



**ESCUELA: Mecánica Automotriz.**

**“ANALISIS DEL RENDIMIENTO TERMICO DE UN MOTOR  
DIESEL A PARTIR DE LA PRESION ATMOSFERICA DE LA  
CIUDAD DE QUITO.”**

**DIRECTOR INVESTIGACION:**

**Msc. Andrés Castillo**

**NOMBRE ALUMNOS:**

**Daniel González B.**

**Geovanny Hervas T.**

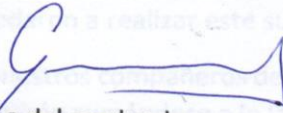
**Kevin Gualoto.**

**FECHA: Septiembre de 2016.**

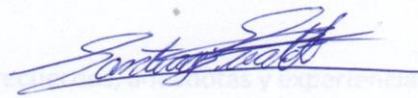
**CERTIFICADO**

Nosotros, Fausto Geovanny Hervás Tovar, Kevin Santiago Gualoto Chavarrea y Wilson Daniel González Bravo declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que NO ha sido presentado anteriormente para ningún grado o certificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

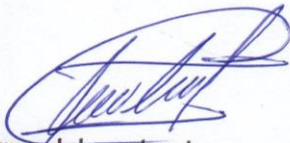
Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de propiedad intelectual, reglamentos y leyes.



Firma del graduado.  
Fausto Geovanny Hervás Tovar  
C.I.: 0502133556



Firma del Graduado.  
Kevin Santiago Gualoto Chavarrea  
C.I.: 1721759486



Firma del graduado  
Wilson Daniel González Bravo  
1720876612

Yo, Ing. Andrés Castillo, Certifico que, conozco a los autores del presente trabajo son los autores de la presente investigación y que esta es original, auténtica y personal suya.



Firma del Director de Trabajo Investigación.  
Ing. Andrés Castillo  
C.I. 1713421749

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación para nuestra culminación de estudios, si bien ha requerido de esfuerzo y dedicación, es por eso que queremos agradecer hoy y siempre a nuestros padres, esposas, hijos, hermanos seres queridos y amigos por su apoyo incondicional en todo el proceso para la realización de nuestro proyecto de investigación quienes procuran nuestro bienestar, y nos brindan su colaboración, comprensión y motivación el cual nos guió durante todo este trayecto. Queremos también agradecer a la Universidad Internacional del Ecuador, quien durante este período nos brindó las herramientas necesarias para poder cumplir con esta meta personal que como estudiantes hemos alcanzado después de estos años de estudio que nos formó profesionalmente y como seres humanos.

A nuestros queridos profesores los cuales fueron amigos en nuestras vidas y que ayudaron a realizar este sueño.

A nuestros compañeros de clase, tanto tiempo, recuerdos, anécdotas y experiencias que seguirán sumándose a lo largo de nuestras vidas, gracias a ellos por formar parte de una de las mejores etapas de nuestra vida.

A nuestros queridos amigos Ing. Miguel Granja, Ing. Juan Fernando Iñiguez e Ing. Andres Castillo, quienes estuvieron apoyándonos y siguiendo de cerca nuestros pasos en nuestra formación profesional.

Geovanny Hervas T.

Kevin Gualoto Ch.

Daniel Gonzalez B.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi padre Fausto el cual me motivó a ser un buen ser humano, responsable, humilde y profesional, realizando las cosas con amor y tenacidad, impulsándome a ser mejor. A mi madre Celeste que me dio la vida y me educó con amor y cariño para ser la persona que ahora soy con todo su apoyo incondicional y creyendo en mi sobre todas las cosas, A mi esposa Juliana e hijo Santino, pilar fundamental en mi vida, que con su amor y dulzura me llenaron de fuerzas para seguir adelante, a mis hermanos que me alentaron a seguir con este proyecto con el fin de cumplir mi objetivo y a mis amigos que han estado apoyándome en todo momento en las buenas y malas, y más que todo que siempre estuvieron junto a mí.

Fausto Geovanny Hervas Tovar.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto principalmente a Dios por darme las fuerzas necesarias para haber podido terminar con mi meta de ser un profesional, a mi madre Gladys quien es y será mi ejemplo de vida, de honestidad, una mujer como pocas en la vida, a la que debo todo lo que soy y lo que seré a futuro. A mis hermanos que a pesar de los problemas siempre me han apoyado en todo lo que me eh proyectado en mi vida. A mis hijos Zahid y Santiago que son mi motor para salir luchando por mis sueños y pode darles una vida de cariño y buenos valores como lo que mi madre me supo brindar. A mis tíos Ruben y Manuel que fueron como el padre que no tuve, y me supieron enseñar lo bueno y lo malo de la vida. A mis tías Silvia y Susana una madre más que dios me dio para seguir adelante por el camino del bien con el cariño de madre que ellas me dieron siempre. Y a todas las personas que nuca dudaron de mis capacidades y me apoyaron a no desistir de todo lo que me propongo en la vida.

Kevin Santiago Gualoto Chavarrea.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis queridos padres Wilson y Bertha que gracias a ellos, al apoyo incondicional en las buenas y en las malas circunstancias, también reflejo ejemplo que me han dado enseñándome muchas cosas dentro de nuestro hogar, inculcándome sus buenos valores y principios como padres y en esta dedicatoria quiero manifestar mi eterna gratitud por el cariño y el amor que recibí de ellos, que para mí son lo más importante ya que me han enseñado a ser un gran ser humano y me han forjado para enfrentar la vida diaria. También dedico este proyecto a mis familiares y amigos en general ya que han estado pendientes de mí y de la culminación de esta muy importante en mi vida.

Wilson Daniel Gonzáles Bravo.

## **“ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN MOTOR DIESEL A PARTIR DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE LA CIUDAD DE QUITO.”**

Fausto Hervas T<sup>1</sup>; Kevin Gualoto Ch<sup>2</sup>; Daniel González B<sup>3</sup>.  
geovannyhervas@gmail.com; kevinsan\_@hotmail.com; danielgb90\_@hotmail.com.  
Universidad Internacional del Ecuador – Facultad de Ingeniería Automotriz.  
Av. Simón Bolívar y Jorge Fernández.  
Quito – Ecuador.

### **RESUMEN:**

*En este artículo desarrollamos el estudio del aprovechamiento de energía en los motores de combustión diésel el cual constituye uno de los temas más importantes en esta área. La complejidad de este proceso se depende de una gran cantidad de variables involucradas en el momento de la combustión de la mezcla en el interior del cilindro. El rendimiento térmico del motor indica la eficacia del mismo, se expresa como la relación entre el trabajo mecánico que obtenemos del motor y la cantidad de calor producida en la combustión empleando un combustible apropiado conseguimos el desarrollo adecuado del proceso de combustión la que tiene el proceso de formación de la mezcla de trabajo, el cual dependiendo del tipo de motor tiene mayores o menores exigencias, de manera que cuando el volumen en la cámara de combustión corresponda aproximadamente al de la máxima compresión ocurra el encendido de la mezcla. Se debe tomar en cuenta que la mayoría de autos ofertados en el parque automotor Sudamericano son probados en condiciones de 0 MSNM por lo que en nuestro medio las condiciones geográficas hace que esto varíe radicalmente en cortas distancias recorridas*

**PALABRAS CLAVE:** *cilindro, combustión, compresión, mezcla, diésel, altura.*

### **ABSTRACT:**

In this article we develop the study of energy use in diesel combustion engines which is one of the most important issues in this area. The complexity of this process depends on a lot of variables involved in the time of combustion of the mixture inside the cylinder. The thermal efficiency of the engine indicates its efficacy is expressed as the ratio of mechanical work to get the engine and the amount of heat produced in the combustion using an appropriate fuel got the proper development of the combustion process which is the process forming a working mix, which depending on the type of engine has higher or lower requirements, so that the ignition of the mixture when the volume in the combustion chamber corresponds approximately to the maximum compression occurs. We note that most cars offered in the South American automotive fleet are tested under conditions of 0 MSNM so in our geographical conditions makes this varies dramatically over short distances traveled.

**KEY WORDS:** *cylinder, combustion, compression, mixing, diesel, geographic height.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Este artículo tiene como objetivo estudiar el motor de combustión diésel, el efecto de la altitud sobre los parámetros de combustión [1], en el que se mostrara el proceso desde el recorrido del fluido de trabajo desde que entra al sistema de admisión, se quema en la cámara de combustión y hasta que este es expulsado al medio ambiente. Los motores térmicos son máquinas que transforman la energía calorífica en energía mecánica directamente utilizable. Esta teoría permite calcular aspectos sobre el proceso de combustión como: eficiencia de la combustión, poder calorífico y temperatura de llama adiabática. Se estudiará el funcionamiento real del motor a través del estudio de los diagramas p-V, tomando en cuenta las pérdidas asociadas a fricción mecánica y transferencia de calor. Finalmente estudiara los detalles del proceso de intercambio de gases, enfatizando en los factores que afectan mayormente el llenado del cilindro con la carga de aire fresco a la altura geográfica de Quito 2800 MSNM, se muestra que al incrementar la altitud se modifica la composición del aire atmosférico y disminuye la densidad debido a la disminución de la presión barométrica. Esto afecta la relación másica estequiométrica entre aire y combustible, por lo que el proceso de mezclado se modifica. Se encontró que las variaciones observadas sobre el desarrollo de la combustión en los motores con turboalimentación son casi imperceptibles. Además se muestra que hay una reducción de las emisiones de NOx con la altitud, debido principalmente a la disminución de la temperatura adiabática de combustión.

## 2. FUNDAMENTACION TEÓRICA

### GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

#### 2.1 CICLO TERMODINÁMICO

Los ciclos termodinámicos son una serie de procesos estables que cumplen con un ciclo, para regresar a su estado inicial. Los ciclos termodinámicos son de gran importancia en la ingeniería ya que a partir de ellos se construyen o diseñan los motores, refrigeradores, sistemas de aire acondicionado, etc.

Un sistema termodinámico se define como “cualquier cantidad de materia, o cualquier región del espacio a la que dirigimos nuestra atención para propósitos de análisis”. Un proceso termodinámico es el cambio de un estado a otro de un sistema termodinámico, y su trayectoria es la serie de estados por los que pasa el sistema durante el proceso. Es importante dejar bien en claro que un proceso termodinámico sólo se puede llevar a cabo si el sistema alcanza el equilibrio termodinámico en cada uno de los estados por los que pasa, esto lleva a que el proceso deba ser lento, de lo contrario el sistema no podría alcanzar el equilibrio termodinámico en cada estado por el que pasa.

El calor neto de un ciclo es igual al trabajo neto del mismo, ahora bien el trabajo neto de un ciclo se define como la suma de los trabajos de cada uno de los procesos que componen el ciclo, esto es:

$$W_{neto} = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$



De igual forma podemos decir que el calor neto del ciclo es igual a la suma del calor de cada proceso del ciclo.

$$Q_{neto} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

Se debe mencionar que en un ciclo termodinámico el calor que entra al ciclo se considera con un signo en esta ecuación y el que sale del ciclo se debe considerar con signo opuesto. Así, podemos establecer que cuando el sistema absorbe calor el signo del calor será positivo y cuando el sistema pierde calor el signo de este será negativo. El Rendimiento termodinámico de un ciclo se define como el trabajo neto del ciclo entre el calor agregado al ciclo, esto es:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{agregado}} \quad (3)$$

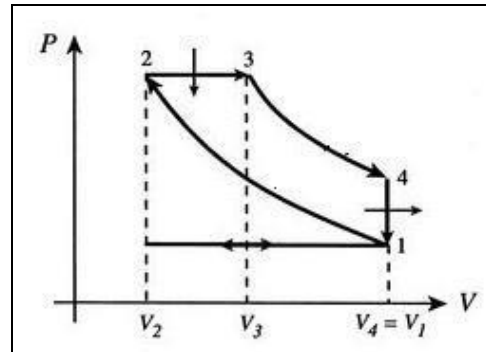
Es importante conocer tanto el trabajo neto del ciclo como su rendimiento, pues estos parámetros son los que nos dan la información necesaria para conocer las posibilidades que posee el ciclo termodinámico. El rendimiento es en general el parámetro más importante, pues nos dice que cantidad de trabajo se puede obtener del ciclo en función del calor que se invierte en él.

## 2.2 CICLO DIESEL

Este motor de cuatro tiempos a diferencia del motor de gasolina, sólo succiona aire, lo comprime y entonces le inyecta el combustible. El calor del aire comprimido enciende el combustible espontáneamente. El ciclo de diésel es un

motor de encendido por compresión (en lugar de encendido por chispa). El combustible atomizado se inyecta en el cilindro en  $p_2$  (alta presión) cuando la compresión se completa, y hay encendido sin una chispa.

En la figura se muestra un ciclo idealizado de motor diésel.

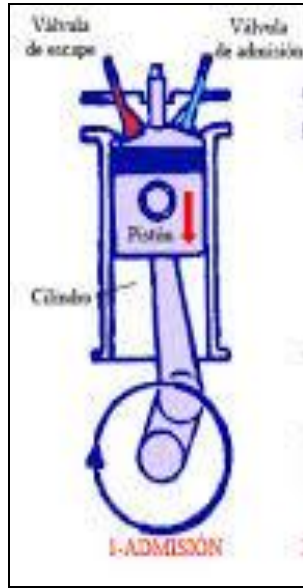


**Figura1. Diagrama p-v.- Ciclo ideal Diésel**  
(Motor diésel de aire estándar)  
**Fuente: Daniel Gonzalez, Kevin Gualoto; Giovanni Herbas**

El ciclo diésel es el ciclo ideal para motores de encendido por compresión. La bujía es sustituida por un inyector de combustible en los motores diésel. En este motor se asume que la adición de calor se produce durante un proceso a presión constante que se inicia con el pistón en el punto muerto superior.

**Primer Tiempo: Admisión**

En este primer tiempo el pistón efectúa su primera carrera o desplazamiento desde el PMS al PMI, aspirando solo aire de la atmósfera, debidamente purificado a través del filtro. El aire pasa por el colector y la válvula de admisión, que permanece abierta, con objeto de llenar todo el volumen del cilindro. Durante este tiempo el cigüeñal gira  $180^\circ$



**Figura 2. Motor diésel en admisión**  
**Fuente: Motores Jovac**

Al llegar al PMI se supone que la válvula de admisión se cierra instantáneamente.

#### Segundo Tiempo: Compresión

En este segundo tiempo y con las dos válvulas completamente cerradas el pistón comprime el aire a gran presión, quedando solo aire alojado en la cámara de combustión, el cigüeñal gira otros 180° y completa la primera vuelta del árbol motor.

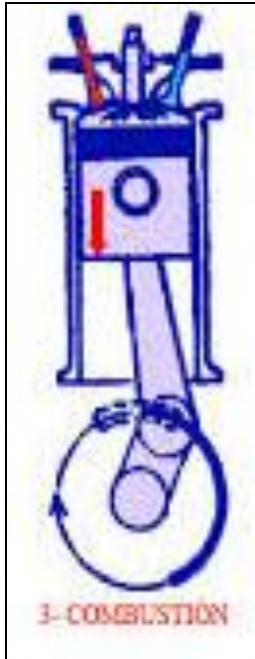
La Presión alcanzada en el interior de la cámara de combustión mantiene la temperatura del aire por encima de los 600° C, superior al punto de inflamación del combustible, para lo cual la relación de compresión tiene que ser del orden de 22.



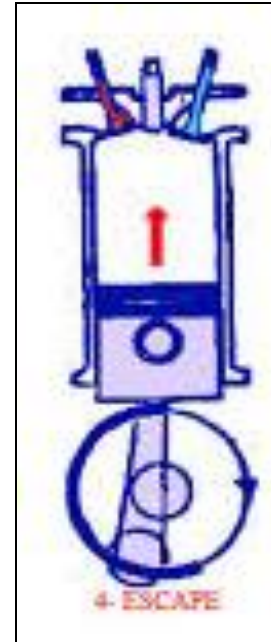
**Figura 3. Motor diésel en compresión**  
**Fuente: Motores Jovac**

Tercer tiempo: Trabajo.

Al final de la compresión con el pistón en el PMS se inyecta el combustible en el interior del cilindro, en una cantidad que es regulada por la bomba de inyección. Como la presión en el interior del cilindro es muy elevada, para que el combustible pueda entrar la inyección debe realizarse a una presión muy superior, entre 150 y 300 atmosferas. El combustible, que debido a la alta presión de inyección sale finalmente pulverizado, se inflama en contacto con el aire caliente, produciéndose la combustión del mismo. Se eleva entonces la temperatura interna, la presión mientras dura la inyección o la aportación de calor se supone constante y, a continuación, se realiza la expansión y desplazamiento del pistón hacia el PMI. Durante este tiempo, o carrera de trabajo, el pistón efectúa su tercer recorrido y la muñequilla del cigüeñal gira otros 180 grados.



**Figura 4. Motor diésel en combustión**  
**Fuente: Motores Jovac**



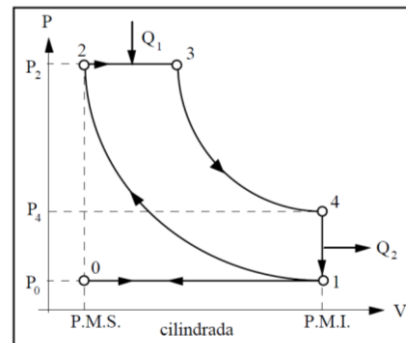
**Figura 5. Motor diésel en escape**  
**Fuente: Motores Jovac**

Cuarto tiempo: Escape.

Durante este cuarto tiempo se supone que la válvula de escape se abre instantáneamente permanece abierta. El pistón, durante su recorrido ascendente, expulsa a la atmosfera los gases remanentes que no han salido, efectuando el barrido de gases quemados lanzándolos al exterior.

La muñequilla de cigüeñal efectúa otro giro de  $180^\circ$ , completando las dos vueltas del árbol motor que corresponde al ciclo completo de trabajo. El diagrama de distribución correspondiente a esta carrera se presenta en la siguiente figura:

Representado en un sistema de ejes coordinados P-V el funcionamiento teórico de estos motores queda determinado por el diagrama de la siguiente figura:



**Figura 6. Diagrama presión volumen**  
**Fuente: Motores Jovac**

0-1.- Admisión (isóbara): Durante la admisión se supone que el cilindro se llena totalmente de aire que circula sin razonamiento por los conductos de admisión, por lo que se puede considerar que la presión se mantiene constante e

igual a la presión atmosférica. Es por lo que esta carrera puede ser representada por una transformación isóbara ( $P=K$ ).

### **3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

1-2- Compresión (Adiabática): Durante esta carrera el aire es comprimido hasta ocupar el volumen correspondiente a la cámara de combustión y alcanza en el punto (2) presiones del orden 50 kp/cm cuadrado. Se supone que por hacerse muy rápidamente no hay que considerar pérdidas de calor, por lo que esta transformación puede considerarse adiabática. La temperatura alcanzada al finalizar la compresión supera los 600 grados C, que la temperatura necesaria para producir la auto inflamación del combustible sin necesidad de chispa eléctrica.

2-3- Inyección y combustión (isóbara): Durante el tiempo que dura la inyección, el pistón inicia su descenso, pero la presión del interior del cilindro se supone que se mantiene constante, transformación isóbara, debido a que se mantiene el combustible que entra se quema progresivamente a medida que entra en el cilindro, compensando en aumento de volumen que genera el desplazamiento del pistón. Esto se conoce como retraso de combustión.

3-4- Terminada la inyección se produce una expansión (3-4), la cual como la compresión se supone que se realiza sin intercambio de calor con el medio exterior, por lo que se considera una transformación adiabática. La presión interna desciende a medida que el cilindro aumenta de volumen.

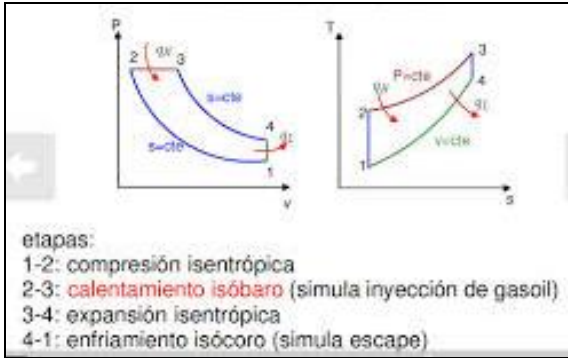
4-1- Primera fase del escape (isócora): en el punto (4) se supone que se abre instantáneamente la válvula de escape y se supone que los gases quemados salen tan rápidamente al exterior, que el pistón no se mueve, por lo que se puede considerar que la transformación que experimentan es una isócora. La presión en el cilindro baja hasta la presión atmosférica y una cantidad de calor  $Q_2$  no transformado en trabajo es cedido a la atmosfera.

1-0- Segunda fase del escape (isóbara): los gases residuales que quedan en el interior del cilindro son expulsados al exterior por el pistón durante su recorrido (1-0) hasta el PMS. Al llegar a él se supone que de forma instantánea se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión para iniciar un nuevo ciclo. Como se supone que no hay pérdida de carga debida al razonamiento de los gases quemados al circular por los conductos de escape, la transformación (1-0) puede ser considerada como isóbara.

Como se puede observar, este ciclo difiere del ciclo Otto en que la aportación de calor se realiza a presión constante, con una carrera de trabajo menos efectiva debido al retraso de la combustión.

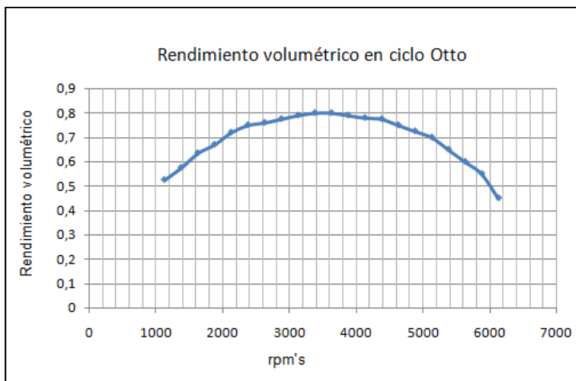
El ciclo de aire estándar diésel consiste de la siguiente secuencia de procesos internos reversibles:

1. Compresión isentrópica
  2. Adición de calor a presión constante
  3. Expansión isentrópica
- Rechazo de calor de volumen constante.



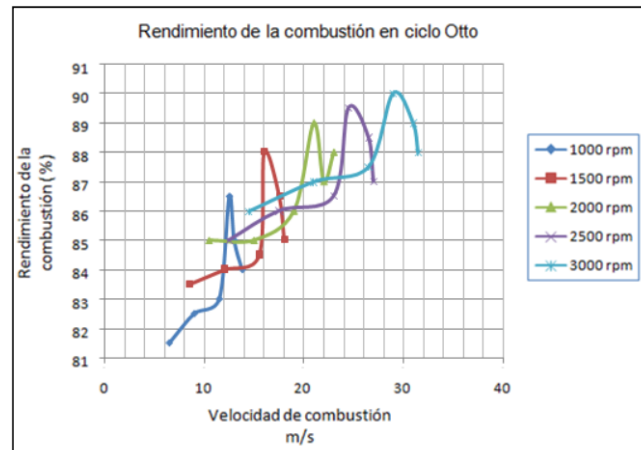
**Figura 7. Aportación de Calor**  
**Fuente: Motores Jovac**

Para determinar el rendimiento volumétrico es necesario tomar en cuenta la masa de mezcla fresca que entra en el cilindro dividido por la masa de la mezcla que entraría si esta llenase todo el volumen desplazado por el pistón y estuviera a la densidad de la admisión antes de la mariposa (a nivel del filtro del aire). En el ciclo Otto el rendimiento volumétrico es siempre inferior al 100 % porque la mariposa limita la entrada de aire y se ha supuesto que no es un motor sobrealimentado.



**Figura 8. Rendimiento volumétrico en función del régimen de giro del motor.**  
**Fuente: Agudelo, John R, & Agudelo, Andrés F. (2006).**

Rendimiento de la combustión: El calor que se puede obtener en una combustión es el correspondiente al Poder Calorífico Inferior del combustible (PCI). Al realizar la combustión, una parte del calor producido se pierde, asociado a los productos de la combustión. Este parámetro depende esencialmente del régimen de giro del motor y de la velocidad de combustión [3]. Para realizar una distinción entre las velocidades de combustión se diferencia entre una combustión laminar, una combustión turbulenta o una combustión casi instantánea.



**Figura 9. En Ciclo Otto**  
**Fuente: Motores Jovac**

Ahora procedemos con la aportación de calor primero utilizando la ecuación de los gases ideales:

$$n = \frac{P_{Otto} \times V_c \times \eta_{vOtto}}{R \times T_1}$$

$$m_{aire} = m_{molar_{aire}} \times n$$

$$m_{combustible} = \frac{m_{aire}}{AFR} \quad (4)$$

Cuando se tiene la masa de combustible, se puede obtener el calor aportado:

$$Q = m_{\text{combustible}} \times \text{PCI}_{\text{gasolina}} \times \eta_{\text{cOtto}}$$

(5)

Una vez se tiene el calor aportado, se puede encontrar la temperatura al final de la aportación del calor.

$$\Delta T = \frac{Q}{(m_{\text{aire}} + m_{\text{combustible}}) \times c_v}$$

(6)

Las prestaciones del motor dependen entre otros factores de la cantidad de aire utilizado. Cuanta más cantidad de aire introducido en los cilindros, más cantidad de combustible puede quemarse, por consiguiente cuanto más energía se transforme en el motor más trabajo útil puede obtenerse.

El rendimiento volumétrico o coeficiente de llenado  $\eta_V$ , nos indica la relación entre la masa de aire efectiva que entra en el cilindro y la masa que teóricamente puede introducirse.

La masa de aire efectiva que entra en el cilindro dependiendo del régimen de rotación del cigüeñal, se mide con pruebas efectuadas en el banco de potencia, la teórica se calcula en base a la cilindrada unitaria y al régimen de rotación del cigüeñal, teniendo en cuenta la densidad atmosférica.

#### 4. RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

El ciclo de Otto que simula al motor de combustión interna consiste en cuatro movimientos de un pistón (Smith *et al.*, 1996), y empieza con una compresión rápida de la mezcla aire-combustible,

luego la mezcla se pone en ignición y ocurre la combustión tan rápidamente que el volumen permanece casi constante y la presión se eleva. Los productos de la combustión se expanden y la temperatura y la presión disminuye. La presión cae a volumen aproximadamente constante.

Debido a la complejidad de este ciclo de potencia, los ingenieros se ven en la necesidad de trabajar con modelos idealizados, por lo que se han de establecer las siguientes aproximaciones, llamadas suposiciones de aire estándar (Cengel y Boles, 1996):

La sustancia de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y se comporta como un gas ideal.

2. Todos los procesos que integran el ciclo son reversibles.

3. El proceso de combustión se reemplaza por un proceso de adición térmica desde una fuente externa.

4. El proceso de escape se sustituye por un proceso de eliminación térmica que regresa la sustancia de trabajo a su estado inicial.

Con estas suposiciones el ciclo Otto teórico (Wark y

Richards, 2001) se compone de los siguientes procesos reversibles

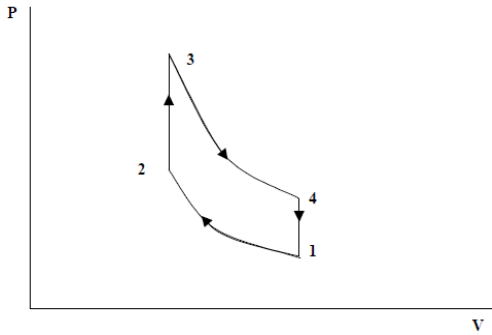
(Figura):

(1) a (2) Compresión adiabática.

(2) a (3) Calentamiento isométrico.

(3) a (4) Expansión adiabática.

(4) a (1) Enfriamiento isométrico.



**Figura 12: Ciclo de Otto periódico,** donde  $P =$  presión;  $V =$  volumen.  
Fuente: Motores Jovac

El trabajo total está dado por:

$$W_{\text{total}} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{3 \rightarrow 4} \quad (7)$$

La expresión para la eficiencia térmica estará dada por:

$$\eta = -\frac{W_{\text{total}}}{Q_{2 \rightarrow 3}} \quad (8)$$

Reemplazando en la expresión para la eficiencia (5) queda

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = r^{\gamma-1} \quad (9)$$

Donde

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (10)$$

y

$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad (11)$$

En la cual  $r$  es la relación de compresión del motor.

La expresión para la eficiencia puede escribirse como:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (12)$$

En la tabla 1 se observa que para un ciclo Otto el trabajo neto aumenta a medida que aumenta la relación de compresión, alcanza un máximo que corresponde a un punto de trabajo óptimo del sistema y luego empieza a disminuir. Es interesante mencionar el hecho de que muchos textos de Termodinámica (por ejemplo: Burghardt, 1984; Van Wylene *et al.*, 2000) no hacen referencia a este comportamiento.

En general, los textos universitarios de Termodinámica mencionan que en un ciclo Otto la eficiencia aumenta con la relación de compresión y crece si aumenta la relación de capacidades caloríficas.

Se puede entonces determinar una relación óptima de compresión  $r_{opt}$  para que un motor de Otto suministre un trabajo máximo. Considerando que la variación de las capacidades caloríficas es lenta y que el aire tiene capacidades caloríficas constantes cuyos valores se determinan a temperatura ambiente, esto es a 300 K (Cengel y Boles, 1996), de acuerdo con la ecuación (4):

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[ \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) + \left(\frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1}\right) \right] \quad (13)$$

Tenemos que:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (14)$$

Y la ecuación quedaria

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[ \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} - 1 + \left(\frac{T_3}{T_2} - \frac{T_3}{T_1}\right) \right] \quad (15)$$

Expresando en términos de  $r$ , que es la relación de compresión:

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[ \left(r^{\gamma-1} - 1\right) + r^{1-\gamma} \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \right]$$

(16)

**Tabla 1: Trabajo neto y eficiencia térmica en función de la relación de compresión**

Tabla 1.								
Relación de compresión	Trabajo neto	Eficiencia (%)	Trabajo neto	Eficiencia (%)	Trabajo neto	Eficiencia (%)	Trabajo neto	Eficiencia (%)
$r = V_1/V_2$	$W_{neto}$ (kJ/kg)	$\eta$	$W_{neto}$ (kJ/kg)	$\eta$	$W_{neto}$ (kJ/kg)	$\eta$	$W_{neto}$ (kJ/kg)	$\eta$
	$T_{max} = 1,000$ K		$T_{max} = 1,500$ K		$T_{max} = 1,700$ K		$T_{max} = 2,000$ K	
2	110.6	22.78	201.6	21.61	238	21.3	292.7	20.85
4	161.8	40.61	328.4	38.91	395.2	38.36	495.6	37.65
6	164.5	49.09	369.1	47.29	451.4	46.67	574.9	45.87
8	154.5	54.36	383.4	52.55	475.7	51.92	614.2	51.08
10	139.6	58.05	386.1	56.28	485.5	55.64	634.9	54.8
12	123	60.84	382.9	59.11	487.8	58.48	645.7	57.63
14	105.9	63.04	376.4	61.36	485.9	60.73	650.5	59.89
16	88.5	64.85	367.9	63.21	484.1	62.59	651.3	61.75

Fuente: Daniel Gonzalez, Kevin Gualoto, Giovanni Herbas

## 5. DISCUSIÓN

En base a los datos obtenidos en la tabla, podemos determinar que la presión atmosférica incide radicalmente en el desenvolvimiento mecánico del motor diésel, afectando el llenado atmosférico de la cámara de combustión y por ende haciendo deficiente la comparativa entre la relación de compresión teórica vs la real medida.

De lo cual obtenemos los siguientes datos:

En el punto de trabajo máximo se tiene que:

$$\frac{dW_{neto}}{dr} = 0 \quad (17)$$

Luego:

$$\frac{dW_{neto}}{dr} = C_p T_1 \left[ (\gamma - 1) r^{\gamma - 1 - 1} + (1 - \gamma) r^{1 - \gamma - 1} \frac{T_3}{T_1} \right] = 0 \quad (18)$$

(18)

Por lo que:

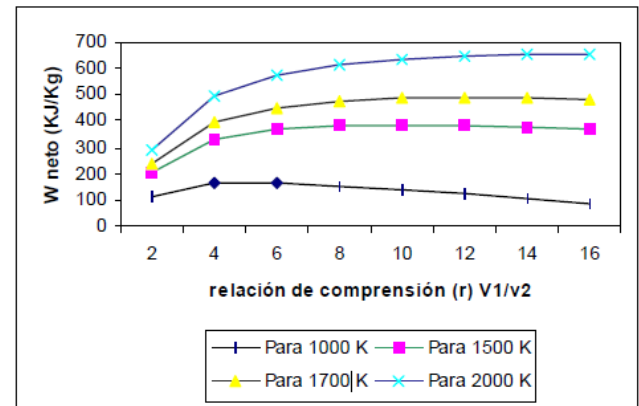
$$r_{opt} = \left( \frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2(\gamma - 1)}} \quad (19)$$

La relación de compresión también puede expresarse como:

$$r = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (20)$$

En el punto máximo se obtiene que:

$$\left( \frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2(\gamma - 1)}} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (21)$$



**Figura 13: comparación de trabajo neto – relación de compresión.**

Fuente: Smith, J.M., H. Van Ness y M. Abbot, *Introducción a la Termodinámica*

Por lo que:

$$T_2 = (T_3 T_1)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

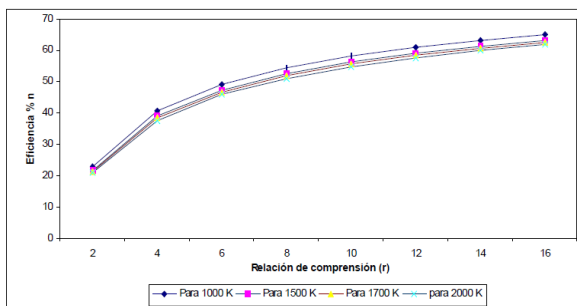
Lo que significa que en el ciclo Otto ideal (cerrado) el trabajo máximo se tiene cuando la temperatura al final de las compresiones la media geométrica de las temperaturas al inicio del ciclo y al final del calentamiento isométrico. En la figura 2 se observa que un aumento de la temperatura máxima ocasiona que los valores de relación de compresión para los que se alcanza el trabajo máximo estén desplazados hacia valores mayores de relación de compresión, como es de esperarse de acuerdo con la ecuación (19).



Lo mismo puede verse en la tabla 1. En efecto, para  $T_{\text{máx}} = 1,700 \text{ K}$  corresponde un valor de  $m_{\text{máx}} = 12$ . En la figura 3 se muestra la variación de la eficiencia térmica vs la relación de compresión. Para los valores de temperatura máxima considerados, la eficiencia aumenta con la relación de compresión, como es de esperarse, pero el valor de la eficiencia se empieza a nivelar a partir de un valor de relación de compresión de aproximadamente 8.

## 6. CONCLUSIONES

Para valores fijos de  $T_1$  y  $T_3$ , el trabajo neto del ciclo diesel aumenta primero con la relación de compresión, luego alcanza un máximo a  $r_p = (T_3/T_1)^{1/2}(g - 1)$  y finalmente disminuye.



**Figura 14: % eficiencia térmica – relación de compresión**

**Fuente: Motores Jovac**

En un ciclo Otto, bajo análisis de aire estándar, el trabajo máximo se tiene cuando la temperatura al final de la compresión es la media geométrica de las temperaturas al inicio del ciclo y al final del calentamiento isométrico  $T_2 = (T_3 T_1)^{1/2}$ . En el ciclo Otto, bajo el análisis de aire estándar, a temperaturas cercanas a 1,500 K se tienen las mayores relaciones de compresión.

También se puede añadir a las conclusiones que la deficiencia en la combustión siempre estará en base al llenado de los cilindros y la carencia de oxígeno en alturas considerables con respecto al nivel del mar.

Los datos obtenidos y medidos varían con respecto a los calculados en base teórica, la diferencia influye numéricamente en el valor real de torque, potencia y trabajo mecánico, tanto el indicado como el trabajo efectivo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Agudelo, John R, & Agudelo, Andrés F. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 2: Motores Diesel. Información tecnológica, 17(5), 31-41.  
  
Burghardt, M.D., *Ingeniería Termodinámica*, 2a ed., Harla, México, 1984, p. 124-141.
- Cengel, Y. y M. Boles, *Termodinámica*, tomo II, cap. 8, 2a ed., McGraw-Hill, México, 1996.
- Manrique, J. y R. Cárdenas, *Termodinámica*, Harla, México, 1981, p. 193-213.
- Smith, J.M., H. Van Ness y M. Abbot, *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*, cap. 8, 4a ed., México, 1997.
- Van Wylen, G.J., R.E. Sonntag y C. Borgnakke, *Fundamentos de Termodinámica*, cap. 9, 2a ed., Limusa, México, 2000.
- Wark, K. y D. Richards, *Termodinámica*, cap. 15, 6a ed., McGraw-Hill, México, 2000.