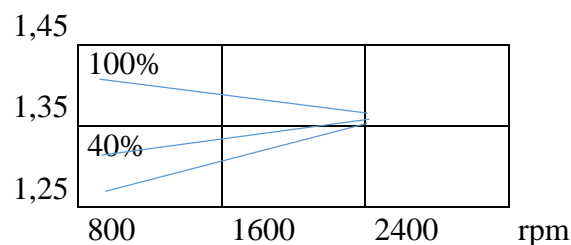


Figura 12. Variación de exponente Politrópico de compresión (n_1) en función de la frecuencia de rotación

Fuente: (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 115)

El coeficiente politrópico tiene un rango, $n_1 = (1.25 - 1.45)$, se adapta un $n_1 = 1.35$, ya que este motor es de aleación de aluminio e incrementa la transmisión de calor, se aplica en las Ecuaciones (22), (23), (26), (27) y (28). (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982, pág. 114)

Grado de expansión (n_2)

Se determina por una serie de factores, por eso n , se debe elegir considerando los resultados que se han obtenido durante la investigación del motor. (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982)

La influencia de un buen proceso de combustión está determinada por la velocidad con que se queman los combustibles en la fase principal. Al arder gran cantidad de combustible, presión en la combustión (P_z) y la temperatura de combustión (T_z), se incrementan y la fracción de combustible que se extingue disminuye en el proceso de expansión y no crece. Semejante desarrollo en el proceso es el más conveniente, ya que se logra mayor aprovechamiento del calor. Se observa una disminución de n_2 al aumentar el régimen de revoluciones, debido a una menor emisión de calor al exterior. ((Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 117)

Los valores del exponente politrópico de expansión oscilan entre ($n_2 = 1, 23 - 1, 30$), mientras que para la investigación que se realiza se toma n_2 igual a 1, 25), se aplica en las ecuaciones (26, (27) y (28). (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982)

Carácter del proceso de compresión

Los factores de intercambio térmico en el proceso de la compresión queda definida por:

- La diferencia entre las temperaturas de la mezcla y las superficies conductoras de calor.

- La cantidad de mezcla que se encuentra en el cilindro en el proceso de combustión.
- El tiempo durante el cual se efectúa el intercambio de calor.
- El coeficiente de transmisión de calor de los gases a las superficies que dependen de la velocidad de la mezcla
- La cantidad de motores de gasolina que se evapora durante el proceso de combustión.

Presión de compresión (Pc)

Se obtiene en el PMS al final de la compresión y es muy difícil determinarla ya que no varía, para lo cual se escogió un n_1 , que servirá para todo cálculo en general, se aplica en la Ecuación (22) y (25). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 112)

$$P_c = P_a * \epsilon^{n_1} \quad (22)$$

Dónde:

P_c = Presión de compresión

P_a = Presión de admisión

ϵ = Relación de compresión

n_1 = Exponente politrópico

$$P_c = 0.088 * 9.8^{1.35}$$

$$P_c = 1.92 \text{ Mpa}$$

Temperatura de compresión (Tc)

Temperatura al final del proceso de compresión.

$$T_c = T_a * \epsilon^{n_1-1} \quad (\text{Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 115}) \quad (23)$$

Dónde:

Tc= Temperatura de compresión

Ta= Temperatura de admisión

ϵ = Relación de compresión

n1= Exponente politrópico

$$T_c = 347,99 * 9.8^{(1.35-1)}$$

$$T_c = 773.56 \text{ }^\circ\text{K}$$

Combustión en el ciclo real

La combustión es un proceso físico - químico, y su mejoramiento queda determinado por las velocidades de las reacciones químicas, por las condiciones de transferencia de calor y masa en la zona de llama, así como el traspaso de calor a las paredes.

La combustión se realiza en un ambiente gaseoso, por lo tanto este proceso ocurre con mayor rapidez en caso de mezclas homogéneas. (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982)

Temperatura de combustión (Tz)

El valor buscado para la temperatura de combustión, correspondiente al valor de la energía internase encuentra interpolando entre la gama de temperaturas $2300^\circ\text{C} < T_z < 2400^\circ\text{C}$ (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982, pág. 638)

$\mu_z = 68600 \text{ KJ/Kmol}$, energía interna de los productos de combustión.

Tabla 8

Interpolación de datos

Energía interna de los productos de combustión	Temperatura de combustión
67213 KJ/Kmol	2300
68600 KJ/Kmol	Tz= 2341.651 °K
70543 KJ/Kmol	2400

Nota: Datos obtenidos de motor Holden GM Family E-TEC II

Presión en la combustión (Pz)

La presión de combustión es la fuerza con que se realiza la combustión sobre el área de la cámara de combustión., como se muestra en la Ecuación (24). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 157)

$$P_z = \mu_r * \frac{T_z}{T_c} * P_c \quad (24)$$

Dónde:

Pz= Presión en la combustión

μ_r = Coeficiente real de variación molecular

Tz= Temperatura de combustión

Tc= Temperatura de compresión

Pc= Presión de compresión

$$\mu_r = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}$$

Dónde:

$\mu_0 = 1.08$, Coeficiente teórico de variación molecular (Adimensional)

$$\mu_r = \frac{1.08 + 0.08}{1 + 0.08}$$

$$\mu_r = 1.074$$

$$P_z = 1.074 * \frac{2341.651}{773.56} * 1.92$$

$$P_z = 6.24 \text{ MPa}$$

Coefficiente de grado de combustión (λ)

El grado de elevación de la presión, Ecuación (25). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 156)

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c} , \tag{25}$$

Dónde:

P_z = Presión de combustión

P_c = Presión de compresión

$$\lambda = \frac{6.24}{1.92}$$

$$\lambda = 3.25$$

Escape en el ciclo real.

El proceso de escape se inicia cuando se abre la válvula de escape, momento en el cual los gases que están en el cilindro se desalojan a una velocidad de (600 – 700) m/s produciendo un gran ruido al cambio de temperatura. Expulsándose del cilindro del motor del (60 – 70) % de los gases quemados, disminuyendo la presión en el mismo, los gases quemados siguen expulsándose, pero a una velocidad de (200 – 250) m/s. Este ciclo termina cuando la válvula de escape se cierra. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982, pág. 162)

Temperatura al final de la expansión (Tb)

Está determinada por la cantidad de temperatura que se detecta en el PMI al final de este ciclo, Ecuación (26). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 157)

$$T_b = T_z * \frac{1}{\epsilon^{n_2-1}} \quad (26)$$

Dónde:

Tz= Temperatura de combustión

n2= 1.25, Grado de expansión

$$T_b = 2341.652 * \frac{1}{9.8^{1.25-1}}$$

$$T_b = 1323.48 \text{ °K}$$

Presión al final de la expansión (Pb)

(Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 159)

$$P_b = \frac{P_z}{\epsilon^{n_2}} \quad (27)$$

Dónde:

Pb= Presión al final de la expansión

Pz= Presión de combustión

ϵ = Relación de compresión

n2= 1.25, Grado de expansión

$$P_b = \frac{6.24}{9.8^{1.25}}$$

$$P_b = 0.36 \text{ MPa}$$

Presión media del ciclo potencia y rendimiento económico de un motor.**Presión media indicada de un ciclo****Motor encendido por chispa ($P_{i(an)}$)**

La magnitud es la presión manométrica convencional de acción constante con la cual el trabajo realizado por los gases durante una carrera del émbolo es igual al trabajo indicado correspondiente al ciclo. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 169)

De donde:

$$P_{i(an)} = P_a \frac{\varepsilon^{n_1}}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \left(\frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) \right) - \left(\frac{1}{n_1 - 1} \right) \left(1 - \left(\frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right) \right] \quad (28)$$

$$P_{i(an)} = 0.99 \approx 1.0 \text{ MPa, (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 169)}$$

Determinación en la presión indicada por el diagrama redondeado

La desviación de los valores de PI, con respecto a los cálculos se evalúa a través del coeficiente de redondeamiento. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 169)

Presión media indicada del ciclo real (P_i)

Es la presión manométrica convencional de acción constante con la cual el trabajo realizado por los gases durante una carrera del pistón, es igual al trabajo indicado correspondiente del ciclo. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 169)

$$P_i = \varphi_1 * P_{i(an)} \quad (29)$$

Dónde:

$\varphi_1 = 0.97$, Coeficiente de redondeamiento, (desviación de ciclo real respecto al teórico en motores a gasolina). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

$$P_i = 0.97 * 1.0 = 0.97 \text{ MPa}$$

Potencia indicada de un motor (N_i)

La potencia indicada de un motor está determinada por la presión media del ciclo por la cilindrada del motor, se aplica en las Ecuaciones (30), (35) y (36). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 169)

$$N_i = \frac{P_i * V_h * n}{30\tau}, \quad (\text{Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 171}) \quad (30)$$

Dónde:

P_i = La presión media indicada del ciclo

V_h = Volumen del cilindro unitario

n = 5800 RPM a 121 HP, Frecuencia de rotación del cigüeñal, se aplica en las Ecuaciones (30) y (34)

τ = 4, Número de tiempos del motor

Siendo:

Volumen del cilindro unitario:

$$V_h = D^2 * \pi * \frac{S}{4} \quad (\text{Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 176}) \quad (31)$$

Dónde:

V_h = Volumen del cilindro unitario, se aplica en las Ecuaciones (30), (32) y (35)

D = 8.1 cm, diámetro del pistón

S = 8.6 cm, carrera del Pistón

$$V_h = 8.1^2 * \pi * 8.6$$

$$V_h = 443.158 \text{ cm}^3$$

Entonces:

$$N_i = \frac{0.97 * 1798 * 5800}{30 * 4}$$

$$N_i = 84.3 \text{ Kw}$$

Trabajo indicado (Li)

El trabajo indicado por un cilindro en un ciclo, Ecuación (32). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 178)

$$L_i = P_i * V_h \tag{32}$$

Dónde:

P_i = La presión media indicada del ciclo

V_h = Volumen del cilindro unitario

$$L_i = 0.97 * 443.158$$

$$L_i = 42.98 \text{ Nm}$$

Presión media correspondiente a pérdidas mecánicas (Pm)

Pérdidas mecánicas, se aplica en las Ecuaciones (33) y (34). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 179)

$$P_m = 0.04 + 0.0135 * V_p \tag{33}$$

Dónde:

V_p = 13.5 m/s, velocidad media del pistón. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 179)

$$P_m = 0.04 + 0.0135 * 13.5$$

$$P_m = 0.222 \text{ MPa}$$

Presión media efectiva (P_e)

La presión media efectiva está definida por la Ecuación (34). (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982, pág. 176)

$$P_e = P_i - P_m \quad (34)$$

$$P_e = 0.97 - 0.222$$

$$P_e = 0.748 \text{ Mpa}$$

Perdidas mecánicas en el motor (N_m)

Parte del trabajo indicado se gasta en vencer el rozamiento en las piezas móviles, en el intercambio de gases y en el accionamiento de los mecanismos auxiliares, Ecuación (35).

(Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

$$N_m = \frac{P_m * i * V_h * n}{30\tau} \quad (35)$$

Dónde:

P_m = Pérdida mecánica

i = 4, número de cilindros

V_h = Volumen del cilindro unitario

n = Frecuencia de rotación del cigueñal ($n = 5800 \text{ RPM}$ a 121 HP)

τ = Número de tiempos del motor

$$N_m = \frac{0.222 * 4 * 443.158 * 5800}{30 * 4}$$

$$N_m = 2.347 \text{ Kw}$$

Potencia efectiva (N_e)

La potencia que puede obtenerse en el cigüeñal del motor y se aprovecha para accionar cualquier máquina, Ecuación (36) (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

$$N_e = N_i - N_m \quad (36)$$

Dónde:

N_i = Potencia indicada del motor

N_m = Pérdidas mecánicas del motor

$$N_e = 84.3 - 2.260$$

$$N_e = 82.04 \text{ Kw}$$

$$N_e = 110 \text{ HP}$$

Rendimiento mecánico (η_m)

La potencia indicada correspondiente a las pérdidas mecánicas se determina por el rendimiento mecánico, Ecuación (37). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 177)

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (37)$$

Dónde:

N_i = Potencia indicada de un motor

N_e = Potencia efectiva

$$\eta_m = \frac{83.077 \text{ Kw}}{81.423 \text{ Kw}}$$

$$\eta_m = 1$$

Variación del rendimiento mecánico en función de la carga

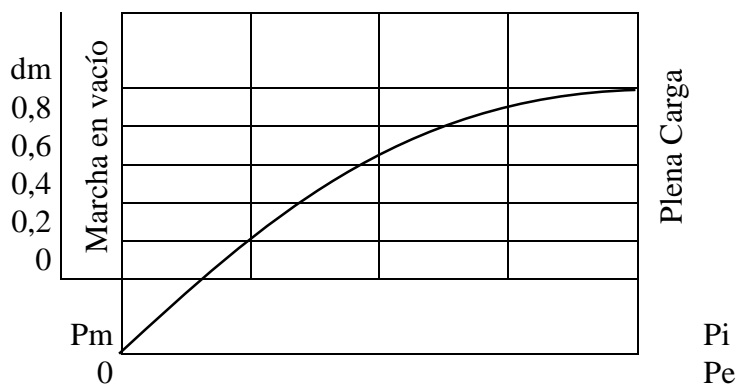


Figura 13. Variación del rendimiento mecánico en función de la carga.

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Presión de las pérdidas mecánicas

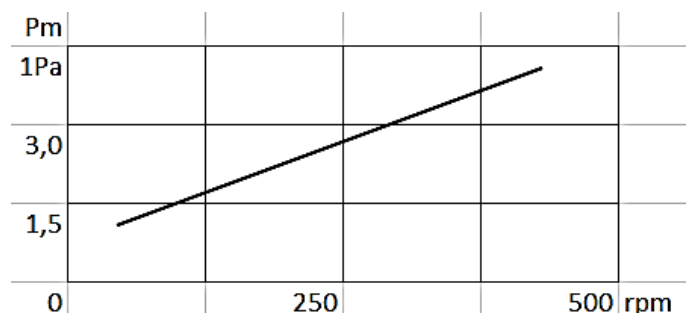


Figura 14. Relación entre las pérdidas mecánicas Pm y la velocidad media del pistón Vp.

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Economía y rendimiento de un motor

Una de las características fundamentales en la calidad de un motor es el consumo de combustible o la economía que proporciona el mismo. (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Gasto específico indicado de combustible (gi)

El gasto específico indicado de combustible, Ecuación (38). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 174)

$$g_i = \frac{3600 \cdot \eta_v \cdot \rho_o}{P_i \cdot \alpha \cdot l_o} \quad (38)$$

Dónde:

η_v = Coeficiente de llenado

ρ_o = Densidad de la carga de Admisión (kg/m³)

P_i = Presión media indicada del ciclo real

α = Coeficiente de exceso de aire

l_o = Cantidad teórica de aire necesaria para la combustión de un kg.

$$g_i = \frac{3600 \cdot 0.69 \cdot 1.209}{0.97 \cdot 0.9 \cdot 14.956}$$

$$g_i = 230.01 \frac{\text{g}}{\text{Kwh}}$$

Gasto de combustible (ge)

El gasto de combustible (ge), Ecuación (39). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 179)

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} \quad (39)$$

Dónde:

g_i = Gasto específico indicado de combustible

η_m = Rendimiento mecánico

$$g_e = \frac{230.01}{1}$$

$$g_e = 230.01 \frac{\text{g}}{\text{Kwh}}$$

El rendimiento indicado (η_i)

Este es menor que el rendimiento térmico a causa de las pérdidas adicionales debidas a la imperfección del ciclo, Ecuación (40). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 179)

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i * H_u} \quad (40)$$

Dónde:

g_i = Gasto específico indicado de combustible

$H_u = 44$, Poder calorífico inferior, se aplica en las Ecuaciones (40) y (41). (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982, pág. 60)

$$\eta_i = \frac{3600}{230.01 * 44}$$

$$\eta_i = 0.36$$

Rendimiento efectivo (η_e)

La parte del calor que se transforma en trabajo efectivo se aprecia por el rendimiento efectivo. Si H_u se expresa en MJ/Kg y g_e en g/Kwh, Ecuación (41). (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 179)

$$\eta_e = \frac{3600}{Hu * g_e} \quad (41)$$

$$\eta_e = \frac{3600}{44 * 230.01}$$

$$\eta_e = 0.36$$

También se puede calcular por la expresión

$$\eta_e = \eta_i * \eta_m \quad (42)$$

Donde;

η_i = Rendimiento indicado.

η_m = Rendimiento Mecánico.

$$\eta_e = 0.36 * 1$$

$$\eta_e = 0.36$$

Rendimiento efectivo máximo y consumos específicos

Tabla 9

Rendimiento efectivo máximo y consumos específicos (referidos a gasolina y gasoil) de distintos tipo de motor.

Motor MEP		η_e	g_{ef}	Motor MEC		η_e	g_{ef}
		(%)	(g/kWh)			(%)	(g/kWh)
	Motocicletas	32	260	Automóvil (IDI)		35	240
4 T	Automóvil	35	240	(DI sobrealimentado)		44	190
	2T pequeño			Industrial/		47	180
2 T	tamaño	25	335	Vehículo pesado			
				2T gran tamaño		55	150

Nota: (MEP o motor encendido provocado) (MEC o motor encendido por compresión) (Payri & Desantes, Motores de combustión interna alternativos, 2011, pág. 62)

Valores orientativos de presión media efectiva máxima

Tabla 10

Valores orientativos de presión media efectiva máxima de distintos tipos de motores

Motor MEP		pme (bar)	Motor MEC	pme (bar)
	Competición	16	Automóvil (IDI)	12
4 T	Atmosféricos	13	Automóvil (DI sobrealimentado)	23
	Sobrealimentados	17	Industrial / Vehículo pesado	23
2 T	2T pequeño tamaño	12	2T gran tamaño (sobrealimentado)	20

Nota: Valores orientativos de presión media efectiva máxima de distintos tipos de motores (Payri & Desantes, Motores de combustión interna alternativos, 2011, pág. 63)

Cálculos del pistón

Tabla 11

Datos para cálculos del pistón.

Parámetros	Datos	Unidades
Diámetro del cilindro (D)	81.6	mm
Carrera del Pistón (S)	86	mm
Área del pistón (Fp)	$7.8 \cdot 10^{-3}$	m ²
Gasto del combustible (ge)	0.323.143	$\frac{kh}{Kwh}$
Presión en la combustión (Pz)	3.58	MPa
Cantidad total de calor introducido (Qo)	44.000	Kj/Kg
Espesor de los álabes (Ó)	7.307	mm
Presión de combustión (Nei) (de un cilindro)	39.5	Kw
Diámetro (d1)	80.384	mm

Tensión de la cabeza del pistón (σ_{ri})

$$\sigma_{ri} = 3 * r_i^2 * \frac{p_z}{4 * O^2} \quad (43)$$

Dónde:

$$\sigma_{ri} \text{ varía de } (50-1500) \frac{N}{mm^2}$$

ri = radio interno

Pz = Presión de combustión

Ó = Espesor de los álabes

$$\sigma_{ri} = 3 * 40.192^2 * \frac{6.18}{4 * 7.307^2}$$

$$\sigma_{ri} = 140.23 \frac{N}{mm^2}$$

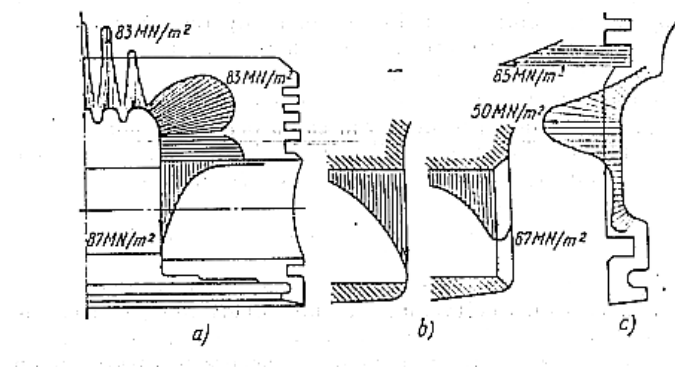


Figura 15. Concentraciones de tensiones en el pistón.

Fuente: (Jovaj M. , *Motores del automóvil*, 1982, pág. 471)

Esfuerzo específico del combustible sobre la cabeza del pistón. (q_p)

$$q_p = \frac{Q_p \cdot N_{ei} \cdot g_e \cdot Q_o}{F_p \cdot 3600} \quad (44)$$

Dónde:

Q_p = Cantidad total de calor introducido

N_{ei} = Presión de combustión

g_e = Gasto del combustible

Q_o = Cantidad de calor inicial

$$q_p = \frac{(39.5) \cdot (0.1371) \cdot (44000) \cdot (0.1)}{7.08 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 (3600)}$$

$$q_p = 934.87 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^2}$$

Altura de la parte cilíndrica de la cabeza del pistón al aro de fuego (h)

$$h = \acute{O} + \left(\frac{D}{2}\right) - r_i \quad (45)$$

Dónde:

\acute{O} = Espesor de los álabes

D = Diámetro del cilindro

r_i = Radio interno

$$h = 7.307 + \frac{81.6}{2} - 38$$

$$h = 10.107 \text{ mm}$$

Coefficiente que caracteriza la unión de la superficie del extremo de la cabeza del pistón (k)

$$k = \left(\frac{\acute{o}}{h}\right) \left[\frac{\left(\frac{D^2}{4} + ri^2\right)}{\left(\frac{D^2}{4} - ri\right)} + \mu \right] \quad (46)$$

Dónde:

Ó= Espesor de los álabes

h= Altura de la parte cilíndrica de la cabeza del pistón al aro de fuego

D= Diámetro del cilindro

ri= Radio interno

$$k = \left(\frac{7.307}{10.107}\right) * \left[\frac{\left(\frac{81.6^2}{4} + 38^2\right)}{\left(\frac{81.6^2}{4} - 38\right)} + 0.26 \right]$$

$$k = 2.89$$

Fuerza máxima de presión del pistón ($P_{z_{max}}$)

$$P_{z_{max}} = P_z * F_p \quad (47)$$

Dónde:

P_z = Presión de combustión

F_p = Área del pistón

$$P_{z_{max}} = 6.18(7.08 * 10^{-3})$$

$$P_{z_{max}} = 0.0437$$

Velocidad angular en ralentí (W)

$$W = \frac{\pi n}{30} \quad (48)$$

Dónde:

n = Frecuencia de rotación del cigueñal

$$W = \frac{3.14 * (4000)}{30}$$

$$W = 418.87$$

Definición de la presión entre el bulón y las orejas del pistón qo se toman las siguientes medidas de construcción del pistón

Diámetro exterior del bulón (db)

$$db = 0.29 * D \quad (49)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$db = 0.29 * D$$

$$db = 0.29 * 81.6$$

$$db = 23.664 \text{ mm}$$

Distancia entre las superficies internas de las orejas del pistón (b)

$$b = 0.37 * D \quad (50)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$b = 0.37 * 81.6$$

$$b = 30.192 \text{ mm}$$

Longitud de trabajo de las orejas (Lo)

$$Lo = \frac{(lp-b)}{2} \quad (51)$$

Dónde:

b= Distancia entre las superficies internas de las orejas del pistón

$$Lo = \frac{(83.81 - 30.192)}{2}$$

$$Lo = 26.809 \text{ mm}$$

Longitud del bulón (Lb)

$$Lb = 0.8(D) \quad (52)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$Lb = 0.8(81.6)$$

$$Lb = 65.28 \text{ mm}$$

Holgura entre la pared del cilindro y la cabeza del pistón en estado frío (Δc)

$$\Delta c = 0.008 D \quad (53)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$\Delta c = 0.008(81.6)$$

$$\Delta c = 0.65 \text{ mm}$$

Holgura entre la pared del cilindro y la falda del pistón (Δf)

$$\Delta f = 0.002 D \quad (54)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$\Delta f = 0.002(81.6)$$

$$\Delta f = 0.1632 \text{ mm}$$

Diámetro de la cabeza y de la falda del pistón (D_c)

$$D_c = D - \Delta c \quad (55)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

Δc = Holgura entre la pared del cilindro y la cabeza del pistón en estado frío

$$D_c = 81.6 - 0.65$$

$$D_c = 80.95 \text{ mm}$$

Diámetro de la cabeza y de la falda del pistón (Df)

$$D_f = D - \Delta f \quad (56)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

Δf = Holgura entre la pared del cilindro y la falda del pistón

$$D_f = 81.6 - 0.1632$$

$$D_f = 81.4368 \text{ mm}$$

Diámetro interior del bulón (di)

$$d_i = 0.7(d_b) \quad (57)$$

Dónde:

d_b = Diámetro exterior del bulón

$$d_i = 0.7(23.664)$$

$$d_i = 16.5648 \text{ mm}$$

Longitud de los casquillos de la biela (Lp.b)

$$L_{p.b} = 0.3D \quad (58)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$L_{p.b} = 0.3(81.6)$$

$$L_{p.b} = 24.48 \text{ mm}$$

Longitud del bulón entre la oreja del pistón (Lt)

$$L_t = L_b - \frac{L_{b,b}}{2} \quad (59)$$

Dónde:

b= Distancia entre las superficies internas de las orejas del pistón

L_b = Longitud del bulón

$$L_t = \left(65.28 - \frac{24.48}{2} \right)$$

$$L_t = 53.04 \text{ mm}$$

Relación entre los diámetros (S)

$$S = \frac{d}{db} \quad (60)$$

Dónde:

db= Diámetro exterior del bulón

$$S = \frac{16.5648}{23.664}$$

$$S = 0.7$$

Cálculo de los segmentos (t)

$$t = \frac{D}{25} \quad (61)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$t = \frac{81.6}{25}$$

$$t = 3.264 \text{ m}$$

Bielas

Análisis de construcción

La biela debe ser lo suficientemente resistente, rígida y tener poca masa para evitar la inercia, su forma estructural depende del tipo de motor. (Jovaj M., Motores del automóvil, 1982)

Cálculo general de las válvulas

$V_{VA} = (60-90) \text{ m/s}$ 67 admisión – velocidad de la válvula de admisión

$V_{VE} = (80-120)$ m/s escape – velocidad de la válvula de escape

$$f_{VA45^\circ} = \pi h (0,702 d_2 + 0,53 h) \quad (62)$$

Válvula de admisión

$D = 81.6$ mm.

Diámetro menor de la superficie de la válvula (d_2)

$$d_2 = 0.42 * D \quad (63)$$

Dónde:

D = Diámetro del cilindro

$$d_2 = 0.42 * 81.6$$

$$d_2 = 34.27 \text{ mm}$$

Diámetro superior de la superficie de la válvula (d_1)

$$d_1 = 0.42 * d_2 \quad (64)$$

Dónde:

d_2 = Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$d_1 = 0.42 * 34.27$$

$$d_1 = 38.38 \text{ mm}$$

Altura máxima a la que se eleva la válvula (h)

$$h = \frac{d_1}{4} \quad (65)$$

Dónde:

d_1 = Diámetro superior de la superficie de la válvula

$$h = \frac{38.38}{4}$$

$$h = 9.59 \text{ mm}$$

Diámetro externo (De)

$$De = 0.72 * d2 \quad (66)$$

Dónde:

d2= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$De = 0.72 * 34.27$$

$$De = 24.67 \text{ mm}$$

Diámetro externo (De)

$$Di = 0.5 * d2 \quad (67)$$

Dónde:

d2= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$Di = 0.5 * 34.27$$

$$Di = 17.13 \text{ mm}$$

Válvula de escape

Diámetro menor de la superficie de la válvula (d2)

$$d_2 = 0.33 * D \quad (68)$$

Dónde:

D= Diámetro del cilindro

$$d_2 = 0.33 * 81.6$$

$$d_2 = 26.92 \text{ mm}$$

Diámetro superior de la superficie de la válvula (d1)

$$d_1 = 1.12 * d_2 \quad (69)$$

Dónde:

d₂= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$d_1 = 1.12 * 26.92$$

$$d_1 = 30.150 \text{ mm}$$

Altura máxima a la que se eleva la válvula (h)

$$h = \frac{d_1}{4} \quad (70)$$

Dónde:

d₁= Diámetro superior de la superficie de la válvula

$$h = \frac{30.150}{4}$$

$$h = 7.537 \text{ mm}$$

Diámetro externo (De)

$$De = 0.72 * d_2 \quad (71)$$

Dónde:

d₂= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$De = 0.72 * 26.92$$

$$De = 19.382 \text{ mm}$$

Diámetro Interno (Di)

$$Di = 0.5 * d2 \tag{72}$$

Dónde:

d2= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

$$Di = 0.5 * 26.92$$

$$Di = 13.46 \text{ mm}$$

Área de la sección de paso de la válvula de admisión es (f_{v45°)

$$f_{v45^\circ} = (3, 14) * h * [0,702 (d2) + 0, 53 (h)] \tag{73}$$

Dónde:

d2= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

h=Altura máxima a la que se eleva la válvula

$$f_{v45^\circ} = (3, 14) (9.59) [0,702 (34.27) + 0, 53 (9.59)]$$

$$f_{v45^\circ} = 886.578 \text{ mm}^2$$

Área de la sección de paso de la válvula de escape es (f_{v45°)

$$f_{v45^\circ} = (3, 14) * h * [0,702 (d2) + 0, 53 (h)] \tag{74}$$

Dónde:

d2= Diámetro inferior de la superficie de la válvula

h=Altura máxima a la que se eleva la válvula

$$f_{v45^\circ} = (3, 14) (7.537) [0,702 (26.92) + 0, 53 (7.537)]$$

$$f_{v45^\circ} = 663.887 \text{ mm}^2$$

Cilindrada de un vehículo

La cilindrada del motor de un cilindro es el volumen que queda comprendido entre el PMS y el PMI del recorrido del pistón, para motores de más de un cilindro, el total será el de uno de ellos multiplicado por el número de cilindros ya que todos son de las mismas dimensiones. (ingelibreblog.wordpress.com, 2016)

Cilindrada Total (VH)

$$VH = \frac{D^2 * \pi * S * i}{4} \quad (75)$$

$$VH = \frac{81.6^2 * \pi * 8.60 * 4}{4}$$

$$VH = 1.798 \text{ cm}^3$$

Volumen Muerto (Vc)

$$Vc = \frac{Vh}{E-1} \quad (76)$$

$$Vc = \frac{44.75}{9.8 - 1}$$

$$Vc = 51.11 \text{ cm}^3$$

Volumen Total del Cilindro

$$Va = Vh + Vc \quad (77)$$

$$Va = 443.158 + 51.11$$

$$Va = 500.85 \text{ cm}^3$$

Relación de Compresión (ξ)

$$\xi = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (78)$$

$$\xi = \frac{443.158 + 51.11}{51.11}$$

$$\xi = 9.68$$

Comparación de datos

Tabla 12

Comparación de datos del vehículo y los datos calculados

Motor	Limited 1.8 MT	Motor Calculado
Desplazamiento (c.c.)	1.799	1,798,99
Potencia (HP)	121 HP	110 HP
Relación de Compresión (ξ)	9.8	9.68

Nota: Datos obtenidos del manual del fabricante, los mismos sirvieron para realizar los cálculos comparativos (globalbuypower, 2015)

Resultados

Cálculos Proceso de Admisión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)

Para la admisión en el ciclo real, es necesario que expulse todos los residuos del ciclo de combustión para que pueda introducir una nueva carga fresca de mezcla de aire y gasolina.

En la tabla 13 se puede apreciar que los valores que se calcularon se encuentran en el rango teórico indicado. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 13

Valores calculados en el punto de Admisión para el motor Holden GM Family E-TEC II

Parámetros	Datos Teóricos	Datos Calculados
Presión admisión (Pa)	(0.08 - 0.09) MPa	0.088 Mpa
Coeficiente de Gases Residuales (γ_r)	(0.06 - 0.1)	0.076 m/s
Temp. de admisión (Ta)	(320 - 400) °K	347.99 °K
Coef. de llenado (η_v)	(0.75 - 0.85)	0.69

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982, pág. 99)

Cálculos Proceso de Compresión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)

Para la compresión en el ciclo real, la temperatura y presión se elevan como se puede identificar en la tabla 14, los demás datos calculados sirven de ayuda para realizar otros análisis en el punto de compresión del ciclo, los valores que se calcularon se encuentran en el rango teórico indicado. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 14

Valores calculados en el punto de Compresión para el motor Holden GM Family E-TEC II

Parámetros	Datos teóricos	Datos calculados
Presión al final de la compresión (Pc)	(0.9 – 1.5) MPa	1.92 MPa
Temp. de compresión (Tc)	(550 - 750) °K	773.56 °K

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Cálculos Proceso de Combustión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)

Para la compresión en el ciclo real, todo el trabajo mecánico se realiza por la energía térmica que se tiene de la combustión por su temperatura elevada al igual que su presión. Como se ve en la tabla 15 los datos calculados se encuentran en el rango teórico indicado. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 15

Valores calculados en el punto de Compresión para el motor Holden GM Family E-TEC II

Parámetros	Datos teóricos	Datos calculados
Temp. de compresión (Tz)	(2300 – 2400) °C	2341.651 °C
Presión de compresión (Pz)		6.24 Mpa
Coefficiente de grado de combustión (λ)		3.25

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Cálculos Proceso de Expansión teórico motor (Holden GM Family E-TEC II)

Para la expansión en el ciclo real, todo el trabajo mecánico se realiza por la energía térmica que se tiene de la combustión por su temperatura elevada al igual que su presión. Como se ve en la tabla 15 los datos calculados se encuentran en el rango teórico indicado. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 16

Valores calculados en el punto de Expansión para el motor Holden GM Family E-TEC II

Parámetros	Datos teóricos	Datos calculados
Temp. de expansión (Tb)	(1200 - 1500) °K	1323.48 °K
Presión de expansión (Pb)	(0.35 – 0.50) MPa	0.36 MPa

Fuente: (Jovaj M. , Motores del automóvil, 1982)

Diagrama Presión vs Volumen del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 16. Indica la gráfica de presión vs volumen, se encuentra el ciclo de funcionamiento del motor (admisión, compresión, explosión y escape), los cuales se encuentran representados en cada punto de la gráfica.

P1 empieza el primer tiempo (Admisión), en este punto no hay variación en la presión la cual está en $P_a = 0.088$ MPa.

P2 empieza el segundo tiempo (Compresión), en el cual la presión va aumenta por el incremento de presión de $P_c = 1.92$ Mpa.

P3 empieza el tercer tiempo (Explosión), con la temperatura de la presión $P_z = 6.24$ MPa en la cual.

P4 está el cuarto tiempo (Escape), con la presión de $P_b = 0.36$ Mpa finalizando el ciclo de combustión Otto y eliminando el resto de gases comprimidos del cilindro.

Una vez que haya completado las dos vueltas del cigüeñal se repite el ciclo de funcionamiento del motor.

Los datos fueron obtenidos realizando los cálculos del vehículo Chevrolet Optra 1.8 cc.

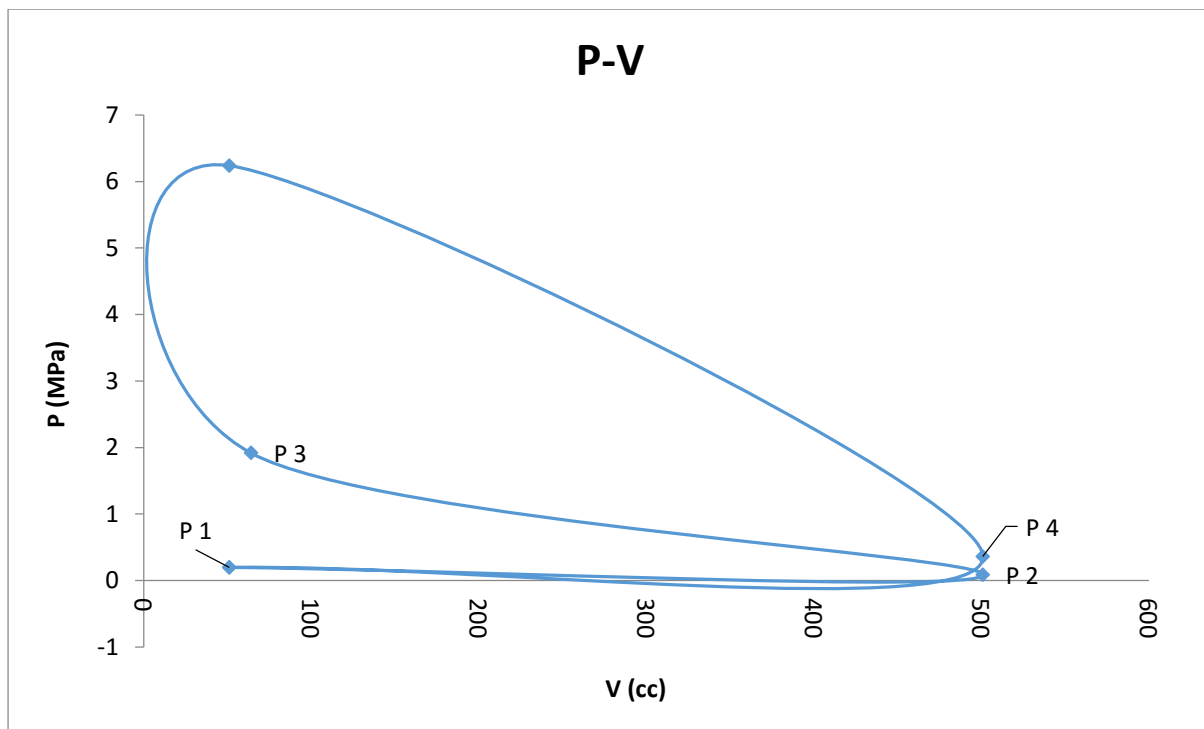


Figura 16. Gráfica Presión vs Volumen

Fórmulas y resultados

Tabla 17

Fórmulas y resultados del diagrama Presión vs Volumen.

Fórmula Volumen	Volumen (cc)
$V_c = \frac{V_h}{E - 1}$	51.11
$V_a = V_h - V_c$	500.85
$V = S_e * A * V_c$	53.21
$V_c = \frac{V_h}{E - 1}$	51.11
$V_a = V_h - V_c$	500.85
$V_c = \frac{V_h}{E - 1}$	51.11

Nota: La tabla 17 indica los volúmenes calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 18

Fórmulas y resultados del diagrama Presión vs Volumen.

Fórmula Presión	Presión (MPa)
Datos de Fabricante	0.07
$P_a = p_o - (\beta^2 + \xi) * \left(\frac{\omega_{ad}^2}{2}\right) * \rho_o * 10^6$	0.088
$P_c = P_a * \varepsilon^{n1}$	1.92
$P_z = U_r * \frac{T_z}{T_c} * P_c$	6.24
$P_b = \frac{P_z}{E^{n2}}$	0.36
Datos de Fabricante	0.07

Nota: La tabla 18 indica las presiones calculadas dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Presión vs Ángulo del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 17. Indica la gráfica de presión vs ángulo de giro del cigüeñal, se encuentra el ciclo de funcionamiento del motor (admisión, compresión, explosión y escape), los cuales están representados en cada punto de la gráfica. El P1 (Tiempo de Admisión) está desde una presión de 0.088 MPa.

El P2 tiene una presión de 3.180 MPa en este punto la presión es mayor.

El P3 la presión va disminuyendo hasta 0,0369 MPa debido a que la válvula de escape libera los gases comprimidos dentro del cilindro.

El P4 la presión regresa a 0.07 MPa completando los cuatro tiempos del ciclo de funcionamiento del motor.

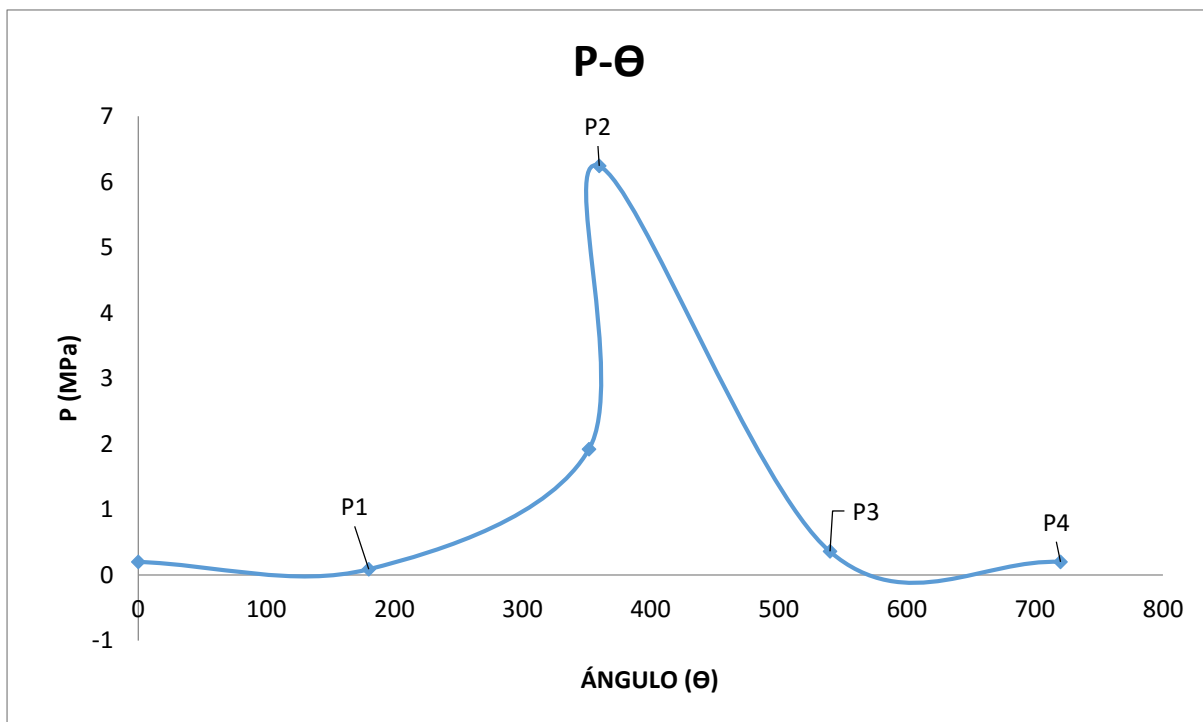


Figura 17. Grafica de Presión vs Ángulo

Fórmulas y resultados

Tabla 19

Fórmulas y resultados del diagrama Presión.

Fórmula Presión	Presión (MPa)
Datos de Fabricante	0.07
$P_a = p_o - (\beta^2 + \xi) * \left(\frac{\omega_{ad}^2}{2}\right) * \rho_o * 10^6$	0.088
$P_c = P_a * \varepsilon^{n1}$	1.657
$P_z = U_r * \frac{T_z}{T_c} * P_c$	3.180
$P_b = \frac{P_z}{E^{n2}}$	0.369
Datos de Fabricante	0.07

Nota: La tabla 19 indica las presiones calculadas dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 20

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 20 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Velocidad del émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 18. Indica la gráfica de velocidad del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal, con velocidades positivas de 359,24 cm/s y velocidades negativas de -360,58 cm/s. Estas velocidades se originan debido al movimiento del émbolo en el PMS y el PMI en el ciclo de combustión.

La velocidad del embolo se considera positiva cuando esta parte de los puntos muertos y es negativa, cuando se acerca después de alcanzar la máxima velocidad.

En los puntos muertos la velocidad es de cero porque en estos puntos el pistón cambia de sentido.

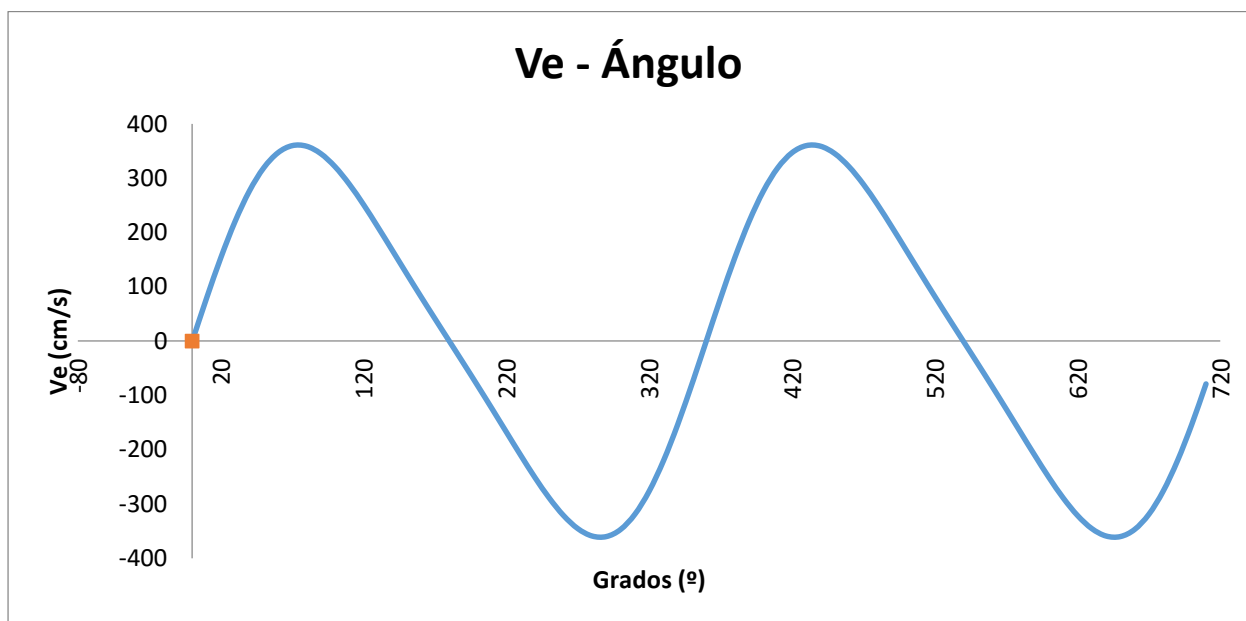


Figura 18. Grafica de Velocidad de émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal

Fórmulas y resultados del diagrama

Tabla 21

Fórmulas y resultados del diagrama Velocidad del émbolo vs Ángulo de giro de cigüeñal.

Fórmula	Velocidad del émbolo
	(Ve)
	(cm/s)
	0
	359,24
$Ve = R * W * \left[\text{sen} \left(\frac{\pi * \theta}{180} \right) + \frac{\lambda}{2} * \text{sen} \left(\frac{\pi * 2\theta}{180} \right) \right]$	0
	-360,28
	0
	345,58
	0
	-345,58
	0

Nota: La tabla 21 indica las velocidades del émbolo calculadas dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 22

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 22 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Aceleración del émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 19. Indica la gráfica de la aceleración del émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal, la aceleración es positiva cuando aumenta la velocidad lineal desde los puntos muertos hasta la velocidad máxima y es negativa cuando la velocidad disminuye.

La máxima aceleración se encuentra en los puntos muertos, tenemos una aceleración máxima del émbolo $39409,31 \text{ cm/s}^2$. La aceleración máxima va a estar en la parte positiva de la gráfica cuando este en el PMI, la parte negativa de la gráfica la aceleración máxima esta con 40° o 50° grados antes del PMS y después del mismo con una aceleración de $-21211,68 \text{ cm/s}^2$.

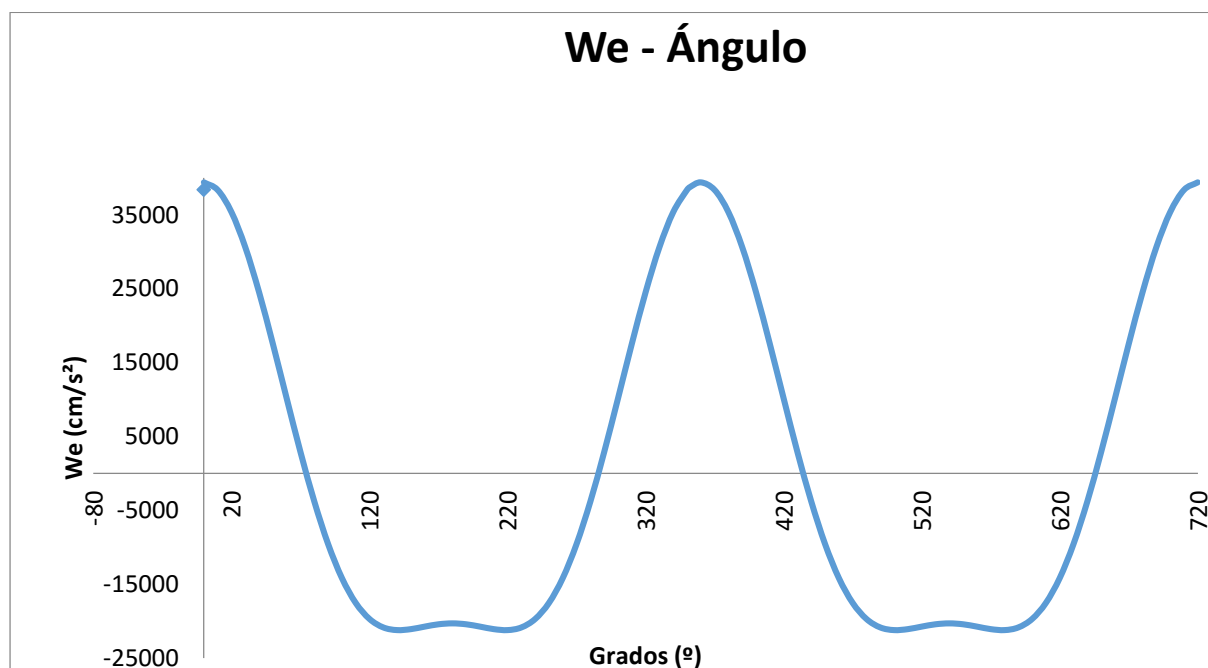


Figura 19. Aceleración del émbolo vs Angulo de giro del cigüeñal.

Fórmulas y resultados del diagrama

Tabla 23

Fórmulas y resultados del diagrama Aceleración del émbolo vs Ángulo de giro de cigüeñal.

Fórmula	Aceleración del émbolo (We) (cm/s)
	39409,31
	-3793,25
$We = R * W^2 * \left[\cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right) + \lambda * \cos\left(\frac{\pi * 2\theta}{180}\right) \right]$	-21211,68
	-20301,77
	-21211,68
	39409,31
	17531,78
	-21211-68
	-20736,42
	-20849,77
	-9553,77
	39409,31

Nota: La tabla 23 indica las velocidades del émbolo calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 24

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 24 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Desplazamiento del Émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 20. Indica la gráfica del desplazamiento del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal, cada 360° está completa una vuelta, la cual empieza en el PMS hasta el PMI, y regresa desde el PMI hasta el PMS realizando los ciclos de Admisión y Compresión, cuando el émbolo repite el ciclo realiza los ciclos de Explosión y Escape completando la segunda vuelta en los 720° .

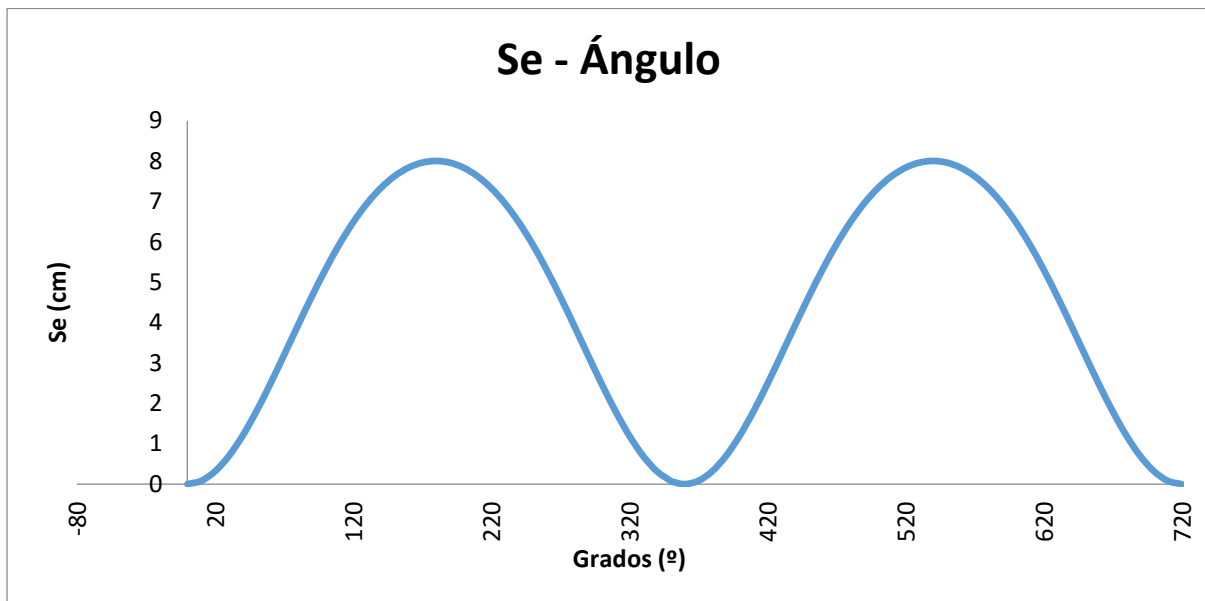


Figura 20. Desplazamiento del émbolo vs Ángulo de giro del cigüeñal

Tabla 25

Fórmulas y resultados del diagrama desplazamiento del émbolo vs Ángulo de giro de cigüeñal.

Fórmula	Angulo del cigüeñal (Θ)	Desplazamiento del émbolo (Se) cm
$Se = R * \left[\left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \cos \left(\frac{\pi * \theta}{180} \right) - \frac{\lambda}{4} * \cos \left(\frac{\pi * \theta}{180} \right) \right]$	0	0,0
	180	8,0
	360	0,0
	540	8,0
	720	0,0

Nota: La tabla 25 indica las velocidades del émbolo y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 26

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 26 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Fuerza tangencial vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 21. Indica la gráfica de la fuerza tangencial vs ángulo de giro del cigüeñal, en los 420° está el mayor punto de elevación en la fuerza tangencial de 13390,45 el cual está dentro del ciclo de explosión, en los 300° tiene otro punto de movimiento de fuerza de 6501,96 el mismo que se desarrolla dentro del ciclo de compresión.

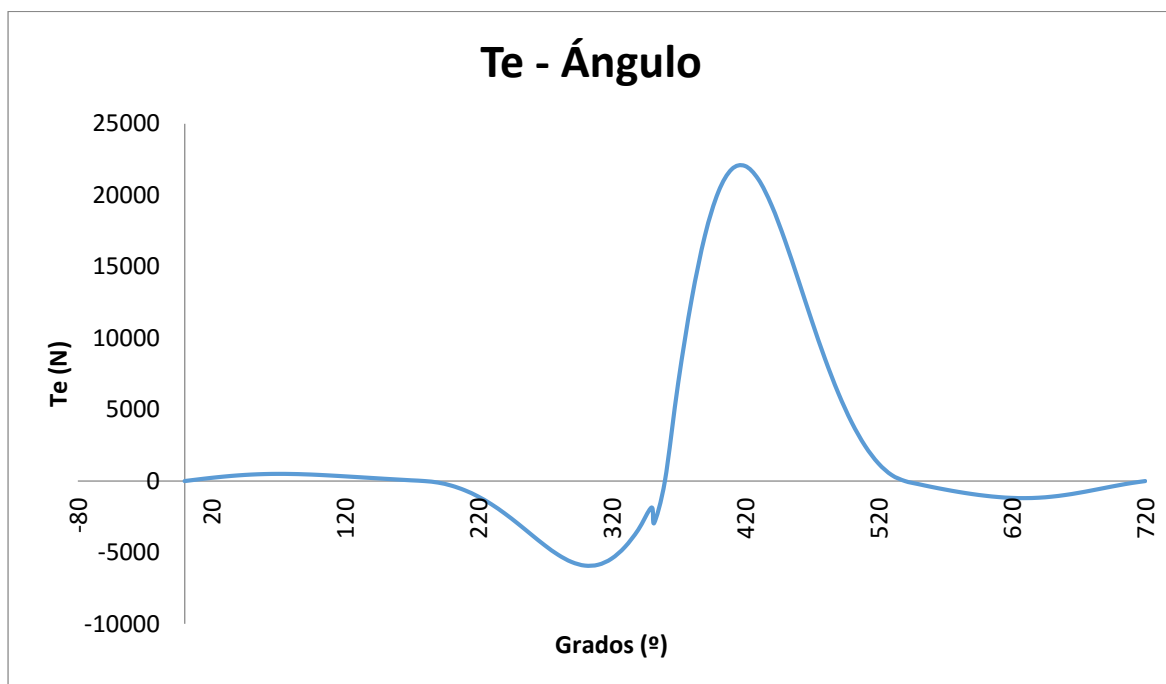


Figura 21. Fuerza Tangencial vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmulas y resultados del diagrama Fuerza

Tabla 27

Fórmulas y resultados del diagrama Fuerza tangencial vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmula	Angulo cigüeñal (θ)	Te
	0	0,0
	200	-348,96
	300	-6501,30
$Te = Fe * \frac{\text{sen} [\frac{\pi}{180} * (\theta + \beta_o)]}{\text{cos}[\frac{\pi}{180} * (\beta_o)]}$	360	0,0
	420	13390,45
	540	0,0
	620	-796,02
	720	0,0

Nota: La tabla 21 indica las presiones y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 28

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 28 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Fuerza de émbolo vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 22. Indica la gráfica de la fuerza del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal, en el punto 360° está la mayor fuerza 19324,87 N y debido a la compresión de la mezcla tiende a disminuir de nuevo hasta tener una fuerza de 538,65 N por la liberación de presión en la válvula de escape.

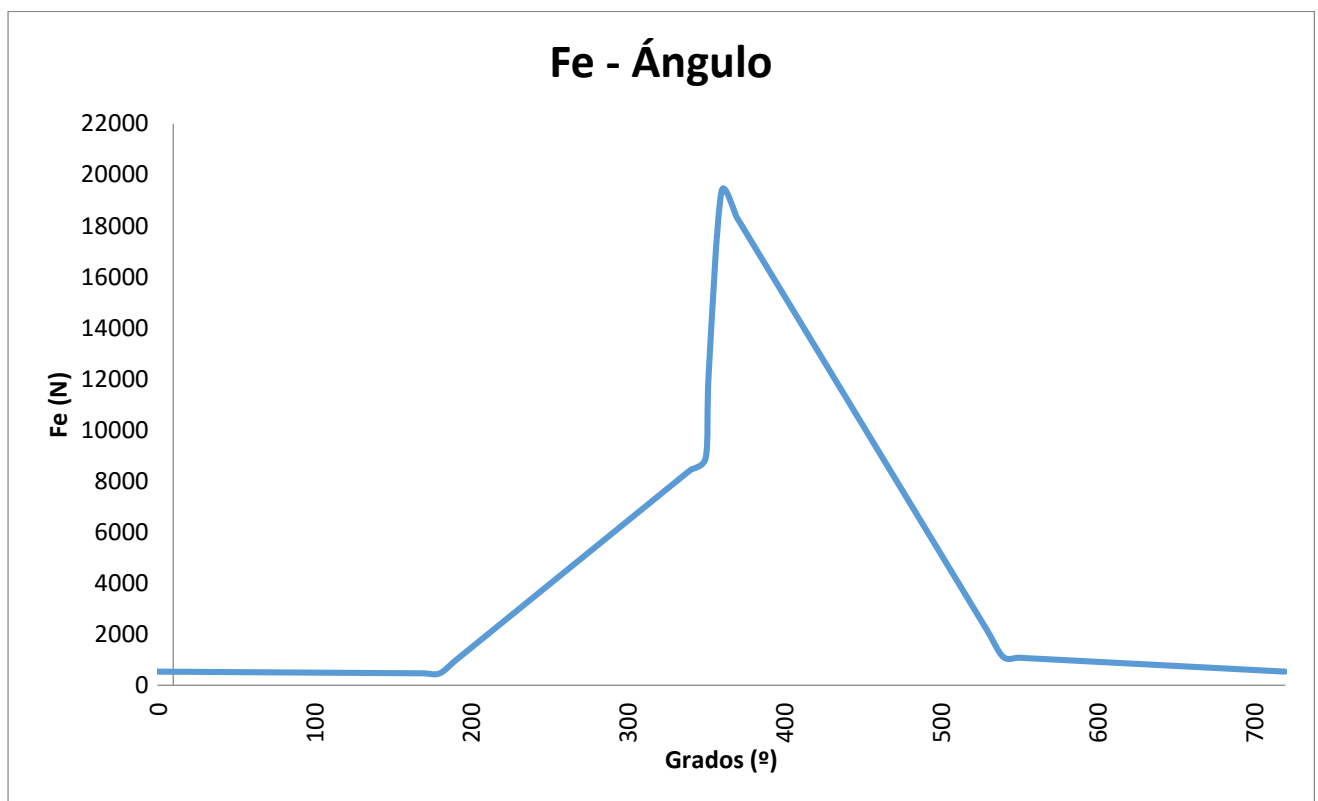


Figura 22. Fuerza del Émbolo vs Ángulo de giro del cigüeñal

Fórmulas y resultados del diagrama

Tabla 29

Fórmulas y resultados del diagrama Fuerza del émbolo vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmula	Fe (N)
$F_o = A * P_o$	538,65
$F_a = A * P_a$	468,30
$F_c = A * P_c$	8921,71
$F_z = A * P_z$	19324,87
$F_b = A * P_b$	1114,51

Nota: La tabla 29 indica las fuerzas del émbolo y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 30

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 30 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Fuerza normal vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 23. Indica la gráfica de la fuerza de la normal vs ángulo de giro del cigüeñal, en el punto 280° tiene una fuerza de $-1806,69$ N y una fuerza mayor de $3729,47$ N debido a la compresión de la mezcla y una fuerza final de 0 N debido a la liberación de presión en la válvula de escape.

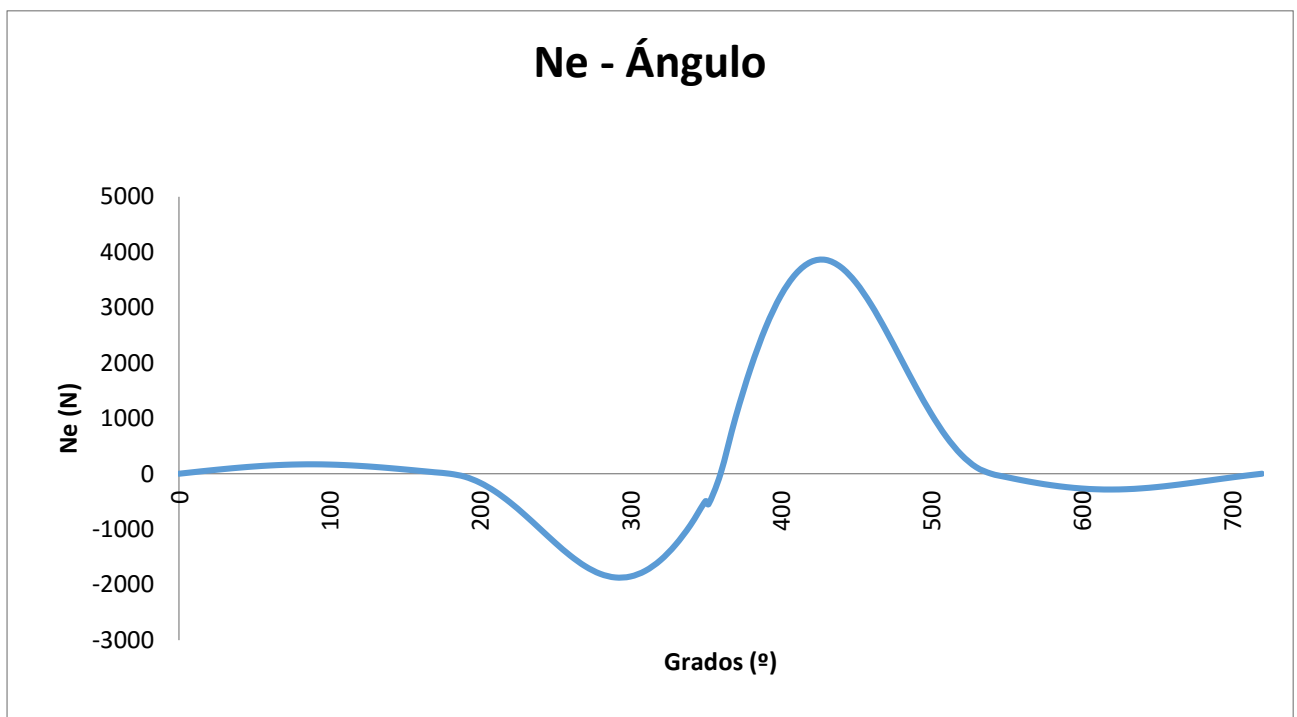


Figura 23. Fuerza de la normal vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmula y resultados

Tabla 31

Fórmula y resultados de la fuerza de la normal vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmula	Ángulo Cigüeñal (θ)	Ne (N)
	0	0,0
	130	123,35
	180	0,0
$Ne = Fe * \tan \left\{ \frac{180}{\pi} * \arcsen \left\{ \left[\lambda * \sen \left(\frac{\pi * \theta}{180} \right) \right] \right\} \right\}$	280	-1806,69
	360	0,0
	440	3729,47
	530	118,33
	720	0,0

Nota: La tabla 31 indica las fuerzas de la normal y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 32

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 32 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Fuerza de la biela vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 24. Indica la gráfica de la fuerza de la biela con sus fuerzas en cada ciclo de combustión del motor. La fuerza más elevada se realiza en el punto de combustión con una fuerza de 19324,87 N.

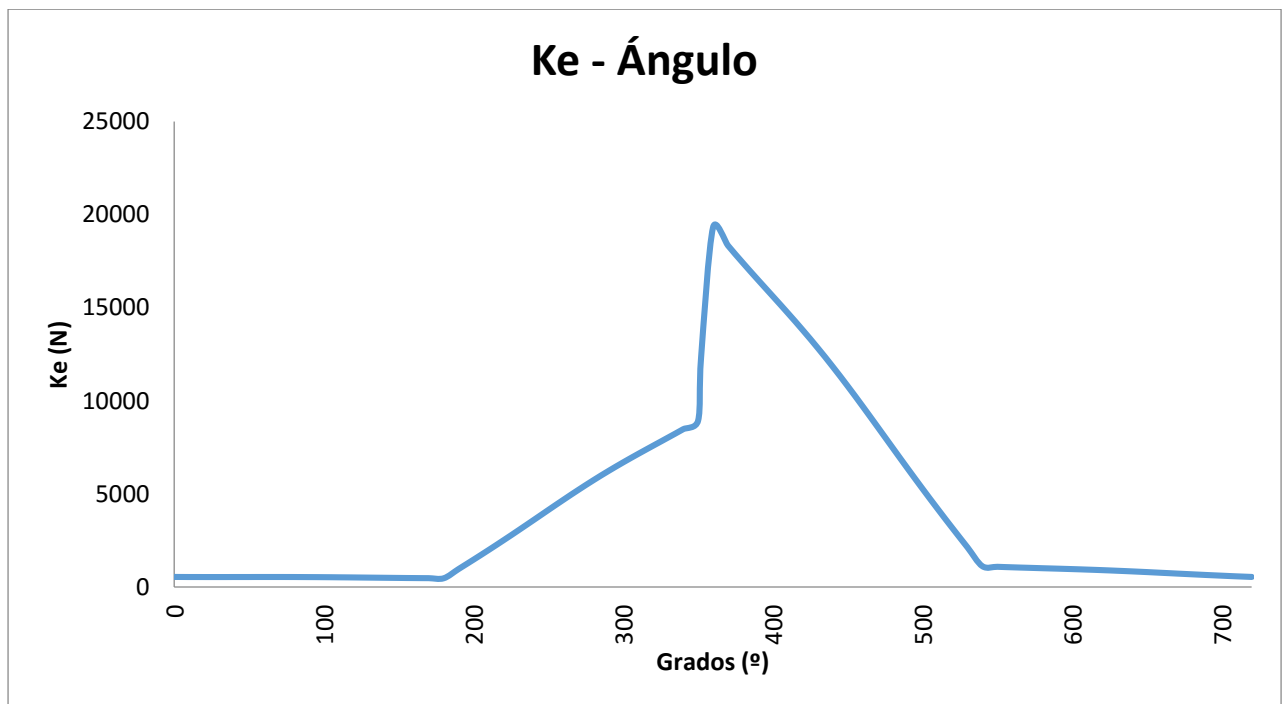


Figura 24. Fuerza de la Biela vs Ángulo de giro del Cigüeñal.

Fórmula y resultados

Tabla 33

Fórmula y resultados de la fuerza de la biela vs Ángulo.

Fórmula	Ángulo (θ)	Ke (N)
	0	538,65
$Ke = \frac{Fe}{\cos \left\{ \frac{180}{\pi} * \text{arsen} * \left[(\lambda) * \text{sen} \left(\frac{\pi + \theta}{180} \right) \right] \right\}}$	180	468,30
	350	8935,52
	360	19324,87
	540	1114,51
	720	538,65

Nota: La tabla 33 indica las fuerzas de la manivela y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 34

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 34 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Diagrama Fuerza de la manivela vs Ángulo de gira del cigüeñal del motor (Holden GM Family E-TEC II)

La Figura 25. Indica la gráfica de la fuerza de la manivela vs ángulo de giro del cigüeñal, La fuerza más elevada se realiza en el punto de combustión con una fuerza de 19324,87 N.

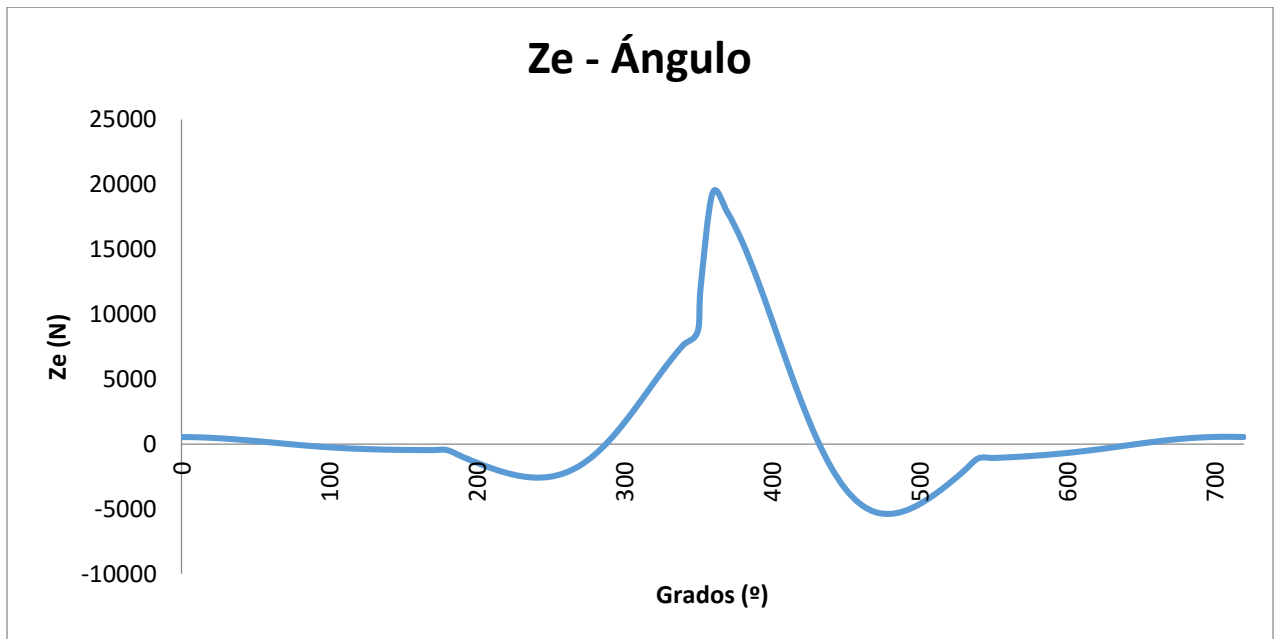


Figura 25. Fuerza de la manivela vs Ángulo de giro del cigüeñal.

Fórmula y resultados

Tabla 35

Fórmula y resultados de la fuerza de la manivela vs Ángulo.

Fórmula	Ze (N)
	538,65
	521,45
	-468,30
$Ze = Fe * \frac{\cos\left(\theta + \arcsin\left\{\left[(\lambda) * \sin\left(\frac{\pi + \theta}{180}\right)\right]\right\}\right)}{\cos\left(\arcsin\left\{\left[(\lambda) * \sin\left(\frac{\pi + \theta}{180}\right)\right]\right\}\right)}$	8699,95
	19324,87
	-5386,92
	-1114,51
	538,65

Nota: La tabla 35 indica las fuerzas de la manivela y ángulos calculados dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Tabla 36

Tabla de ángulo de giro del cigüeñal

Ángulo (Θ)
0
180
350
360
540
720

Nota: La tabla 36 indica los ángulos dentro del ciclo Otto del motor Holden GM Family E-Tec II. (Jovaj M. , Motores del Automovil, 1982)

Discusión

Conclusiones:

- Los datos obtenidos luego del análisis respectivo de la potencia efectiva (N_e) del vehículo indica un valor de 81.423 Kw o 110 HP mientras que en la ficha técnica su potencia es de 121 HP, razón por la cual el vehículo demuestra pérdidas mecánicas.
- El análisis de cada uno de los procesos y el cálculo de estos permiten determinar los parámetros de diseño del ciclo, la potencia del motor, así como la presión de los gases en el espacio útil del cilindro en función del ángulo de rotación del cigüeñal.
- Los cálculos efectuados durante el estudio de este proyecto resultan muy útiles, porque permiten determinar los parámetros de las etapas finales de los procesos individuales, reforzando de esta forma los conocimientos referentes a la teoría del ciclo del trabajo y de cada uno de los procesos.

Recomendaciones:

- Si no se obtiene algún dato importante para los cálculos respectivos tomar los datos de referenciales de los textos de ingeniería mecánica.
- De acuerdo a los cálculos y el análisis del motor del vehículo Chevrolet Optra se recomienda el uso del mismo por su alto rendimiento en el consumo de combustible, potencia y velocidad así como también por su seguridad y confort que brinda a sus ocupantes.
- Para realizar una comprobación de los datos calculados se recomienda el uso de un dinamómetro automotriz el cual nos permitirá de una manera práctica observar el comportamiento del motor.

Bibliografía

Libros

Esguar, T. H. (2014). *Combustion Teoria de Motores de Combustion Interna*.

Jovaj, M. (1982). Motores del automóvil. En *Motores del Automovil*. Moscú: MIR.

Stuttgart, H. G. (1980). *Tecnología del automovil*. Mexico: Reverté, S.A

Net-biografías

Areatecnologia. (s.f.). Obtenido de

<http://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/MOTOR%20DE%20COMBUSTION.htm>

Areatecnologia. (2015). Obtenido de

<http://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/MOTOR%20DE%20COMBUSTION.htm>

automotor. (24 de Enero de 2015). *Partes Automoviles*. Obtenido de

<https://sites.google.com/site/partesautomovil/home/biela>

betamachinery.com. (s.f.). Obtenido de <http://es.betamachinery.com/services/torsional-vibration-analysis-tva>

dailypage.us. (2015). Obtenido de [dailypage.us](http://www.dailypages.us/chevrolet-optra-review/): <http://www.dailypages.us/chevrolet-optra-review/>

especiales.autocosmos.com.mx. (2012). Obtenido de

<http://especiales.autocosmos.com.mx/jetta/noticias/2008/06/06/jetta-tdi-a-prueba-parte-iii>

fierrosclasicos. (8 de Enero de 2015). Obtenido de <http://www.fierrosclasicos.com/las-valvulas-que-son-y-como-funcionan/>

globalbuypower. (2015). Obtenido de [globalbuypower](http://www.globalbuypower.com):

https://www.globalbuypower.com/content_data/LAAM/EC/es/GBPEC/001/BRANDS ITE/site/vehiculos/Autos/Optra/Sedan-ficha-tecnica.html

Gonzalez, D. (s.f.). *books.google.es*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2015, de

books.google.es: <https://books.google.es>

Ingoldaracena. (28 de Abril de 2005). *UCLM.es*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2015, de [UCLM.es](https://www.uclm.es): <https://www.uclm.es>

- ingelibreblog.wordpress.com*. (2016). Obtenido de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/02/21/calculo-de-la-cilindrada-de-un-motor/>
- jeroitim.blogspot.com*. (Octubre de 2012). Obtenido de http://jeroitim.blogspot.com/2012/10/motores-de-combustion-interna-en_29.html
- Mecanica facil.net*. (2015). Recuperado el 26 de Noviembre de 2015, de Mecanica facil.net: <http://www.mecanicafacil.info>
- Mecanicavirtual.com*. (2016). Obtenido de <http://www.mecanicavirtual.com.ar/p/el-filtro-de-aceite.html>
- meganeboy, D. (2014). *Aficionados a la mecanica.net*. Recuperado el 25 de Octubre de 2015, de Aficionados a la mecanica.net: <http://www.aficionadosalamecanica.net/>
- Monografias.com*. (s.f.). Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/a-eje-ciguenal-construccion-caracteristicas-y-empleo-buques-mercantesa/a-eje-ciguenal-construccion-caracteristicas-y-empleo-buques-mercantesa.pdf>
- motorgiga*. (20 de 8 de 2010). Obtenido de <http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/asiento-de-valvula-definicion-significado/gmx-niv15-con311.htm>
- motorgiga.com*. (s.f.). Obtenido de <http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/equilibrado-del-motor-definicion-significado/gmx-niv15-con194029.htm>
- Payri, F., & Desantes, J. (2011). Motores de combustion interna alternativos. En *Motores de combustion interna alternativos* (pág. 46). Valencia: Reverte S.A.
- ro-des.com*. (2016). Obtenido de <http://www.ro-des.com/mecanica/bomba-de-gasolina-que-es-y-como-funciona/>
- Rosas, J. R. (2015). *Monografias.com*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos94/motor-combustion-interna/motor-combustion-interna.shtml>
- Sites.google.com*. (s.f.). Obtenido de <https://sites.google.com/site/partesautomovil/home/biela>
- Slideshare.net*. (s.f.). Obtenido de <http://www.slideshare.net/liALUI/procesos-de-fabricacin-del-cigeal>
- Slideshare.net*. (2016). Obtenido de <http://es.slideshare.net/guest07963/motores-y-refrigeracin-2-presentation>
- Virtual, T. (23 de Octubre de 2012). *Actualidad Motor*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2015, de Actualidad Motor: <http://www.actualidadmotor.com>

Anexos

Ficha Técnica: Chevrolet Optra (1.8) CC

Motor	Limited 1.8 MT
Ajuste Valvular	Automático / hidráulico
Alimentación	MPFI
Alternador	95 ^a
Batería	12V - 80 ^a
Caja cambios / relación final de eje	4.176
Caja de cambios relaciones 1°	3.545
Caja de cambios relaciones 2°	2.048
Caja de cambios relaciones 3°	1.346
Caja de cambios relaciones 4°	0.971
Caja de cambios relaciones 5°	0.763
Calidad de gasolina	87RON
Desplazamiento (c.c.)	1.799
Diam x Carrera (mm)	81,6x86
Dirección	Hidráulica de cremallera y piñón
Freno ABS	ABS
Llantas	195/55 R15 (repuesto 185/65 R14)
Material: bloque culata	Hierro / Aluminio
Posición	Delantera Transversal
Potencia (HP@rpm)	121 @ 5800
Radio mínimo de giro paredes	5.2m / 5.5m
Relación de Compresión	9,8:1
Reversa	3.333
Rines	6JXx15 Aluminio / (repuesto 14'' acero)
Sensor auto detonación	SI
Sistema de Freno delantero	Discos ventilados 256mm
Sistema de Freno tipo y de mano	Hidráulicos
Sistema de Freno trasero	Disco sólido 258mm
Suspensión Amortiguadores	a gas doble acción
Suspensión Barra Estabilizadora	Delantera y posterior
Suspensión delantera tipo	McPherson sobre /resortes helicoidales
Suspensión posterior tipo	Independiente dual link sobre / resortes helicoidales
Tipo	4 CIL DOHC 16V
Tipo / palanca de cambio	Mecánica 5 velocidades
Torque kg-m (Nm)@rpm	16.8 (165) @ 4000

(globalbuypower, 2015)

Datos calculados de Excel para las gráficas

ÁNGULO DEL CIGÜEÑAL (θ)	PRESIÓN C/10º	Fe N	Ne N	Ke N	Ze N	Te N
(º)	(MPa)					
0	0,10	509,89	0,00	509,89	509,89	0,00
10	0,10	505,73	28,15	506,51	493,15	115,54
20	0,10	501,56	55,23	504,59	452,43	223,44
30	0,10	497,40	80,62	503,89	390,45	318,52
40	0,09	493,24	103,67	504,01	311,20	396,46
50	0,09	489,07	123,66	504,47	219,64	454,14
60	0,09	484,91	139,86	504,68	121,33	489,88
70	0,09	480,75	151,58	504,08	21,99	503,60
80	0,09	476,59	158,25	502,17	-73,09	496,83
90	0,09	472,42	159,57	498,64	-159,57	472,42
100	0,09	468,26	155,49	493,40	-234,44	434,15
110	0,09	464,10	146,33	486,62	-296,23	386,06
120	0,09	459,94	132,66	478,68	-344,85	331,99
130	0,09	455,77	115,24	470,12	-381,25	275,07
140	0,09	451,61	94,92	461,48	-406,97	217,57
150	0,09	447,45	72,53	453,29	-423,76	160,91
160	0,08	443,28	48,81	445,96	-433,25	105,75
170	0,08	439,12	24,44	439,80	-436,69	52,19
180	0,08	434,96	0,00	434,96	-434,96	0,00
190	0,17	886,32	-49,33	887,69	-881,42	-105,33
200	0,26	1337,68	-147,29	1345,76	-1307,38	-319,11
210	0,34	1789,04	-289,98	1812,39	-1694,34	-643,39
220	0,43	2240,40	-470,90	2289,35	-2018,93	-1079,37
230	0,51	2691,76	-680,61	2776,47	-2251,61	-1624,52
240	0,60	3143,12	-906,55	3271,24	-2356,66	-2268,74
250	0,69	3594,48	-1133,32	3768,91	-2294,35	-2990,09
260	0,77	4045,84	-1343,45	4263,06	-2025,60	-3751,08
270	0,86	4497,20	-1518,97	4746,80	-1518,97	-4497,20
280	0,95	4948,56	-1643,21	5214,25	-758,94	-5158,72
290	1,03	5399,92	-1702,56	5661,96	247,00	-5656,57
300	1,12	5851,28	-1687,65	6089,80	1464,09	-5911,18
310	1,21	6302,64	-1593,61	6500,99	2830,48	-5852,46
320	1,29	6754,00	-1419,60	6901,58	4261,36	-5428,86
330	1,38	7205,36	-1167,90	7299,40	5656,07	-4614,11
340	1,46	7656,72	-843,07	7702,99	6906,62	-3410,97
350	1,55	8108,08	-451,24	8120,62	7906,54	-1852,34
352	3,05	15942,90	-710,73	15958,73	15688,83	-2922,63
360	6,08	31793,08	0,00	31793,08	31793,08	0,00
370	5,76	30131,02	1676,89	30177,64	29382,07	6883,61

380	5,44	28468,95	3134,66	28641,01	25679,95	12682,57
390	5,13	26806,89	4345,08	27156,75	21042,91	17166,39
400	4,81	25144,82	5285,10	25694,25	15864,85	20211,40
410	4,49	23482,76	5937,59	24221,78	10545,97	21805,44
420	4,17	21820,69	6293,63	22710,18	5459,90	22044,09
430	3,85	20158,63	6355,89	21136,88	922,07	21116,76
440	3,54	18496,56	6141,94	19489,64	-2836,73	19282,09
450	3,22	16834,50	5686,02	17768,83	-5686,02	16834,50
460	2,90	15172,43	5038,13	15987,04	-7596,26	14067,07
470	2,58	13510,37	4259,74	14165,99	-8623,66	11238,68
480	2,27	11848,30	3417,35	12331,28	-8883,66	8552,26
490	1,95	10186,24	2575,58	10506,81	-8520,59	6147,56
500	1,63	8524,17	1791,67	8710,43	-7681,56	4106,74
510	1,31	6862,11	1112,27	6951,66	-6498,89	2467,80
520	0,99	5200,04	572,57	5231,47	-5082,27	1240,48
530	0,68	3537,98	196,90	3543,45	-3518,42	420,45
540	0,36	1875,91	0,00	1875,91	-1875,91	0,00
550	0,34	1800,02	-100,18	1802,81	-1790,07	-213,92
560	0,33	1724,13	-189,84	1734,55	-1685,08	-411,30
570	0,32	1648,24	-267,16	1669,75	-1561,00	-592,75
580	0,30	1572,35	-330,49	1606,71	-1416,92	-757,52
590	0,29	1496,46	-378,38	1543,56	-1251,76	-903,14
600	0,27	1420,57	-409,73	1478,48	-1065,12	-1025,39
610	0,26	1344,68	-423,97	1409,93	-858,31	-1118,58
620	0,24	1268,79	-421,31	1336,91	-635,23	-1176,35
630	0,23	1192,90	-402,91	1259,11	-402,91	-1192,90
640	0,21	1117,01	-370,91	1176,98	-171,31	-1164,45
650	0,20	1041,12	-328,26	1091,64	47,62	-1090,60
660	0,18	965,23	-278,40	1004,58	241,52	-975,11
670	0,17	889,34	-224,87	917,33	399,40	-825,82
680	0,16	813,45	-170,98	831,22	513,24	-653,85
690	0,14	737,56	-119,55	747,18	578,97	-472,31
700	0,13	661,67	-72,85	665,67	596,85	-294,77
710	0,11	585,78	-32,60	586,68	571,22	-133,82
720	0,10	509,89	0,00	509,89	509,89	0,00

Datos calculados de Excel para las gráficas

ÁNGULO DEL CIGÜEÑAL (θ)	PRESIÓN C/10º	VELOCIDAD DEL PISTON (Ve)	ACELERACION DEL PISTON (We)	DESPLAZAMIENTO DEL PISTON (Se)
(º)	(MPa)	(cm/seg)	(cm/seg ²)	cm
0	0,10	0,00	39409,31	0,00
10	0,10	78,92	38379,58	0,08
20	0,10	153,73	35373,65	0,32
30	0,10	220,67	30632,54	0,70
40	0,09	276,58	24529,67	1,20
50	0,09	319,18	17531,78	1,80
60	0,09	347,16	10150,88	2,48
70	0,09	360,28	2892,58	3,20
80	0,09	359,24	-3793,25	3,93
90	0,09	345,58	-9553,77	4,64
100	0,09	321,41	-14161,97	5,32
110	0,09	289,19	-17529,81	5,93
120	0,09	251,39	-19704,66	6,48
130	0,09	210,27	-20849,77	6,95
140	0,09	167,68	-21211,68	7,33
150	0,09	124,90	-21078,77	7,62
160	0,08	82,65	-20736,42	7,83
170	0,08	41,10	-20424,36	7,96
180	0,08	0,00	-20301,77	8,00
190	0,17	-41,10	-20424,36	7,96
200	0,26	-82,65	-20736,42	7,83
210	0,34	-124,90	-21078,77	7,62
220	0,43	-167,68	-21211,68	7,33
230	0,51	-210,27	-20849,77	6,95
240	0,60	-251,39	-19704,66	6,48
250	0,69	-289,19	-17529,81	5,93
260	0,77	-321,41	-14161,97	5,32
270	0,86	-345,58	-9553,77	4,64
280	0,95	-359,24	-3793,25	3,93
290	1,03	-360,28	2892,58	3,20
300	1,12	-347,16	10150,88	2,48
310	1,21	-319,18	17531,78	1,80
320	1,29	-276,58	24529,67	1,20
330	1,38	-220,67	30632,54	0,70
340	1,46	-153,73	35373,65	0,32
350	1,55	-78,92	38379,58	0,08
352	3,05	-63,34	38748,66	0,05
360	6,08	0,00	39409,31	0,00
370	5,76	78,92	38379,58	0,08

380	5,44	153,73	35373,65	0,32
390	5,13	220,67	30632,54	0,70
400	4,81	276,58	24529,67	1,20
410	4,49	319,18	17531,78	1,80
420	4,17	347,16	10150,88	2,48
430	3,85	360,28	2892,58	3,20
440	3,54	359,24	-3793,25	3,93
450	3,22	345,58	-9553,77	4,64
460	2,90	321,41	-14161,97	5,32
470	2,58	289,19	-17529,81	5,93
480	2,27	251,39	-19704,66	6,48
490	1,95	210,27	-20849,77	6,95
500	1,63	167,68	-21211,68	7,33
510	1,31	124,90	-21078,77	7,62
520	0,99	82,65	-20736,42	7,83
530	0,68	41,10	-20424,36	7,96
540	0,36	0,00	-20301,77	8,00
550	0,34	-41,10	-20424,36	7,96
560	0,33	-82,65	-20736,42	7,83
570	0,32	-124,90	-21078,77	7,62
580	0,30	-167,68	-21211,68	7,33
590	0,29	-210,27	-20849,77	6,95
600	0,27	-251,39	-19704,66	6,48
610	0,26	-289,19	-17529,81	5,93
620	0,24	-321,41	-14161,97	5,32
630	0,23	-345,58	-9553,77	4,64
640	0,21	-359,24	-3793,25	3,93
650	0,20	-360,28	2892,58	3,20
660	0,18	-347,16	10150,88	2,48
670	0,17	-319,18	17531,78	1,80
680	0,16	-276,58	24529,67	1,20
690	0,14	-220,67	30632,54	0,70
700	0,13	-153,73	35373,65	0,32
710	0,11	-78,92	38379,58	0,08
720	0,10	0,00	39409,31	0,00