



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DE IMPACTO DE LA
TEMPERATURA EN EL PROCESO DE
COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO
DE COMBUSTIBLE) EN LOS MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA.**

Autores:

Jesús L. Ortega. S.
Ángel J. Manrique T.

Urb. Yuma II, calle N.º 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (máster) – Fax: (0241) 8712394

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE
COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE) EN LOS
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores: Jesús L. Ortega. S.
C.I.: V 19.011.513
Ángel J. Manrique T.
C.I.: V 24.969.950
Tutor: Ing. Alicia Yánez de Pizzella.

San Diego, marzo de 2020.



FI-N -001-2019-3CR (TG)

Valencia, 03 de diciembre de 2019

Ciudadanos:

Ortega S, Jesús L.

19.011.513

Manrique T, Ángel J.

24.969.950

Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 02-2019 de fecha 05-09-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **ESTUDIO DE IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE) EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación de la Ing. Alicia de Pizzella C.I:4.598.880 como Tutora Académica que los asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería





REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Alicia Yánez de Pizzella, portador de la cédula de identidad N.º V 4.598.880, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Jesus Lorenzo Ortega Sequera, cédula de identidad N.º V 19.011.513, y Ángel Javier Manrique Tovar, cédula de identidad N.º V 24.969.950, titulado **ESTUDIO DE IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE) EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, marzo de 2020.

Firma

Ing. Alicia Yánez de Pizzella

C.I.: V 4.598.880

Tutor Académico



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

San Diego, marzo 2020

ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado: **ESTUDIO DE IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE) EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.** Ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

. Ing. Alicia Yánez de Pizzella

Tutor Académico

Firma

Fecha

Ing. Alicia Yánez de Pizzella

Tutor Metodológico

Firma

Fecha

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la salud y por siempre acompañarme en mis faenas día tras día, y darme las herramientas para alcanzar las metas propuestas.

Agradezco a mis padres **Ángel Manrique y Carmen Tovar** por darme la vida y acompañarme en cada una de las etapas de mi vida. A la profesora **Alicia Pizzella** por guiarnos en los momentos determinantes de nuestra formación académica y por estar siempre con la mejor disposición hacia con nosotros. A todo el grupo de **profesores** que conforman la **Escuela de Ingeniería Mecánica** por permanecer dictándonos sus conocimientos en los momentos más críticos y cuando más es requerido para una mejor sociedad. A mis **compañeros de estudios, amigos y familiares**, por formar parte del cumplimiento de esta gran meta en nuestra vida.

¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!

-Ángel Javier Manrique Tovar

AGRADECIMIENTOS

Si de agradecer se trata, por agradecer hay tanto que podría hacer unas cuantas tesis en base a este concepto, pero estos análisis pertenecen a otras ciencias a las que quienes nos hacemos llamar ingenieros tendemos a subestimar.

Comienzo por agradecer tener la oportunidad de vivir en una familia donde conocí el amor de padres, abuelos, tíos, padrinos. Aunque hubo días donde la puerta de casa se trancaba con un palo en vez de cerradura, nunca me faltó un hogar.

Desde la más terrible de mis experiencias hasta la más grata que pueda llegar a recordar me han traído a este momento.

Agradezco a mi padre por hablarme, gritarme felicitarme o exigirme ser una mejor versión y sobre todo por siempre ser ejemplo y guía en mis momentos de luz y de oscuridad. Como buen marinero nunca abandono este barco a pesar que por momentos estuviese naufragando.

A Jesús María Ortega, abuelo gracias por ser referencia musa e inspiración en las ciencias. El legado que me dejás cada día que tengo la oportunidad de compartir contigo me mantuvo y me devolvió a las aulas.

A mi madre Marlyn Saquera y a mi abuela Rosa por ser vida, sabiduría refugio y comprensión.

A mi hermano Jesús Gerardo y a mi primo Nelson Ricardo por ser compañeros, consejeros y cómplices de infancia y juventud.

A mis compañeros por esforzarnos juntos les agradezco cada hora de estudio que compartimos en especial a: Carlos Granados, Jerónimo Fernández, Giovanni Brizuela y Luis Requena.

A mis maestros y educadores por dedicar su tiempo en transmitir sus conocimientos, moral y ética como profesional también a Dayana Escobar por toda su ayuda y colaboración.

-Jesús Lorenzo Ortega Sequera

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pag
ÍNDICE DE FIGURA.....	xi
ÍNDICE DE TABLA.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICO.....	xiv
RESUMEN.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación del problema.....	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Justificación de la investigación.....	4
1.5 Limitaciones.....	4
1.6 Alcance.....	5
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes de la investigación.....	6
2.2 Bases teóricas.....	10
2.2.1 Motor.....	10
2.2.2 Motores de Combustión Interna.....	11
2.2.3 Motores de Combustión Interna más Comunes.....	14
2.2.4 Combustibles y Combustión.....	14
2.2.5 Relación Aire - Combustible.	16
2.2.6 Procesos de Combustión Teórica y Real.	17
2.2.7 Punto de Ignición.	18
2.2.8 Punto de destello.	19
2.2.9 Combustión Súbita Generalizada.	19
2.2.10 Densidad y Densidad Relativa.	19
2.2.11 Estado y Equilibrio.	20
2.2.12 Procesos y Ciclos.	22
2.2.13 Temperatura y Ley Cero de la Termodinámica.	23
2.2.14 Escalas de Temperatura.	25
2.2.15 Escala de Temperatura Internacional de 1990 (ITS-90)....	27
2.2.16 Presión.	28
2.2.17 Formas de Energía.	29
2.2.18 Consideraciones Físicas en Relación con la Energía Interna.	31
2.2.19 Energía Mecánica.....	34
2.2.20 Transferencia de Energía por Calor.....	34

2.2.21	Primera Ley de la Termodinámica.....	37
2.2.22	Balance de Energía.....	38
2.2.23	Mecanismos de Transferencia de Energía.....	39
2.2.24	Eficiencia en la Conversión de Energía.....	40
2.2.25	Segunda Ley de la Termodinámica.....	41
2.2.26	Análisis de los Ciclos de Potencia.....	42
2.2.27	Ciclo de Otto.....	43
2.3	Definición de términos básicos.....	52
III MARCO METODOLÓGICO		
3.1	Tipo de investigación.....	55
3.2	Diseño de la investigación.....	55
3.3	Nivel de la investigación.....	56
3.4	Población y muestra.....	57
3.5	Técnicas de recolección de información.....	57
3.6	Fases metodológicas.....	58
IV RESULTADOS		
4.1	Diagnóstico del proceso.	60
4.1.1	Admisión del Ciclo Otto.	61
4.1.2	Compresión del ciclo Otto.	63
4.1.3	Proceso de Expansión (combustión), ciclo Otto.	64
4.1.4	Proceso de Escape, ciclo Otto.	67
4.2	Analizar e identificar las variables involucradas en el proceso de combustión.	69
4.2.1	Variables Según la Energía.	70
4.3	Determinar las Causas de la Pérdida de Potencia y la Disminución de la Eficiencia en el Proceso de Combustión Interna.	73
4.4	Evaluar el impacto final en la potencia generada por la combustión, la eficiencia de este y el consumo de combustible, usando métodos analíticos termodinámicos en el proceso de combustión.	87
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES		100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		101
ANEXOS		
A	Propiedades de gas ideal del aire.	103
B	Código de animación y cálculos termodinámicos con respecto al ángulo del cigüeñal de un motor cuatro tiempos.	104
APÉNDICES		
A	Código de cálculos para ciclo otto ideal.	108

B	Código de cálculos para ciclo otto ideal.	110
C	Cálculos del ciclo otto.	111
D	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 600 [kj/kg].	129
E	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 800 [kj/kg].	131
F	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 1000 [kj/kg]	133
G	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 1200 [kj/kg]	135
H	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 1400 [kj/kg]	137
I	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 1600 [kj/kg]	139
J	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 1800 [kj/kg]	141
K	Valores de un ciclo otto ideal para un poder calorífico de 2000 [kj/kg]	143
L	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 600 [kj/kg]...	145
M	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 800 [kj/kg]...	147
N	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 1000 [kj/kg].	149
O	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 1200 [kj/kg].	151
P	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 1400 [kj/kg].	153
Q	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 1600 [kj/kg].	155
R	Valores de un ciclo otto real para un poder calorífico de 1800 [kj/kg].	157

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pp.
1 Carrera de pistón.	11
2 Proceso de destilación.	15
3 Un proceso de combustión es completo si todos los componentes inflamables del combustible se queman por completo.	18
4 Temperaturas de ignición de distintos combustibles.	19
5 Densidades relativas de algunas sustancias a 0° C.	20
6 Un sistema en dos estados diferentes.	21
7 Un proceso entre dos estados 1 y 2 y la trayectoria del proceso.	22
8 Procesos de compresión con y sin cuasiequilibrio.	23
9 Dos cuerpos que alcanzan el equilibrio térmico después de ser puestos en contacto dentro de un recinto aislado.....	24
10 Comparación de escalas de temperatura.....	27
11 Comparación de magnitudes de varias unidades de temperatura.....	28
12 Cambio de la energía macroscópica de un objeto al cambia su velocidad y elevación.	30
13 Cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial.	39
14 La salida neta de trabajo de un ciclo es equivalente al producto de la presión media efectiva por el volumen de desplazamiento.	44
15 Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.	44
16 Diagrama esquemático de un motor recíprocante de dos tiempos.	46
17 Diagrama T-s para el ciclo de Otto.	47
18 Bujía e inyector de combustible.	49
19 Diagrama P-v para el ciclo Diesel ideal.	50
20 Diagramas T-s para el ciclo Diesel ideal.	50
21 Motor de ciclo Otto.	60
22 Grafica de trabajo ideal del ciclo Otto.	61
23 Proceso de admisión, ciclo Otto.	61
24 Etapa de admisión de un motor de cuatro tiempos.	62
25 Proceso de compresión, ciclo Otto.	63
26 Etapa de compresión de un motor de cuatro tiempos.	63
27 Proceso de expansión (combustión), ciclo Otto.	65
28 Etapa de expansión de un motor de cuatro tiempos.	65
29 Proceso de escape, ciclo Otto.....	67
30 Etapa de escape de un motor de cuatro tiempos.	68
31 Distribución de la energía calórica del proceso de combustión..	69
32 Energía en la combustión.	70

33	Programa simulador del proceso.	70
34	Animación ciclo Otto con propiedades variables.	90

LISTA DE TABLAS

TABLAS	Pp.
1 Proceso de Admisión, ciclo Otto.....	62
2 Proceso de compresión, ciclo Otto.....	63
3 Proceso de expansión (combustión) ciclo Otto.....	65
4 Proceso de escape, ciclo Otto.....	67
5 Características para el cálculo del Ciclo Otto Ideal.....	71
6 Propiedades físicas de un motor de combustión interna.....	72
7 Cálculos del ciclo Otto para la fase de admisión.....	73
8 Cálculos del ciclo Otto para la fase de compresión.....	74
9 Cálculos del ciclo Otto para la fase de expansión.....	75
10 Cálculos del ciclo Otto para la fase de escape.....	76
11 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 600 [kJ/kg].....	78
12 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 800 [kJ/kg].....	78
13 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1000 [kJ/kg].....	79
14 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1200 [kJ/kg].....	80
15 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1400 [kJ/kg].....	80
16 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1600 [kJ/kg].....	81
17 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1800 [kJ/kg].....	81
18 Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 2000 [kJ/kg].....	82
19 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 600 [kJ/kg].....	83
20 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 800 [kJ/kg].....	84
21 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1000 [kJ/kg].....	84
22 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1200 [kJ/kg].....	85
23 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1400 [kJ/kg].....	85
24 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1600 [kJ/kg].....	86
25 Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1800 [kJ/kg].....	87

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA	Pp.
1 Presión - Volumen.....	88
2 Presión - Angulo del cigüeñal.....	88
3 Temperatura - Angulo del cigüeñal.....	89
4 Temperatura - Entropía.....	89
5 Temperatura de compresión - Relación de compresión.....	90
6 Temperatura de combustión - Relación de compresión.....	91
7 Trabajo neto - Relación de compresión.....	92
8 Presión Media Efectiva- Relación de compresión.....	93
9 Eficiencia térmica ideal - Relación de compresión.....	93
10 Temperatura de compresión - Relación de compresión (aproximación real)	94
11 Temperatura de combustión - Relación de compresión (aproximación real)	95
12 Trabajo neto - Relación de compresión (aproximación real).....	95
13 Presión Media Efectiva - Relación de compresión (aproximación real).....	96
14 Eficiencia térmica - Relación de compresión.....	96
15 Comparación de Eficiencias térmicas - Relación de compresión.....	97



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN (EFICIENCIA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE) EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Autores: Jesús Ortega, Ángel Manrique.

Tutor: Ing. Alicia Yáñez de Pizzella

Fecha: marzo de 2020.

RESUMEN INFORMATIVO

El presente trabajo de tuvo como objetivo el estudio del impacto de la temperatura en el proceso de combustión en los motores de combustión interna. Se analizaron las variables involucradas y los resultados del proceso obteniendo registros de temperaturas utilizando un programa de análisis matemático - termodinámico (EES) para la comparación de los resultados, obteniendo la conclusión de que a medida que aumenta la energía inicial al comienzo del ciclo la eficiencia disminuye. El análisis del proceso de combustión se realizó mediante la aplicación de principios físicos, termodinámicos, así como todos los estudios capaces de generar referencias satisfactorias del análisis y consideración de las variables presentes en el proceso, teniendo en función la temperatura. Este proyecto metodológicamente fue un proyecto factible sustentado en un diseño documental, con un nivel descriptivo.

Descriptor: Eficiencia, Temperatura, Motor, Combustión interna, Análisis, Registro, Comparación.

INTRODUCCIÓN

Desde que se inventaron los primeros motores de combustión, los grandes fabricantes y diseñadores han realizado grandes esfuerzos para desarrollar prototipos capaces de brindar resultados satisfactorios tanto en el campo de aplicaciones destinadas, como también a los diseñadores. Uno de los motores en que se ha hecho más auge, es el motor de combustión interna, debido a su amplio rango de aplicación tanto a nivel industrial como es la sociedad en general. En los mencionados motores se busca un funcionamiento óptimo y eficaz, por lo que se deben tomar en cuenta las variables físicas, termodinámicas, químicas y de toda índole involucrada y responsable del desarrollo satisfactorio del sistema. El motor es un elemento vital, por lo que se puede considerar como corazón del sistema, tomando como ejemplo el funcionamiento del cuerpo humano. El cual es responsable de generar la energía mecánica al sistema en el cual esté presente.

La temperatura en el proceso de combustión de los mencionados motores es un punto muy importante, el cual resulta necesario tratar, investigar y analizar de forma particular. El deterioro de los motores de combustión interna como consecuencia de una combustión incompleta o inestable es algo desfavorable tanto para el sistema en el cual esta empleada, tanto para el medio ambiente en general. Esto se debe en gran parte por las condiciones del proceso de combustión, en las que se destaca una temperatura no óptima para su ejecución, entre otros factores involucrados.

El propósito de esta investigación es el análisis del proceso de combustión, evaluando el proceso en distintas temperaturas, con el fin de obtener resultados aprovechables como referencia de temperatura garantizando de que el proceso de combustión se ejecuta en condiciones más óptimas, para lograr un mayor rendimiento y eficiencia de los motores de combustión interna. Las herramientas utilizadas para la obtención de los resultados mencionados son todos los criterios y leyes científicas, involucrados y capaces de arrojar resultados confiables, entre estas destacan: las leyes

termodinámicas, estudios de reacciones químicas, leyes físicas, estudios de combustión, entre otros criterios, métodos y requeridos y aprovechables.

El uso de estas herramientas tiene la ventaja de ofrecer más información en el desarrollo del proceso de combustión en motores de combustión interna, además, permite un análisis aproximado del efecto presente y así como referencias de temperaturas óptimas, y temperaturas desfavorables para garantizar la mayor eficiencia del proceso de combustión.

Para lograr este propósito, la investigación se desarrolla a través de la siguiente estructura:

El **Capítulo I**, se especifica el problema y objetivos de la investigación, así como la formulación, justificación y limitaciones de esta. Su objetivo es describir el objeto de estudio.

El **Capítulo II**, representa el marco teórico que contiene los antecedentes de la investigación, los cuales son estudios antes realizados que guardan estrecha relación con el perfil metodológico al trabajo de investigación. También se establecen las bases teóricas sobre la cual se soporta este trabajo y se definen los términos básicos que se manejan en el mismo.

El **Capítulo III**, se especifica lo referente al marco metodológico, estableciendo el tipo y diseño de la investigación, definiendo la población y muestra, detallando cada una de las fases, las estrategias a utilizar, así como los recursos con los que se contara en cada periodo durante el desarrollo de las actividades.

En el **Capítulo IV** se presentan los resultados que serán necesarios para llevar a cabo el acto investigativo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En este capítulo se explica la razón del estudio a realizar en este trabajo de grado, los objetivos planteados, así como la justificación de la investigación, sus limitaciones y alcances, las cuales condicionan el presente proyecto.

1.1. Planteamiento del problema.

A nivel industrial y en la sociedad en general el término “motor”, es muy conocido ya sea por estar involucrado o requerir del funcionamiento de este bien sea de manera directa como indirecta. Un motor es la parte sistemática de una máquina capaz de hacer funcionar el sistema en el que se emplea. Los motores de combustión interna; son motores térmicos en los cuales se produce una reacción del fluido suministrado al mismo, transformando su energía química en energía térmica, a partir de la cual se obtiene energía mecánica.

Para lograr la combustión interna en motores (la combustión es la reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama; los materiales oxidantes más comunes utilizados en procesos de combustión son: “gasolina, gas natural, carbón, papel, madera”), es necesario acondicionar las propiedades del fluido que se suministra al motor. Dicho fluido es una mezcla en una proporción determinada, de oxígeno y combustible. En los motores de combustión interna, la combustión es un proceso en el cual basa su funcionamiento en un ciclo termodinámico. Se conoce como ciclo termodinámico a cualquier serie o conjunto termodinámicos tales que, al transcurso de todos ellos, el sistema regresa a su estado inicial (ciclo ideal); es decir, que la variación de las magnitudes termodinámicas propias del sistema se anula. Todo proceso termodinámico está sujeto a una serie de variables o propiedades involucradas para la ejecución de dicho proceso. Desde la invención del motor de combustión interna, se ha venido trabajando en función de hacer del proceso térmico en el cual operan los motores de combustión interna un ciclo ideal.

Para la obtención de un ciclo ideal es necesario contar con un serie de parámetros o variables como se mencionó anteriormente, estas variables son: la temperatura del ambiente interno que sería el lugar donde ocurre la combustión (se conoce como cámara de combustión), la calidad de la mezcla de fluidos que se logra ingresar a la cámara de combustión, las condiciones de temperatura que presente al momento de la combustión el ambiente externo (sería el ambiente externo todos los elementos conectados o en contacto con la cámara de combustión), también se requiere de un perfecto acople de funcionamiento del sistema mecánico involucrado antes y después del proceso de combustión.

Indagando un poco en ambiente de ingeniería mecánica específicamente en termodinámica, se determina que lograr un ciclo ideal en un proceso térmico es algo que no se ha logrado con una exactitud persistente. Esto se debe a que en un ciclo ideal no se consideran los aspectos negativos de las variables mencionadas.

Desde los inicios del motor de combustión interna, se han enfrentado problemas en las variables involucradas; una de las primeras variables fue el funcionamiento mecánico involucrado en el proceso de combustión, debido a la falta de sincronización en el proceso. El siguiente punto fue la calidad de la mezcla del fluido ingresado al motor para su combustión, esto se debía a una proporción de oxígeno y combustible incorrecta. Otro punto fue las condiciones de operación que se presenta en un proceso de combustión, una de las causas más directas y la base de este proyecto de grado es la temperatura presente en los diferentes sectores del motor, como resultado de la disipación de calor que se genera en el proceso de combustión.

Lo antes mencionado es lo que da lugar a un término muy conocido e importante, como lo es la “eficiencia”, la eficiencia es el resultado de todo proceso y está ligado a un buen desempeño del proceso. En un proceso termodinámico la eficiencia es uno de los parámetros más importantes, ya que sería lo que determine la calidad y resultado de este.

La disminución de la eficiencia en un proceso termodinámico se debe a la aparición de las variables mencionadas, las cuales interfieren en el proceso. En un

proceso termodinámico se muestra la transformación de energía o manipulación de esta, por ende, la similitud en las magnitudes de energía de entrada y energía de salida es lo que se conoce como eficiencia. En todo proceso termodinámico la temperatura tiene un rol muy importante, ya que es una variable que puede influir tanto positivamente como de forma negativa dentro del proceso, es por esto por lo que saber o poder aproximar un proceso en función de la temperatura de operación es vital para un resultado más positivo o para mejorar los parámetros para hacer el proceso más eficiente.

En este trabajo de grado, se pretende registrar en función de la temperatura todos los parámetros o datos arrojados en un proceso de combustión en motores de combustión interna. Estos datos o parámetros son: eficiencia del proceso, consumo de combustible no aprovechado y energía suministrada. Con la finalidad de poder tener en forma de datos los resultados del proceso según las condiciones de operación.

1.2. Formulación del problema.

¿De qué manera se refleja el impacto de la temperatura en el proceso de combustión (eficiencia y consumo de combustible) en los motores de combustión interna permitirá obtener resultados satisfactorios o aprovechables del proceso?

1.3. Objetivos de la investigación.

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar y cuantificar el impacto de la temperatura en el proceso de combustión (eficiencia y consumo de combustible) en los motores de combustión interna.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Diagnóstico del proceso.
2. Analizar e identificar las variables involucradas en el proceso de combustión.
3. Determinar las causas de la pérdida de potencia y la disminución de la eficiencia en el proceso de combustión interna.
4. Evaluar el impacto final en la potencia generada por la combustión, la eficiencia de este y el consumo de combustible, usando métodos analíticos termodinámicos en el proceso de combustión.

1.4. Justificación de la investigación.

El motor de combustión interna es uno de los motores más eficaces, ya que logran el trabajo requerido por una cantidad prolongada de tiempo, aun así, no es el más eficiente de los motores en el mercado obteniendo en mejor el mejor de los casos una eficiencia de 20 a un 25%, pero si es el más desarrollado a nivel industrial y tiene la mayor infraestructura de producción y distribución de su combustible. Lo cual lleva a reconocer que el motor de combustión interna no va a ser desarticulado por un largo tiempo, así que es necesario estudiar a fondo su funcionamiento y mejorar su rendimiento y eficiencia.

Pon ende el análisis de esta investigación podría arrojar mejoras en la eficiencia de los motores de combustión interna y traerían un beneficio económico, reduciendo la cantidad de combustible necesaria para el tiempo o potencia de funcionamiento de un motor de combustión interna, así también mejorando su vida útil ya que un motor de combustión interna más eficiente tendría menores exigencias de funcionamiento, esta mejora en el proceso de combustión también puede dar beneficios ambientales reduciendo las emisiones de dióxido de carbono que ya por hoy en día se conoce que los motores de combustión interna y su amplio uso son uno de los mayores generadores de dióxido de carbono, lo cual está demostrado que es un gas que contribuye al efecto invernadero aumentando así la aceleración del calentamiento global.

1.5. Limitaciones.

Durante la investigación se presentaron las siguientes limitantes:

- La información técnica utilizada será la obtenida en el ámbito comercial específicamente relacionada al área automotriz del mercado venezolano (catálogos de fabricantes).
- Este limitado por los diseños de motores de combustión interna existentes.
- El intercambio de energía calorífica hacia el ambiente, es un punto de estudio que amerita una investigación independiente.

- El poder calorífico de entrada hacia el sistema, representa un valor que debe ser estudiado a fondo en una investigación enfocada en sí misma.
- El tiempo para el desarrollo de esta investigación está limitado a la duración de dos semestres académico, dentro de la programación del trabajo de grado. Por lo cual no se pudiera hacer un seguimiento en el tiempo de posibles técnicas aplicables para lograr los objetivos de esta investigación.

1.6. Alcance.

El alcance de este trabajo de grado tiene como objetivo principal reflejar el impacto de la temperatura en el proceso de combustión en los motores de combustión interna.

Por otra parte, aplicar principios científicos ligados a la termodinámica y la ingeniería mecánica, con la finalidad de obtener resultados reales y confiable

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico representa la “explicación” teórica para comprender la naturaleza del fenómeno investigado y analizado, o lo que es lo mismo, sustentar teóricamente el estudio. Constituye un aspecto de mucha importancia dentro de la investigación, donde se crea un espacio en el que se apoya el investigador para comprender las situaciones del problema y como solucionarlo. En este punto de la investigación su busca poder establecer los diferentes puntos y aspectos para tener en cuenta durante dicha investigación, mediante la definición de distintos componentes, faces o etapas relevantes. Así como los métodos involucrados y viables para un resultado satisfactorio de la investigación. Este marco comprende los antecedentes, las bases teóricas y la definición de términos básicos.

2.1. Antecedentes de la investigación.

Los antecedentes de la investigación se refieren a la revisión de trabajos previos sobre el tema en estudio. En este punto se pueden contemplar, analizar y familiarizar, investigaciones previas relacionadas de manera directa como indirecta con el tema de investigación seleccionado.

Figueroa, S. y Villamar, C. (2015). Cuyo trabajo de grado titulado: **“El proceso de combustión en motores de combustión interna”** presentado en la Universidad de los Andes, como requerimiento para optar al título de Posgrado en Motores de Combustión, en el cual el objetivo general es el estudio de la mezcla de combustible aire en motores de combustión interna. Metodológicamente es una investigación documental y de campo donde se aplicaron los principios físicos, termodinámicos y químicos para determinar las características y comportamiento de la mezcla de combustible aire utilizado para la combustión en motores de combustión interna. Se explicaron las fases y procedimientos los cuales consisten en: Primero realizar una recopilación de información, para su posterior análisis y mediante la implementación

de las herramientas mencionadas poder llegar a una conclusión satisfactoria. Obteniendo entre los resultados aprovechables para esta investigación lo siguiente: procesos analíticos indican que la variación del rendimiento durante el trabajo del motor es debido a la influencia de factores estáticos del sistema de admisión y a los efectos dinámicos del movimiento del aire. Por otro lado, la eficiencia de la combustión está afectada por: el aprovechamiento adecuado de la energía contenida en el combustible.

El modelo de dos zonas empleado para el estudio de propagación de llama en MECH divide el espacio de la cámara de combustión en una zona de mezcla fresca y otra de productos quemados, separadas por un delgado frente de llama, mismo que ocupa un volumen despreciable, con la misma presión a ambos lados y temperatura uniforme (Hoult, 1985). Con el incremento de la masa quemada la temperatura de los gases en la cámara de combustión aumenta y se observa la propagación del frente de llama. La velocidad de avance del frente depende de: las propiedades de transporte del fluido de trabajo, las características de difusión de la mezcla fresca y las características cinéticas de la reacción química (Salvi, 1984; Kuo, 1986).

El precalentamiento de la mezcla contribuye con el aumento de la velocidad de propagación de llama ampliando los límites de inflamabilidad, acelerando la velocidad de la reacción química. El objetivo de estudios experimentales y modelos de simulación en MECH (Kono y col., 1984; Kono y col., 1982; Roder y Brohmer, 1990) es obtener resultados para entender mejor cuales son los factores y como ellos afectan el proceso de liberación de energía.

Algunos de estos estudios predicen la razón de masa quemada utilizando modelos cuasi dimensionales, valores que luego son validados empleando datos experimentales de presión en el cilindro. En otros estudios investigan la influencia que tienen los gases residuales sobre la velocidad de quemado y el espesor del frente de llama.

Con el incremento de la masa quemada la temperatura de los gases en la cámara de combustión aumenta. El precalentamiento de la mezcla contribuye con el aumento

de la velocidad de propagación de llama ampliando los límites de inflamabilidad, acelerando la velocidad de la reacción química. El objetivo de estudios experimentales y modelos de simulación es obtener resultados para entender mejor cuales son los factores y como ellos afectan el proceso de liberación de energía. Se sabe según estudios de la gran cantidad de factores que influyen en el desarrollo del proceso de combustión. Por lo tanto, la dificultad para estudiar la propagación del frente de llama empleando métodos teóricos y técnicas experimentales consiste en buscar la manera óptima de simular mediante ecuaciones el efecto de los agentes físicos que actúan sobre el proceso de combustión, por ejemplo: las particularidades del sistema de encendido, la geometría del espacio de combustión, el fenómeno de transferencia de calor y la preparación de la mezcla combustible aire.

De igual manera, Arcos, C. Gallegos, B. (2014), quienes realizaron el trabajo de grado titulado: **“Implementación de un banco didáctico para el análisis térmico y flujométrico de un motor v6 para la escuela de ingeniería automotriz”** desarrollado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, previa a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, la cual tuvo como objetivo general la implementación de un banco didáctico para el análisis térmico y flujométrico de un motor v6 para la escuela de ingeniería automotriz. La estructura metodológica está constituida por una investigación documental y de campo donde se desarrolló un análisis térmico y posteriormente se implementó un banco didáctico para la simulación, enfocado en los motores de combustión interna tipo v6. En este trabajo de grado se encuentran como resultados aprovechables los siguientes: parte de la energía térmica del combustible quemado en un motor es transformado en energía mecánica. La parte restante se pierde por circunstancias diferentes como por el agua de refrigeración, que por medio del radiador se envía a la atmósfera, las distintas partes del motor transmiten el resto por la radiación a la atmósfera. La cantidad de calor equivale al trabajo realizado para vencer las resistencias pasivas también se pierde a través de estas tres vías fundamentales de dispersión. Prácticamente sólo del 25 al 40% del calor producido se transforma en trabajo efectivo y del 60 al 75% se pierde por varias razones.

La mayoría de los motores utilizan menos que 25% de la energía térmica producida para conducir el vehículo. Un 35% del calor de combustión sale a través del escape, y otro 10% se pierde por fricción interna. El 30% del calor de motor restante debe ser evacuado por el sistema de refrigeración. Las temperaturas de combustión pueden alcanzar 1300°C ($\pm 2400^{\circ}\text{F}$) y más, pero se ven estabilizadas a más o menos 10% de este valor por el sistema de refrigeración.

Por último, Amaya, O. (2017), quien realizó el trabajo de grado titulado: **“Generación y seguimiento de estrategias de operación para el ahorro de combustible y disminución de contaminantes en motores fuel injection”**, en la Universidad Autónoma de Nuevo León, en opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en control automático, la estructura del trabajo de grado está constituida por una investigación analítica y un modelo de campo, contando como objetivo principal de esta tesis es la generar estrategias de control de velocidad para motores FI que puedan ayudar a la disminución de consumo de energía y por ende contaminantes, principalmente NOx.

Utilizando controladores basados en técnicas no lineales, tales como geometría diferencial, y especialmente aprovechando la propiedad de planitud la cual conduce a un interesante punto de vista de diseño de control y planificación de trayectorias. Obteniendo como resultado resaltantes: se observó cómo es que la adición de la dinámica de la temperatura del múltiple afecta considerablemente el desempeño del motor, alterando la velocidad del mismo, esto se puede relacionar cuando por ejemplo encendemos el motor en un día frío, la velocidad decaerá de tal manera que se volverá inestable hasta que el motor y el múltiple alcance una temperatura ideal, esto provoca combustiones incompletas por tanto las emisiones de hidrocarburos no quemados se incrementan, caso contrario cuando se enciende el motor en un día cálido, se observa cómo es que este no requiere del previo calentamiento e incluso este se revolucionará de manera excesiva a la hora del encendido.

2.2. Bases teóricas.

De acuerdo con Arias, F. (2006), “las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado”. Asimismo, la correcta realización de las bases teóricas permitirá obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

2.2.1. Motor.

Un motor es la parte sistemática de una máquina capaz de hacer funcionar el sistema, transformando algún tipo de energía (eléctrica, de combustibles fósiles, etc.), en energía mecánica capaz de realizar un trabajo. En los automóviles este efecto es una fuerza que produce el movimiento. Existen diversos tipos, siendo de los más comunes los siguientes:

- Motores térmicos, cuando el trabajo se obtiene a partir de energía calórica.
- Motores de combustión interna, son motores térmicos en los cuales se produce una combustión del fluido del motor, transformando su energía química en energía térmica, a partir de la cual se obtiene energía mecánica. El fluido motor antes de iniciar la combustión es una mezcla de un comburente (como el aire) y un combustible, como los derivados del petróleo y gasolina, los del gas natural o los biocombustibles.
- Motores de combustión externa, son motores térmicos en los cuales se produce una combustión en un fluido distinto al fluido motor. El fluido motor alcanza un estado térmico de mayor fuerza posible de llevar es mediante la transmisión de energía a través de una pared.
- Motores eléctricos, cuando el trabajo se obtiene a partir de una corriente eléctrica.

En los aerogeneradores, las centrales hidroeléctricas o los reactores nucleares también se transforman algún tipo de energía en otro. Sin embargo, la palabra motor se reserva para los casos en los cuales el resultado inmediato es energía mecánica.

2.2.2. Motores de Combustión Interna.

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al interior. El movimiento del pistón va del PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior), durante el cual se modifica el volumen que existe en la cámara de combustión como se muestra en la figura 1. La cara exterior del pistón está unida por una biela al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

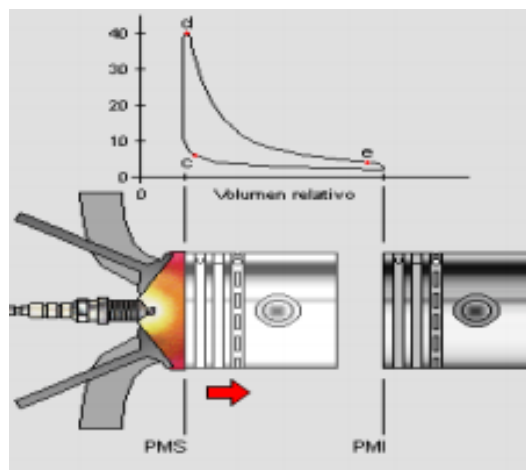


Figura 1: Carrera de pistón.

Fuente: Cengel Y., termodinámica.

La fricción en los motores provoca una importante pérdida de energía y un considerable desgaste, por lo que hay que proponer soluciones para evitar en lo posible esa fricción o conseguir su disminución, lo que se consigue interponiendo una película de lubricante entre las piezas en movimiento del motor.

Los procesos de intercambio de gases en un motor de combustión interna juegan un papel muy importante debido a que de ellos depende el correcto funcionamiento del motor, a continuación, se presentan a grandes rasgos conceptos que ayudan a su entendimiento.

- **Eficiencia volumétrica.**

El filtro de aire, el carburador, la válvula de la garganta, el múltiple de entrada, el puerto de entrada, y su válvula son elementos que restringen la cantidad de aire que un motor de un desplazamiento dado puede inducir. La eficiencia volumétrica es utilizada como una medida general de la efectividad de un ciclo de cuatro tiempos, y sus sistemas de admisión y exhaustión, como dispositivos de bombeo.

$$\eta V = \frac{2ma}{\rho a V d N} \quad (\text{Ec. 1})$$

La densidad del aire ρa puede evaluarse en condiciones atmosféricas; ηV es entonces la eficiencia volumétrica general o puede evaluarse en condiciones de puertos de entrada, (múltiple de entrada), en cuyo caso ηV es entonces la medida del desempeño de bombeo del cilindro, puerto de admisión, y válvula solamente. La eficiencia volumétrica es afectada por las siguientes variables en el combustible, diseño del motor y variables operativas.

1. Temperatura de la mezcla.
2. Relación de presiones de exhaustión y admisión.
3. Velocidad del motor.
4. Diseño de los puertos y múltiple de admisión.
5. Geometría de las válvulas de admisión y salida, tamaño de estas y temporizado.

Los efectos de varias de las variables anteriores, es esencialmente cuasiestático en su naturaleza, es decir, su impacto es ya sea independiente de la velocidad o puede describirse adecuadamente en términos de la velocidad media del motor. Sin embargo, muchas de estas variables tienen efectos que dependen del flujo turbulento y fenómenos de presión que acompañan la naturaleza variable de los procesos de intercambio de gases.

- **Proceso de intercambio de gases.**

El flujo de masa de aire que entra a los pistones se relaciona con variables difíciles de modelar, entre ellas están la presión en el múltiple de entrada, la velocidad

del motor, y el desplazamiento del motor, la siguiente es una ecuación que describe este proceso en condiciones estables:

$$m_{ao} = \frac{\eta v V d P \omega}{4 \phi R m T} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

Rm : Es una función relacionada a constantes y temperaturas de los gases en el múltiple.

Vd : Desplazamiento del motor.

ω : Velocidad del motor.

- **Proceso de admisión y exhaustión en un motor SI.**

En un motor SI, el sistema de admisión típicamente consiste en un filtro de aire, un carburador y una garganta, o una garganta e inyector de combustible, o garganta con inyectores individuales en cada puerto de admisión, y un múltiple de entrada. Durante los procesos de inducción, las pérdidas de presión ocurren según la mezcla pasa por cada uno de estos componentes, hay caída de presión adicional a través del puerto y la válvula de admisión. El sistema de salida típicamente consiste en un múltiple de salida, una tubería de escape de convertidor catalítico para el control de las emisiones y un mofle o silenciador. Los flujos pueden ser analizados en un régimen-cuasi estático. La caída de presión en el sistema de admisión depende de la velocidad del motor, la resistencia al flujo de los elementos en el sistema, el área transversal por la que se mueve la carga y la densidad de la carga. Es prácticamente general el extender el tiempo de apertura de las válvulas de admisión y salida un intervalo de tiempo de manera que el intercambio de gases sea más eficiente. El proceso de exhaustión, usualmente inicia

2.2.3. Motores de Combustión Interna más Comunes.

Las diferentes variantes de los dos ciclos, tanto en diésel como en gasolina, tienen cada uno su ámbito de aplicación.

- 2T gasolina: tuvo gran aplicación en las motocicletas, motores de ultraligeros (ULM) y motores marinos fuera de borda hasta una cierta cilindrada, habiendo perdido mucho terreno en este campo por las normas anticontaminación. Actualmente siguen en uso para las cilindradas mínimas de ciclomotores y Scooters de 50 c.c., o un poco más grandes de motocicletas de competición y motocross, pequeños motores de motosierras y otras máquinas portátiles ligeras, y pequeños grupos electrógenos.
- 4T gasolina: domina en las aplicaciones en motocicletas de todas las cilindradas, automóviles, aviación deportiva y fuera borda.
- 2T diésel: domina en las aplicaciones navales de gran potencia, hasta 100 000 CV hoy día, y tracción ferroviaria. En su momento de auge se usó en aviación con cierto éxito.
- 4T diésel: domina en el transporte terrestre, automóviles y aplicaciones navales hasta una cierta potencia. Empieza a aparecer en la aviación deportiva.

2.2.4. Combustibles y Combustión.

Cualquier material que pueda quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible o carburante. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrogeno y carbono, y en gran parte son obtenidos por destilación de petróleo crudo. Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, como lo refleja tener carbón (el cual se encuentra en estado sólido), la gasolina (estado líquido) y gas natural (en forma gaseosa).

El principal constituyente del carbón mineral es el carbono; también contiene cantidades variables de oxígeno, hidrogeno, nitrógeno, azufre, humedad y ceniza. Pero a pesar de todo lo mencionado sobre el carbón, es difícil realizar un análisis de la masa exacta del carbón mineral puesto que su composición varía dependiendo de diversos

factores geográficos, y propiamente teniendo noción básica del proceso de combustión en motores de combustión interna se sabe que no es factible aplicar material carburante en estado sólido al proceso. Los hidrocarburos más volátiles se vaporizan primero, formando lo que se conoce como gasolina. Los combustibles menos volátiles que se obtienen durante la destilación son el queroseno, el diésel y el combustóleo. La composición de un combustible particular depende de la fuente de la fuente de petróleo crudo, así como la refinería.

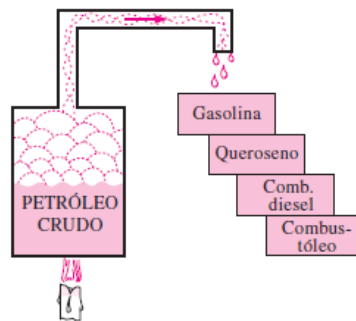


Figura 2: Proceso de destilación.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Aunque los combustibles hidrocarburos líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia suelen considerarse como un solo hidrocarburo. Por ejemplo, la gasolina se trata como octano C_8H_{18} , y el diésel como dodecano, $C_{12}H_{26}$. Otro hidrocarburo líquido común es el alcohol metílico, CH_3OH , al que también se le llama metanol y se usa en algunas mezclas de gasolina. El gas natural (combustible hidrocarburo gaseoso), que es una mezcla de metano y cantidades más pequeñas de otros gases, algunas veces se trata como metano, CH_4 , por simplicidad.

El gas natural es producido en pozos de gas o pozos de petróleo ricos en gas natural. Principalmente está compuesto de metano, pero también contiene pequeñas cantidades de etano, propano, hidrógeno, helio, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfato de hidrógeno y vapor de agua. Para los vehículos, se almacena ya sea en la fase gaseosa a presiones de 150 a 250 atm como CNG (gas natural comprimido, por sus siglas en

inglés) o en la fase líquida a 162°C como LNG (gas natural licuado, por sus siglas en inglés). Casi un millón de vehículos en el mundo, principalmente autobuses, operan con gas natural. El gas licuado de petróleo (LPG, por sus siglas en inglés) es un subproducto del procesamiento del gas natural o de la refinación del petróleo crudo. Consiste principalmente de propano (casi 90 por ciento) y por lo tanto el LPG generalmente se conoce como propano. Sin embargo, también contiene cantidades variables de butano, propileno y butileno. El propano por lo general se emplea en flotillas de vehículos, taxis, autobuses escolares y autos particulares.

El etanol se obtiene del maíz, granos y desechos orgánicos. El metanol es producido principalmente a partir del gas natural, pero también puede obtenerse a partir del carbón y de biomasa. Ambos alcoholes generalmente se emplean como aditivos en gasolina oxigenada y combustibles reformulados para reducir la contaminación del aire.

Los vehículos son una fuente importante de contaminantes del aire, tales como óxidos nítricos, monóxido de carbono e hidrocarburos, así como el dióxido de carbono (gas del efecto invernadero), y por ende existe un creciente cambio en la industria del transporte para sustituir los combustibles tradicionales basados en petróleo (como la gasolina y el combustible diésel) por combustibles alternativos de quema limpia más amigables con el ambiente, como el gas natural, alcoholes (etanol y metanol), gas licuado de petróleo (LPG) e hidrógeno. El uso de autos eléctricos también está al alza.

2.2.5. Relación Aire - Combustible.

Una cantidad utilizada frecuentemente en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire es la relación aire-combustible, AC. Suele expresarse en una base de masa y se define como la relación entre la masa del aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Es decir:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (\text{Ec. 3})$$

La masa m de una sustancia se relaciona con el número de moles N por medio de la relación $m = NM$, donde M es la masa molar.

2.2.6. Procesos de Combustión Teórica y Real.

Muchas veces es muy útil estudiar la ignición de un combustible con la suposición de que la combustión es completa. Un proceso de combustión está completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO_2 . Esto es, si todos los componentes combustibles de un combustible se queman totalmente durante un proceso de combustión completa. Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes no quemados, como C, H_2 , CO, o bien, OH.

El oxígeno insuficiente es una razón obvia para la combustión incompleta, pero no la única. La combustión incompleta sucede incluso cuando en la cámara de combustión hay más oxígeno del necesario para la combustión completa. Esto puede atribuirse a la mezcla insuficiente en la cámara de combustión durante el limitado tiempo en que el oxígeno y el combustible quedan en contacto. Otra causa de combustión incompleta es la disociación, la cual se vuelve importante a elevadas temperaturas.

El oxígeno es atraído con más fuerza hacia el hidrógeno que hacia el carbono. Por consiguiente, el hidrógeno en el combustible normalmente se quema por completo, formando H_2O , aun cuando exista menos oxígeno del necesario para la combustión completa. No obstante, una parte del carbono termina como CO o como simples partículas C (hollín) en los productos.

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente el oxígeno sin combinar el producto de los gases. El aire teórico también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta o aire 100 por ciento teórico. Un proceso de combustión

con menos cantidad teórica de aire está condenado a ser incompleto. El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como combustión estequiométrica o teórica de ese combustible. (ver figura 3)

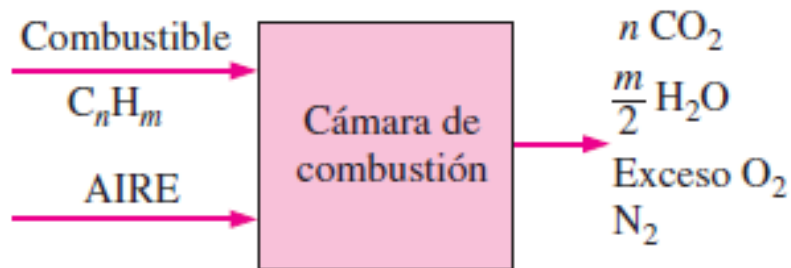


Figura 3: Un proceso de combustión es completo si todos los componentes inflamables del combustible se queman por completo.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

2.2.7. Punto de Ignición.

Se denomina punto de ignición, punto de inflamación o punto de incendio de una materia combustible al conjunto de condiciones físicas (presión, temperatura, etc.) necesarias para que la sustancia empiece a arder al acercarse una fuente de calor (fuente de ignición) y se mantenga la llama una vez retirada la fuente de calor externa.

Si las condiciones del entorno son las normales (atmósfera de composición normal, presión atmosférica normal, 1013 kPa) se denomina temperatura de ignición de una materia combustible a la temperatura mínima necesaria para que la materia empiece a arder y la llama se mantenga sin necesidad de añadir calor exterior. Una condición fundamental, es que la fuente de calor externa tenga una temperatura más alta que la de ignición de la sustancia.

Combustible	Temperatura (°C)
Gas natural de alto contenido en metano	482 – 632
Butano (comercial)	405
Etanol	360
Gasolina	456
Hidrógeno	500
Madera blanda	310 – 350
Madera dura	313 – 393
Propano (comercial)	493 – 604

Figura 4: Temperaturas de ignición de distintos combustibles.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

2.2.8. Punto de destello.

El punto de destello (en inglés flash point) sería aquél en que los gases producidos por el combustible empiezan a arder, pero si se retira la fuente de calor de ignición, se apagan de nuevo. La temperatura en ese punto suele ser unos 10 °C más baja que la de ignición.

2.2.9. Combustión Súbita Generalizada.

Existe la posibilidad de que se produzca una combustión súbita generalizada (en inglés, flash over point o flashover) cuando, en una situación de incendio, los gases desprendidos por el combustible y que ocupan el ambiente alrededor del fuego, se calientan hasta un punto en el que se produce su ignición brusca.

2.2.10. Densidad y Densidad Relativa.

La densidad se define como la masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 4})$$

El recíproco de la densidad es el volumen específico V , que se define como el volumen por unidad de masa. Es decir:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Ec. 5})$$

Para un elemento de volumen diferencial de masa dm y volumen dV , la densidad se puede expresar como $\rho = \frac{dm}{dV}$.

En general, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y la presión. La densidad de la mayor parte de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. Por otro lado, los líquidos y sólidos son en esencia sustancias no compresibles y la variación de su densidad con la presión es por lo regular insignificante. A 20°C, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 1 atm, a 1 003 kg/m³ a 100 atm, un cambio de sólo 0.5 por ciento. La densidad de líquidos y sólidos depende más de la temperatura que de la presión. A 1 atm, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 20°C a 975 kg/m³ a 75°C, esto significa un cambio de 2.3 por ciento, lo cual puede ignorarse en muchos análisis de ingeniería.

Sustancia	DR
Agua	1.0
Sangre	1.05
Agua de mar	1.025
Gasolina	0.7
Alcohol etílico	0.79
Mercurio	13.6
Madera	0.3-0.9
Oro	19.2
Huesos	1.7-2.0
Hielo	0.92
Aire (a 1 atm)	0.0013

Figura 5: Densidades relativas de algunas sustancias a 0° C.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

2.2.11. Estado y Equilibrio.

Considere un sistema que no experimenta ningún cambio: en estas circunstancias, todas las propiedades se pueden medir o calcular en el sistema, lo cual

da un conjunto de propiedades que describe por completo la condición, o el estado, del sistema. En un estado específico, todas las propiedades de un sistema tienen valores fijos, e incluso si cambia el valor de una propiedad, el estado cambia a otro diferente.

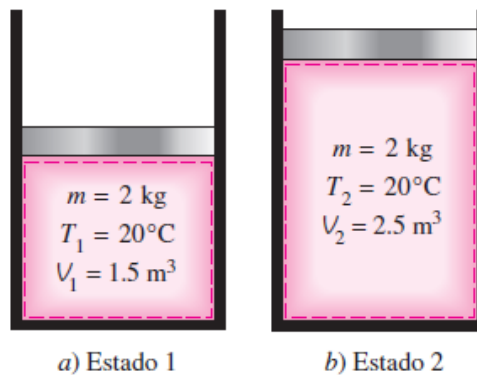


Figura 6: Un sistema en dos estados diferentes.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

La termodinámica trata con estados de equilibrio. Esta última palabra define un estado de balance. En un estado de equilibrio no hay potenciales desbalanceados (o fuerzas impulsoras) dentro del sistema, y éste no experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores.

Hay muchos tipos de equilibrio, y un sistema no está en equilibrio termodinámico a menos que se satisfagan las condiciones de todos los tipos necesarios de equilibrio. Es decir, el sistema no implica diferencial de temperatura, que es la fuerza impulsora para el flujo de calor. El equilibrio mecánico se relaciona con la presión, y un sistema lo posee si con el tiempo no hay cambio de presión en alguno de sus puntos. Sin embargo, al interior del sistema la presión puede variar con la elevación como resultado de efectos gravitacionales. Por ejemplo, la mayor presión en una capa inferior se equilibra mediante el peso extra que debe llevar y, por lo tanto, no hay desbalance de fuerzas. La variación de la presión como resultado de la gravedad en la mayor parte de los sistemas termodinámicos es relativamente pequeña y generalmente se ignora. Si en un sistema hay dos fases, se encuentra en la fase de equilibrio cuando la masa de cada fase alcanza un nivel de equilibrio y permanece allí. Por último, un sistema está

en equilibrio térmico si su composición química no cambia con el tiempo, es decir, si no ocurren reacciones químicas. Un sistema no estará en equilibrio a menos que se satisfagan los criterios de equilibrio necesarios.

2.2.12. Procesos y Ciclos.

Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso, y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una trayectoria del proceso. Para describir completamente un proceso se deben especificar sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores.

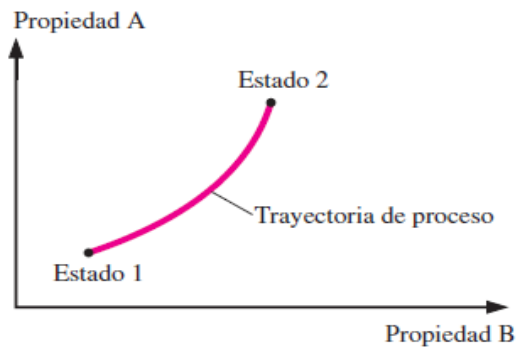


Figura 7: Un proceso entre dos estados 1 y 2 y la trayectoria del proceso.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Cuando un proceso se desarrolla de tal manera que todo el tiempo el sistema permanece infinitesimalmente cerca de un estado de equilibrio, estamos ante un proceso cuasiestático, o de cuasiequilibrio. Un proceso de este tipo puede considerarse lo suficientemente lento como para permitirle al sistema ajustarse internamente de modo que las propiedades de una de sus partes no cambien más rápido que las de otras.

Cuando un gas en un dispositivo de cilindro- émbolo se comprime de forma repentina, las moléculas cercanas a la superficie del émbolo no tendrán suficiente tiempo para escapar y se concentrarán en una pequeña región frontal del émbolo, de modo que ahí se creará una región de alta presión. Como resultado de esta diferencia de presión, ya no se puede decir que el sistema está en equilibrio, lo cual hace que todo el proceso no sea de cuasiequilibrio. Sin embargo, si el émbolo se mueve lentamente,

las moléculas tendrán tiempo suficiente para redistribuirse y no habrá concentración de moléculas al frente del émbolo. Como resultado, la presión dentro del cilindro siempre será uniforme y aumentará con la misma rapidez en todos los lugares. Puesto que el equilibrio se mantiene todo el tiempo, se trata de un proceso de cuasiequilibrio.

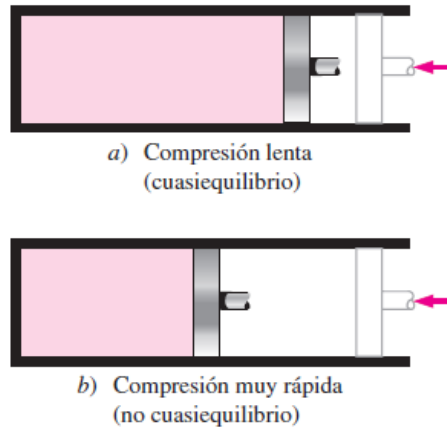


Figura 8: Procesos de compresión con y sin cuasiequilibrio.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

2.2.13. Temperatura y Ley Cero de la Termodinámica.

Aun cuando estamos familiarizados con la temperatura como una medida del “calor” y el “frío”, no es fácil ofrecer una definición exacta de este concepto. Con base en nuestras sensaciones fisiológicas, se expresa el nivel de temperatura de modo cualitativo con palabras como frío congelante, frío, tibio, caliente y al rojo vivo; sin embargo, no es posible asignar valores numéricos a temperaturas basándose únicamente en las sensaciones. Además, en ocasiones los sentidos engañan. Una silla metálica, por ejemplo, se sentirá mucho más fría que una silla de madera aun cuando ambas estén a la misma temperatura.

Por fortuna, varias propiedades de los materiales cambian con la temperatura de una manera repetible y predecible, y esto establece una base para la medición precisa de la temperatura. Por ejemplo, el termómetro de mercurio utilizado comúnmente se rige por la expansión del mercurio con la temperatura. Ésta se mide también por medio de otras propiedades dependientes de ella.

Una experiencia común es que una taza de café caliente colocada sobre una mesa se enfríe con el tiempo, y que una bebida fría se entibie en algún momento. Cuando un cuerpo se pone en contacto con otro que está a una temperatura diferente, el calor se transfiere del que está caliente al frío hasta que ambos alcanzan la misma temperatura. En ese punto se detiene la transferencia de calor y se dice que los dos cuerpos han alcanzado el equilibrio térmico. Para el cual el único requerimiento es la igualdad de temperatura.

La ley cero de la termodinámica establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. Podría parecer tonto que un hecho tan obvio se conozca como una de las leyes básicas de la termodinámica; sin embargo, no es posible concluir esta ley de las otras leyes de la termodinámica, además de que sirve como base para la validez de la medición de la temperatura. Si el tercer cuerpo se sustituye por un termómetro, la ley cero se puede volver a expresar como dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto.

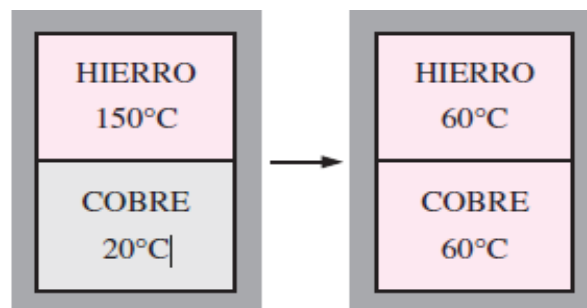


Figura 9: Dos cuerpos que alcanzan el equilibrio térmico después de ser puestos en contacto dentro de un recinto aislado.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

R. H. Fowler fue el primero que formuló y nombró la ley cero en 1931. Como indica el nombre, su valor como principio físico fundamental se reconoció más de medio siglo después de la formulación de la primera y segunda leyes de la termodinámica y se llamó ley cero puesto que debía preceder a éstas.

2.2.14. Escalas de Temperatura.

Estas escalas permiten usar una base común para las mediciones de temperatura. A través de la historia se han introducido varias y todas se basan en ciertos estados fácilmente reproducibles como los puntos de congelamiento y ebullición del agua, llamados también punto de hielo y punto de vapor, respectivamente. Una mezcla de hielo y agua que está en equilibrio con aire saturado con vapor a 1 atm de presión está en el punto de hielo, mientras que una mezcla de agua líquida y vapor de agua (sin aire) en equilibrio a 1 atm de presión se encuentra en el punto de vapor.

Las escalas de temperatura usadas actualmente en el SI y en el sistema inglés son la escala Celsius (antes llamada escala centígrada; en 1948 se le cambió el nombre en honor de quien la diseñó, el astrónomo sueco A. Celsius, 1702-1744) y la escala Fahrenheit (en honor al fabricante de instrumentos alemán G. Fahrenheit, 1686-1736), respectivamente. En la primera a los puntos de hielo y de vapor se les asignaron originalmente los valores de 0 y 100°C, respectivamente. Los valores correspondientes en la segunda son 32 y 212°F. Ambas se conocen comúnmente como escalas de dos puntos dado que los valores de temperatura se asignan en dos puntos distintos.

En termodinámica es muy conveniente tener una escala de temperatura independiente de las propiedades de cualquier sustancia o sustancias. Tal escala es la escala de temperatura termodinámica, desarrollada posteriormente junto con la segunda ley de la termodinámica. La escala de temperatura termodinámica en el SI es la escala Kelvin, llamada así en honor a Lord Kelvin (1824-1907), cuya unidad de temperatura es el kelvin, designado por K (no K; el símbolo de grado se eliminó de forma oficial del kelvin en 1967). La temperatura mínima en esta escala es el cero absoluto, o 0 K. Se deduce entonces que sólo se requiere asignar un punto de referencia diferente a cero para establecer la pendiente de esta escala lineal. Por medio de técnicas de refrigeración poco comunes los científicos se han aproximado al cero absoluto kelvin (en 1989 lograron alcanzar 0.000000002 K).

La escala de temperatura termodinámica en el sistema inglés es la escala Rankine, nombrada en honor a William Rankine (1820-1872), cuya unidad de temperatura es el Rankine, el cual se designa mediante R.

Otra escala de temperatura que resulta ser casi idéntica a la Kelvin es la escala de temperatura del gas ideal, ya que en ésta las temperaturas se miden por medio de un termómetro de gas a volumen constante, el cual es básicamente un recipiente rígido lleno de gas a baja presión, generalmente hidrógeno o helio. Este termómetro funciona bajo el principio de que, a bajas presiones, la temperatura de un gas es proporcional a su presión a volumen constante. Es decir, a presiones suficientemente bajas la temperatura de un gas de volumen fijo varía de forma lineal con la presión. Entonces la relación entre la temperatura y la presión del gas en el recipiente se expresa como:

$$T = a + bP \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde los valores de las constantes a y b para un termómetro de gas se determinan de forma experimental. Una vez conocidas a y b a temperatura de un medio se calcula a partir de esta relación al sumergir dentro del medio el recipiente rígido del termómetro de gas y medir la presión del gas cuando se establece el equilibrio térmico entre el medio y el gas del recipiente cuyo volumen se mantiene constante.

La escala Kelvin se relaciona con la Celsius mediante:

$$T (K) = T (^{\circ}C) + 273.15 \quad (\text{Ec. 7})$$

La escala Rankine se relaciona con la Fahrenheit mediante

$$T (R) = T (^{\circ}F) + 459.67 \quad (\text{Ec. 8})$$

Las escalas de temperatura en los dos sistemas de unidades se relacionan mediante:

$$T (R) = 1.8T (K) \quad (\text{Ec. 9})$$

$$T (^\circ F) = 1.8T (^\circ C) + 32 \quad (\text{Ec. 10})$$

2.2.15. Escala de Temperatura Internacional de 1990 (ITS-90).

La Escala de temperatura internacional de 1990, que sustituye a las de temperatura práctica internacional de 1968 (IPTS-68), 1948 (IPTS-48) y 1927 (ITS-27), fue adoptada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas en 1989 a solicitud de la Decimoctava Conferencia General de Pesos y Medidas. La ITS-90 es similar a sus predecesoras, pero posee valores más actualizados de temperaturas fijas, tiene un alcance amplio y se ajusta con más precisión a la escala de temperatura termodinámica. En la ITS-90 la unidad de temperatura termodinámica T es también el kelvin (K), definida como la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, el cual es el único punto fijo de definición de esta escala y la Kelvin, además de funcionar como el punto fijo termométrico más importante usado en la calibración de termómetros para ITS-90.

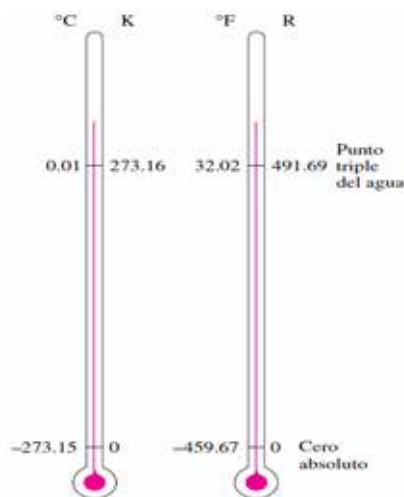


Figura 10: Comparación de escalas de temperatura.
Fuente: Cengel, Y, termodinámica.

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que por definición es igual en magnitud al kelvin (K). Una diferencia de temperatura se puede expresar en kelvin o grados Celsius. El punto de hielo es el mismo en 0°C (273.15°C) tanto en ITS-90 como en IPTS-68, pero el punto de vapor es 99.975°C en ITS-90 (con una incertidumbre de 0.005°C) mientras que éste fue 100.000°C en IPTS-68. El cambio se debe a mediciones precisas realizadas mediante termometría de gas con particular atención en el efecto de absorción (las impurezas de un gas absorbidas por las paredes de un bulbo a la temperatura de referencia que se des absorben a temperaturas más altas, lo cual provoca que se incremente la presión medida del gas).



Figura 11: Comparación de magnitudes de varias unidades de temperatura.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

2.2.16. Presión.

La presión se define como una fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se trata de gas o líquido, mientras que la contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como la fuerza por unidad de área, tiene como unidad los newtons por metro cuadrado ($\frac{N}{m^2}$), también conocida como pascal (Pa). Es decir:

$$1 Pa = \frac{1 N}{m^2} \quad (\text{Ec. 11})$$

La unidad de presión pascal es demasiado pequeña para las presiones que se suscitan en la práctica. De ahí que sus múltiplos kilo Pascal ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$) y mega Pascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$) se usen más comúnmente. Otras tres unidades de presión de

uso extendido, principalmente en Europa, son bar, atmósfera estándar y kilogramo fuerza por centímetro cuadrado:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa} \\
 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bar} \\
 1 \text{ kgf/cm}^2 &= 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2 \\
 &= 9.807 \cdot 10^4 \text{ Pa} = 0.9807 \text{ bar} = 0.9679 \text{ atm}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 12}$$

2.2.17. Formas de Energía.

La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total E de un sistema, la cual se denota por unidad de masa mediante e y se expresa como:

$$e = \frac{E}{m} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)
 \tag{Ec. 13}$$

La termodinámica no proporciona información acerca del valor absoluto de la energía total, sólo trata con el cambio de ésta, que es lo importante en los problemas de ingeniería. Así, a la energía total de un sistema se le puede asignar un valor de cero ($E = 0$) en algún punto de referencia conveniente. El cambio de energía total de un sistema es independiente del punto de referencia seleccionado. La disminución en la energía potencial de una roca que cae, por ejemplo, depende sólo de la diferencia de elevación y no del nivel de referencia seleccionado.

En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar dos grupos para las diversas formas de energía que conforman la energía total de un sistema: macroscópicas y microscópicas. Las formas macroscópicas de energía son las que posee un sistema como un todo en relación con cierto marco de referencia exterior, como las energías cinética y potencial. Las formas microscópicas de energía son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de la actividad molecular, y son independientes de los marcos de referencia externos. La suma de todas

las formas microscópicas de energía se denomina energía interna de un sistema y se denota mediante U .



Figura 12: Cambio de la energía macroscópica de un objeto al cambia su velocidad y elevación.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

En 1807 Thomas Young acuñó el término energía y en 1852 Lord Kelvin propuso su uso en termodinámica. El concepto energía interna y su símbolo U aparecieron por primera vez en los trabajos de Rudolph Clausius y William Rankine, en la segunda mitad del siglo XIX, y con el tiempo substituyó a los términos trabajo interior, trabajo interno y energía intrínseca empleados comúnmente en esa época.

La energía macroscópica de un sistema se relaciona con el movimiento y la influencia de algunos factores externos como la gravedad, el magnetismo, la electricidad y la tensión superficial. La energía que posee un sistema como resultado de su movimiento en relación con cierto marco de referencia se llama energía cinética (EC). Cuando todas las partes de un sistema se mueven con la misma velocidad, la energía cinética se expresa como:

$$EC = \frac{V^2}{2} (kJ) \quad (\text{Ec. 14})$$

O bien, por unidad de masa:

$$ec = \frac{V^2}{2} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde V denota la velocidad del sistema con respecto a algún marco de referencia fijo. La energía cinética de un cuerpo sólido que gira se determina mediante $I\omega^2$ donde I es el momento de inercia del cuerpo y ω es la velocidad angular.

La energía que posee un sistema como resultado de su elevación en un campo gravitacional se llama energía potencial (EP) y se expresa como:

$$EP = mgz \text{ (kJ)} \quad (\text{Ec. 16})$$

O, por unidad de masa:

$$ep = gz \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde g es la aceleración gravitacional y z es la elevación del centro de gravedad de un sistema con respecto a algún nivel de referencia elegido arbitrariamente.

Los efectos magnéticos, eléctrico y de tensión superficial son significativos sólo en casos especiales y en general se ignoran. En ausencia de esta clase de efectos, la energía total de un sistema consta sólo de las energías cinética, potencial e interna, y se expresa como:

$$E = U + EC + EP = U + \frac{mV^2}{2} + mgz \text{ (kJ)} \quad (\text{Ec. 18})$$

O bien, por unidad de masa:

$$e = u + ec + ep = u + \frac{V^2}{2} + gz \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (\text{Ec. 19})$$

2.2.18. Consideraciones Físicas en Relación con la Energía Interna.

La energía interna se definió como la suma de todas las formas microscópicas de energía de un sistema. Se relaciona con la estructura molecular y el grado de actividad molecular y se puede considerar como la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas.

Para comprender mejor la energía interna, los sistemas se examinan a nivel molecular. Las moléculas de gas se mueven en el espacio con cierta velocidad; por lo

tanto, poseen alguna energía cinética. Esto se conoce como energía de traslación. Los átomos de las moléculas poliatómicas rotan respecto a un eje y la energía relacionada con esta rotación es la energía cinética rotacional. Los átomos de este tipo de moléculas podrían vibrar respecto a su centro de masa común, entonces la energía de este movimiento de “vaivén” sería la energía cinética vibratoria. Para los gases, la energía cinética se debe sobre todo a los movimientos de traslación y rotación, en los que el movimiento vibratorio se vuelve significativo a altas temperaturas. Los electrones en un átomo giran en torno al núcleo y, por lo tanto, poseen energía cinética rotacional. Los electrones de órbitas exteriores tienen energías cinéticas más grandes. Como estas partículas también giran en torno a sus ejes, la energía relacionada con este movimiento es la energía de giro (espín). Otras partículas ubicadas en el núcleo de un átomo también poseen energía de giro. La porción de la energía interna de un sistema relacionada con la energía cinética de las moléculas se llama energía sensible. La velocidad promedio y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura del gas, por lo que a temperaturas más elevadas las moléculas poseen energías cinéticas superiores y, como consecuencia, el sistema tiene una energía interna más alta.

La energía interna también se relaciona con diversas fuerzas de enlace entre las moléculas de una sustancia, entre los átomos dentro de una molécula y entre las partículas al interior de un átomo y su núcleo. Las fuerzas que unen a las moléculas entre sí son, como se esperaría, más intensas en los sólidos y más débiles en los gases. Si se agrega suficiente energía a las moléculas de un sólido o de un líquido, éstas superan las fuerzas moleculares y se separan, de modo que la sustancia se convierte en un gas; éste es un proceso de cambio de fase. Debido a la energía agregada, un sistema en la fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que el de la fase sólida o líquida. La energía interna relacionada con la fase de un sistema se llama energía latente. El proceso de cambio de fase puede ocurrir sin que se modifique la composición química de un sistema. La mayor parte de los problemas reales caen dentro de esta categoría, por lo que no es necesario prestar atención a las fuerzas de enlace de los átomos en una molécula.

En su núcleo, un átomo tiene neutrones y protones con carga positiva enlazados entre sí mediante intensas fuerzas, además de electrones cargados negativamente orbitando a su alrededor. La energía interna relacionada con los enlaces atómicos en una molécula se llama energía química. Durante una reacción química, por ejemplo, un proceso de combustión, algunos enlaces químicos se destruyen y otros se forman, lo que da como resultado que la energía interna experimente un cambio. Las fuerzas nucleares son mucho mayores que las que unen a los electrones con el núcleo. Esta enorme cantidad de energía relacionada con los fuertes enlaces dentro del núcleo del átomo se llama energía nuclear. Es evidente que no es necesario ocuparse de la energía nuclear en termodinámica a menos, desde luego, que se trate de una reacción de fusión o de fisión. Una reacción química tiene que ver con cambios en la estructura de los electrones de los átomos, pero en una reacción nuclear los cambios ocurren en el núcleo; por lo tanto, un átomo conserva su identidad durante una reacción química, pero la pierde durante una nuclear. Los átomos pueden poseer también energías de momento dipolo eléctrico y magnético cuando se someten a campos magnéticos y eléctricos externos debidos a la torsión de los dipolos magnéticos resultantes de pequeñas corrientes eléctricas relacionadas con los electrones que orbitan.

Las formas de energía arriba explicadas, que constituyen la energía total de un sistema, pueden estar contenidas o almacenadas en éste, así que es posible considerarlas como formas estáticas de energía. Las formas de energía no almacenadas en un sistema se consideran formas dinámicas de energía, o interacciones de energía, posibles de reconocer cuando cruzan las fronteras del sistema y representan la energía que éste gana o pierde durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de energía relacionadas con un sistema cerrado son la transferencia de calor y el trabajo. Una interacción de energía corresponde a una transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura, de lo contrario es trabajo, como se explica en la siguiente sección.

Un volumen de control también intercambia energía vía transferencia de masa, puesto que cada vez que ésta se transfiere hacia un sistema o afuera del mismo el contenido de energía de la masa también es transferido.

En la vida diaria es común llamar calor a las formas sensible y latente de la energía interna, y se habla acerca del calor que los cuerpos contienen. Sin embargo, en termodinámica, normalmente se hace referencia a esas formas de energía como energía térmica para evitar cualquier confusión con la transferencia de calor.

2.2.19. Energía Mecánica.

Muchos sistemas de ingeniería se diseñan para transportar un fluido de un lugar a otro a determinado flujo volumétrico y velocidad y diferencia de elevación, mientras el sistema genera trabajo mecánico en una turbina o consume trabajo mecánico en una bomba o ventilador. Estos sistemas no tienen que ver con la conversión de energía nuclear, química o térmica a energía mecánica; tampoco hay en ellos transferencia de calor en cantidad importante y operan en esencia a temperatura constante. Esta clase de sistemas se analizan de modo conveniente al considerar sólo las formas mecánicas de la energía y los efectos que la fricción causa, como la pérdida de energía mecánica (es decir, que se convierta en energía térmica la cual por lo general no puede usarse para ningún propósito útil).

La energía mecánica se puede definir como la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal. Las formas más familiares de energía mecánica son la cinética y la potencial. Sin embargo, la térmica no es energía mecánica puesto que no se puede convertir en trabajo de forma completa y directa (segunda ley de la termodinámica).

2.2.20. Transferencia de Energía por Calor.

La experiencia nos dice que, si se deja sobre la mesa una lata fría de bebida carbonatada, en algún momento alcanzará la temperatura ambiente, mientras que una papa horneada caliente se enfriará. Cuando un cuerpo se coloca en un medio que está a una temperatura diferente, la transferencia de energía tiene lugar entre el cuerpo y el

medio hasta que se establece el equilibrio térmico, es decir, cuando ambos alcanzan la misma temperatura. La dirección de la transferencia de energía es siempre del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura. Una vez establecida la igualdad de temperatura, la transferencia termina. En este proceso se afirma que la energía se transfiere en forma de calor.

El calor está definido como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperatura. Es decir, una interacción de energía es calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura.

Varias frases de uso común como flujo de calor, adición de calor, rechazo de calor, absorción de calor, remoción de calor, ganancia de calor, pérdida de calor, almacenamiento de calor, generación de calor, calentamiento eléctrico, calentamiento por resistencia, calentamiento por fricción, calentamiento por gas, calor de reacción, liberación de calor, calor específico, calor sensible, calor latente, calor de desecho, calor del cuerpo, calor de proceso, sumidero de calor y fuente de calor, no son congruentes con el estricto significado termodinámico de calor, término cuyo uso se limita a la transferencia de energía térmica durante un proceso. Sin embargo, estas frases tan arraigadas en el vocabulario de científicos y personas comunes generalmente no producen malentendidos, ya que por lo común son interpretadas apropiadamente y no de manera literal. (Además, no existen alternativas aceptables para algunas de estas frases.) Por ejemplo, se entiende que “calor corporal” significa el contenido de energía térmica de un cuerpo. De igual modo, “flujo de calor” se interpreta como la transferencia de energía térmica no como el flujo de una sustancia similar a un líquido llamada calor. Aunque incorrecta, esta última interpretación fue la base de la teoría calórica, la cual dio origen a la frase. Asimismo, la transferencia de calor hacia un sistema se conoce como adición de calor mientras que rechazo de calor es la transferencia hacia afuera. Hay razones termodinámicas para ser tan reacio en sustituir

calor por energía térmica: el primero requiere menos tiempo y esfuerzo que el segundo para decirlo, escribirlo y entenderlo.

Un proceso durante el cual no hay transferencia de calor se denomina proceso adiabático. El término adiabático proviene de la palabra griega adiabatos, que significa “no pasar”. Hay dos maneras en que un proceso puede ser adiabático: el sistema está bien aislado de modo que sólo una cantidad insignificante de calor cruza la frontera, o bien, tanto el sistema como los alrededores están a la misma temperatura y por lo tanto no hay fuerza impulsora (diferencia de temperatura) para la transferencia de calor. Hay que distinguir entre un proceso adiabático y uno isotérmico: aunque no hay transferencia de calor durante un proceso adiabático, otros medios como el trabajo pueden cambiar el contenido de energía y, en consecuencia, la temperatura de un sistema.

Como forma de energía, el calor tiene unidades de energía, la más común es el kJ (o Btu). La cantidad de calor transferida durante el proceso entre dos estados (1 y 2) se denota mediante Q_{12} o sólo Q . La transferencia de calor por unidad de masa de un sistema se denota con q y se determina a partir de:

$$q = \frac{Q}{m} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

En ocasiones es deseable conocer la tasa de transferencia de calor (cantidad de calor transferida por unidad de tiempo) en lugar del calor total transferido durante cierto intervalo de tiempo. La tasa de transferencia de calor se expresa con \dot{Q} , donde el punto significa la derivada respecto del tiempo, o “por unidad de tiempo”. La tasa de transferencia de calor \dot{Q} tiene las unidades kJ/s, equivalente a kW. Cuando \dot{Q} varía con el tiempo, la cantidad de transferencia de calor durante un proceso se determina integrando \dot{Q} sobre el intervalo de tiempo del proceso:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (\text{Ec. 21})$$

Cuando Q permanece constante durante un proceso, esta relación se reduce a:

$$Q = Q \Delta t \text{ (kJ)} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde $\Delta t = t_2 - t_1$ es el intervalo de tiempo durante el que ocurre el proceso.

El calor se transfiere mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas. La convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. La radiación es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones).

2.2.21. Primera Ley de la Termodinámica.

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso.

Una consecuencia importante de la primera ley es la existencia y definición de la propiedad energía total E . Considerando que el trabajo neto es el mismo para todos los procesos adiabáticos de un sistema cerrado entre dos estados especificados, el valor del trabajo neto debe depender únicamente de los estados finales del sistema y por lo tanto debe corresponder al cambio en una propiedad del sistema; esta propiedad es la energía total. La primera ley no hace referencia al valor de la energía total de un sistema cerrado en un estado, tan sólo establece que el cambio de energía total durante un proceso adiabático debe ser igual al trabajo neto realizado. En consecuencia, se puede

asignar cualquier valor arbitrario conveniente a la energía total en un estado específico para servir como punto de referencia.

Implícita en el enunciado de la primera ley se encuentra la conservación de la energía. Aunque la esencia de la primera ley es la existencia de la propiedad energía total, con frecuencia se considera a la primera ley como un enunciado del principio de la conservación de la energía.

2.2.22. Balance de Energía.

El principio de conservación de la energía se expresa: el cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir:

(Energía total que entra al sistema) - (Energía total que sale del sistema) = (Cambio en la energía total del sistema)

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (\text{Ec. 23})$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1)$$

Figura 13: Cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Cuando se especifican los estados inicial y final los valores de las energías internas específicas u_1 y u_2 se determinan directamente de las tablas de propiedades o de las relaciones de propiedades termodinámicas.

2.2.23. Mecanismos de Transferencia de Energía

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía que gana o pierde un sistema durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de la energía relacionadas con una masa fija o sistema cerrado son las transferencias de calor y de trabajo.

1. Transferencia de calor, Q La transferencia de calor hacia un sistema (ganancia de calor) incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema; asimismo, la transferencia de calor desde un sistema (pérdida de calor) la disminuye, ya que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.
2. Transferencia de trabajo, W Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores es trabajo. Un émbolo ascendente, un eje rotatorio y un alambre eléctrico que cruzan la frontera del sistema se relacionan con interacciones de trabajo. La transferencia de trabajo a un sistema (es decir, el trabajo realizado sobre un sistema)

incrementa la energía de éste, mientras que la transferencia de trabajo desde un sistema (es decir, el trabajo realizado por el sistema) la disminuye, puesto que la energía transferida como trabajo viene de la energía contenida en el sistema. Los motores de automóviles y las turbinas hidráulicas, de vapor o de gas, producen trabajo mientras que los compresores, las bombas y los mezcladores consumen trabajo.

3. Flujo másico, m El flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía (de hecho, la masa es energía). De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale saca algo consigo. Por ejemplo, cuando cierta cantidad de agua caliente sale de un calentador y es reemplazada por agua fría en la misma cantidad, el contenido de energía del tanque de agua caliente (el volumen de control) disminuye como resultado de esta interacción de masa.

Como la energía puede ser transferida en las formas de calor, trabajo y masa, y su transferencia neta es igual a la diferencia entre las cantidades transferidas hacia dentro y hacia fuera, el balance de energía se expresa de modo más explícito como:

$$\begin{aligned}
 E_{entrada} - E_{salida} &= (Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) \\
 &+ (E_{masa_{entrada}} - E_{masa_{salida}}) = \Delta E_{sistema}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 24}$$

2.2.24. Eficiencia en la Conversión de Energía

Eficiencia es uno de los términos más usados en ingeniería, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones. Esto se debe a que se usa sin una definición adecuada. Lo cual se aclara a continuación y se definen algunas de las eficiencias más

usadas en la práctica. El desempeño o eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida, de la siguiente manera:

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{salida deseada}}{\text{salida requerida}} \quad (\text{Ec. 25})$$

Por regla general, la eficiencia de equipo que quema combustible se basa en el poder calorífico del combustible, el cual es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente. Entonces el rendimiento del equipo de combustión se puede caracterizar por la eficiencia de combustión, la cual se define como:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{combustión}} &= \frac{Q}{HV} \\ &= \frac{\text{Cantidad de calor liberado durante la combustión}}{\text{Poder calorífico del combustible quemado}} \quad (\text{Ec. 26}) \end{aligned}$$

Una eficiencia de combustión de 100 por ciento indica que el combustible se quema completamente y los gases residuales salen de la cámara de combustión a temperatura ambiente; en consecuencia, la cantidad de calor liberada durante un proceso de combustión es igual al poder calorífico del combustible.

2.2.25. Segunda Ley de la Termodinámica

La energía es una propiedad conservada y no se sabe de ningún proceso que viole la primera ley de la termodinámica. Por lo tanto, es razonable concluir que para que ocurra, un proceso debe satisfacer la primera ley. Sin embargo, como se explica aquí, satisfacerla no asegura que en realidad el proceso tenga lugar.

La primera ley de la termodinámica no restringe la dirección de un proceso, pero satisfacerla no asegura que en realidad ocurra el proceso. Esta falta de adecuación de la primera ley para identificar si un proceso puede tener lugar se remedia introduciendo otro principio general, la segunda ley de la termodinámica. Un proceso

no puede ocurrir a menos que satisfaga tanto la primera ley de la termodinámica como la segunda.

El uso de la segunda ley de la termodinámica no se limita a identificar la dirección de los procesos, también afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad. La primera ley se relaciona con la cantidad de energía y las transformaciones de energía de una forma a otra sin considerar su calidad. Conservar la calidad de la energía es una cuestión importante para los ingenieros, y la segunda ley provee los medios necesarios para determinarla, así como el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso. Según una explicación posterior de este capítulo, mayor cantidad de energía a alta temperatura se puede convertir en trabajo, por lo tanto, tiene una calidad mayor que esa misma cantidad de energía a una temperatura menor. La segunda ley de la termodinámica se usa también para determinar los límites teóricos en el desempeño de sistemas de ingeniería de uso ordinario, como máquinas térmicas y refrigeradores, así como predecir el grado de terminación de las reacciones químicas.

2.2.26. Análisis de los Ciclos de Potencia

La mayor parte de los dispositivos que producen potencia operan en ciclos, y el estudio de los ciclos de potencia es una parte interesante e importante de la termodinámica. Los ciclos que se llevan a cabo en los dispositivos reales son difíciles de analizar debido a la presencia de efectos complicados, como la fricción y la falta de tiempo suficiente para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo. Para que sea factible el estudio analítico de un ciclo es necesario mantener estas complejidades en un nivel manejable y utilizar algunas idealizaciones. Cuando al ciclo real se le eliminan todas las irreversibilidades y complejidades internas, se consigue finalmente un ciclo que se parece en gran medida al real pero que está formado en su totalidad de procesos internamente reversibles. Tal ciclo es llamado un ciclo ideal.

Un modelo idealizado simple permite a los ingenieros estudiar los efectos de los principales parámetros que gobiernan el ciclo, sin detenerse en los detalles. Frecuentemente las conclusiones del análisis de ciclos ideales son aplicables a los reales, por ejemplo, la eficiencia térmica del ciclo de Otto, el ciclo ideal para los

motores de automóvil de encendido por chispa, aumenta con la relación de compresión. Éste es también el caso para los motores de automóvil reales. Sin embargo, los valores numéricos obtenidos del análisis de un ciclo ideal no son necesariamente representativos de los ciclos reales y debe tenerse cuidado en su interpretación.

Las máquinas térmicas se diseñan con el propósito de convertir energía térmica

la relación entre el trabajo neto producido por la máquina y la entrada de calor total:

$$\eta_{ter} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} = \frac{\eta_{ter} W_{neto}}{q_{entrada}} \quad (\text{Ec. 27})$$

2.2.27. Ciclo de Otto

El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes de encendido por chispa. Recibe ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien, en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Frenchman Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el pistón ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. Estas máquinas son llamadas máquinas de combustión interna de cuatro tiempos. Un diagrama esquemático de cada tiempo, así como el diagrama P-v para una máquina real de encendido por chispa de cuatro tiempos es importante para el análisis del sistema.

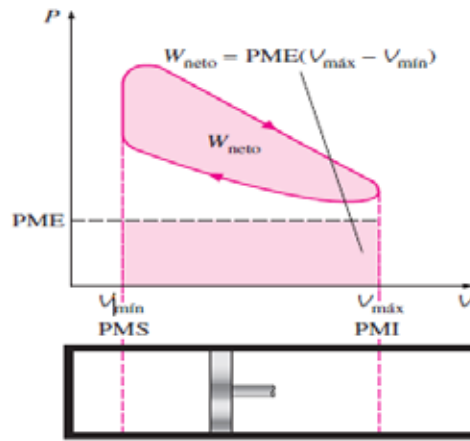


Figura 14: La salida neta de trabajo de un ciclo es equivalente al producto de la presión media efectiva por el volumen de desplazamiento.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

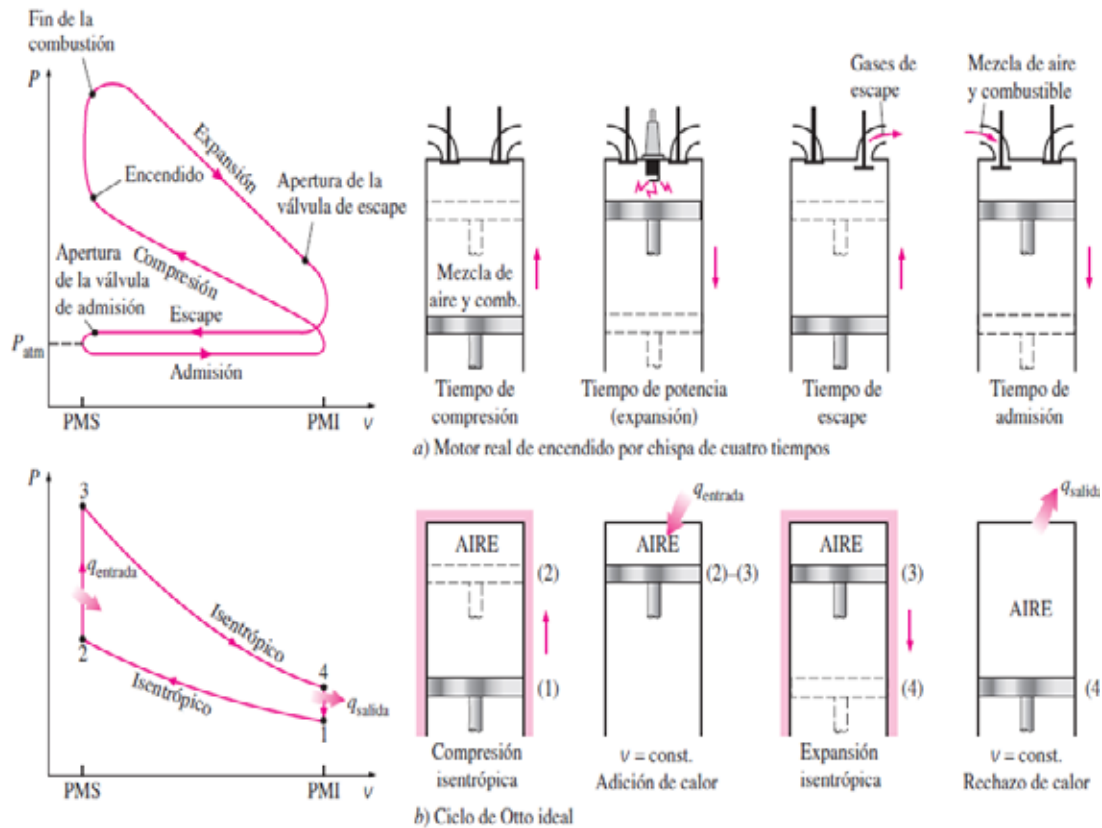


Figura 15: Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Inicialmente, tanto la válvula de admisión como la de escape están cerradas y el pistón se encuentra en su posición más baja (PMI). Durante la carrera de compresión, el pistón se mueve hacia arriba y comprime la mezcla de aire y combustible. Un poco antes de que el pistón alcance su posición más alta (PMS), la bujía produce una chispa y la mezcla se enciende, con lo cual aumenta la presión y la temperatura del sistema. Los gases de alta presión impulsan al pistón hacia abajo, el cual a su vez obliga a rotar al cigüeñal, lo que produce una salida de trabajo útil durante la carrera de expansión o carrera de potencia. Al final de esta carrera, el pistón se encuentra en su posición más baja (la terminación del primer ciclo mecánico) y el cilindro se llena con los productos de la combustión. Después el pistón se mueve hacia arriba una vez más y evacua los gases de escape por la válvula de escape (carrera de escape), para descender por segunda vez extrayendo una mezcla fresca de aire y combustible a través de la válvula de admisión (carrera de admisión). Observe que la presión en el cilindro está un poco arriba del valor atmosférico durante la carrera de escape y un poco abajo durante la carrera de admisión.

En las máquinas de dos tiempos, las cuatro funciones descritas anteriormente se ejecutan sólo en dos tiempos: el de potencia y el de compresión.

En estas máquinas el cárter se sella y el movimiento hacia fuera del pistón se emplea para presurizar ligeramente la mezcla de aire y combustible en el cárter. Además, las válvulas de admisión y de escape se sustituyen por aberturas en la porción inferior de la pared del cilindro. Durante la última parte de la carrera de potencia, el pistón descubre primero el puerto de escape permitiendo que los gases de escape sean parcialmente expelidos, entonces se abre el puerto de admisión permitiendo que la mezcla fresca de aire y combustible se precipite en el interior e impulse la mayor parte de los gases de escape restantes hacia fuera del cilindro. Esta mezcla es entonces comprimida cuando el pistón se mueve hacia arriba durante la carrera de compresión y se enciende subsecuentemente mediante una bujía.

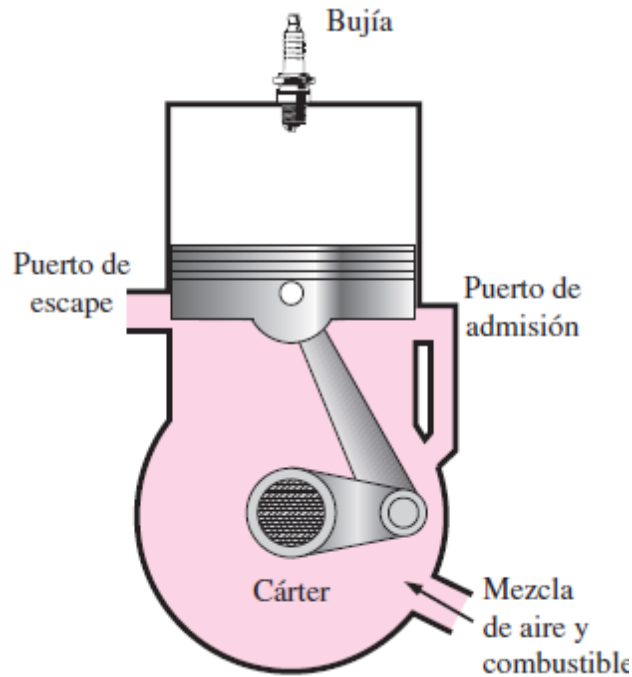


Figura 16: Diagrama esquemático de un motor recíprocante de dos tiempos.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Las máquinas de dos tiempos son generalmente menos eficientes que sus contrapartes de cuatro tiempos, debido a las expulsiones parciales de los gases de escape y la mezcla fresca de aire y combustible con los gases de escape. Sin embargo, son más sencillas y económicas y tienen altas relaciones entre potencia y peso, así como de entre potencia y volumen, lo cual las hace más adecuadas en aplicaciones que requieren tamaño y peso pequeños como motocicletas, sierras de cadena y segadoras de pasto.

El análisis termodinámico de los ciclos reales de cuatro y dos tiempos antes descritos no es una tarea simple. Sin embargo, el análisis puede simplificarse de manera significativa si se utilizan las suposiciones de aire estándar, ya que el ciclo que resulta y que es parecido a las condiciones de operación reales es el ciclo de Otto ideal, el cual se compone de cuatro procesos reversibles internamente:

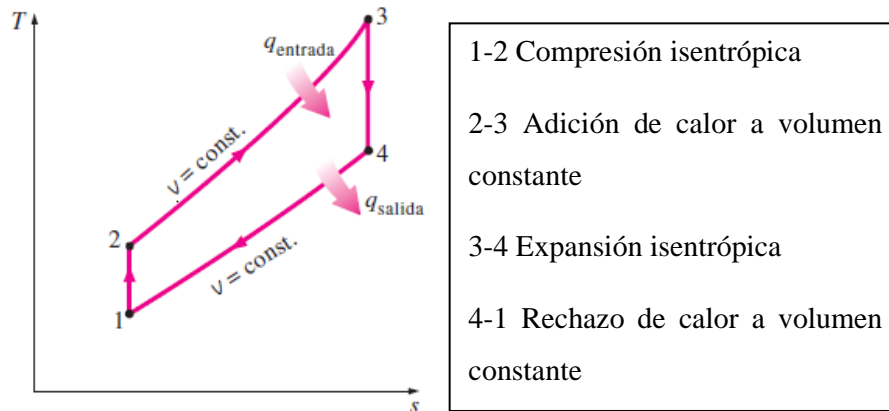


Figura 17: Diagrama T-s para el ciclo de Otto.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

El ciclo de Otto se ejecuta en un sistema cerrado, y sin tomar en cuenta los cambios en las energías cinética y potencial, el balance de energía para cualquiera de los procesos se expresa, por unidad de masa, como:

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = \Delta u \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (\text{Ec. 28})$$

No hay trabajo involucrado durante los dos procesos de transferencia de calor porque ambos toman lugar a volumen constante. Por lo tanto, la transferencia de calor hacia y desde el fluido de trabajo puede expresarse como:

$$Q_{entrada} = u_3 - u_2 = cv (T_3 - T_2) \quad (\text{Ec. 29})$$

Y

$$q_{salida} = u_4 - u_1 = cv (T_4 - T_1) \quad (\text{Ec. 30})$$

Entonces, la eficiencia térmica del ciclo de Otto ideal supuesto para el aire frío estándar es:

$$\begin{aligned}\eta_{terotto} &= \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \frac{T_1}{T_2} \\ &= 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}\end{aligned}\quad (\text{Ec. 31})$$

Los procesos 1-2 y 3-4 son isentrópicos, y $V_2 = V_3$ y $V_4 = V_1$. Por lo tanto:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k_1} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k_1} = \frac{T_4}{T_3}\quad (\text{Ec. 32})$$

Sustituyendo estas ecuaciones en la relación de la eficiencia térmica y simplificando, se obtiene:

$$\eta_{terotto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}\quad (\text{Ec. 33})$$

Donde:

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}\quad (\text{Ec. 34})$$

2.2.28. Ciclo Diesel

El ciclo Diesel es el ciclo ideal para las máquinas reciprocantes ECOM. El motor ECOM, por primera vez propuesto por Rudolph Diesel en la década de 1890, es muy similar al motor ECH estudiado en la última sección; la diferencia principal está en el método de inicio de la combustión. En los motores de encendido por chispa (conocidos también como motores de gasolina), la mezcla de aire y combustible se comprime hasta una temperatura inferior a la temperatura de autoencendido del combustible y el proceso de combustión se inicia al encender una bujía. En los motores ECOM (también conocidos como motores Diesel) el aire se comprime hasta una temperatura que es superior a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión inicia al contacto, cuando el combustible se inyecta dentro de este aire

caliente. Por lo tanto, en los motores Diesel la bujía y el carburador son sustituidos por un inyector de combustible.

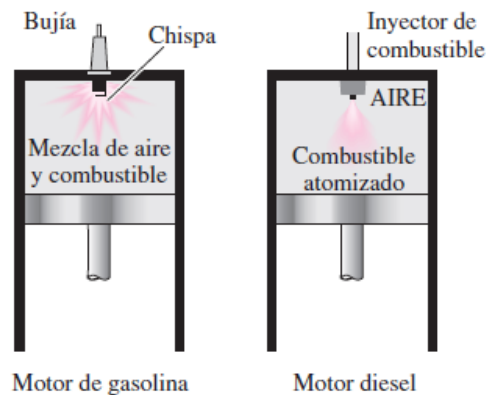


Figura 18: Bujía e inyector de combustible.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

En los motores de gasolina, una mezcla de aire y combustible se comprime durante la carrera de compresión, mientras que las relaciones de compresión están limitadas por el comienzo del autoencendido o el golpeteo del motor. En los Diesel, solamente el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando la posibilidad de autoencendido. Por lo tanto, los motores Diesel pueden ser diseñados para operar a relaciones de compresión mucho más altas, generalmente entre 12 y 24. No tener el problema del autoencendido conlleva otro beneficio: muchos de los exigentes requerimientos impuestos a la gasolina pueden ser eliminados, de manera que los combustibles menos refinados (y por lo tanto menos costosos) pueden utilizarse en los motores Diesel.

El proceso de inyección de combustible en los motores Diesel empieza cuando el pistón se aproxima al PMS y continúa durante la primera parte de la carrera de potencia. Por lo tanto, en estos motores el proceso de combustión sucede durante un periodo más largo. Debido a esta mayor duración, el proceso de combustión en el ciclo Diesel ideal se obtiene como un proceso de adición de calor a presión constante. De hecho, éste es el único proceso donde los ciclos de Otto y Diesel difieren. Los tres

procesos restantes son los mismos para ambos ciclos ideales. Es decir, el proceso 1-2 es una compresión isentrópica, el 3-4 una expansión isentrópica y el 4-1 un rechazo de calor a volumen constante. La similitud entre los dos ciclos es también evidente en los diagramas P-v y T-s del ciclo Diesel.

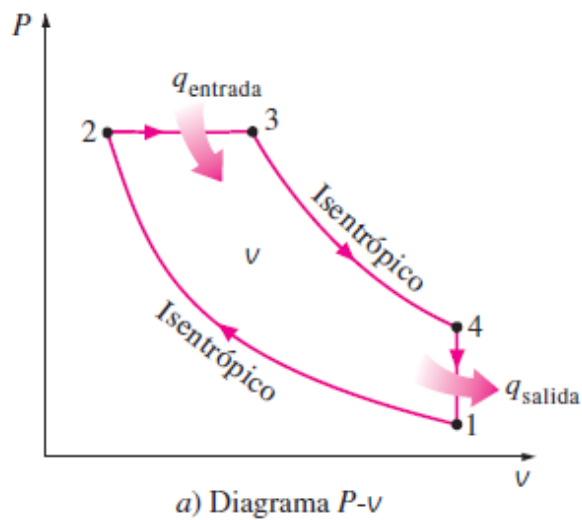


Figura 19: Diagrama para el ciclo Diesel ideal.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

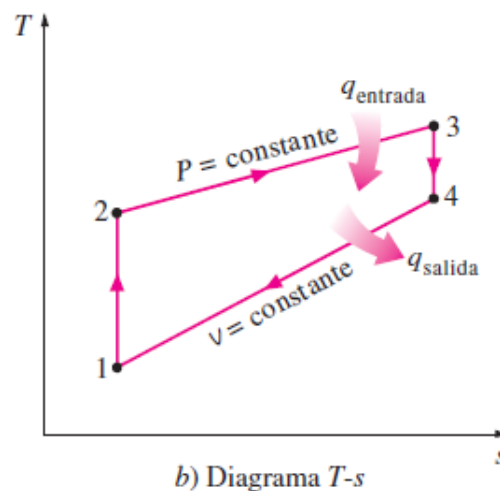


Figura 20: Diagramas T-s para el ciclo Diesel ideal.
Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

Si se observa que el ciclo Diesel se ejecuta en un dispositivo de pistón y cilindro, que forma un sistema cerrado, la cantidad de calor añadida al fluido de trabajo a presión constante y rechazada por éste a volumen constante puede expresarse como:

$$\begin{aligned} Q_{entrada} - w_{b_{salida}} &= u_3 - u_2 = q_{entrada} \\ &= P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = c_p(T_3 - T_2) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 35})$$

Y:

$$q_{salida} = u_1 - u_4 = c_v(T_4 - T_1) \quad (\text{Ec. 36})$$

Entonces, la eficiencia térmica de un ciclo Diesel ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se vuelve:

$$\eta_{ter_{Diesel}} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k_1 T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{k T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (\text{Ec. 37})$$

$$q_{salida} = u_1 - u_4 = c_v(T_4 - T_1) \quad (\text{Ec. 38})$$

Entonces, la eficiencia térmica de un ciclo Diesel ideal bajo las suposiciones de aire frío estándar se vuelve:

$$\begin{aligned} \eta_{ter_{Diesel}} &= \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k_1 T_3 - T_2} \\ &= 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{k T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 39})$$

Ahora se define una nueva cantidad, la relación de corte de admisión r_c , como la relación de los volúmenes del cilindro antes y después del proceso de combustión:

$$rc = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (\text{Ec. 40})$$

Al usar esta definición y las relaciones de gas ideal isentrópicas para los procesos 1-2 y 3-4, la relación de la eficiencia térmica se reduce a:

$$\eta_{terDiesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left(\frac{r_c^k}{k} \frac{1}{(r^c - 1)} \right) \quad (\text{Ec. 41})$$

Donde r es la relación de compresión. Si se observa cuidadosamente, se notará que bajo las suposiciones de aire frío estándar la eficiencia de un ciclo Diesel difiere de la de un ciclo de Otto por la cantidad que está entre paréntesis, la cual siempre es mayor que 1. Por lo tanto:

$$\eta_{terOtto} > \eta_{terDiesel} \quad (\text{Ec. 42})$$

2.3. Definición de términos básicos

Calor: Se denomina calor a la energía en tránsito que se reconoce solo cuando se cruza la frontera de un sistema termodinámico

Combustión: La combustión, en sentido amplio, puede entenderse como toda reacción química, relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea con o sin manifestación del tipo de llamas o de radiaciones visibles.

Compresión: El esfuerzo de compresión es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección

Eficiencia: La eficiencia de un proceso o de un dispositivo es la relación entre la energía útil y la energía invertida.

Energía cinética: La energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada.

Energía potencial: La energía potencial es la energía mecánica asociada a la localización de un cuerpo dentro de un campo de fuerza o a la existencia de un campo de fuerza en el interior de un cuerpo. La energía potencial de un cuerpo es una consecuencia de que el sistema de fuerzas que actúa sobre el mismo sea conservativo.

Energía: Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.

Entalpía: Entalpía es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, definida como «el flujo de energía térmica en los procesos químicos efectuados a presión constante cuando el único trabajo es de presión-volumen», es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Entropía: La entropía es una magnitud física para un sistema termodinámico en equilibrio.

Propiedades Termodinámicas: Las propiedades termodinámicas son el calor (q), el trabajo (w) y la energía interna (E).

Máquina térmica: Una máquina térmica es un conjunto de elementos mecánicos que permite intercambiar energía, generalmente a través de un eje, mediante la variación de energía de un fluido que varía su densidad significativamente al atravesar la máquina.

Potencia: Capacidad para producir trabajo, que se mide por la cantidad de trabajo realizado por una fuerza en una unidad de tiempo.

Proceso Adiabático: En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquel en el cual el sistema termodinámico no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isentrópico.

Proceso isocórico: Un proceso isocórico, también llamado proceso isométrico o isovolumétrico es un proceso termodinámico en el cual el volumen permanece constante; Esto implica que el proceso no realiza trabajo presión-volumen

Rendimiento: El rendimiento es la eficacia energética de un dispositivo, máquina, ciclo termodinámico, etc., expresa el cociente entre: La energía obtenida de su funcionamiento y la energía suministrada o consumida por la máquina o el proceso.

Temperatura: La temperatura es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia.

Termodinámica: La termodinámica es la rama de la física que describe los estados de equilibrio termodinámico a nivel macroscópico

Trabajo: El trabajo es la magnitud que equivale al producto escalar de la fuerza por la distancia que recorre su punto de aplicación.

Propiedades intensivas y extensivas: Las propiedades intensivas son aquellas que no dependen de la masa o del tamaño de un cuerpo. Si el sistema se divide en varios subsistemas su valor permanecerá inalterable, por este motivo no son propiedades aditivas.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Esta unidad del proyecto se refiere y definen los métodos, fases y procedimientos necesarios analizar la información y vincularla con el objetivo general previamente establecido de la investigación para así formar resultados exactos y cercanos a los logrados empíricamente.

3.1. Tipo de investigación

Los trabajos de investigación pueden ser de diferentes tipos y se catalogan de distintas maneras, la más usual es su categorización en función de su nivel, los cuales serían: Investigación exploratoria o formuladora, de tipo descriptivo, de tipo explicativo, estudios correlacionales, experimentales y no experimentales.

Esta investigación fue de tipo exploratoria, ya que según Behar D. (2008) “El primer nivel de conocimiento científico sobre un problema de investigación se logra a través de estudios de tipo exploratorio; tienen por objetivo, la formulación de un problema para posibilitar una investigación más precisa o el desarrollo de una hipótesis.”. considerando que se caracteriza por el estudio de impacto de la temperatura en el proceso de combustión en la eficiencia y el consumo de combustible en los motores de combustión interna, mediante el manejo de las variables que afectan e inciden en el comportamiento de este, a través de ecuaciones de máquinas térmicas y comparándolo con resultados de trabajos anteriores.

3.2. Diseño de la investigación

En este estudio, la investigación cuenta con un diseño documental, ya que el proceso se encuentra basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas o electrónicas. Al respecto Sabino Behar D. (2008), sostiene que:

Este tipo de investigación es la que se realiza, como su nombre lo indica, apoyándose en fuentes de carácter documental, esto es, en documentos de cualquier especie. Como subtipos de esta investigación encontramos la investigación bibliográfica, la hemerográfica y la archivística; la primera se basa en la consulta de libros, la segunda en artículos o ensayos de revistas y periódicos y la tercera en documentos que se encuentran en los archivos, como cartas, oficios, circulares, expedientes, etcétera.

Se dice que la presente investigación es de tipo documental, debido a que para realizar el estudio se recurre con frecuencia a fuentes impresas con información ya registrada, o de otro tipo como referencias web, entre otros y de esta manera fundamentar las conclusiones del estudio en técnicas y herramientas teóricas ya conocidas.

3.3. Nivel de la investigación

Esta investigación es de nivel descriptiva, pues se fundamenta en hechos reales, enfocándose en la restricción, registro, análisis e interpretación de las conclusiones, permitiendo poner en manifiesto los conocimientos teóricos y metodológicos para darle solución al problema planteado en esta investigación.

Behar D. (2008). Mediante este tipo de investigación, que utiliza el método de análisis, se logra caracterizar un objeto de estudio o una situación concreta, señalar sus características y propiedades... Su objetivo es describir la estructura de los fenómenos y su dinámica, identificar aspectos relevantes de la realidad.

En el mismo orden de ideas, la investigación se basa en el estudio de impacto de la temperatura en el proceso de combustión en la eficiencia y el consumo de combustible en los motores de combustión interna, en una situación rigurosamente controlada y de esta manera fijar los parámetros por los cuales se regirá la investigación.

3.4. Población y muestra

Una población según Arias (2006), “Es el conjunto de elementos con características comunes que son objeto de análisis y para los cuales serán válidas las conclusiones de la investigación”.

Hurtado y Toro (2001), la definen como, “Es la composición de todos los elementos a ser estudiados y a quienes podrán ser generalizados los resultados de la investigación, una vez concluida ésta, para lo que es necesario que la muestra con la cual se trabaje sea representativa de la población”. Con base en las definiciones de los autores, la población es la totalidad de los integrantes objetos del estudio, por lo que, para los efectos de esta investigación las poblaciones corresponden a las diferentes curvas características y gráficas experimentales que muestran los fabricantes.

Para autores como Balestrini (2003), la muestra “Es obtenida con el fin de investigar, a partir del conocimiento de sus características particulares, las propiedades de una población”. Sin embargo, la muestra a seleccionar en esta investigación es del tipo no probabilística. Véliz y Arredondo determinan en su trabajo de grado titulado, Aspectos Teóricos Sobre Tipos de Muestreo, que este tipo de muestra es: “aquel tipo de muestra para el cual no puede no puede calcularse la probabilidad de extracción de una determinada muestra”. Por lo tanto, las muestras seleccionadas fueron: las diversas variables que afectan la eficiencia en los motores de combustión interna.

3.5. Técnicas de recolección de información

Los datos según Sabino C (1992) son “Cada uno de los elementos de información que se recoge durante el desarrollo de una investigación y sobre la base de los cuales, convenientemente sintetizados, podrán extraerse conclusiones con relevancia en relación con el problema inicial planteado”.

Con el propósito de recolectar datos se dispondrá de técnicas, tanto cuantitativas como cualitativas. La Torre M. (2007) define las técnicas y métodos de recolección de datos como:

Herramientas que se manipulan para obtener información y para llevar a cabo las observaciones de una investigación o estudio determinado. Conforme a lo que se desea investigar o estudiar, la característica a observar, sus propiedades y factores relacionados con aspectos naturales, económicos, políticos, sociales, etc., cuando se selecciona uno de estos instrumentos. En otras palabras, estos son los que permiten efectuar observaciones, de uno u otro fenómeno en una forma más despejada y precisa de la descripción de los hechos a estudiar.

En esta investigación se hizo uso de las siguientes herramientas de recolección de datos: localización y consolidación de los datos, revisión documental la cual es definida por Candelo (2006)

Esta técnica se realizará con el fin de profundizar la información recopilada con todas las aplicadas anteriormente, esta comprende la búsqueda de la información de documentos empresariales, que contribuyan al conocimiento del comportamiento de sucesos realizados que sirvan de apoyo para el desarrollo de teorías pertinentes para la resolución de problemas.

3.6. Fases metodológicas

Se describirán de manera individual, las respectivas acciones, procedimientos, técnicas y actividades que se realizaron, para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

Fase I: Diagnostico del proceso.

En esta fase se definen los motores de combustión en los cuales se va a enfocar esta investigación, se refleja el funcionamiento del mismo.

Fase II: Analizar e identificar las variables involucradas en el proceso de combustión.

Definido el funcionamiento del proceso, se procede a determinar el reconocimiento de las variables presentes en el sistema. Estas variables serían las propiedades según cada etapa del proceso.

Fase III: Determinar las causas de la pérdida de potencia y la disminución de la eficiencia en el proceso de combustión interna.

Determinadas las variables presentes en las diferentes etapas del proceso. Se analiza cuales son las variables de mayor impacto en la eficiencia del sistema y el trabajo realizado a partir de dicha eficiencia.

Fase IV: Análisis y conclusiones de los resultados obtenidos.

Analizar el desarrollo del proceso efectuado en el sistema, tomando como punto de partida los datos arrojados en la culminación del proyecto de investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En esta parte de la investigación se plasma los resultados obtenidos en cada una de las fases metodológicas establecidas en los capítulos anteriores a fin de cumplir con los objetivos principal, el cual es, estudiar el efecto de los diferentes niveles de temperatura presentes en el proceso de combustión de los motores de combustión, para la cual se estable como punto de estudio los motores de combustión interna de encendido por chispa y ciclo de cuatro tiempos. En la misma se busca generar un registro en función de la temperatura de; eficiencia del proceso, consumo de combustible del mismo y otras variables relevantes, así como la descripción especificada del proceso de combustión en los motores de combustión interna.

4.1. Diagnóstico del proceso.

Para la puesta en marcha de este proyecto de investigación se estable el motor de combustión interna de encendido por chispa de ciclo de cuatro tiempos (ciclo Otto), como el objeto de estudio para la realización del mismo como referencia se muestra la figura 21 y 22.

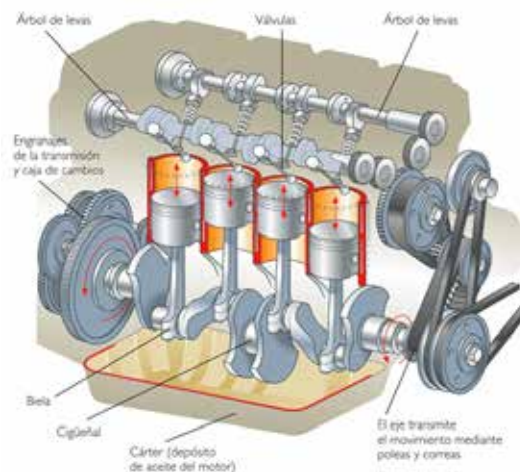


Figura 21: Motor de ciclo Otto.

Fuente:

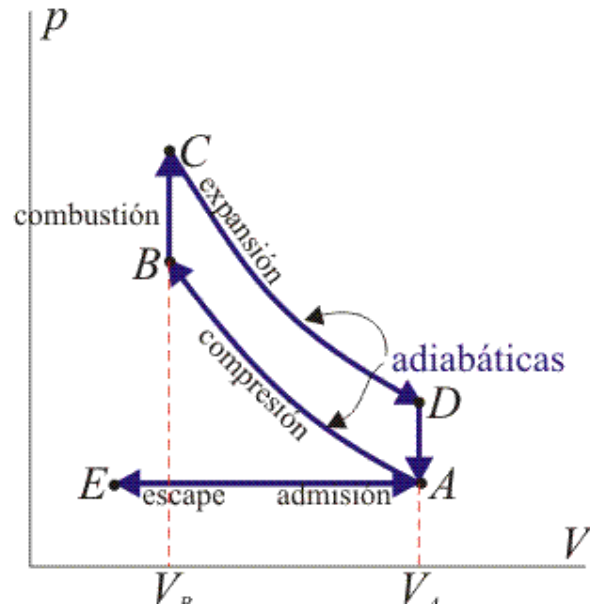


Figura 22: Grafica de trabajo ideal del ciclo Otto.

Fuente: Cengel. Y, termodinámica.

4.1.1. Admisión del Ciclo Otto.

En la figura 23 y 24, se muestra la descripción esquemática de la etapa de admisión del ciclo Otto. Así como en la primera tabla se describe las condiciones o proceso de la etapa estudiada.

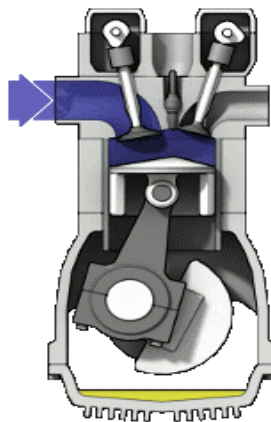


Figura 23: Proceso de admisión, ciclo Otto.

Fuente: es

Tabla 1: Proceso de Admisión, ciclo Otto.

Proceso de Admisión, ciclo Otto.	
Elemento aportado:	Oxígeno (O_2)
Temperatura al momento de aporte (T^0):	Temperatura ambiente, aprox. $30^\circ C$
Presión (atm):	Presión atmosférica, aprox. 1 atm
Volumen (L):	Volumen según la capacidad del motor (V_{max})
Estado de fase:	Gas ideal, condiciones ambientales
Descripción: el proceso de admisión es el primer paso en el funcionamiento del ciclo Otto. Se inserta oxígeno en condiciones ambientales a la cámara de combustión, se lleva a cabo al abrir la válvula de admisión que deja pasar el oxígeno que es succionado por el vacío creado por el pistón al iniciar su desplazamiento hacia el PMI. El oxígeno insertado inicialmente, sufre alteraciones en su temperatura al entrar en contacto con la superficie de la cámara de combustión.	

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

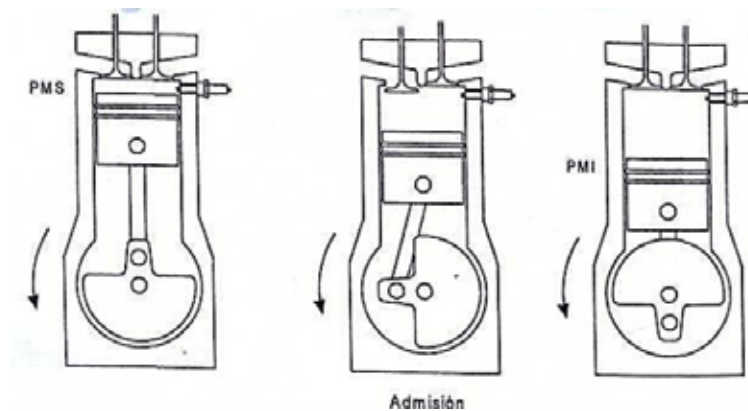


Figura 24: Etapa de admisión de un motor de cuatro tiempos.

Fuente: Goñi, 2009.

4.1.2. Compresión del ciclo Otto.

El comportamiento y la descripción visual, del proceso de compresión del motor de ciclo Otto, se refleja en las figuras 25 y 26, mientras que las condiciones y características de estado se muestran en la tabla dos.

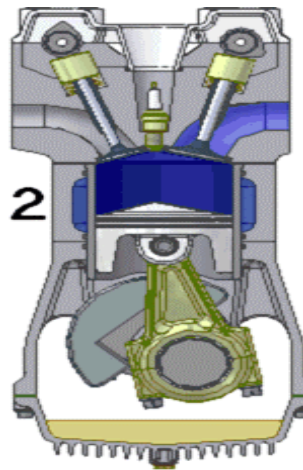


Figura 25: Proceso de compresión, ciclo Otto.

Fuente: es

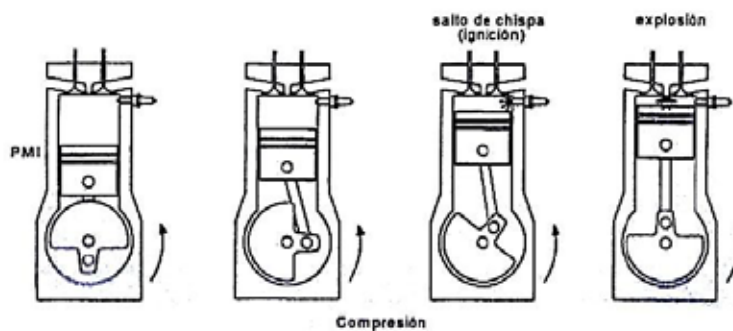


Figura 26: Etapa de compresión de un motor de cuatro tiempos.

Fuente: Goñi, 2009.

Tabla 2: Proceso de compresión, ciclo Otto

Proceso de Compresión, ciclo Otto.	
Elemento aportado:	Oxigeno

Temperatura al momento de aporte (T^0):	Temperatura ambiente, aprox. 30° C
Presión (atm):	Presión; varía según la relación de compresión del motor
Volumen (L):	Volumen según la capacidad del motor (V_{max}) – (V_{min})
Estado de fase:	Gas ideal (O_2), oxígeno comprimido
Relación de compresión:	4 – 16
Descripción: luego de que el pistón llega a su punto inferior PMI, se cierra la válvula de admisión, y comienza el proceso de compresión del material suministrado. Ese proceso consta del movimiento ascendente del pistón hasta llegar al punto superior PMS, en el cual se encuentra la máxima temperatura y presión antes de la combustión. En este punto se considera la energía obtenida producto de la compresión del fluido.	

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

4.1.3. Proceso de Expansión (combustión), ciclo Otto.

Las figuras 27 y 28, permiten apreciar la etapa de expansión del motor de ciclo Otto. Las cuales se complementan con la descripción de la etapa mostrada en la tabla tres.

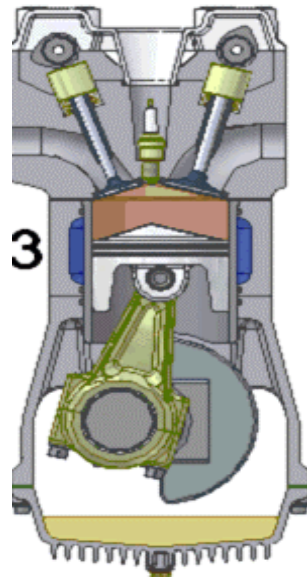


Figura 27: Proceso de expansión (combustión), ciclo Otto.

Fuente: es

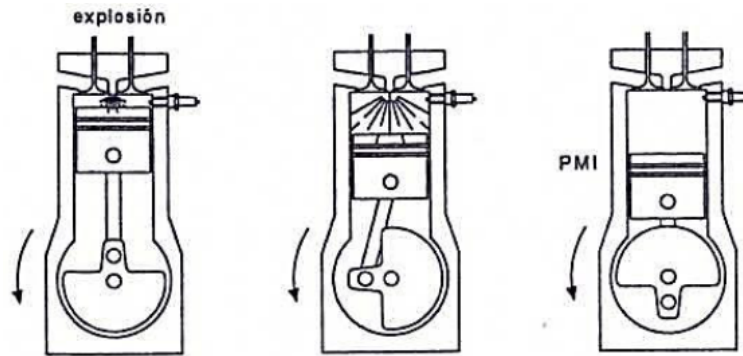


Figura 28: Etapa de expansión de un motor de cuatro tiempos.

Fuente: Goñi, 2009.

Tabla 3: Proceso de expansión (combustión), ciclo Otto.

Proceso de Expansión (combustión), ciclo Otto.	
Elemento de trabajo:	Mezcla oxígeno combustible (gasolina)
Temperatura al momento de aporte (T^0):	Temperatura de combustión, referida según el punto de ignición del combustible.

Presión (atm):	Presión; presión de combustión, Pmax del sistema
Volumen (L):	Volumen según la capacidad del motor (Vmin) – (Vmax)
Estado de fase:	Mescla de oxígeno combustible.
Qentrada:	$(400 - 1800) \text{ KJ} / \text{Kg}$
Tcombustión:	$(520 - 910) \text{ K}$
<p>Descripción: finalizada la compresión del oxígeno, se activa el inyector de combustible hacia la cámara de combustión, se libera de manea tal, que el fluido que se libera logre la atomización, de tal manera que se logra llegar lo más cerca posible a considerar la mescla formada como sustancia pura al mezclarse con el oxígeno comprimido. En esta etapa se encuentra la energía calorífica Q liberada en la combustión, así como la temperatura, entalpia, entropía y presión máximas. Con la energía calorífica liberada en el sistema, se logra una presión capaz de desplazar el pistón hasta el PMI, produciendo así el accionamiento del motor. Es importante considerar el punto de ignición del carburante utilizado.</p>	

Fuente: Ortega y Manrique (2020).

4.1.4. Proceso de Escape, ciclo Otto.

La etapa de escape del motor de ciclo otto, se aprecia en las figuras 29 y 30. Mientras que las características de la etapa se observan en la tabla cuatro.

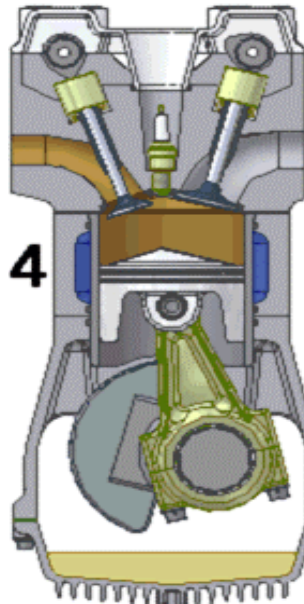


Figura 29: Proceso de escape, ciclo Otto
Fuente: es

Tabla 4: Proceso de escape, ciclo Otto.

Proceso de Escape, ciclo Otto.	
Elemento de trabajo:	Mezcla residual del proceso de combustión (conformada principalmente por CO ₂ , en combustión completa)
Temperatura al momento de aporte:	(1245 – 2780) °K
Presión (atm):	Presión; de P _{max} – P _{atm}
Volumen (L):	Volumen según la capacidad del motor (V _{max}) – (V _{min})
Estado de fase:	Residuos gaseosos del proceso de combustión. Se considera como gas ideal, debido a su composición química.

Descripción: después de la combustión, y al estar el pistón en el PMI, inicia el escape hacia la atmosfera de los gases residuales del motor por el sistema de escape del mismo. En este punto se considera las variables de temperatura, intercambio calorífico con el ambiente (se considera ambiente, a toda el área en contacto con la cámara de combustión).

Fuente: Ortega y Manrique (2020).

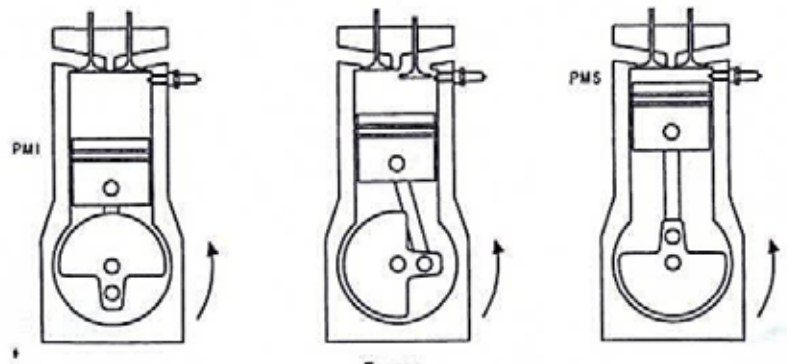


Figura 30: Etapa de escape de un motor de cuatro tiempos.

Fuente: Goñi, 2009.

En todo proceso de combustión real, existe un intercambio energético con el ambiente, siendo la temperatura el principal componente de intercambio. Factores como entropía, entalpía, poder calorífico del combustible, factor de compresibilidad, dimensiones físicas de la cámara de combustión, volúmenes específicos manejados. Son variables que impactan directamente en la eficiencia del motor de ciclo Otto, y por lo tanto su rendimiento.

4.2. Analizar e identificar las variables involucradas en el proceso de combustión.

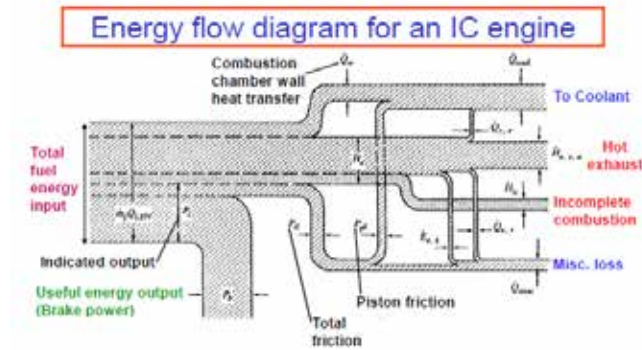


Figura 31: Distribución de la energía calórica del proceso de combustión..

Fuente: <http://web.mit.edu/2.61/www/Lecture%20notes/Lec.%2018%20Heat%20transf.pdf>.

Definido la distribución energética del proceso de combustión. Según el poder calorífico por unidad de masa, se toma como referencia un valor de relación de combustible (AC) de 14,7:1 (relación estequiométrica ideal para el proceso de combustión), de donde se deduce la masa estequiométrica total.

$$1000\text{g de capacidad volumétrica} - 15,7\text{g de masa estequiométrica total}$$

$$X - 1\text{g}$$

Se obtiene la masa de combustible aplicada a la combustión.

$X = 63,69\text{g}$ de combustible. Esta masa representa, en un motor específico, con una capacidad tal, que, su capacidad volumétrica total es de 1000g.

Considerando el poder calorífico de la gasolina, la cual se expresa como KJ por Kg. Se obtiene el poder calorífico presente, para el caso particular donde se cuenta con un motor de 1000g de capacidad.

$$q_{\text{comb}} = 32000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} (0,0636 \text{ Kg de combustible})$$

$$q_{\text{comb}} = q_{\text{entrada}}$$

$$q_{\text{entrada}} = 2035$$

Asumiendo el porcentaje de poder calorífico descrito en la figura 31 y 32, en poder calorífico Q aportado al ciclo en el proceso de combustión es.

$$Q = q_{\text{entrada}} * 30\%$$

$$Q = 610 \text{ KJ}$$

Energy flow distribution for SI and Diesel

TABLE 12.1
Energy balance for automotive engines at maximum power

	P_b	\dot{Q}_{cool}	\dot{Q}_{misc}	$\dot{H}_{e,lc}$	$\dot{m}h_{e,s}$
	(percentage of fuel heating value)				
SI engine	25–28	17–26	3–10	2–5	34–45
Diesel	34–38	16–35	2–6	1–2	22–35

Sources: From Khovakh,³ Sitkei,⁴ and Burke *et al.*⁵

Update for modern engines:
SI engine in the low 30's
Diesel in the low 40's

Figura 32: Energía en la combustión.

Fuente: <http://web.mit.edu/2.61/www/Lecture%20notes/Lec.%2018%20Heat%20transf.pdf>.

4.2.1. Variables Según la Energía.

Para el análisis del sistema se utilizaron valores promedios de presión, temperatura, energía calórica y relación de compresión los cuales se muestran en la tabla 5 los cuales se introdujeron en el modelo matemático del apéndice A.



Figura 33: Programa simulador del proceso.

Fuente: Ortega y Manrique (2020).

Tabla 5: Características para el cálculo del Ciclo Otto Ideal

P_1	100[kPa]
T_1	300[K]
q_{entrada}	800[kPa]
r_c	6
γ	1,4
R_a	$0,2869 \left[\frac{kJ}{kg} \cdot K \right]$

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 33:

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

$c_v = 0,7177$ [kJ/kg·K]	$\eta_{\text{th}} = 51,16$	$\gamma = 1,4$
$m = 1$ [kg]	PME = 570,7 [kPa]	$P_1 = 100$ [kPa]
$P_2 = 1229$ [kPa]	$P_3 = 3458$ [kPa]	$P_4 = 281,5$ [kPa]
$q_{\text{entrada}} = 800$ [kJ/kg]	$Q_{\text{entrada}} = 800$ [kJ]	$Q_{\text{salida}} = 390,7$ [kJ]
$R_a = 0,2869$ [kJ/kg·K]	$r_c = 6$	$T_1 = 300$ [K]
$T_2 = 614,3$ [K]	$T_3 = 1729$ [K]	$T_4 = 844,4$ [K]
$V_1 = 0,8607$ [m ³]	$V_2 = 0,1435$ [m ³]	$V_3 = 0,1435$ [m ³]
$V_4 = 0,8607$ [m ³]	$W_{\text{neto}} = 409,3$ [kJ]	

Figura 33: Resultados para el cálculo del Ciclo Otto Ideal.

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Luego se procedió a realizar el mismo análisis utilizando el modelo matemático del anexo B con el ciclo Otto utilizando valores de volúmenes específicos relativos del anexo A (Resultados para el cálculo del Ciclo Otto con volúmenes específicos relativos), obteniendo los resultados de la figura 34.

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

$c_v = 0,7177$ [kJ/kg-K]	$\eta_{\text{ter}} = 47,07$	$\eta_{\text{ter,otta}} = 51,16$
$\gamma = 1,4$	PME = 524,8 [kPa]	$P_1 = 100$ [kPa]
$P_2 = 1210$ [kPa]	$P_3 = 3072$ [kPa]	$q_{\text{entrada}} = 800$ [kJ/kg]
$q_{\text{neto}} = 376,6$ [kJ/kg]	$q_{\text{salida}} = 423,4$ [kJ/kg]	$r_c = 6$
$T_1 = 300$ [K]	$T_2 = 604,9$ [K]	$T_3 = 1536$ [K]
$T_4 = 855,2$ [K]	$u_1 = 214,3$ [kJ/kg]	$u_2 = 438,8$ [kJ/kg]
$u_3 = 1239$ [kJ/kg]	$u_4 = 637,7$ [kJ/kg]	$v_1 = 0,8611$ [m ³ /kg]
$v_2 = 0,1435$ [m ³ /kg]	$v_3 = 0,1435$ [m ³ /kg]	$v_4 = 0,8611$ [m ³ /kg]
$v_{r1} = 621,2$	$v_{r2} = 103,5$	$v_{r3} = 6,626$
$v_{r4} = 39,76$	$w_{\text{neto}} = 376,6$ [kJ/kg]	

Figura 34: Resultados para el cálculo del Ciclo Otto con volúmenes específicos relativos.**Fuente:** Ortega y Manrique (2020)

Para estos datos se le asignan propiedades físicas al motor para simular el ciclo Otto, y obtener así resultados de Temperatura-Entropía, Temperatura-Angulo del cigüeñal, Presión-Angulo del cigüeñal y Presión-Volumen. Las propiedades se muestran en la tabla 6

Tabla 6 : Propiedades físicas de un motor de combustión interna.

<i>Carrera</i>	75[mm]
<i>Diametro</i>	130[mm]
<i>RPM</i>	$3000 \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$
T_{max}	2000[K]
L_{biela}	110[mm]

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

4.3. Determinar las Causas de la Pérdida de Potencia y la Disminución de la Eficiencia en el Proceso de Combustión Interna.

Para analizar el caso de estudio para un motor de combustión interna propuesto se realiza un programa en EES® (Engineering Equation Solver) para resolver el modelo matemático planteado del ciclo Otto ideal que se muestra en el anexo B utilizando los datos de la tabla 6.

Los datos obtenidos del ciclo Otto se pueden observar desde la tabla 7 a la tabla 10.

Tabla 7: Cálculos del ciclo Otto para la fase de admisión.

Ang	Vol.	m	T	P	s	v	u	Tope pistón
[°]	[m ³]	[kg]	[K]	[kPa]	[kJ/kg-K]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[mm]
0	1,99E-04	7,71E-05	900	100	6,852	2,583	674,9	142,5
10	2,09E-04	8,88E-05	820,6	100	6,749	2,355	609,4	143,3
20	2,39E-04	1,23E-04	674,7	100	6,536	1,937	492,8	145,5
30	2,87E-04	1,79E-04	558,4	100	6,337	1,603	403,5	149,1
40	3,50E-04	2,53E-04	483,1	100	6,187	1,387	347,3	153,9
50	4,26E-04	3,40E-04	435,9	100	6,082	1,251	312,6	159,6
60	5,10E-04	4,38E-04	405,5	100	6,009	1,164	290,5	165,9
70	6,00E-04	5,42E-04	385,3	100	5,958	1,106	275,8	172,7
80	6,90E-04	6,47E-04	371,4	100	5,921	1,066	265,7	179,5
90	7,79E-04	7,51E-04	361,6	100	5,894	1,038	258,7	186,2
100	8,63E-04	8,48E-04	354,5	100	5,874	1,018	253,5	192,5

110	9,40E-04	9,38E-04	349,3	100	5,859	1,003	249,8	198,3
120	1,01E-03	1,02E-03	345,5	100	5,848	0,9917	247	203,4
130	1,07E-03	1,08E-03	342,7	100	5,839	0,9836	245	207,8
140	1,11E-03	1,14E-03	340,6	100	5,833	0,9777	243,5	211,3
150	1,15E-03	1,18E-03	339,2	100	5,829	0,9736	242,5	214,1
160	1,17E-03	1,21E-03	338,2	100	5,826	0,9708	241,8	216
170	1,19E-03	1,23E-03	337,7	100	5,825	0,9692	241,4	217,1
180	1,20E-03	1,23E-03	337,5	100	5,824	0,9687	241,3	217,5

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 8: Cálculos del ciclo Otto para la fase de compresión.

Ang	Vol.	m	T	P	s	v	u	Tope pistón
[°]	[m ³]	[kg]	[K]	[kPa]	[kJ/kg-K]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[mm]
190	1,19E-03	1,23E-03	338,1	100,6	5,824	0,9647	241,7	217,1
200	1,17E-03	1,23E-03	339,8	102,4	5,824	0,9524	242,9	216
210	1,15E-03	1,23E-03	342,8	105,6	5,824	0,9317	245,1	214,1
220	1,11E-03	1,23E-03	347,2	110,4	5,824	0,9024	248,2	211,3
230	1,07E-03	1,23E-03	353,2	117,3	5,824	0,8642	252,6	207,8
240	1,01E-03	1,23E-03	361,1	126,8	5,824	0,8173	258,3	203,4
250	9,40E-04	1,23E-03	371,3	139,8	5,824	0,7622	265,7	198,3
260	8,63E-04	1,23E-03	384,1	157,5	5,824	0,6999	274,9	192,5

270	7,79E-04	1,23E-03	400	181,7	5,824	0,6318	286,5	186,2
280	6,90E-04	1,23E-03	419,6	215,2	5,824	0,5597	300,7	179,5
290	6,00E-04	1,23E-03	443,6	261,9	5,824	0,4861	318,2	172,7
300	5,10E-04	1,23E-03	472,5	327,9	5,824	0,4137	339,5	165,9
310	4,26E-04	1,23E-03	506,9	421,4	5,824	0,3453	365	159,6
320	3,50E-04	1,23E-03	546,5	552,4	5,824	0,284	394,5	153,9
330	2,87E-04	1,23E-03	589,5	727,4	5,824	0,2326	427,1	149,1
340	2,39E-04	1,23E-03	631,2	934,8	5,824	0,1938	459	145,5
350	2,09E-04	1,23E-03	663,1	1122	5,824	0,1697	483,7	143,3
360	1,99E-04	1,23E-03	675,3	1201	5,824	0,1615	493,3	142,5

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 9: Cálculos del ciclo Otto para la fase de expansión.

An g	Vol.	m	T	P	s	v	u	Tope pistón
[°]	[m ³]	[kg]	[K]	[kPa]	[kJ/kg-K]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[mm]
370	2,09E-04	1,23E-03	197,2	3336	6,777	0,1697	1651	143,3
380	2,39E-04	1,23E-03	189,5	2806	6,777	0,1938	1577	145,5
390	2,87E-04	1,23E-03	179,3	2213	6,777	0,2326	1480	149,1
400	3,50E-04	1,23E-03	168,8	1706	6,777	0,284	1381	153,9
410	4,26E-04	1,23E-03	159,0	1321	6,777	0,3453	1289	159,6
420	5,10E-04	1,23E-03	150,3	1043	6,777	0,4137	1208	165,9

430	6,00E-04	1,23E-03	1429	843,9	6,777	0,4861	1140	172,7
440	6,90E-04	1,23E-03	1367	701,1	6,777	0,5597	1084	179,5
450	7,79E-04	1,23E-03	1316	597,8	6,777	0,6318	1037	186,2
460	8,63E-04	1,23E-03	1273	522,2	6,777	0,6999	999,1	192,5
470	9,40E-04	1,23E-03	1239	466,6	6,777	0,7622	968,3	198,3
480	1,01E-03	1,23E-03	1211	425,4	6,777	0,8173	943,7	203,4
490	1,07E-03	1,23E-03	1190	395,2	6,777	0,8642	924,5	207,8
500	1,11E-03	1,23E-03	1173	373,2	6,777	0,9024	909,8	211,3
510	1,15E-03	1,23E-03	1161	357,7	6,777	0,9317	899,1	214,1
520	1,17E-03	1,23E-03	1153	347,4	6,777	0,9524	891,8	216
530	1,19E-03	1,23E-03	1148	341,6	6,777	0,9647	887,5	217,1
540	1,20E-03	1,23E-03	1146	339,7	6,777	0,9687	886,2	217,5

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 10: Cálculos del ciclo Otto para la fase de escape.

An g	Vol.	m	T	P	s	v	u	Tope pistón
[°]	[m ³]	[kg]	[K]	[kPa]	[kJ/kg-K]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[mm]
550	1,19E-03	5,10E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,1
560	1,17E-03	5,04E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	216
570	1,15E-03	4,93E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	214,1
580	1,11E-03	4,78E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	211,3

590	1,07E-03	4,57E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	207,8
600	1,01E-03	4,33E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	203,4
610	9,40E-04	4,03E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	198,3
620	8,63E-04	3,70E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	192,5
630	7,79E-04	3,34E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	186,2
640	6,90E-04	2,96E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	179,5
650	6,00E-04	2,57E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	172,7
660	5,10E-04	2,19E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	165,9
670	4,26E-04	1,83E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	159,6
680	3,50E-04	1,50E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	153,9
690	2,87E-04	1,23E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	149,1
700	2,39E-04	1,03E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	145,5
710	2,09E-04	8,98E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	143,3
720	1,99E-04	7,71E-05	900	100	6,852	2,583	674,9	142,5

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Seguidamente se analiza el efecto en la eficiencia térmica que produce la variación de la relación de compresión en el rango de 4 a 16, se realizaron ocho simulación variando la cantidad de energía que ingresa en el sistema la cual se relaciona directamente con la relación de aire combustible del mismo, las simulaciones se realizan para los casos particulares en donde el poder calorífico absorbido por el sistema varía entre los valores 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 y 2000. Estas simulaciones se realizaron tanto con el ciclo Otto ideal mostrado en el apéndice A, como con el ciclo Otto aproximado a la realidad mostrado en el apéndice B, utilizando

valores de volúmenes específicos relativos de la tabla en el Anexo A. Se realizaron 16 simulaciones en EES®, cada simulación conto con una corrida de 100 valores para relación de compresión de 4 a 16. Obteniendo así los resultados mostrados desde la tabla 11 a la tabla 18:

Tabla 11: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 600 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3309	851,3	1319	10,1	3542	1206	1555
4,36	3328	890,6	1342	10,4	3553	1217	1564
4,73	3345	925,6	1364	10,8	3564	1228	1572
5,09	3362	956,9	1384	11,2	3574	1238	1580
5,46	3378	985,3	1402	11,5	3584	1247	1587
5,82	3394	1011	1419	11,9	3594	1257	1594
6,18	3408	1035	1434	12,2	3604	1266	1601
6,55	3423	1057	1449	12,6	3613	1274	1608
6,91	3437	1077	1463	13	3623	1282	1614
7,27	3450	1096	1476	13,3	3632	1290	1621
7,64	3463	1113	1488	13,7	3641	1298	1627
8	3476	1129	1500	14,1	3650	1305	1633
8,36	3488	1145	1511	14,4	3659	1312	1638
8,73	3500	1159	1521	14,8	3668	1319	1644
9,09	3512	1173	1531	15,2	3677	1326	1649
9,46	3524	1186	1541	15,5	3685	1332	1654
9,82	3535	1198	1550	15,9	3693	1338	1659

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 12: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 800 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	1637	340,5	527,5	10,06	1870	482,3	622,2
4,364	1656	356,2	536,9	10,42	1881	486,8	625,6

4,727	1673	370,2	545,5	10,79	1891	491	628,8
5,091	1690	382,8	553,4	11,15	1902	495,1	631,9
5,455	1706	394,1	560,7	11,52	1912	499	634,9
5,818	1721	404,5	567,5	11,88	1922	502,7	637,8
6,182	1736	413,9	573,8	12,24	1932	506,3	640,5
6,545	1751	422,7	579,6	12,61	1941	509,7	643,2
6,788	1760	428,1	583,4	12,85	1948	511,9	644,9
7,152	1774	435,8	588,7	13,21	1957	515,1	647,5
7,515	1787	443	593,6	13,58	1966	518,2	649,9
7,879	1800	449,6	598,4	13,94	1975	521,1	652,3
8,242	1812	455,9	602,8	14,3	1984	524	654,6
8,606	1824	461,8	607,1	14,67	1993	526,8	656,8
8,97	1836	467,4	611,1	15,03	2002	529,4	658,9
9,333	1848	472,6	615	15,39	2010	532	661
9,697	1859	477,6	618,7	15,76	2019	534,5	663,1

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 13: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1000 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	1916	425,7	659,4	10,06	2149	602,9	777,7
4,364	1934	445,3	671,2	10,42	2160	608,5	781,9
4,727	1952	462,8	681,9	10,79	2170	613,8	786
5,091	1969	478,5	691,8	11,15	2181	618,9	789,9
5,455	1985	492,7	700,9	11,52	2191	623,7	793,6
5,818	2000	505,6	709,3	11,88	2201	628,4	797,2
6,182	2015	517,4	717,2	12,24	2210	632,8	800,7
6,545	2029	528,3	724,6	12,61	2220	637,1	804
6,909	2043	538,4	731,4	12,97	2230	641,2	807,2
7,273	2057	547,8	737,9	13,33	2239	645,2	810,4
7,636	2070	556,5	744,1	13,7	2248	649	813,4
8	2083	564,7	749,9	14,06	2257	652,6	816,3
8,364	2095	572,4	755,3	14,42	2266	656,2	819,1
8,727	2107	579,6	760,6	14,79	2275	659,6	821,9
9,091	2119	586,4	765,5	15,15	2283	662,9	824,6
9,455	2130	592,9	770,3	15,52	2292	666	827,1
9,818	2141	599	774,8	15,88	2300	669,1	829,7

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 14: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1200 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2194	510,8	791,3	10,06	2427	723,4	933,3
4,364	2213	534,4	805,4	10,42	2438	730,1	938,3
4,727	2230	555,3	818,3	10,79	2449	736,5	943,2
5,091	2247	574,2	830,1	11,15	2459	742,7	947,8
5,455	2263	591,2	841,1	11,52	2469	748,5	952,3
5,818	2279	606,7	851,2	11,88	2479	754,1	956,6
6,182	2294	620,9	860,6	12,24	2489	759,4	960,8
6,545	2308	634	869,5	12,61	2499	764,5	964,8
6,909	2322	646,1	877,7	12,97	2508	769,5	968,7
7,273	2336	657,4	885,5	13,33	2518	774,2	972,4
7,636	2349	667,9	892,9	13,7	2527	778,8	976,1
8	2361	677,7	899,8	14,06	2536	783,2	979,6
8,364	2374	686,9	906,4	14,42	2545	787,4	983
8,727	2386	695,5	912,7	14,79	2553	791,5	986,3
9,091	2397	703,7	918,6	15,15	2562	795,4	989,5
9,455	2409	711,4	924,3	15,52	2570	799,2	992,6
9,818	2420	718,8	929,8	15,88	2579	802,9	995,6

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 15: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1400 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2473	595,9	923,1	10,06	2706	844	1089
4,364	2492	623,4	939,6	10,42	2717	851,8	1095
4,727	2509	647,9	954,7	10,79	2728	859,3	1100
5,091	2526	669,9	968,5	11,15	2738	866,4	1106
5,455	2542	689,7	981,3	11,52	2748	873,2	1111
5,818	2558	707,8	993,1	11,88	2758	879,7	1116
6,182	2572	724,4	1004	12,24	2768	886	1121
6,545	2587	739,7	1014	12,61	2777	892	1126
6,909	2601	753,8	1024	12,97	2787	897,7	1130
7,273	2614	766,9	1033	13,33	2796	903,2	1135

7,636	2627	779,2	1042	13,7	2805	908,6	1139
8	2640	790,6	1050	14,06	2814	913,7	1143
8,364	2652	801,4	1057	14,42	2823	918,6	1147
8,727	2664	811,5	1065	14,79	2832	923,4	1151
9,091	2676	821	1072	15,15	2841	928	1154
9,455	2688	830	1078	15,52	2849	932,5	1158
9,818	2699	838,5	1085	15,88	2857	936,8	1162

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 16: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1600 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2752	681	1055	10,06	2985	964,6	1244
4,364	2770	712,5	1074	10,42	2996	973,5	1251
4,727	2788	740,4	1091	10,79	3006	982,1	1258
5,091	2805	765,5	1107	11,15	3017	990,2	1264
5,455	2821	788,3	1121	11,52	3027	998	1270
5,818	2836	808,9	1135	11,88	3037	1005	1276
6,182	2851	827,9	1148	12,24	3047	1013	1281
6,545	2865	845,4	1159	12,61	3056	1019	1286
6,909	2879	861,5	1170	12,97	3066	1026	1292
7,273	2893	876,5	1181	13,33	3075	1032	1297
7,636	2906	890,5	1190	13,7	3084	1038	1301
8	2919	903,6	1200	14,06	3093	1044	1306
8,364	2931	915,8	1209	14,42	3102	1050	1311
8,727	2943	927,4	1217	14,79	3111	1055	1315
9,091	2955	938,3	1225	15,15	3119	1061	1319
9,455	2966	948,6	1232	15,52	3128	1066	1323
9,818	2977	958,3	1240	15,88	3136	1071	1327

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 17: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 1800 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3030	766,2	1187	10,06	3263	1085	1400
4,364	3049	801,5	1208	10,42	3274	1095	1407
4,727	3067	833	1227	10,79	3285	1105	1415

5,091	3083	861,2	1245	11,15	3295	1114	1422
5,455	3099	886,8	1262	11,52	3305	1123	1428
5,818	3115	910,1	1277	11,88	3315	1131	1435
6,182	3130	931,4	1291	12,24	3325	1139	1441
6,545	3144	951	1304	12,61	3335	1147	1447
6,909	3158	969,2	1317	12,97	3344	1154	1453
7,273	3172	986,1	1328	13,33	3354	1161	1459
7,636	3185	1002	1339	13,7	3363	1168	1464
8	3197	1017	1350	14,06	3372	1175	1469
8,364	3210	1030	1360	14,42	3381	1181	1474
8,727	3222	1043	1369	14,79	3389	1187	1479
9,091	3233	1056	1378	15,15	3398	1193	1484
9,455	3245	1067	1387	15,52	3406	1199	1489
9,818	3256	1078	1395	15,88	3415	1204	1493

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 18: Valores de un ciclo Otto ideal para un poder calorífico de 2000 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3309	851,3	1319	10,06	3542	1206	1555
4,364	3328	890,6	1342	10,42	3553	1217	1564
4,727	3345	925,6	1364	10,79	3564	1228	1572
5,091	3362	956,9	1384	11,15	3574	1238	1580
5,455	3378	985,3	1402	11,52	3584	1247	1587
5,818	3394	1011	1419	11,88	3594	1257	1594
6,182	3408	1035	1434	12,24	3604	1266	1601
6,545	3423	1057	1449	12,61	3613	1274	1608
6,909	3437	1077	1463	12,97	3623	1282	1614
7,273	3450	1096	1476	13,33	3632	1290	1621
7,636	3463	1113	1488	13,7	3641	1298	1627
8	3476	1129	1500	14,06	3650	1305	1633
8,364	3488	1145	1511	14,42	3659	1312	1638
8,727	3500	1159	1521	14,79	3668	1319	1644
9,091	3512	1173	1531	15,15	3677	1326	1649
9,455	3524	1186	1541	15,52	3685	1332	1654
9,818	3535	1198	1550	15,88	3693	1338	1659

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Los cálculos aproximados a la realidad utilizando valores de volúmenes específicos relativos de la tabla en el Anexo A se realizan entre los valores de poder calorífico de 600 y 1800 [kJ/kg] los resultados se muestran en las talas desde la 19 a la 25, debido a que las tabla de volumen especifico relativo al exceder los 2250 °K las tendencias de los cálculos son negativos como se muestra en la gráfica 25 del poder calorífico de 1800 [kJ/kg] la cual puede ser analizada hasta cierto punto, esto se ve directamente relacionado a la reducción de oxígeno que entra al volumen de admisión debido a la expansión de los gases lo que lleva a una disminución de la potencia de entrega del equipo, además de esto en estas tablas se anexa la eficiencia para cada relación de compresión cosa que no cambia en un ciclo ideal las tablas obtenidas fueron las siguientes:

Tabla 19: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 600 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	1245	237,9	368,3	39,64	10,06	1426	339,1	437,2	56,51
4,364	1260	249	375,2	41,51	10,42	1434	342,3	439,7	57,05
4,727	1274	259	381,5	43,16	10,79	1442	345,4	442	57,56
5,091	1287	267,9	387,2	44,65	11,15	1450	348,3	444,3	58,05
5,455	1299	276,1	392,6	46,01	11,52	1458	351,1	446,5	58,51
5,818	1312	283,4	397,5	47,24	11,88	1465	353,7	448,6	58,96
6,182	1323	290,2	402,1	48,37	12,24	1473	356,3	450,6	59,38
6,545	1335	296,4	406,3	49,4	12,61	1480	358,8	452,5	59,79
6,909	1345	302,1	410,2	50,35	12,97	1487	361,1	454,4	60,18
7,273	1356	307,5	414,1	51,25	13,33	1494	363,4	456,2	60,56
7,636	1366	312,5	417,7	52,09	13,7	1501	365,5	457,9	60,92
8	1376	317,2	421	52,87	14,06	1507	367,7	459,7	61,28
8,364	1385	321,6	424,2	53,6	14,42	1514	369,7	461,4	61,62
8,727	1394	325,7	427,2	54,29	14,79	1520	371,7	463	61,95
9,091	1403	329,6	430,1	54,94	15,15	1527	373,6	464,5	62,27
9,455	1412	333,4	432,9	55,56	15,52	1533	375,4	466	62,57
9,818	1421	336,9	435,6	56,14	15,88	1539	377,1	467,4	62,86

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 20: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 800 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]					[kJ]			
4	1465	311,4	482,2	38,93	10,06	1642	446,4	575,7	55,8
4,364	1480	326,2	491,5	40,78	10,42	1650	450,8	579	56,34
4,727	1493	339,4	500	42,43	10,79	1658	454,9	582,2	56,86
5,091	1506	351,4	507,8	43,92	11,15	1665	458,8	585,3	57,35
5,455	1518	362,2	515,1	45,28	11,52	1673	462,5	588,3	57,82
5,818	1530	372	521,6	46,5	11,88	1680	466,2	591,1	58,27
6,182	1541	381	527,9	47,63	12,24	1687	469,6	593,9	58,7
6,545	1552	389,3	533,6	48,66	12,61	1694	472,9	596,5	59,11
6,909	1563	397	539,1	49,63	12,97	1701	476,1	599,1	59,51
7,273	1573	404,1	544,2	50,52	13,33	1708	479,1	601,5	59,89
7,636	1583	410,8	549	51,35	13,7	1715	482	603,9	60,25
8	1593	417,1	553,6	52,14	14,06	1721	484,9	606,2	60,61
8,364	1602	423	558	52,88	14,42	1728	487,6	608,4	60,95
8,727	1611	428,6	562,1	53,57	14,79	1734	490,3	610,6	61,28
9,091	1620	433,8	566,1	54,23	15,15	1740	492,8	612,8	61,6
9,455	1628	438,8	569,8	54,85	15,52	1746	495,3	614,9	61,92
9,818	1637	443,4	573,4	55,43	15,88	1752	497,9	617,1	62,23

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 21: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1000 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]					[kJ]			
4	1680	383,2	593,3	38,32	10,06	1853	551,7	711,4	55,17
4,364	1694	401,7	605,2	40,17	10,42	1861	557,1	715,6	55,71
4,727	1707	404,4	595,6	40,44	10,79	1869	562,2	719,6	56,22
5,091	1720	421,5	609,1	42,15	11,15	1877	567,1	723,5	56,71
5,455	1732	451,3	641,8	45,13	11,52	1884	571,9	727,3	57,19
5,818	1744	458,4	642,9	45,84	11,88	1891	576,5	731	57,65
6,182	1755	470,1	651,3	47,01	12,24	1898	580,9	734,6	58,09
6,545	1766	481,3	659,8	48,13	12,61	1905	585,1	738	58,51
6,909	1776	491,8	667,8	49,18	12,97	1912	589,1	741,3	58,91
7,273	1786	501,5	675,2	50,15	13,33	1919	592,9	744,4	59,29
7,636	1796	510,4	682	51,04	13,7	1925	596,6	747,4	59,66
8	1805	518,2	687,8	51,82	14,06	1932	600,2	750,4	60,02

8,364	1814	525,1	692,7	52,51	14,42	1938	603,7	753,3	60,37
8,727	1823	531,4	697	53,14	14,79	1944	607	756,1	60,7
9,091	1832	537,3	701,1	53,73	15,15	1950	610,3	758,8	61,03
9,455	1840	542,9	705,1	54,29	15,52	1956	613,4	761,4	61,34
9,818	1848	548,2	708,8	54,82	15,88	1962	616,4	764	61,64

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 22: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1200 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]					[kJ]			
4	1891	453,6	702,4	37,8	10,06	2061	655,7	845,5	54,64
4,364	1905	475,6	716,6	39,64	10,42	2069	662,2	850,6	55,18
4,727	1918	495,3	729,5	41,28	10,79	2077	668,4	855,6	55,7
5,091	1930	513	741,4	42,75	11,15	2084	674,4	860,3	56,2
5,455	1942	529,1	752,4	44,09	11,52	2092	680,1	864,9	56,67
5,818	1954	543,7	762,5	45,31	11,88	2099	685,6	869,4	57,13
6,182	1965	557,2	772	46,44	12,24	2106	690,8	873,6	57,57
6,545	1975	569,6	780,8	47,47	12,61	2112	695,8	877,7	57,98
6,909	1985	581,2	789,1	48,43	12,97	2119	700,6	881,6	58,38
7,273	1995	592	797,2	49,34	13,33	2126	705,2	885,4	58,77
7,636	2004	602,2	804,7	50,18	13,7	2132	709,7	889	59,14
8	2014	603,9	801,5	50,32	14,06	2139	714	892,6	59,5
8,364	2023	605,1	798,2	50,43	14,42	2145	718,1	896,1	59,85
8,727	2031	613,1	804,1	51,09	14,79	2151	722,2	899,5	60,18
9,091	2040	634,1	827,4	52,84	15,15	2157	726,1	902,8	60,51
9,455	2048	649,2	843,2	54,1	15,52	2163	729,8	906	60,82
9,818	2056	654,2	845,9	54,52	15,88	2169	733,5	909,1	61,12

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 23: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1400 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]					[kJ]			
4	2099	523,4	810,5	37,39	10,06	2267	758	977,4	54,14
4,364	2112	548,9	826,9	39,21	10,42	2275	765,6	983,4	54,68
4,727	2125	571,6	841,9	40,83	10,79	2283	772,8	989,1	55,2
5,091	2137	592,1	855,6	42,29	11,15	2290	779,7	994,6	55,69

5,455	2149	610,8	868,5	43,63	11,52	2297	786,2	1000	56,16
5,818	2160	627,7	880,3	44,84	11,88	2304	792,7	1005	56,62
6,182	2171	643,5	891,5	45,96	12,24	2311	798,8	1010	57,06
6,545	2182	657,9	901,8	46,99	12,61	2318	803,6	1014	57,4
6,909	2192	671,3	911,6	47,95	12,97	2324	803,9	1012	57,42
7,273	2201	683,9	920,8	48,85	13,33	2331	804	1009	57,43
7,636	2211	695,6	929,5	49,68	13,7	2337	805,1	1009	57,51
8	2220	706,5	937,7	50,47	14,06	2344	808,6	1011	57,76
8,364	2229	716,9	945,6	51,2	14,42	2350	815,4	1017	58,24
8,727	2238	726,5	952,9	51,9	14,79	2356	827,6	1031	59,12
9,091	2246	735,7	960	52,55	15,15	2362	840,6	1045	60,05
9,455	2254	744,5	966,8	53,18	15,52	2368	848,1	1053	60,58
9,818	2262	752,7	973,3	53,77	15,88	2374	852,3	1056	60,88

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 24: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1600 [kJ/kg]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]	
4	2099	523,4	810,5	10,06	2267	758	977,4	54,14
4,364	2112	548,9	826,9	10,42	2275	765,6	983,4	54,68
4,727	2125	571,6	841,9	10,79	2283	772,8	989,1	55,2
5,091	2137	592,1	855,6	11,15	2290	779,7	994,6	55,69
5,455	2149	610,8	868,5	11,52	2297	786,2	1000	56,16
5,818	2160	627,7	880,3	11,88	2304	792,7	1005	56,62
6,182	2171	643,5	891,5	12,24	2311	798,8	1010	57,06
6,545	2182	657,9	901,8	12,61	2318	803,6	1014	57,4
6,909	2192	671,3	911,6	12,97	2324	803,9	1012	57,42
7,273	2201	683,9	920,8	13,33	2331	804	1009	57,43
7,636	2211	695,6	929,5	13,7	2337	805,1	1009	57,51
8	2220	706,5	937,7	14,06	2344	808,6	1011	57,76
8,364	2229	716,9	945,6	14,42	2350	815,4	1017	58,24
8,727	2238	726,5	952,9	14,79	2356	827,6	1031	59,12
9,091	2246	735,7	960	15,15	2362	840,6	1045	60,05
9,455	2254	744,5	966,8	15,52	2368	848,1	1053	60,58
9,818	2262	752,7	973,3	15,88	2374	852,3	1056	60,88

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Tabla 25: Valores de un ciclo Otto real para un poder calorífico de 1800 [kJ/kg]

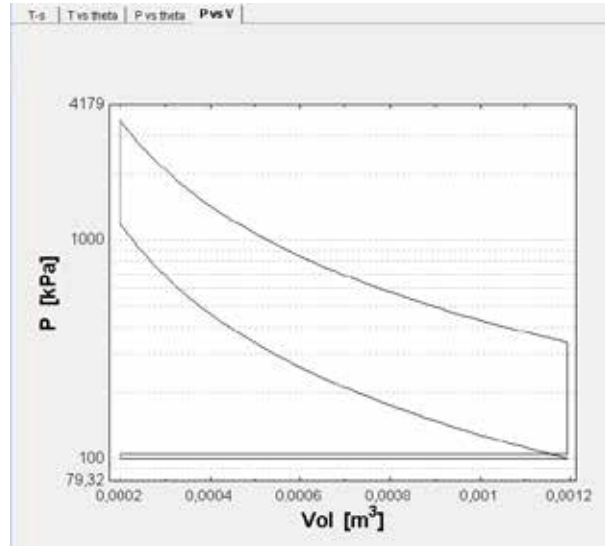
Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	2508	636,5	985,5	35,36	10,06	2673	854,7	1102	47,48
4,364	2521	665,4	1002	36,97	10,42	2681	857,6	1102	47,64
4,727	2534	690,9	1018	38,38	10,79	2688	859,6	1100	47,76
5,091	2546	713,2	1031	39,62	11,15	2696	861	1098	47,83
5,455	2557	733,2	1043	40,73	11,52	2703	861,6	1096	47,86
5,818	2568	750,8	1053	41,71	11,88	2710	861,5	1092	47,86
6,182	2579	766,7	1062	42,59	12,24	2716	860,6	1088	47,81
6,545	2589	780,6	1070	43,37	12,61	2723	859,1	1084	47,73
6,909	2599	793,1	1077	44,06	12,97	2730	856,8	1078	47,6
7,273	2609	804,3	1083	44,68	13,33	2736	853,7	1072	47,43
7,636	2618	814,2	1088	45,23	13,7	2742	849,8	1065	47,21
8	2627	823	1092	45,72	14,06	2748	845,2	1057	46,95
8,364	2636	830,7	1096	46,15	14,42	2755	839,8	1048	46,65
8,727	2644	837,4	1098	46,52	14,79	2761	833,5	1038	46,3
9,091	2652	843,3	1100	46,85	15,15	2766	826,2	1027	45,9
9,455	2660	848,3	1102	47,13	15,52	2772	818	1015	45,44
9,818	2668	852,4	1102	47,36	15,88	2778	808,7	1002	44,93

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

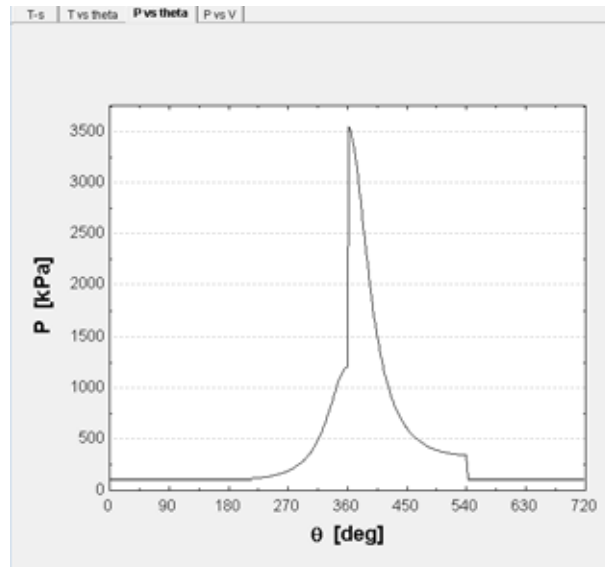
4.4. Evaluar el impacto final en la potencia generada por la combustión, la eficiencia de este y el consumo de combustible, usando métodos analíticos termodinámicos en el proceso de combustión.

Obtenidos estos valores se procede a graficar y comparar los resultados para la facilidad de análisis y demostración.

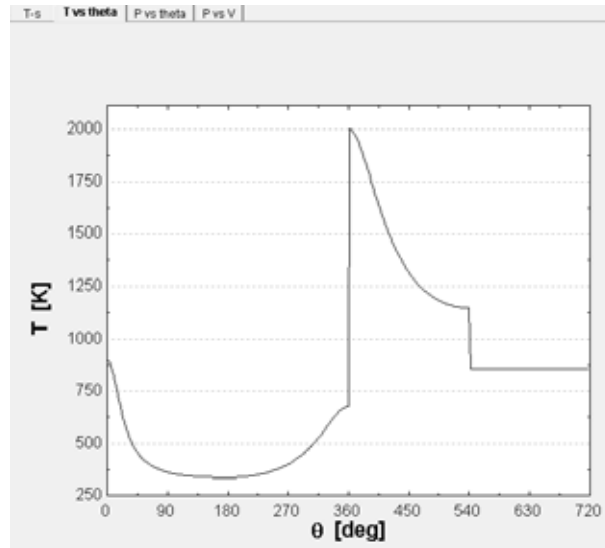
Las gráficas de 1 a 4 muestran la variación de las propiedades termodinámicas dentro los diferentes estados del ciclo Otto



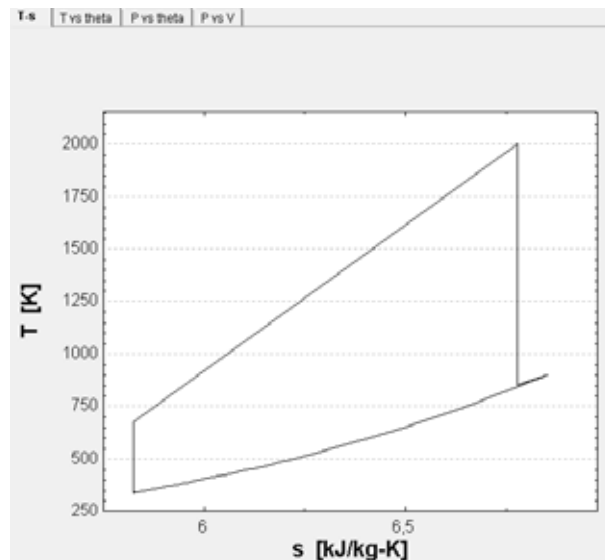
Gráfica 1: Presión - Volumen
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



Gráfica 2: Presión - Angulo del cigüeñal
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



Gráfica 3: Temperatura - Angulo del cigüeñal.
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



Gráfica 4: Temperatura - Entropía
Fuente: Ortega y Manrique (2020)

También se dispone de un programa para cálculos del anexo B para el cálculo de diferentes propiedades para el cálculo y animación de las propiedades durante los estados y el proceso del ciclo Otto se observa una ilustración de este en la figura 21.

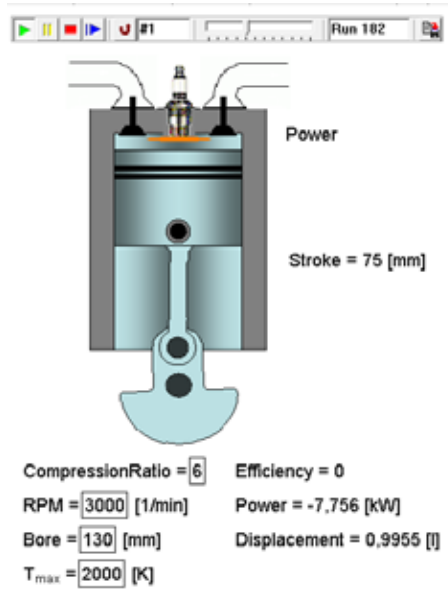
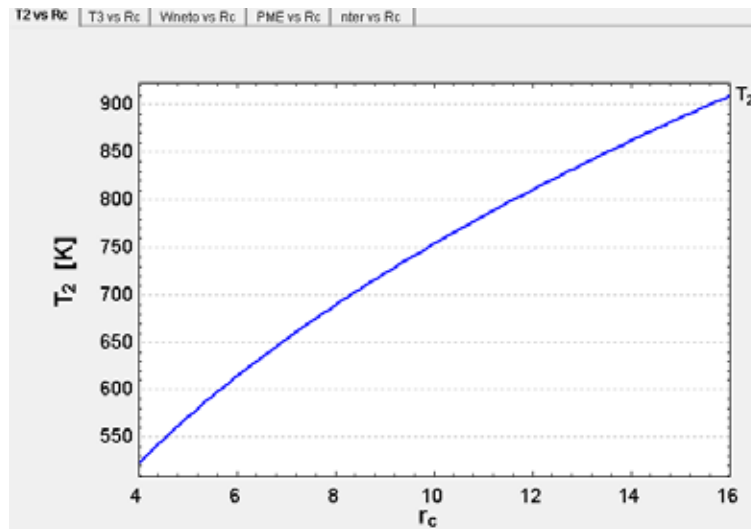


Figura 34: Animación ciclo Otto con propiedades variables.
Fuente: Engineering Equation Solver

Para el ciclo ideal del ciclo Otto se obtienen las siguientes graficas:

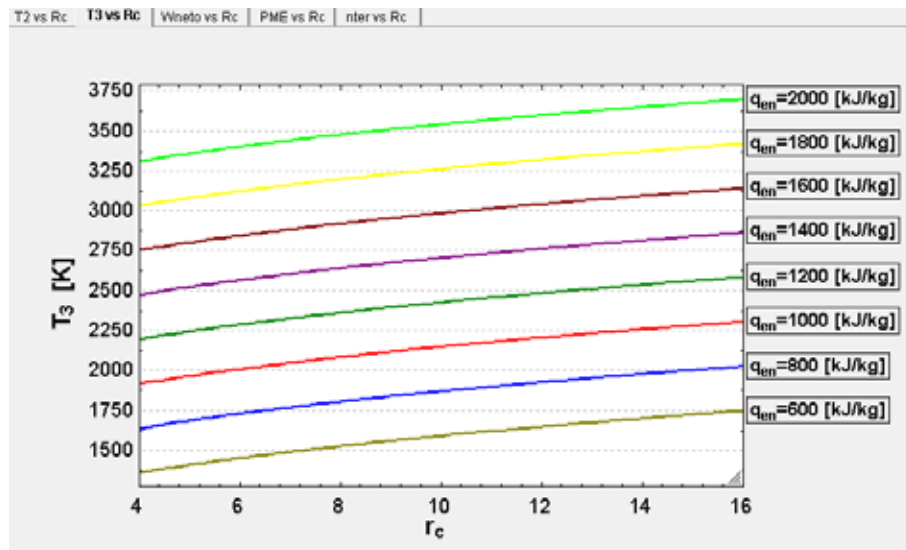


Gráfica 5: Temperatura de compresión - Relación de compresión.
Fuente: Ortega y Manrique (2020)

En la gráfica 5 se puede observar como la temperatura aumenta conforme aumenta el factor de compresión, esto se debe a la disminución del volumen de compresión con

respecto al volumen de admisión aumentando así la temperatura del aire por fricción entre moléculas de los gases. Este aumento en la temperatura durante el proceso de compresión, en altas temperaturas es contraproducente para el funcionamiento de los motores de combustión interna debido a que dentro de la mezcla puede suceder una autoignición de la misma por las altas temperatura creando un desbalance entre las fuerzas primarias y aceleraciones secundarias de los componentes mecánicos del motor, esto es conocido como “engine knock” el cual puede dañar con severidad el pistón, biela, cigüeñal, bloque, conchas y entre otros.

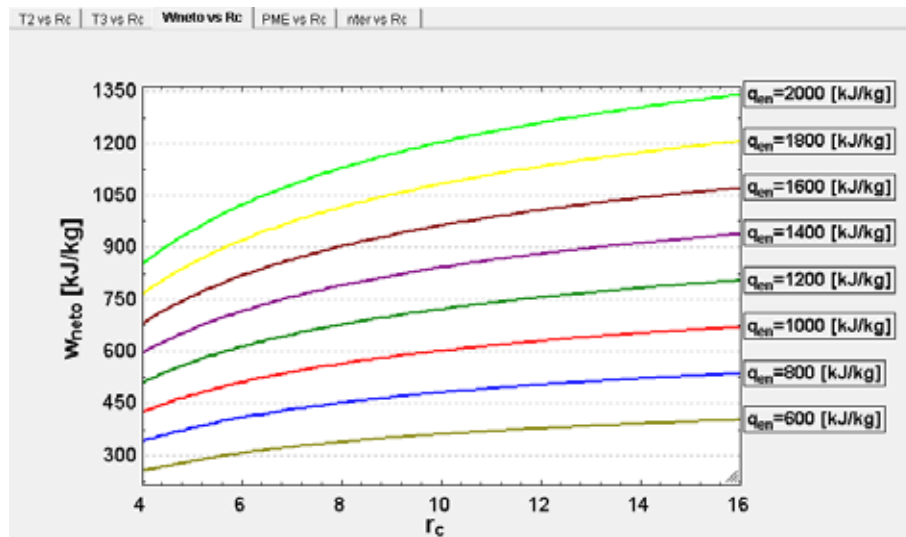
En la gráfica 6 se puede observar que conforme aumenta la relación de compresión la temperatura aumenta, esto define la temperatura máxima que deben soportar los componentes de un motor de combustión interna y la capacidad para disipar calor de su sistema de refrigeración, además a altas temperaturas se producen gases nocivos para el ambiente como lo es el NOx el cual se forma con la unión de nitrógeno y oxígeno a altas temperaturas y su formación aumenta a medida que las temperaturas aumentan a partir de 1800 °K.



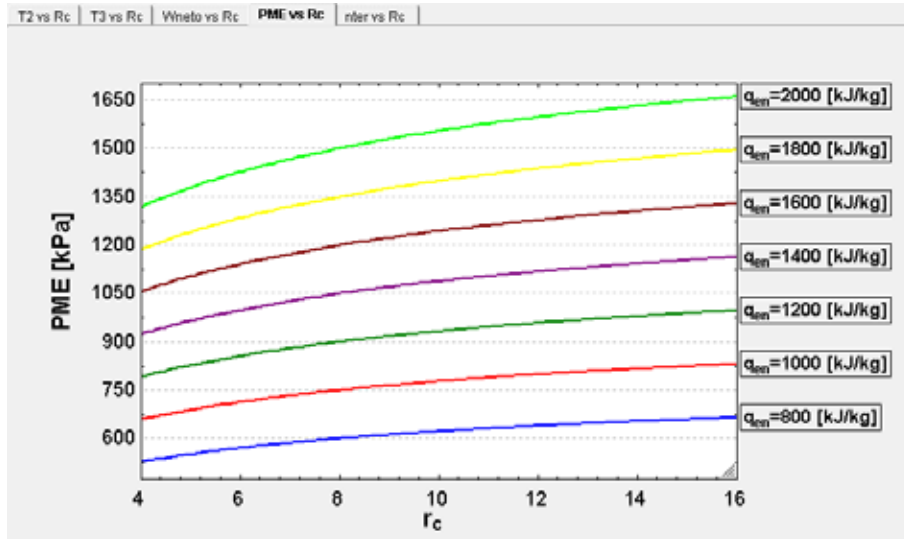
Gráfica 6: Temperatura de combustión - Relación de compresión.

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

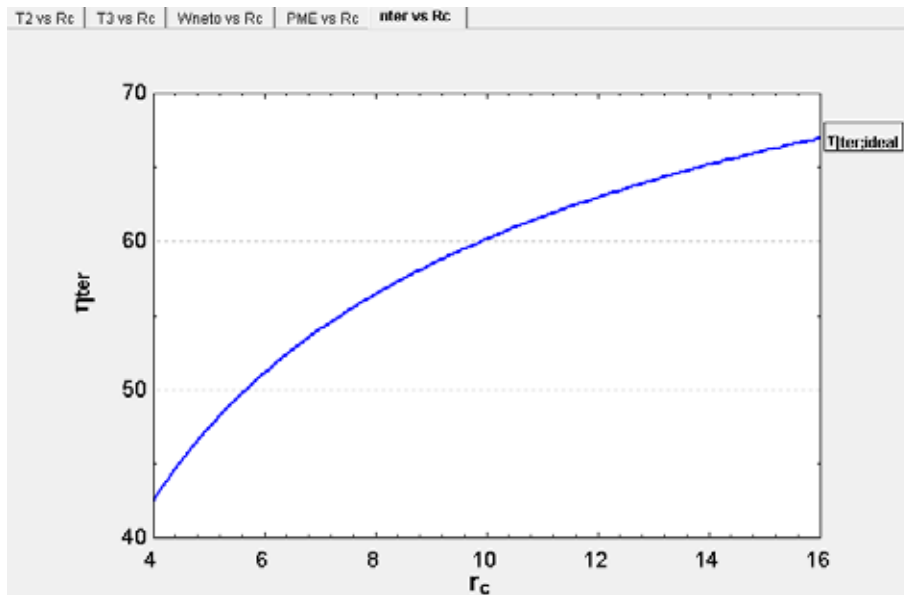
En estas graficas se puede observar que conforme aumenta la relación aire combustible la presión media efectiva, el trabajo y la eficiencia del motor aumentan como se observa en las gráficas 6, 8 y 7. Además, se observa que conforme se incrementa la razón de compresión la eficiencia térmica para todos los casos aumenta ya que la eficiencia no varía, debido a que los datos utilizados para el cálculo son ideales.



Gráfica 7: Trabajo neto - Relación de compresión
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



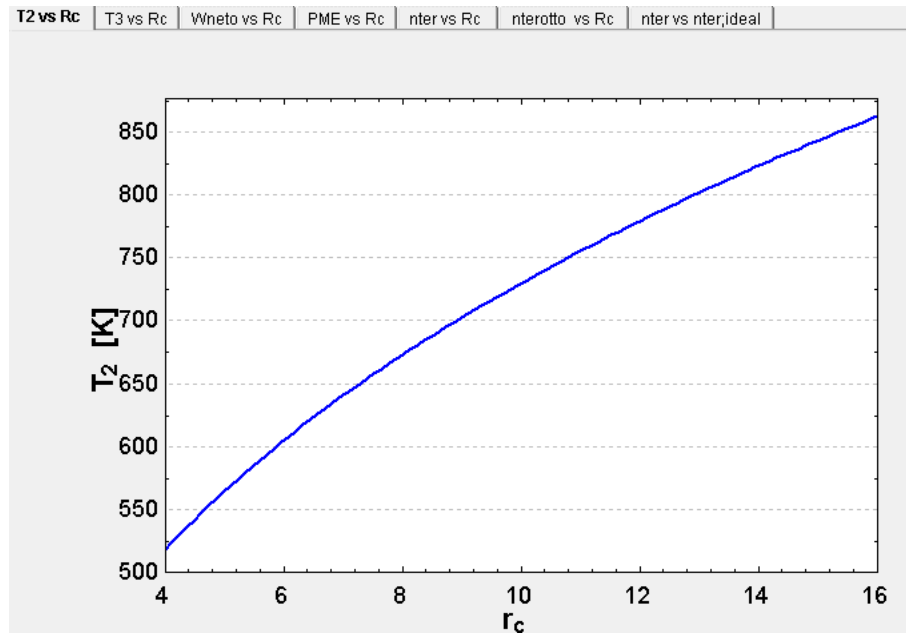
Gráfica 8: Presión Media Efectiva- Relación de compresión
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



Gráfica 9: Eficiencia térmica ideal - Relación de compresión
Fuente: Ortega y Manrique (2020)

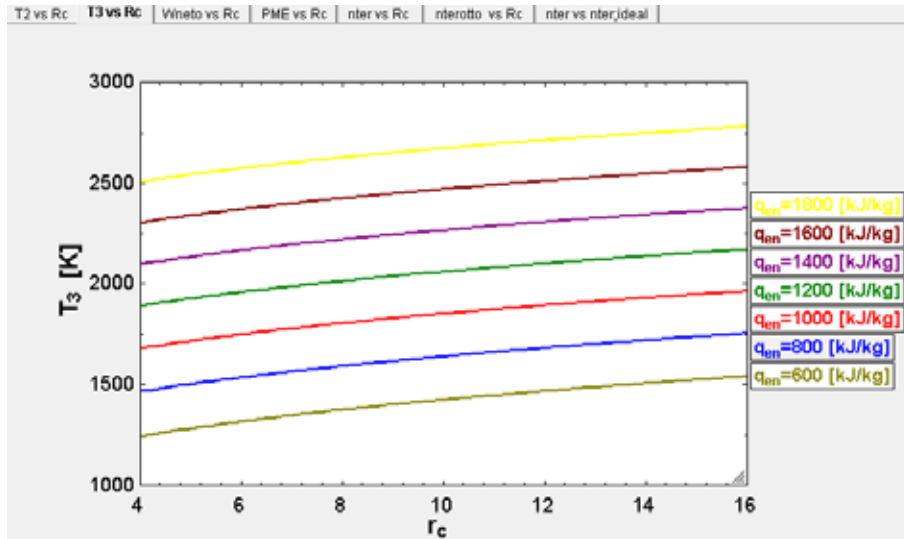
Para el análisis del ciclo Otto aproximado a el real se estudiaron diversos valores como se observan en las gráficas 10 y 11 a diferencia del ciclo Otto ideal las gráficas de eficiencia varían con respecto a al poder calorífico que entra al sistema,

también se puede observar que para ciclos reales introducir un poder calorífico mayor al sistema sin aumentar la cantidad de aire en la fase de admisión resulta en un desempeño negativo del ciclo como se observa en la gráfica 12, 13 y 14 en las gráficas de trabajo, presión media efectiva y eficiencia.



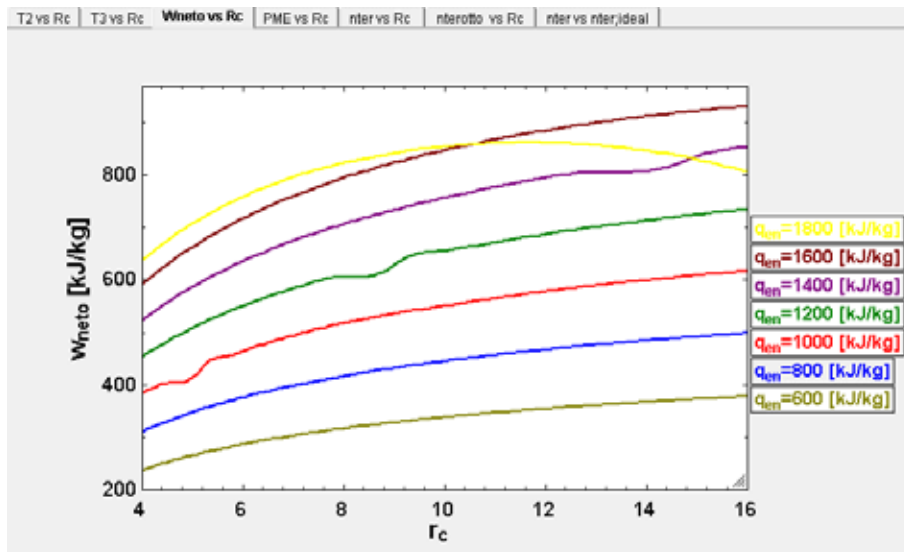
Gráfica 10: Temperatura de compresión - Relación de compresión (aproximación real)

Fuente: Ortega y Manrique (2020)



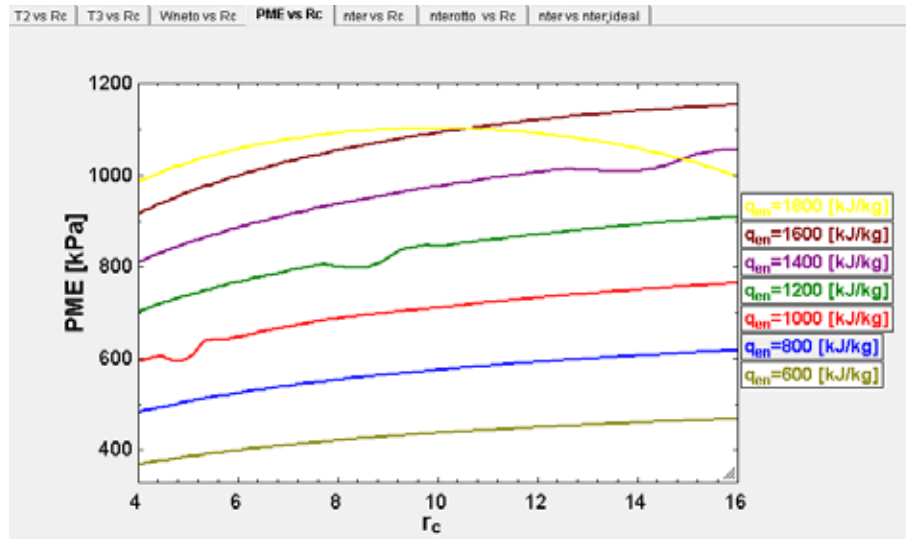
Gráfica 11: Temperatura de combustión - Relación de compresión (aproximación real)

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

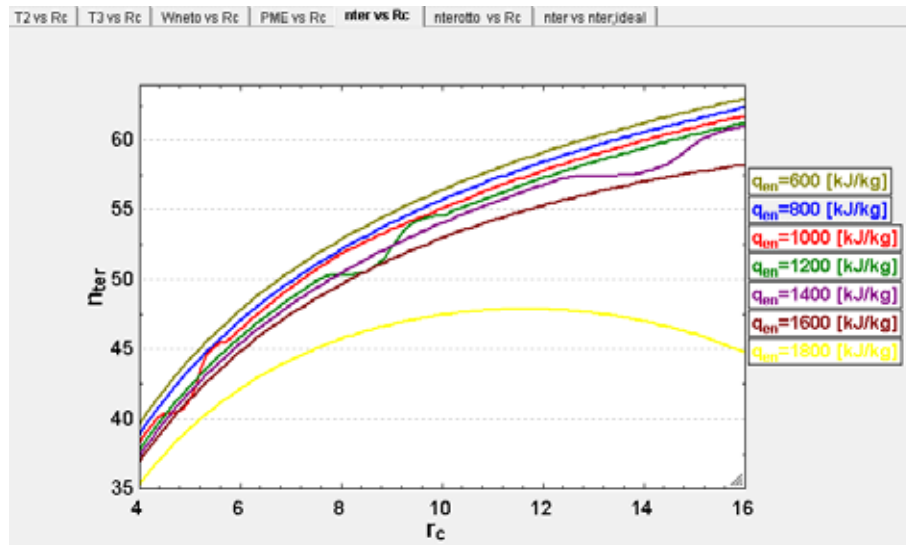


Gráfica 12: Trabajo neto - Relación de compresión (aproximación real)

Fuente: Ortega y Manrique (2020)

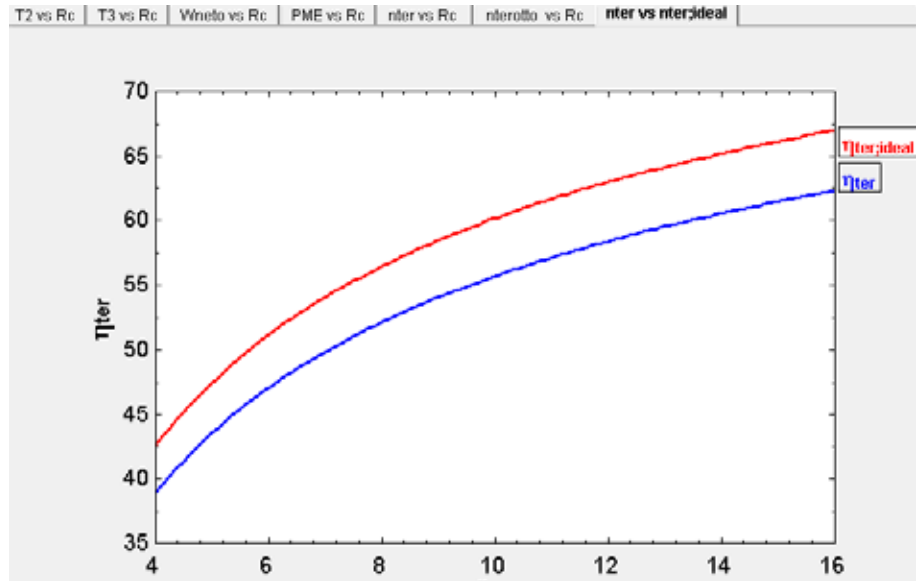


Gráfica 13: Presión Media Efectiva - Relación de compresión (aproximación real)
Fuente: Ortega y Manrique (2020)



Gráfica 14: Eficiencia térmica - Relación de compresión
Fuente: Ortega y Manrique (2020)

Luego se proceden a comparar las eficiencias de los sistemas de aproximación reales e ideales la cuales se ven reflejadas en la gráfica 15.



Gráfica 15: Comparación de Eficiencias térmicas - Relación de compresión
Fuente: Ortega y Manrique (2020)

CONCLUSIÓN.

Implementando las consideraciones matemáticas, físicas, termodinámicas, equilibrio de estado, cambio de fase, así como consideraciones energéticas estandarizadas, se logró la interpretación de las variables involucradas en el proceso de combustión del ciclo Otto, haciendo relevancia en la temperatura de operación y la eficiencia térmica del proceso. Para la lectura de las variables descritas, se aplicó una modelación matemática mediante el programa EES®.

En el presente trabajo de grado se logró obtener una descripción grafica del comportamiento del motor de ciclo Otto, en relación de condiciones de trabajo variables con el fin de generar registros de eficiencia, aprovechables. Las variables manejadas o cuyos valores son manipulables para el estudio son: relación de compresión, temperatura de entrada del oxígeno, poder calorífico aportado, geometría y capacidad volumétrica del motor.

Las variables manejadas, permite mediante la implementación de EES obtener resultados de salida en el arrojados por el estudio del ciclo Otto. La relación de compresión junto con la temperatura de entrada, son dos factores que fijan la calidad de la combustión en el proceso. Se fijaron valores que fueron verificados, donde se relaciona eficiencia y trabajo neto, dada una temperatura de entrada y relación de compresión. Con esto se obtiene según los datos arrojados, referencia de que dictan los valores de mayor beneficio para la puesta en marcha de un motor de ciclo Otto.

En el estudio se obtuvo diversos valores de temperatura (T), los cuales se identificaron según la etapa del ciclo perteneciente. Esa temperatura impacta directamente en la energía aportada al sistema, ya que la energía proviene de la gasolina la cual tiene que ser quemada para su aprovechamiento, pero la cual requiere de ciertos parámetros de temperatura y relación de oxígeno para su aprovechamiento máximo.

El poder calorífico aportado a un motor de ciclo Otto, es un valor relacionado con la calidad de la mezcla, la calidad está limitada por la temperatura de compresión del motor (donde interviene la relación de compresión), ya que, al estar presente gasolina en estado líquido, la densidad de la misma disminuye a medida que aumenta la

temperatura, lo cual afecta la calidad de la mezcla y por ende la eficiencia de la combustión.

El trabajo neto, va dirigido por la por la cantidad de energía calorífica aportada al sistema, pero sin embargo esta magnitud de energía tiene valores límites. Estas limitaciones suceden porque a mayor poder calorífico suministrado a un mismo sistema, mayor temperatura se maneja (interviene lo expuesto en el párrafo anterior), y llega a un punto donde la eficiencia disminuye. La grafica de trabajo neto, tiene la forma de una curva ascendente descendente, donde el punto más alto indica el poder calorífico en referencia a la temperatura de trabajo.

Los resultados de esta investigación, son valores referentes al estudio del impacto de la temperatura en el funcionamiento de motores de ciclo Otto. Cuyos resultados están limitados por valores referenciales de su funcionamiento, el poder calorífico suministrado al sistema, es la principal interrogante en cuanto a los valores referenciales tomados, debido a la complejidad y relevancia en esta investigación. En los valores de resultados, no se enfatiza en la transferencia de calor que ocasiona una pérdida del poder calorífico y por ende la eficiencia, más sin embargo es un fenómeno de alto impacto en el proceso. Por ende, los resultados obtenidos sirven de punto de partida para una investigación de los otros fenómenos físicos presentes en el funcionamiento de los motores de ciclo Otto.

RECOMENDACIONES.

Finalizado este trabajo especial de grado, se generan varias interrogantes debido a la experiencia obtenida en la realización del mismo. Algunas de las vías recomendadas para dar una solución posible a las interrogantes, son:

- Llevar al cronograma de estudio de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, estrategias metodológicas que permitan a los estudiantes generar una simulación efectiva de los distintos procesos termodinámicos estudiados a la largo de la misma.
- Realizar estudios detallados de la interacción de la energía calorífica del proceso de combustión, con el medio ambiente. Con el fin de lograr valores referentes a la pérdida de energía por medio de la temperatura.
- Evaluación del comportamiento de la gasolina, enfocado en la variación de la densidad en relación al incremento de temperatura.
- Eficiencia del motor de ciclo Otto, según la calidad de la mezcla de trabajo.
- Descripción de los parámetros reales de funcionamiento del ciclo Otto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Arcos, C. Gallegos, B. (2014). **Implementación de un banco didáctico para el análisis térmico y flujo métrico de un motor v6 para la escuela de ingeniería automotriz.** México.
- Arias F. (2006) **El proyecto de investigación** (5ta Edición) Caracas: Editorial Episteme
- Behar D. (2008) **Metodología de la investigación** (1ª ed.) México D.F. Ediciones Shalom
- Cengel.Y (quinta edición). Termodinámica.
- Energiza. (2011). **Energía Calorífica.** [en línea] Disponible en: www.energiza.org Engineer Equation Solver (EES). **Demostración de funcionamiento con condiciones estandarizadas.**
- Fygueroa, S. y Villamar, C. (2015). **El proceso de combustión en motores de combustión interna.** Mérida, Venezuela.
- Hurtado (2006). **Metodología de la investigación holística.** Consultada el 12 de enero de 2020
- Ing. Amaya, O. (2017). **Generación y seguimiento de estrategias de operación para el ahorro de combustible y disminución de contaminantes en motores fuel injection.** Ecuador.
- PDVSA (2018). Parámetros y consideraciones de la gasolina. [en línea] disponible en [www. PDVSA.com](http://www.PDVSA.com).
- Sabino (1992). **El proceso de la investigación, 216 pags.** Consultada el 12 de enero de 2018.

Universidad José Antonio Páez. (2007). **Normas para Elaboración y Presentación de los Anteproyectos, Proyectos y Trabajos de Grado**. San Diego, Carabobo, Venezuela.

Wiki (2019). Ciclo Otto. [en línea] .

ANEXO

ANEXO A.

PROPIEDADES DE GAS IDEAL DEL AIRE

T °K	vr	T °K	vr	T °K	vr	T °K	vr	T °K	vr
200	1707	420	266,6	700	69,76	1200	14,47	1850	3,601
210	1512	430	251,1	710	67,07	1220	13,75	1900	3,295
220	1346	440	236,8	720	64,53	1240	13,07	1950	3,022
230	1205	450	223,6	730	62,13	1260	12,44	2000	2,776
240	1084	460	211,4	740	59,82	1280	11,84	2050	2,555
250	979	470	200,1	750	57,63	1300	11,28	2100	2,356
260	887,8	480	189,5	760	55,54	1320	10,75	2150	2,175
270	808	490	179,7	780	51,64	1340	10,25	2200	2,012
280	738	500	170,6	800	48,08	1360	9,78	2250	1,864
285	706,1	510	162,1	820	44,84	1380	9,337		
290	676,1	520	154,1	840	41,85	1400	8,919		
295	647,9	530	146,7	860	39,12	1420	8,526		
298	631,9	540	139,7	880	36,61	1440	8,153		
300	621,2	550	133,1	900	34,31	1460	7,801		
305	596	560	127	920	32,18	1480	7,468		
310	572,3	570	121,2	940	30,22	1500	7,152		
315	549,8	580	115,7	960	28,4	1520	6,854		
320	528,6	590	110,6	980	26,73	1540	6,569		
325	508,4	600	105,8	1000	25,17	1560	6,301		
330	489,4	610	101,2	1020	23,72	1580	6,046		
340	454,1	620	96,92	1040	23,29	1600	5,804		
350	422,2	630	92,84	1060	21,14	1620	5,574		
360	393,4	640	88,99	1080	19,98	1640	5,355		
370	367,2	650	85,34	1100	18,9	1660	5,147		
380	343,4	660	81,89	1120	17,89	1680	4,949		
390	321,5	670	78,61	1140	16,95	1700	4,761		
400	301,6	680	75,5	1160	16,06	1750	4,328		
410	283,3	690	72,56	1180	15,24	1800	3,994		

Fuente: Termodinámica Yunus A. Sengel, Michael A. Boles.

ANEXO B.
CÓDIGO DE ANIMACIÓN Y CÁLCULOS TERMODINÁMICOS CON
RESPECTO AL ANGULO DEL CIGÜEÑAL DE UN MOTOR CUATRO
TIEMPOS.

```

procedure Otto(Theta; Vol; ClearanceVol; T_max:m;T;P;u;v;s;
Stroke$;IntakeArrowColor;ExhaustArrowColor)

if (Theta>=720 [deg]) then Theta=Theta-720 [deg]
Stroke$='Intake'
if (Theta>180) then Stroke$='Compression'
if (Theta>360) then Stroke$='Power'
if (Theta>540) then Stroke$='Exhaust'

if (Stroke$='Intake') then
    IntakeArrowColor=Black#
    ExhaustArrowColor=White#
    P=100 [kPa]
    T_in=300 [K]
    if (Loop#>1) then T_exhaust=TableValue('Otto';360;'T') else
T_exhaust=900 [K]"calculado asumiendo expansión isentrópica después de que se
abren las válvulas de admision"
    m_clearance=ClearanceVol/volume(Air;T=T_exhaust;P=P)
    m_in=(Vol-ClearanceVol)/volume(Air;T=T_in;P=P)
    m=m_clearance+m_in
    T=Temperature(Air;P=P;v=Vol/m)
    u=intEnergy(Air;T=T)
    v=volume(Air;T=T;P=P)
    s=entropy(Air;T=T;P=P)
    {m=Vol/v}
endif

if (Stroke$='Compression') then
    IntakeArrowColor=White#
    ExhaustArrowColor=White#
    s=entropy(Air;T=TableValue('Otto';91;'T');
P=TableValue('Otto';91;'P'))
    m=TableValue('Otto';91;'m')
    v=Vol/m
    T=Temperature(Air;s=s;v=v)
    P=Pressure(Air;s=s;v=v)

```

```

        u=intEnergy(Air;T=T)
endif

if (Stroke$='Power') then
    IntakeArrowColor=White#
    ExhaustArrowColor=White#
    s=entropy(Air;T=T_max;v=TableValue('Otto';180;'v'))
    m=TableValue('Otto';180;'m')
    v=Vol/m
    T=Temperature(Air;s=s;v=v)
    P=Pressure(Air;s=s;v=v)
    u=intEnergy(Air;T=T)
endif

if (Stroke$='Exhaust') then
    IntakeArrowColor=White#
    ExhaustArrowColor=Black#
    P=105 [kPa]
    s=TableValue('Otto';270;'s')
    T=temperature(Air;s=s;P=P)
    {T=TableValue('Otto';270,'T')}
    v=volume(Air;T=T;P=P)
    m=Vol/v
    u=intEnergy(Air;T=T)
    s=entropy(Air;T=T;P=P)
endif
end

procedure CycleAnalysis(R:Work_compression;Work_power;Efficiency)
    Work_compression=0
    Work_power=0
    Efficiency=0
    m=1
    if (R>91) or (Loop#>1) then m=TableValue('Otto';91;'m')
    if (R>180) or (Loop#>1) then
Work_compression=m*(TableValue('Otto';91;'u')-TableValue('Otto';180;'u'))
    if (R>270) or (Loop#>1) then
Work_power=m*(TableValue('Otto';182;'u')-TableValue('Otto';270;'u'))
    if (R>270) or (Loop#>1) then
Efficiency=(Work_power+Work_compression)/(m*(TableValue('Otto';182;'u')-
TableValue('Otto';181;'u')))
    end
end

```

"Informacion de animacion"

Stroke=75 [mm]

L_1=Stroke/2 "Longitud de la conexión al cigüeñal"

L_2=110 [mm] "longitud de conexión de la biela"

Flywheel.angle=theta

Piston.top=70 [mm]+(L_2)*cos(-Crankshaft.angle)-

L_1*cos(Flywheel.angle)+L_1*sin(abs(Crankshaft.angle))*abs(sin(Flywheel.angle))

Crankshaft.angle=-arcsin(L_1/L_2*sin(Flywheel.angle))

Crankshaft.top=Piston.top+65 [mm]-L_2/2*(1-cos(Crankshaft.angle))

Crankshaft.left=102 [mm]-L_2/2*sin(-Crankshaft.angle)

IntakeValve.top=IntakeV

ExhaustValve.top=ExhaustV

Fire.top=SparkY

"Informacion para calculo de propiedades"

Piston.Width=Bore: Piston.Left=111 [mm]+(130 [mm]-Bore)/2:

Cylinder.Width=178 [mm]+(Bore-130 [mm]): Cylinder.left=87 [mm]+(130 [mm]-Bore)/2

H=Piston.top-TopofCylinder

CompressionRatio=H_max/H_min

H_min=70 [mm]+L_2-L_1-TopofCylinder:

H_max=H_min+Stroke

Vol=pi*Bore^2/4*H*convert(mm^3;m^3)

Displacement=pi*Bore^2/4*Stroke*convert(mm^3;l)

ClearanceVol=pi*Bore^2/4*H_min*convert(mm^3;m^3)

Call Otto(Theta; Vol; ClearanceVol; T_max:m;T;P;u;v;s;

Stroke\$;IntakeArrow.Color;ExhaustArrow.Color)

Call CycleAnalysis(TableRun#:W_compression;W_power;Efficiency)

Power=(W_compression+W_power)*RPM/2*convert(kJ/min;kW)

m2=pi*Bore^2/4*(H_max-H_min)/volume(Air;T=300 [K];P=100 [kPa])*convert(mm^3;m^3)

\$TabStops 0,25 0,5 3 in

\$ifnot ParametricTable

Theta=0

\$endif

Fuente: Engineer Equation Solver (EES)

APÉNDICE

APÉNDICE A.

CÓDIGO DE CÁLCULOS PARA CICLO OTTO IDEAL.

```
P_1=100 [kPa]
T_1=300 [K]
{T_3=2000 [K]
r_c=6}
gamma=1,4
cv=Cv(Air;T=T_1)

"Cálculos"
"Proceso 1-2 (compresión isentrópica de un gas ideal)"
u_1=IntEnergy(Air;T=T_1)
v_1=Volume(Air;T=T_1;P=P_1)
v_r2/v_r1=v_2/v_1
v_1/v_2=r_c
v_r1=interpolate('vr';'T';'vr';T=T_1)
T_2=interpolate('vr';'T';'vr';vr=v_r2)
u_2=IntEnergy(Air;T=T_2)
(P_2*v_2)/T_2=(P_1*v_1)/T_1
"Proceso 2-3 (adición de calor a volumen constante)"
q_entrada=u_3-u_2
T_3=Temperature(Air;u=u_3)
v_r3=interpolate('vr';'T';'vr';T=T_3)
v_2=v_3
(P_3*v_3)/T_3=(P_2*v_2)/T_2
"Proceso 3-4 (expansión isentrópica de un gas ideal)"
v_r4/v_r3=v_4/v_3
v_4/v_3=r_c
T_4=interpolate('vr';'T';'vr';vr=v_r4)
u_4=IntEnergy(Air;T=T_4)
"Proceso 4-1 (rechazo de calor a volumen constante)"
q_salida=u_4-u_1
w_netto=q_netto
q_netto=q_entrada-q_salida
eta_ter=w_netto/q_entrada*100
eta_ter_otto=(1-(1/r_c^(gamma-1)))*100
PME=w_netto/(v_1-v_2)*convert(kJ/m^3;kPa)
```

Código de cálculos para ciclo Otto ideal:

"Datos"

$P_1=100$ [kPa]
 $T_1=300$ [K]
 $q_{entrada}=800$
 $r_c=6$
 $\gamma=1,4$
 $cv=Cv(\text{Air};T=T_1)$
 $R_a=0,2869$

"Cálculos"

$m=(P_1*V_1)/(R_a*T_1)$
 $Q_{entrada}=q_{entrada}*m$
 $T_2/T_1=r_c^{(\gamma-1)}$ "Proceso isentrópico de 1-2 se halla T_2 "
 $(P_1*V_1)/T_1=R_a$ "Se halla V_1 "
 $cv*(T_3-T_2)=Q_{entrada}$ "Se halla $Q_{entrada}$ "
 $V_3=V_2$ "Proceso isocórico de 2-3"
 $P_2/P_1=r_c^{\gamma}$ "Para el proceso de 1-2 se halla P_2 "
 $(P_1*V_1)/T_1=(P_2*V_2)/T_2$ "Se halla V_2 "
 $P_3/T_3=P_2/T_2$ "Proceso isocórico se halla P_3 "
 $V_4=V_1$ "Proceso isocórico de 1-4"
 $T_3/T_4=(r_c)^{(\gamma-1)}$ "Proceso isentrópico se halla T_4 "
 $P_3/P_4=(r_c)^{\gamma}$ "Proceso de 3-4 se halla P_4 "
 $Q_{salida}=cv*(T_4-T_1)$ "Calor rechazado"
 $W_{neto}=Q_{entrada}-Q_{salida}$ "Trabajo neto"
 $\eta_{th}=W_{neto}/Q_{entrada}*100$ "Eficiencia térmica"
 $PME=W_{neto}/(V_1-V_2)$ "Presión media efectiva"

APÉNDICE B.

CÓDIGO DE CÁLCULOS PARA CICLO OTTO IDEAL.

```
P_1=100 [kPa]
T_1=300 [K]
{T_3=2000 [K]
r_c=6}
gamma=1,4
cv=Cv(Air;T=T_1)

"Calculos"
"Proceso 1-2 (compresión isentrópica de un gas ideal)"
u_1=IntEnergy(Air;T=T_1)
v_1=Volume(Air;T=T_1;P=P_1)
v_r2/v_r1=v_2/v_1
v_1/v_2=r_c
v_r1=interpolate('vr';'T';'vr';T=T_1)
T_2=interpolate('vr';'T';'vr';vr=v_r2)
u_2=IntEnergy(Air;T=T_2)
(P_2*v_2)/T_2=(P_1*v_1)/T_1
"Proceso 2-3 (adición de calor a volumen constante)"
q_entrada=u_3-u_2
T_3=Temperature(Air;u=u_3)
v_r3=interpolate('vr';'T';'vr';T=T_3)
v_2=v_3
(P_3*v_3)/T_3=(P_2*v_2)/T_2
"Proceso 3-4 (expansión isentrópica de un gas ideal)"
v_r4/v_r3=v_4/v_3
v_4/v_3=r_c
T_4=interpolate('vr';'T';'vr';vr=v_r4)
u_4=IntEnergy(Air;T=T_4)
"Proceso 4-1 (rechazo de calor a volumen constante)"
q_salida=u_4-u_1
w_netto=q_netto
q_netto=q_entrada-q_salida
eta_ter=w_netto/q_entrada*100
eta_ter_otto=(1-(1/r_c^(gamma-1)))*100
PME=w_netto/(v_1-v_2)*convert(kJ/m^3;kPa)
```

APÉNDICE C.
CÁLCULOS DEL CICLO OTTO.

Ang	Vol.	m	T	P	s	v	u	Tope pistón
[°]	[m ³]	[kg]	[K]	[kPa]	[kJ/kg-K]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[mm]
0	1,99E-04	7,71E-05	900	100	6,852	2,583	674,9	142,5
2	2,00E-04	7,75E-05	896,3	100	6,847	2,573	671,8	142,5
4	2,01E-04	7,90E-05	885,7	100	6,834	2,542	663	142,6
6	2,03E-04	8,13E-05	868,7	100	6,812	2,493	648,9	142,8
8	2,06E-04	8,46E-05	846,6	100	6,783	2,43	630,7	143
10	2,09E-04	8,88E-05	820,6	100	6,749	2,355	609,4	143,3
12	2,14E-04	9,40E-05	792,2	100	6,71	2,274	586,3	143,6
14	2,19E-04	1,00E-04	762,4	100	6,668	2,188	562,3	144
16	2,25E-04	1,07E-04	732,4	100	6,625	2,102	538,3	144,4
18	2,32E-04	1,15E-04	703	100	6,58	2,018	515	144,9
20	2,39E-04	1,23E-04	674,7	100	6,536	1,937	492,8	145,5
22	2,47E-04	1,33E-04	647,9	100	6,493	1,86	471,9	146,1
24	2,56E-04	1,43E-04	622,8	100	6,451	1,788	452,5	146,8
26	2,66E-04	1,54E-04	599,5	100	6,411	1,721	434,7	147,5
28	2,76E-04	1,66E-04	578,1	100	6,373	1,659	418,4	148,3
30	2,87E-04	1,79E-04	558,4	100	6,337	1,603	403,5	149,1
32	2,98E-04	1,92E-04	540,4	100	6,303	1,551	390	150

34	3,11E-04	2,06E-04	524	100	6,271	1,504	377,7	150,9
36	3,23E-04	2,21E-04	509,1	100	6,241	1,461	366,6	151,8
38	3,36E-04	2,37E-04	495,5	100	6,213	1,422	356,5	152,8
40	3,50E-04	2,53E-04	483,1	100	6,187	1,387	347,3	153,9
42	3,64E-04	2,69E-04	471,9	100	6,163	1,354	339	155
44	3,79E-04	2,86E-04	461,6	100	6,141	1,325	331,5	156,1
46	3,94E-04	3,04E-04	452,2	100	6,12	1,298	324,6	157,2
48	4,10E-04	3,22E-04	443,7	100	6,101	1,274	318,3	158,4
50	4,26E-04	3,40E-04	435,9	100	6,082	1,251	312,6	159,6
52	4,42E-04	3,59E-04	428,7	100	6,066	1,231	307,4	160,8
54	4,59E-04	3,79E-04	422,2	100	6,05	1,212	302,6	162,1
56	4,76E-04	3,98E-04	416,1	100	6,035	1,194	298,2	163,3
58	4,93E-04	4,18E-04	410,6	100	6,022	1,179	294,2	164,6
60	5,10E-04	4,38E-04	405,5	100	6,009	1,164	290,5	165,9
62	5,28E-04	4,59E-04	400,8	100	5,997	1,15	287	167,3
64	5,46E-04	4,79E-04	396,5	100	5,986	1,138	283,9	168,6
66	5,63E-04	5,00E-04	392,5	100	5,976	1,126	281	169,9
68	5,81E-04	5,21E-04	388,8	100	5,967	1,116	278,3	171,3
70	6,00E-04	5,42E-04	385,3	100	5,958	1,106	275,8	172,7
72	6,18E-04	5,63E-04	382,1	100	5,949	1,097	273,5	174
74	6,36E-04	5,84E-04	379,2	100	5,941	1,088	271,3	175,4

76	6,54E-04	6,05E-04	376,4	100	5,934	1,08	269,3	176,8
78	6,72E-04	6,26E-04	373,8	100	5,927	1,073	267,5	178,1
80	6,90E-04	6,47E-04	371,4	100	5,921	1,066	265,7	179,5
82	7,08E-04	6,68E-04	369,2	100	5,914	1,06	264,1	180,9
84	7,26E-04	6,89E-04	367,1	100	5,909	1,054	262,6	182,2
86	7,44E-04	7,10E-04	365,1	100	5,903	1,048	261,2	183,5
88	7,62E-04	7,30E-04	363,3	100	5,898	1,043	259,9	184,9
90	7,79E-04	7,51E-04	361,6	100	5,894	1,038	258,7	186,2
92	7,96E-04	7,71E-04	360	100	5,889	1,033	257,5	187,5
94	8,13E-04	7,91E-04	358,5	100	5,885	1,029	256,4	188,8
96	8,30E-04	8,10E-04	357,1	100	5,881	1,025	255,4	190
98	8,47E-04	8,29E-04	355,8	100	5,877	1,021	254,4	191,3
100	8,63E-04	8,48E-04	354,5	100	5,874	1,018	253,5	192,5
102	8,79E-04	8,67E-04	353,4	100	5,87	1,014	252,7	193,7
104	8,95E-04	8,85E-04	352,3	100	5,867	1,011	251,9	194,9
106	9,10E-04	9,03E-04	351,2	100	5,864	1,008	251,2	196,1
108	9,25E-04	9,20E-04	350,2	100	5,861	1,005	250,5	197,2
110	9,40E-04	9,38E-04	349,3	100	5,859	1,003	249,8	198,3
112	9,54E-04	9,54E-04	348,5	100	5,856	1	249,2	199,4
114	9,68E-04	9,70E-04	347,7	100	5,854	0,9979	248,6	200,5
116	9,82E-04	9,86E-04	346,9	100	5,852	0,9957	248	201,5

118	9,95E-04	1,00E-03	346,2	100	5,85	0,9936	247,5	202,5
120	1,01E-03	1,02E-03	345,5	100	5,848	0,9917	247	203,4
122	1,02E-03	1,03E-03	344,9	100	5,846	0,9899	246,6	204,4
124	1,03E-03	1,05E-03	344,3	100	5,844	0,9881	246,1	205,3
126	1,04E-03	1,06E-03	343,7	100	5,842	0,9865	245,7	206,1
128	1,06E-03	1,07E-03	343,2	100	5,841	0,985	245,4	207
130	1,07E-03	1,08E-03	342,7	100	5,839	0,9836	245	207,8
132	1,08E-03	1,10E-03	342,2	100	5,838	0,9823	244,7	208,6
134	1,09E-03	1,11E-03	341,8	100	5,837	0,981	244,4	209,3
136	1,10E-03	1,12E-03	341,4	100	5,835	0,9798	244,1	210
138	1,10E-03	1,13E-03	341	100	5,834	0,9787	243,8	210,7
140	1,11E-03	1,14E-03	340,6	100	5,833	0,9777	243,5	211,3
142	1,12E-03	1,15E-03	340,3	100	5,832	0,9768	243,3	211,9
144	1,13E-03	1,16E-03	340	100	5,831	0,9759	243,1	212,5
146	1,14E-03	1,17E-03	339,7	100	5,831	0,975	242,9	213,1
148	1,14E-03	1,17E-03	339,4	100	5,83	0,9743	242,7	213,6
150	1,15E-03	1,18E-03	339,2	100	5,829	0,9736	242,5	214,1
152	1,16E-03	1,19E-03	339	100	5,828	0,9729	242,3	214,5
154	1,16E-03	1,19E-03	338,7	100	5,828	0,9723	242,2	214,9
156	1,17E-03	1,20E-03	338,6	100	5,827	0,9718	242	215,3
158	1,17E-03	1,21E-03	338,4	100	5,827	0,9713	241,9	215,7

160	1,17E-03	1,21E-03	338,2	100	5,826	0,9708	241,8	216
162	1,18E-03	1,21E-03	338,1	100	5,826	0,9704	241,7	216,3
164	1,18E-03	1,22E-03	338	100	5,825	0,97	241,6	216,5
166	1,19E-03	1,22E-03	337,9	100	5,825	0,9697	241,5	216,8
168	1,19E-03	1,23E-03	337,8	100	5,825	0,9695	241,5	217
170	1,19E-03	1,23E-03	337,7	100	5,825	0,9692	241,4	217,1
172	1,19E-03	1,23E-03	337,6	100	5,824	0,969	241,4	217,3
174	1,19E-03	1,23E-03	337,6	100	5,824	0,9689	241,3	217,4
176	1,19E-03	1,23E-03	337,5	100	5,824	0,9688	241,3	217,4
178	1,19E-03	1,23E-03	337,5	100	5,824	0,9687	241,3	217,5
180	1,20E-03	1,23E-03	337,5	100	5,824	0,9687	241,3	217,5
182	1,19E-03	1,23E-03	337,5	100	5,824	0,9686	241,3	217,5
184	1,19E-03	1,23E-03	337,6	100,1	5,824	0,9681	241,3	217,4
186	1,19E-03	1,23E-03	337,7	100,2	5,824	0,9673	241,4	217,4
188	1,19E-03	1,23E-03	337,9	100,4	5,824	0,9661	241,5	217,3
190	1,19E-03	1,23E-03	338,1	100,6	5,824	0,9647	241,7	217,1
192	1,19E-03	1,23E-03	338,3	100,9	5,824	0,9629	241,9	217
194	1,19E-03	1,23E-03	338,6	101,2	5,824	0,9608	242,1	216,8
196	1,18E-03	1,23E-03	339	101,5	5,824	0,9583	242,3	216,5
198	1,18E-03	1,23E-03	339,4	101,9	5,824	0,9555	242,6	216,3
200	1,17E-03	1,23E-03	339,8	102,4	5,824	0,9524	242,9	216

202	1,17E-03	1,23E-03	340,3	102,9	5,824	0,9489	243,3	215,7
204	1,17E-03	1,23E-03	340,8	103,5	5,824	0,9452	243,7	215,3
206	1,16E-03	1,23E-03	341,4	104,1	5,824	0,941	244,1	214,9
208	1,16E-03	1,23E-03	342,1	104,8	5,824	0,9365	244,6	214,5
210	1,15E-03	1,23E-03	342,8	105,6	5,824	0,9317	245,1	214,1
212	1,14E-03	1,23E-03	343,5	106,4	5,824	0,9265	245,6	213,6
214	1,14E-03	1,23E-03	344,4	107,3	5,824	0,921	246,2	213,1
216	1,13E-03	1,23E-03	345,2	108,3	5,824	0,9152	246,8	212,5
218	1,12E-03	1,23E-03	346,2	109,3	5,824	0,9089	247,5	211,9
220	1,11E-03	1,23E-03	347,2	110,4	5,824	0,9024	248,2	211,3
222	1,10E-03	1,23E-03	348,2	111,6	5,824	0,8954	249	210,7
224	1,10E-03	1,23E-03	349,4	112,9	5,824	0,8882	249,8	210
226	1,09E-03	1,23E-03	350,6	114,3	5,824	0,8805	250,7	209,3
228	1,08E-03	1,23E-03	351,9	115,7	5,824	0,8725	251,6	208,6
230	1,07E-03	1,23E-03	353,2	117,3	5,824	0,8642	252,6	207,8
232	1,06E-03	1,23E-03	354,6	119	5,824	0,8555	253,6	207
234	1,04E-03	1,23E-03	356,1	120,8	5,824	0,8465	254,7	206,1
236	1,03E-03	1,23E-03	357,7	122,7	5,824	0,8371	255,8	205,3
238	1,02E-03	1,23E-03	359,4	124,7	5,824	0,8274	257	204,4
240	1,01E-03	1,23E-03	361,1	126,8	5,824	0,8173	258,3	203,4
242	9,95E-04	1,23E-03	363	129,1	5,824	0,8069	259,6	202,5

244	9,82E-04	1,23E-03	364,9	131,5	5,824	0,7962	261	201,5
246	9,68E-04	1,23E-03	366,9	134,1	5,824	0,7852	262,5	200,5
248	9,54E-04	1,23E-03	369,1	136,9	5,824	0,7739	264	199,4
250	9,40E-04	1,23E-03	371,3	139,8	5,824	0,7622	265,7	198,3
252	9,25E-04	1,23E-03	373,6	142,9	5,824	0,7503	267,3	197,2
254	9,10E-04	1,23E-03	376,1	146,2	5,824	0,7381	269,1	196,1
256	8,95E-04	1,23E-03	378,6	149,8	5,824	0,7256	271	194,9
258	8,79E-04	1,23E-03	381,3	153,5	5,824	0,7129	272,9	193,7
260	8,63E-04	1,23E-03	384,1	157,5	5,824	0,6999	274,9	192,5
262	8,47E-04	1,23E-03	387	161,8	5,824	0,6867	277	191,3
264	8,30E-04	1,23E-03	390,1	166,3	5,824	0,6733	279,2	190
266	8,13E-04	1,23E-03	393,2	171,1	5,824	0,6596	281,5	188,8
268	7,96E-04	1,23E-03	396,6	176,3	5,824	0,6458	284	187,5
270	7,79E-04	1,23E-03	400	181,7	5,824	0,6318	286,5	186,2
272	7,62E-04	1,23E-03	403,6	187,6	5,824	0,6176	289,1	184,9
274	7,44E-04	1,23E-03	407,4	193,8	5,824	0,6033	291,8	183,5
276	7,26E-04	1,23E-03	411,3	200,5	5,824	0,5889	294,7	182,2
278	7,08E-04	1,23E-03	415,4	207,6	5,824	0,5743	297,6	180,9
280	6,90E-04	1,23E-03	419,6	215,2	5,824	0,5597	300,7	179,5
282	6,72E-04	1,23E-03	424,1	223,3	5,824	0,5451	304	178,1
284	6,54E-04	1,23E-03	428,7	232	5,824	0,5303	307,3	176,8

286	6,36E-04	1,23E-03	433,4	241,3	5,824	0,5156	310,8	175,4
288	6,18E-04	1,23E-03	438,4	251,2	5,824	0,5009	314,5	174
290	6,00E-04	1,23E-03	443,6	261,9	5,824	0,4861	318,2	172,7
292	5,81E-04	1,23E-03	449	273,3	5,824	0,4715	322,2	171,3
294	5,63E-04	1,23E-03	454,5	285,6	5,824	0,4569	326,3	169,9
296	5,46E-04	1,23E-03	460,3	298,7	5,824	0,4424	330,5	168,6
298	5,28E-04	1,23E-03	466,3	312,8	5,824	0,428	334,9	167,3
300	5,10E-04	1,23E-03	472,5	327,9	5,824	0,4137	339,5	165,9
302	4,93E-04	1,23E-03	479	344	5,824	0,3996	344,3	164,6
304	4,76E-04	1,23E-03	485,6	361,4	5,824	0,3857	349,2	163,3
306	4,59E-04	1,23E-03	492,5	380	5,824	0,372	354,3	162,1
308	4,42E-04	1,23E-03	499,6	400	5,824	0,3585	359,5	160,8
310	4,26E-04	1,23E-03	506,9	421,4	5,824	0,3453	365	159,6
312	4,10E-04	1,23E-03	514,4	444,3	5,824	0,3324	370,6	158,4
314	3,94E-04	1,23E-03	522,2	468,7	5,824	0,3197	376,3	157,2
316	3,79E-04	1,23E-03	530,1	494,9	5,824	0,3075	382,2	156,1
318	3,64E-04	1,23E-03	538,2	522,7	5,824	0,2955	388,3	155
320	3,50E-04	1,23E-03	546,5	552,4	5,824	0,284	394,5	153,9
322	3,36E-04	1,23E-03	554,9	583,8	5,824	0,2728	400,9	152,8
324	3,23E-04	1,23E-03	563,5	617,1	5,824	0,2621	407,3	151,8
326	3,11E-04	1,23E-03	572,1	652,2	5,824	0,2518	413,9	150,9

328	2,98E-04	1,23E-03	580,8	689	5,824	0,2419	420,5	150
330	2,87E-04	1,23E-03	589,5	727,4	5,824	0,2326	427,1	149,1
332	2,76E-04	1,23E-03	598,2	767,3	5,824	0,2238	433,7	148,3
334	2,66E-04	1,23E-03	606,7	808,3	5,824	0,2155	440,2	147,5
336	2,56E-04	1,23E-03	615,1	850,2	5,824	0,2077	446,7	146,8
338	2,47E-04	1,23E-03	623,3	892,5	5,824	0,2005	453	146,1
340	2,39E-04	1,23E-03	631,2	934,8	5,824	0,1938	459	145,5
342	2,32E-04	1,23E-03	638,7	976,4	5,824	0,1878	464,8	144,9
344	2,25E-04	1,23E-03	645,7	1017	5,824	0,1823	470,2	144,4
346	2,19E-04	1,23E-03	652,2	1055	5,824	0,1775	475,3	144
348	2,14E-04	1,23E-03	658	1090	5,824	0,1732	479,8	143,6
350	2,09E-04	1,23E-03	663,1	1122	5,824	0,1697	483,7	143,3
352	2,06E-04	1,23E-03	667,4	1149	5,824	0,1667	487,1	143
354	2,03E-04	1,23E-03	670,8	1171	5,824	0,1644	489,8	142,8
356	2,01E-04	1,23E-03	673,3	1187	5,824	0,1628	491,7	142,6
358	2,00E-04	1,23E-03	674,8	1197	5,824	0,1618	492,9	142,5
360	1,99E-04	1,23E-03	675,3	1201	5,824	0,1615	493,3	142,5
362	2,00E-04	1,23E-03	2000	3548	6,777	0,1618	1678	142,5
364	2,01E-04	1,23E-03	1996	3520	6,777	0,1628	1675	142,6
366	2,03E-04	1,23E-03	1990	3475	6,777	0,1644	1669	142,8
368	2,06E-04	1,23E-03	1982	3413	6,777	0,1667	1661	143

370	2,09E-04	1,23E-03	1972	3336	6,777	0,1697	1651	143,3
372	2,14E-04	1,23E-03	1960	3247	6,777	0,1732	1639	143,6
374	2,19E-04	1,23E-03	1945	3147	6,777	0,1775	1626	144
376	2,25E-04	1,23E-03	1930	3038	6,777	0,1823	1611	144,4
378	2,32E-04	1,23E-03	1913	2924	6,777	0,1878	1594	144,9
380	2,39E-04	1,23E-03	1895	2806	6,777	0,1938	1577	145,5
382	2,47E-04	1,23E-03	1876	2686	6,777	0,2005	1559	146,1
384	2,56E-04	1,23E-03	1856	2565	6,777	0,2077	1540	146,8
386	2,66E-04	1,23E-03	1835	2445	6,777	0,2155	1520	147,5
388	2,76E-04	1,23E-03	1814	2327	6,777	0,2238	1501	148,3
390	2,87E-04	1,23E-03	1793	2213	6,777	0,2326	1480	149,1
392	2,98E-04	1,23E-03	1772	2102	6,777	0,2419	1460	150
394	3,11E-04	1,23E-03	1751	1996	6,777	0,2518	1440	150,9
396	3,23E-04	1,23E-03	1730	1894	6,777	0,2621	1420	151,8
398	3,36E-04	1,23E-03	1709	1798	6,777	0,2728	1400	152,8
400	3,50E-04	1,23E-03	1688	1706	6,777	0,284	1381	153,9
402	3,64E-04	1,23E-03	1667	1619	6,777	0,2955	1361	155
404	3,79E-04	1,23E-03	1647	1538	6,777	0,3075	1343	156,1
406	3,94E-04	1,23E-03	1628	1461	6,777	0,3197	1324	157,2
408	4,10E-04	1,23E-03	1608	1389	6,777	0,3324	1306	158,4
410	4,26E-04	1,23E-03	1590	1321	6,777	0,3453	1289	159,6

412	4,42E-04	1,23E-03	1571	1258	6,777	0,3585	1272	160,8
414	4,59E-04	1,23E-03	1553	1199	6,777	0,372	1255	162,1
416	4,76E-04	1,23E-03	1536	1143	6,777	0,3857	1239	163,3
418	4,93E-04	1,23E-03	1519	1091	6,777	0,3996	1223	164,6
420	5,10E-04	1,23E-03	1503	1043	6,777	0,4137	1208	165,9
422	5,28E-04	1,23E-03	1487	997,5	6,777	0,428	1194	167,3
424	5,46E-04	1,23E-03	1472	955,2	6,777	0,4424	1180	168,6
426	5,63E-04	1,23E-03	1457	915,6	6,777	0,4569	1166	169,9
428	5,81E-04	1,23E-03	1443	878,5	6,777	0,4715	1153	171,3
430	6,00E-04	1,23E-03	1429	843,9	6,777	0,4861	1140	172,7
432	6,18E-04	1,23E-03	1416	811,4	6,777	0,5009	1128	174
434	6,36E-04	1,23E-03	1403	781,1	6,777	0,5156	1117	175,4
436	6,54E-04	1,23E-03	1391	752,7	6,777	0,5303	1105	176,8
438	6,72E-04	1,23E-03	1379	726,1	6,777	0,5451	1094	178,1
440	6,90E-04	1,23E-03	1367	701,1	6,777	0,5597	1084	179,5
442	7,08E-04	1,23E-03	1356	677,7	6,777	0,5743	1074	180,9
444	7,26E-04	1,23E-03	1345	655,8	6,777	0,5889	1064	182,2
446	7,44E-04	1,23E-03	1335	635,2	6,777	0,6033	1055	183,5
448	7,62E-04	1,23E-03	1325	615,9	6,777	0,6176	1046	184,9
450	7,79E-04	1,23E-03	1316	597,8	6,777	0,6318	1037	186,2
452	7,96E-04	1,23E-03	1307	580,7	6,777	0,6458	1029	187,5

454	8,13E-04	1,23E-03	1298	564,7	6,777	0,6596	1021	188,8
456	8,30E-04	1,23E-03	1289	549,7	6,777	0,6733	1013	190
458	8,47E-04	1,23E-03	1281	535,5	6,777	0,6867	1006	191,3
460	8,63E-04	1,23E-03	1273	522,2	6,777	0,6999	999,1	192,5
462	8,79E-04	1,23E-03	1266	509,7	6,777	0,7129	992,4	193,7
464	8,95E-04	1,23E-03	1259	497,9	6,777	0,7256	985,9	194,9
466	9,10E-04	1,23E-03	1252	486,8	6,777	0,7381	979,8	196,1
468	9,25E-04	1,23E-03	1245	476,4	6,777	0,7503	973,9	197,2
470	9,40E-04	1,23E-03	1239	466,6	6,777	0,7622	968,3	198,3
472	9,54E-04	1,23E-03	1233	457,3	6,777	0,7739	962,9	199,4
474	9,68E-04	1,23E-03	1227	448,6	6,777	0,7852	957,8	200,5
476	9,82E-04	1,23E-03	1222	440,4	6,777	0,7962	952,9	201,5
478	9,95E-04	1,23E-03	1216	432,7	6,777	0,8069	948,2	202,5
480	1,01E-03	1,23E-03	1211	425,4	6,777	0,8173	943,7	203,4
482	1,02E-03	1,23E-03	1207	418,6	6,777	0,8274	939,5	204,4
484	1,03E-03	1,23E-03	1202	412,2	6,777	0,8371	935,4	205,3
486	1,04E-03	1,23E-03	1198	406,2	6,777	0,8465	931,6	206,1
488	1,06E-03	1,23E-03	1194	400,5	6,777	0,8555	927,9	207
490	1,07E-03	1,23E-03	1190	395,2	6,777	0,8642	924,5	207,8
492	1,08E-03	1,23E-03	1186	390,2	6,777	0,8725	921,2	208,6
494	1,09E-03	1,23E-03	1183	385,5	6,777	0,8805	918,1	209,3

496	1,10E-03	1,23E-03	1179	381,1	6,777	0,8882	915,2	210
498	1,10E-03	1,23E-03	1176	377	6,777	0,8954	912,4	210,7
500	1,11E-03	1,23E-03	1173	373,2	6,777	0,9024	909,8	211,3
502	1,12E-03	1,23E-03	1170	369,6	6,777	0,9089	907,4	211,9
504	1,13E-03	1,23E-03	1168	366,3	6,777	0,9152	905,1	212,5
506	1,14E-03	1,23E-03	1165	363,2	6,777	0,921	902,9	213,1
508	1,14E-03	1,23E-03	1163	360,3	6,777	0,9265	900,9	213,6
510	1,15E-03	1,23E-03	1161	357,7	6,777	0,9317	899,1	214,1
512	1,16E-03	1,23E-03	1159	355,2	6,777	0,9365	897,4	214,5
514	1,16E-03	1,23E-03	1157	353	6,777	0,941	895,8	214,9
516	1,17E-03	1,23E-03	1156	350,9	6,777	0,9452	894,3	215,3
518	1,17E-03	1,23E-03	1154	349,1	6,777	0,9489	893	215,7
520	1,17E-03	1,23E-03	1153	347,4	6,777	0,9524	891,8	216
522	1,18E-03	1,23E-03	1152	345,9	6,777	0,9555	890,7	216,3
524	1,18E-03	1,23E-03	1150	344,6	6,777	0,9583	889,7	216,5
526	1,19E-03	1,23E-03	1149	343,4	6,777	0,9608	888,9	216,8
528	1,19E-03	1,23E-03	1149	342,4	6,777	0,9629	888,2	217
530	1,19E-03	1,23E-03	1148	341,6	6,777	0,9647	887,5	217,1
532	1,19E-03	1,23E-03	1147	340,9	6,777	0,9661	887	217,3
534	1,19E-03	1,23E-03	1147	340,3	6,777	0,9673	886,7	217,4
536	1,19E-03	1,23E-03	1147	340	6,777	0,9681	886,4	217,4

538	1,19E-03	1,23E-03	1146	339,7	6,777	0,9686	886,2	217,5
540	1,20E-03	1,23E-03	1146	339,7	6,777	0,9687	886,2	217,5
542	1,19E-03	5,13E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,5
544	1,19E-03	5,12E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,4
546	1,19E-03	5,12E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,4
548	1,19E-03	5,11E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,3
550	1,19E-03	5,10E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217,1
552	1,19E-03	5,10E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	217
554	1,19E-03	5,08E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	216,8
556	1,18E-03	5,07E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	216,5
558	1,18E-03	5,06E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	216,3
560	1,17E-03	5,04E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	216
562	1,17E-03	5,02E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	215,7
564	1,17E-03	5,00E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	215,3
566	1,16E-03	4,98E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	214,9
568	1,16E-03	4,96E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	214,5
570	1,15E-03	4,93E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	214,1
572	1,14E-03	4,90E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	213,6
574	1,14E-03	4,87E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	213,1
576	1,13E-03	4,84E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	212,5
578	1,12E-03	4,81E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	211,9

580	1,11E-03	4,78E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	211,3
582	1,10E-03	4,74E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	210,7
584	1,10E-03	4,70E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	210
586	1,09E-03	4,66E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	209,3
588	1,08E-03	4,62E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	208,6
590	1,07E-03	4,57E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	207,8
592	1,06E-03	4,53E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	207
594	1,04E-03	4,48E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	206,1
596	1,03E-03	4,43E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	205,3
598	1,02E-03	4,38E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	204,4
600	1,01E-03	4,33E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	203,4
602	9,95E-04	4,27E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	202,5
604	9,82E-04	4,21E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	201,5
606	9,68E-04	4,16E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	200,5
608	9,54E-04	4,10E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	199,4
610	9,40E-04	4,03E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	198,3
612	9,25E-04	3,97E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	197,2
614	9,10E-04	3,91E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	196,1
616	8,95E-04	3,84E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	194,9
618	8,79E-04	3,77E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	193,7
620	8,63E-04	3,70E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	192,5

622	8,47E-04	3,63E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	191,3
624	8,30E-04	3,56E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	190
626	8,13E-04	3,49E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	188,8
628	7,96E-04	3,42E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	187,5
630	7,79E-04	3,34E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	186,2
632	7,62E-04	3,27E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	184,9
634	7,44E-04	3,19E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	183,5
636	7,26E-04	3,12E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	182,2
638	7,08E-04	3,04E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	180,9
640	6,90E-04	2,96E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	179,5
642	6,72E-04	2,88E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	178,1
644	6,54E-04	2,81E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	176,8
646	6,36E-04	2,73E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	175,4
648	6,18E-04	2,65E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	174
650	6,00E-04	2,57E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	172,7
652	5,81E-04	2,50E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	171,3
654	5,63E-04	2,42E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	169,9
656	5,46E-04	2,34E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	168,6
658	5,28E-04	2,26E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	167,3
660	5,10E-04	2,19E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	165,9
662	4,93E-04	2,11E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	164,6

664	4,76E-04	2,04E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	163,3
666	4,59E-04	1,97E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	162,1
668	4,42E-04	1,90E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	160,8
670	4,26E-04	1,83E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	159,6
672	4,10E-04	1,76E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	158,4
674	3,94E-04	1,69E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	157,2
676	3,79E-04	1,63E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	156,1
678	3,64E-04	1,56E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	155
680	3,50E-04	1,50E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	153,9
682	3,36E-04	1,44E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	152,8
684	3,23E-04	1,39E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	151,8
686	3,11E-04	1,33E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	150,9
688	2,98E-04	1,28E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	150
690	2,87E-04	1,23E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	149,1
692	2,76E-04	1,18E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	148,3
694	2,66E-04	1,14E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	147,5
696	2,56E-04	1,10E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	146,8
698	2,47E-04	1,06E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	146,1
700	2,39E-04	1,03E-04	852,6	105	6,777	2,331	635,6	145,5
702	2,32E-04	9,94E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	144,9
704	2,25E-04	9,65E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	144,4

706	2,19E-04	9,39E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	144
708	2,14E-04	9,17E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	143,6
710	2,09E-04	8,98E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	143,3
712	2,06E-04	8,82E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	143
714	2,03E-04	8,70E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	142,8
716	2,01E-04	8,61E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	142,6
718	2,00E-04	8,56E-05	852,6	105	6,777	2,331	635,6	142,5
720	1,99E-04	7,71E-05	900	100	6,852	2,583	674,9	142,5

APÉNDICE D.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE
600 [KJ/KG]:

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3309	851,3	1319	10,1	3542	1206	1555
4,12	3315	864,9	1327	10,2	3546	1210	1558
4,24	3322	878	1335	10,3	3549	1213	1561
4,36	3328	890,6	1342	10,4	3553	1217	1564
4,49	3334	902,7	1350	10,6	3557	1221	1567
4,61	3339	914,3	1357	10,7	3560	1224	1569
4,73	3345	925,6	1364	10,8	3564	1228	1572
4,85	3351	936,4	1371	10,9	3567	1231	1575
4,97	3356	946,8	1377	11	3570	1234	1577
5,09	3362	956,9	1384	11,2	3574	1238	1580
5,21	3367	966,7	1390	11,3	3577	1241	1582
5,33	3373	976,2	1396	11,4	3581	1244	1585
5,46	3378	985,3	1402	11,5	3584	1247	1587
5,58	3383	994,2	1408	11,6	3587	1251	1590
5,7	3388	1003	1413	11,8	3591	1254	1592
5,82	3394	1011	1419	11,9	3594	1257	1594
5,94	3399	1019	1424	12	3597	1260	1597
6,06	3404	1027	1429	12,1	3601	1263	1599
6,18	3408	1035	1434	12,2	3604	1266	1601
6,3	3413	1042	1439	12,4	3607	1269	1604
6,42	3418	1050	1444	12,5	3610	1271	1606
6,55	3423	1057	1449	12,6	3613	1274	1608
6,67	3428	1064	1454	12,7	3617	1277	1610
6,79	3432	1070	1458	12,9	3620	1280	1612
6,91	3437	1077	1463	13	3623	1282	1614
7,03	3441	1083	1467	13,1	3626	1285	1617
7,15	3446	1090	1472	13,2	3629	1288	1619
7,27	3450	1096	1476	13,3	3632	1290	1621
7,39	3455	1102	1480	13,5	3635	1293	1623
7,52	3459	1107	1484	13,6	3638	1295	1625

7,64	3463	1113	1488	13,7	3641	1298	1627
7,76	3468	1119	1492	13,8	3644	1300	1629
7,88	3472	1124	1496	13,9	3647	1303	1631
8	3476	1129	1500	14,1	3650	1305	1633
8,12	3480	1135	1503	14,2	3653	1308	1635
8,24	3484	1140	1507	14,3	3656	1310	1636
8,36	3488	1145	1511	14,4	3659	1312	1638
8,49	3492	1150	1514	14,6	3662	1315	1640
8,61	3496	1155	1518	14,7	3665	1317	1642
8,73	3500	1159	1521	14,8	3668	1319	1644
8,85	3504	1164	1525	14,9	3671	1321	1646
8,97	3508	1168	1528	15	3674	1324	1647
9,09	3512	1173	1531	15,2	3677	1326	1649
9,21	3516	1177	1534	15,3	3679	1328	1651
9,33	3520	1182	1537	15,4	3682	1330	1653
9,46	3524	1186	1541	15,5	3685	1332	1654
9,58	3527	1190	1544	15,6	3688	1334	1656
9,7	3531	1194	1547	15,8	3691	1336	1658
9,82	3535	1198	1550	15,9	3693	1338	1659
9,94	3539	1202	1553	16	3696	1340	1661

APÉNDICE E.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 800 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	1637	340,5	527,5	10,06	1870	482,3	622,2
4,121	1643	346	530,8	10,18	1874	483,8	623,3
4,242	1649	351,2	533,9	10,3	1877	485,3	624,4
4,364	1656	356,2	536,9	10,42	1881	486,8	625,6
4,485	1661	361,1	539,9	10,55	1884	488,2	626,6
4,606	1667	365,7	542,8	10,67	1888	489,6	627,7
4,727	1673	370,2	545,5	10,79	1891	491	628,8
4,848	1679	374,6	548,2	10,91	1895	492,4	629,8
4,97	1684	378,7	550,9	11,03	1898	493,8	630,9
5,091	1690	382,8	553,4	11,15	1902	495,1	631,9
5,212	1695	386,7	555,9	11,27	1905	496,4	632,9
5,333	1701	390,5	558,4	11,39	1909	497,7	633,9
5,455	1706	394,1	560,7	11,52	1912	499	634,9
5,576	1711	397,7	563	11,64	1915	500,2	635,9
5,697	1716	401,1	565,3	11,76	1919	501,5	636,8
5,818	1721	404,5	567,5	11,88	1922	502,7	637,8
5,939	1727	407,7	569,6	12	1925	503,9	638,7
6,061	1731	410,9	571,7	12,12	1929	505,1	639,6
6,182	1736	413,9	573,8	12,24	1932	506,3	640,5
6,303	1741	416,9	575,8	12,36	1935	507,4	641,4
6,424	1746	419,8	577,7	12,48	1938	508,6	642,3
6,545	1751	422,7	579,6	12,61	1941	509,7	643,2
6,667	1755	425,4	581,5	12,73	1945	510,8	644,1
6,788	1760	428,1	583,4	12,85	1948	511,9	644,9
6,909	1765	430,7	585,2	12,97	1951	513	645,8
7,03	1769	433,3	586,9	13,09	1954	514	646,6
7,152	1774	435,8	588,7	13,21	1957	515,1	647,5
7,273	1778	438,2	590,3	13,33	1960	516,1	648,3
7,394	1783	440,6	592	13,45	1963	517,2	649,1
7,515	1787	443	593,6	13,58	1966	518,2	649,9

7,636	1791	445,2	595,2	13,7	1969	519,2	650,7
7,758	1795	447,5	596,8	13,82	1972	520,2	651,5
7,879	1800	449,6	598,4	13,94	1975	521,1	652,3
8	1804	451,8	599,9	14,06	1978	522,1	653
8,121	1808	453,9	601,4	14,18	1981	523,1	653,8
8,242	1812	455,9	602,8	14,3	1984	524	654,6
8,364	1816	457,9	604,3	14,42	1987	524,9	655,3
8,485	1820	459,9	605,7	14,55	1990	525,8	656,1
8,606	1824	461,8	607,1	14,67	1993	526,8	656,8
8,727	1828	463,7	608,5	14,79	1996	527,6	657,5
8,848	1832	465,5	609,8	14,91	1999	528,5	658,2
8,97	1836	467,4	611,1	15,03	2002	529,4	658,9
9,091	1840	469,1	612,4	15,15	2005	530,3	659,6
9,212	1844	470,9	613,7	15,27	2007	531,1	660,3
9,333	1848	472,6	615	15,39	2010	532	661
9,455	1852	474,3	616,2	15,52	2013	532,8	661,7
9,576	1855	475,9	617,5	15,64	2016	533,7	662,4
9,697	1859	477,6	618,7	15,76	2019	534,5	663,1
9,818	1863	479,2	619,9	15,88	2021	535,3	663,7
9,939	1866	480,7	621	16	2024	536,1	664,4

APÉNDICE F.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1000 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	1916	425,7	659,4	10,06	2149	602,9	777,7
4,121	1922	432,5	663,4	10,18	2152	604,8	779,2
4,242	1928	439	667,4	10,3	2156	606,6	780,6
4,364	1934	445,3	671,2	10,42	2160	608,5	781,9
4,485	1940	451,3	674,9	10,55	2163	610,3	783,3
4,606	1946	457,2	678,4	10,67	2167	612	784,7
4,727	1952	462,8	681,9	10,79	2170	613,8	786
4,848	1957	468,2	685,3	10,91	2174	615,5	787,3
4,97	1963	473,4	688,6	11,03	2177	617,2	788,6
5,091	1969	478,5	691,8	11,15	2181	618,9	789,9
5,212	1974	483,4	694,9	11,27	2184	620,5	791,1
5,333	1979	488,1	697,9	11,39	2187	622,1	792,4
5,455	1985	492,7	700,9	11,52	2191	623,7	793,6
5,576	1990	497,1	703,8	11,64	2194	625,3	794,8
5,697	1995	501,4	706,6	11,76	2197	626,9	796
5,818	2000	505,6	709,3	11,88	2201	628,4	797,2
5,939	2005	509,7	712	12	2204	629,9	798,4
6,061	2010	513,6	714,6	12,12	2207	631,4	799,5
6,182	2015	517,4	717,2	12,24	2210	632,8	800,7
6,303	2020	521,2	719,7	12,36	2214	634,3	801,8
6,424	2025	524,8	722,2	12,48	2217	635,7	802,9
6,545	2029	528,3	724,6	12,61	2220	637,1	804
6,667	2034	531,8	726,9	12,73	2223	638,5	805,1
6,788	2039	535,2	729,2	12,85	2226	639,9	806,2
6,909	2043	538,4	731,4	12,97	2230	641,2	807,2
7,03	2048	541,6	733,7	13,09	2233	642,6	808,3
7,152	2052	544,8	735,8	13,21	2236	643,9	809,3
7,273	2057	547,8	737,9	13,33	2239	645,2	810,4
7,394	2061	550,8	740	13,45	2242	646,4	811,4
7,515	2066	553,7	742,1	13,58	2245	647,7	812,4

7,636	2070	556,5	744,1	13,7	2248	649	813,4
7,758	2074	559,3	746	13,82	2251	650,2	814,4
7,879	2078	562,1	748	13,94	2254	651,4	815,3
8	2083	564,7	749,9	14,06	2257	652,6	816,3
8,121	2087	567,3	751,7	14,18	2260	653,8	817,3
8,242	2091	569,9	753,5	14,3	2263	655	818,2
8,364	2095	572,4	755,3	14,42	2266	656,2	819,1
8,485	2099	574,8	757,1	14,55	2269	657,3	820,1
8,606	2103	577,3	758,9	14,67	2272	658,4	821
8,727	2107	579,6	760,6	14,79	2275	659,6	821,9
8,848	2111	581,9	762,3	14,91	2277	660,7	822,8
8,97	2115	584,2	763,9	15,03	2280	661,8	823,7
9,091	2119	586,4	765,5	15,15	2283	662,9	824,6
9,212	2123	588,6	767,1	15,27	2286	663,9	825,4
9,333	2126	590,8	768,7	15,39	2289	665	826,3
9,455	2130	592,9	770,3	15,52	2292	666	827,1
9,576	2134	594,9	771,8	15,64	2294	667,1	828
9,697	2138	597	773,3	15,76	2297	668,1	828,8
9,818	2141	599	774,8	15,88	2300	669,1	829,7
9,939	2145	600,9	776,3	16	2303	670,1	830,5

APÉNDICE G.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1200 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2194	510,8	791,3	10,06	2427	723,4	933,3
4,121	2201	519	796,1	10,18	2431	725,7	935
4,242	2207	526,8	800,8	10,3	2435	727,9	936,7
4,364	2213	534,4	805,4	10,42	2438	730,1	938,3
4,485	2219	541,6	809,8	10,55	2442	732,3	940
4,606	2225	548,6	814,1	10,67	2445	734,4	941,6
4,727	2230	555,3	818,3	10,79	2449	736,5	943,2
4,848	2236	561,8	822,4	10,91	2452	738,6	944,8
4,97	2242	568,1	826,3	11,03	2456	740,6	946,3
5,091	2247	574,2	830,1	11,15	2459	742,7	947,8
5,212	2253	580	833,9	11,27	2463	744,6	949,4
5,333	2258	585,7	837,5	11,39	2466	746,6	950,8
5,455	2263	591,2	841,1	11,52	2469	748,5	952,3
5,576	2269	596,5	844,5	11,64	2473	750,4	953,8
5,697	2274	601,7	847,9	11,76	2476	752,2	955,2
5,818	2279	606,7	851,2	11,88	2479	754,1	956,6
5,939	2284	611,6	854,4	12	2483	755,9	958
6,061	2289	616,3	857,6	12,12	2486	757,7	959,4
6,182	2294	620,9	860,6	12,24	2489	759,4	960,8
6,303	2299	625,4	863,6	12,36	2492	761,1	962,2
6,424	2303	629,8	866,6	12,48	2496	762,9	963,5
6,545	2308	634	869,5	12,61	2499	764,5	964,8
6,667	2313	638,2	872,3	12,73	2502	766,2	966,1
6,788	2317	642,2	875	12,85	2505	767,8	967,4
6,909	2322	646,1	877,7	12,97	2508	769,5	968,7
7,03	2327	650	880,4	13,09	2511	771,1	969,9
7,152	2331	653,7	883	13,21	2514	772,6	971,2
7,273	2336	657,4	885,5	13,33	2518	774,2	972,4
7,394	2340	660,9	888	13,45	2521	775,7	973,7
7,515	2344	664,4	890,5	13,58	2524	777,3	974,9

7,636	2349	667,9	892,9	13,7	2527	778,8	976,1
7,758	2353	671,2	895,2	13,82	2530	780,2	977,2
7,879	2357	674,5	897,5	13,94	2533	781,7	978,4
8	2361	677,7	899,8	14,06	2536	783,2	979,6
8,121	2365	680,8	902,1	14,18	2539	784,6	980,7
8,242	2370	683,9	904,3	14,3	2542	786	981,8
8,364	2374	686,9	906,4	14,42	2545	787,4	983
8,485	2378	689,8	908,5	14,55	2547	788,8	984,1
8,606	2382	692,7	910,6	14,67	2550	790,1	985,2
8,727	2386	695,5	912,7	14,79	2553	791,5	986,3
8,848	2390	698,3	914,7	14,91	2556	792,8	987,3
8,97	2394	701	916,7	15,03	2559	794,1	988,4
9,091	2397	703,7	918,6	15,15	2562	795,4	989,5
9,212	2401	706,3	920,6	15,27	2565	796,7	990,5
9,333	2405	708,9	922,5	15,39	2568	798	991,5
9,455	2409	711,4	924,3	15,52	2570	799,2	992,6
9,576	2413	713,9	926,2	15,64	2573	800,5	993,6
9,697	2416	716,4	928	15,76	2576	801,7	994,6
9,818	2420	718,8	929,8	15,88	2579	802,9	995,6
9,939	2424	721,1	931,5	16	2581	804,1	996,6

APÉNDICE H.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1400 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2473	595,9	923,1	10,06	2706	844	1089
4,121	2479	605,5	928,8	10,18	2710	846,7	1091
4,242	2486	614,6	934,3	10,3	2713	849,3	1093
4,364	2492	623,4	939,6	10,42	2717	851,8	1095
4,485	2498	631,9	944,8	10,55	2720	854,4	1097
4,606	2503	640	949,8	10,67	2724	856,9	1099
4,727	2509	647,9	954,7	10,79	2728	859,3	1100
4,848	2515	655,5	959,4	10,91	2731	861,7	1102
4,97	2520	662,8	964	11,03	2734	864,1	1104
5,091	2526	669,9	968,5	11,15	2738	866,4	1106
5,212	2531	676,7	972,9	11,27	2741	868,7	1108
5,333	2537	683,3	977,1	11,39	2745	871	1109
5,455	2542	689,7	981,3	11,52	2748	873,2	1111
5,576	2547	695,9	985,3	11,64	2751	875,4	1113
5,697	2552	702	989,2	11,76	2755	877,6	1114
5,818	2558	707,8	993,1	11,88	2758	879,7	1116
5,939	2563	713,5	996,8	12	2761	881,8	1118
6,061	2568	719	1000	12,12	2765	883,9	1119
6,182	2572	724,4	1004	12,24	2768	886	1121
6,303	2577	729,6	1008	12,36	2771	888	1123
6,424	2582	734,7	1011	12,48	2774	890	1124
6,545	2587	739,7	1014	12,61	2777	892	1126
6,667	2591	744,5	1018	12,73	2781	893,9	1127
6,788	2596	749,2	1021	12,85	2784	895,8	1129
6,909	2601	753,8	1024	12,97	2787	897,7	1130
7,03	2605	758,3	1027	13,09	2790	899,6	1132
7,152	2610	762,7	1030	13,21	2793	901,4	1133
7,273	2614	766,9	1033	13,33	2796	903,2	1135
7,394	2619	771,1	1036	13,45	2799	905	1136
7,515	2623	775,2	1039	13,58	2802	906,8	1137

7,636	2627	779,2	1042	13,7	2805	908,6	1139
7,758	2632	783,1	1044	13,82	2808	910,3	1140
7,879	2636	786,9	1047	13,94	2811	912	1141
8	2640	790,6	1050	14,06	2814	913,7	1143
8,121	2644	794,3	1052	14,18	2817	915,3	1144
8,242	2648	797,8	1055	14,3	2820	917	1145
8,364	2652	801,4	1057	14,42	2823	918,6	1147
8,485	2656	804,8	1060	14,55	2826	920,2	1148
8,606	2660	808,2	1062	14,67	2829	921,8	1149
8,727	2664	811,5	1065	14,79	2832	923,4	1151
8,848	2668	814,7	1067	14,91	2835	924,9	1152
8,97	2672	817,9	1069	15,03	2838	926,5	1153
9,091	2676	821	1072	15,15	2841	928	1154
9,212	2680	824,1	1074	15,27	2843	929,5	1156
9,333	2684	827,1	1076	15,39	2846	931	1157
9,455	2688	830	1078	15,52	2849	932,5	1158
9,576	2691	832,9	1081	15,64	2852	933,9	1159
9,697	2695	835,7	1083	15,76	2855	935,3	1160
9,818	2699	838,5	1085	15,88	2857	936,8	1162
9,939	2702	841,3	1087	16	2860	938,2	1163

APÉNDICE I.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1600 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	2752	681	1055	10,06	2985	964,6	1244
4,121	2758	691,9	1062	10,18	2988	967,6	1247
4,242	2764	702,4	1068	10,3	2992	970,6	1249
4,364	2770	712,5	1074	10,42	2996	973,5	1251
4,485	2776	722,1	1080	10,55	2999	976,4	1253
4,606	2782	731,5	1086	10,67	3003	979,3	1255
4,727	2788	740,4	1091	10,79	3006	982,1	1258
4,848	2794	749,1	1096	10,91	3010	984,8	1260
4,97	2799	757,5	1102	11,03	3013	987,5	1262
5,091	2805	765,5	1107	11,15	3017	990,2	1264
5,212	2810	773,4	1112	11,27	3020	992,8	1266
5,333	2815	780,9	1117	11,39	3023	995,4	1268
5,455	2821	788,3	1121	11,52	3027	998	1270
5,576	2826	795,4	1126	11,64	3030	1000	1272
5,697	2831	802,3	1131	11,76	3033	1003	1274
5,818	2836	808,9	1135	11,88	3037	1005	1276
5,939	2841	815,4	1139	12	3040	1008	1277
6,061	2846	821,8	1143	12,12	3043	1010	1279
6,182	2851	827,9	1148	12,24	3047	1013	1281
6,303	2856	833,9	1152	12,36	3050	1015	1283
6,424	2861	839,7	1155	12,48	3053	1017	1285
6,545	2865	845,4	1159	12,61	3056	1019	1286
6,667	2870	850,9	1163	12,73	3059	1022	1288
6,788	2875	856,3	1167	12,85	3062	1024	1290
6,909	2879	861,5	1170	12,97	3066	1026	1292
7,03	2884	866,6	1174	13,09	3069	1028	1293
7,152	2888	871,6	1177	13,21	3072	1030	1295
7,273	2893	876,5	1181	13,33	3075	1032	1297
7,394	2897	881,3	1184	13,45	3078	1034	1298
7,515	2902	885,9	1187	13,58	3081	1036	1300

7,636	2906	890,5	1190	13,7	3084	1038	1301
7,758	2910	894,9	1194	13,82	3087	1040	1303
7,879	2914	899,3	1197	13,94	3090	1042	1305
8	2919	903,6	1200	14,06	3093	1044	1306
8,121	2923	907,7	1203	14,18	3096	1046	1308
8,242	2927	911,8	1206	14,3	3099	1048	1309
8,364	2931	915,8	1209	14,42	3102	1050	1311
8,485	2935	919,8	1211	14,55	3105	1052	1312
8,606	2939	923,6	1214	14,67	3108	1054	1314
8,727	2943	927,4	1217	14,79	3111	1055	1315
8,848	2947	931,1	1220	14,91	3114	1057	1316
8,97	2951	934,7	1222	15,03	3116	1059	1318
9,091	2955	938,3	1225	15,15	3119	1061	1319
9,212	2959	941,8	1227	15,27	3122	1062	1321
9,333	2962	945,2	1230	15,39	3125	1064	1322
9,455	2966	948,6	1232	15,52	3128	1066	1323
9,576	2970	951,9	1235	15,64	3131	1067	1325
9,697	2974	955,1	1237	15,76	3133	1069	1326
9,818	2977	958,3	1240	15,88	3136	1071	1327
9,939	2981	961,5	1242	16	3139	1072	1329

APÉNDICE J.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1800 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3030	766,2	1187	10,06	3263	1085	1400
4,121	3037	778,4	1194	10,18	3267	1089	1402
4,242	3043	790,2	1201	10,3	3271	1092	1405
4,364	3049	801,5	1208	10,42	3274	1095	1407
4,485	3055	812,4	1215	10,55	3278	1098	1410
4,606	3061	822,9	1221	10,67	3281	1102	1412
4,727	3067	833	1227	10,79	3285	1105	1415
4,848	3072	842,7	1234	10,91	3288	1108	1417
4,97	3078	852,1	1239	11,03	3292	1111	1419
5,091	3083	861,2	1245	11,15	3295	1114	1422
5,212	3089	870	1251	11,27	3299	1117	1424
5,333	3094	878,5	1256	11,39	3302	1120	1426
5,455	3099	886,8	1262	11,52	3305	1123	1428
5,576	3105	894,8	1267	11,64	3309	1126	1431
5,697	3110	902,5	1272	11,76	3312	1128	1433
5,818	3115	910,1	1277	11,88	3315	1131	1435
5,939	3120	917,4	1282	12	3319	1134	1437
6,061	3125	924,5	1286	12,12	3322	1136	1439
6,182	3130	931,4	1291	12,24	3325	1139	1441
6,303	3135	938,1	1295	12,36	3328	1142	1443
6,424	3139	944,6	1300	12,48	3332	1144	1445
6,545	3144	951	1304	12,61	3335	1147	1447
6,667	3149	957,2	1308	12,73	3338	1149	1449
6,788	3153	963,3	1313	12,85	3341	1152	1451
6,909	3158	969,2	1317	12,97	3344	1154	1453
7,03	3163	974,9	1321	13,09	3347	1157	1455
7,152	3167	980,6	1324	13,21	3350	1159	1457
7,273	3172	986,1	1328	13,33	3354	1161	1459
7,394	3176	991,4	1332	13,45	3357	1164	1460
7,515	3180	996,7	1336	13,58	3360	1166	1462

7,636	3185	1002	1339	13,7	3363	1168	1464
7,758	3189	1007	1343	13,82	3366	1170	1466
7,879	3193	1012	1346	13,94	3369	1173	1468
8	3197	1017	1350	14,06	3372	1175	1469
8,121	3201	1021	1353	14,18	3375	1177	1471
8,242	3206	1026	1356	14,3	3378	1179	1473
8,364	3210	1030	1360	14,42	3381	1181	1474
8,485	3214	1035	1363	14,55	3384	1183	1476
8,606	3218	1039	1366	14,67	3386	1185	1478
8,727	3222	1043	1369	14,79	3389	1187	1479
8,848	3226	1047	1372	14,91	3392	1189	1481
8,97	3230	1052	1375	15,03	3395	1191	1483
9,091	3233	1056	1378	15,15	3398	1193	1484
9,212	3237	1059	1381	15,27	3401	1195	1486
9,333	3241	1063	1384	15,39	3404	1197	1487
9,455	3245	1067	1387	15,52	3406	1199	1489
9,576	3249	1071	1389	15,64	3409	1201	1490
9,697	3252	1075	1392	15,76	3412	1203	1492
9,818	3256	1078	1395	15,88	3415	1204	1493
9,939	3260	1082	1397	16	3418	1206	1495

APÉNDICE K.

VALORES DE UN CICLO OTTO IDEAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 2000 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME	Rc	T3	Wneto	PME
	[K]	[kJ]	[kPa]		[K]	[kJ]	[kPa]
4	3309	851,3	1319	10,06	3542	1206	1555
4,121	3315	864,9	1327	10,18	3546	1210	1558
4,242	3322	878	1335	10,3	3549	1213	1561
4,364	3328	890,6	1342	10,42	3553	1217	1564
4,485	3334	902,7	1350	10,55	3557	1221	1567
4,606	3339	914,3	1357	10,67	3560	1224	1569
4,727	3345	925,6	1364	10,79	3564	1228	1572
4,848	3351	936,4	1371	10,91	3567	1231	1575
4,97	3356	946,8	1377	11,03	3570	1234	1577
5,091	3362	956,9	1384	11,15	3574	1238	1580
5,212	3367	966,7	1390	11,27	3577	1241	1582
5,333	3373	976,2	1396	11,39	3581	1244	1585
5,455	3378	985,3	1402	11,52	3584	1247	1587
5,576	3383	994,2	1408	11,64	3587	1251	1590
5,697	3388	1003	1413	11,76	3591	1254	1592
5,818	3394	1011	1419	11,88	3594	1257	1594
5,939	3399	1019	1424	12	3597	1260	1597
6,061	3404	1027	1429	12,12	3601	1263	1599
6,182	3408	1035	1434	12,24	3604	1266	1601
6,303	3413	1042	1439	12,36	3607	1269	1604
6,424	3418	1050	1444	12,48	3610	1271	1606
6,545	3423	1057	1449	12,61	3613	1274	1608
6,667	3428	1064	1454	12,73	3617	1277	1610
6,788	3432	1070	1458	12,85	3620	1280	1612
6,909	3437	1077	1463	12,97	3623	1282	1614
7,03	3441	1083	1467	13,09	3626	1285	1617
7,152	3446	1090	1472	13,21	3629	1288	1619
7,273	3450	1096	1476	13,33	3632	1290	1621
7,394	3455	1102	1480	13,45	3635	1293	1623
7,515	3459	1107	1484	13,58	3638	1295	1625

7,636	3463	1113	1488	13,7	3641	1298	1627
7,758	3468	1119	1492	13,82	3644	1300	1629
7,879	3472	1124	1496	13,94	3647	1303	1631
8	3476	1129	1500	14,06	3650	1305	1633
8,121	3480	1135	1503	14,18	3653	1308	1635
8,242	3484	1140	1507	14,3	3656	1310	1636
8,364	3488	1145	1511	14,42	3659	1312	1638
8,485	3492	1150	1514	14,55	3662	1315	1640
8,606	3496	1155	1518	14,67	3665	1317	1642
8,727	3500	1159	1521	14,79	3668	1319	1644
8,848	3504	1164	1525	14,91	3671	1321	1646
8,97	3508	1168	1528	15,03	3674	1324	1647
9,091	3512	1173	1531	15,15	3677	1326	1649
9,212	3516	1177	1534	15,27	3679	1328	1651
9,333	3520	1182	1537	15,39	3682	1330	1653
9,455	3524	1186	1541	15,52	3685	1332	1654
9,576	3527	1190	1544	15,64	3688	1334	1656
9,697	3531	1194	1547	15,76	3691	1336	1658
9,818	3535	1198	1550	15,88	3693	1338	1659
9,939	3539	1202	1553	16	3696	1340	1661

APÉNDICE L.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 600 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	1245	237,9	368,3	39,64	10,06	1426	339,1	437,2	56,51
4,121	1250	241,7	370,7	40,29	10,18	1429	340,2	438,1	56,7
4,242	1255	245,4	373	40,91	10,3	1432	341,3	438,9	56,88
4,364	1260	249	375,2	41,51	10,42	1434	342,3	439,7	57,05
4,485	1264	252,5	377,3	42,08	10,55	1437	343,3	440,5	57,22
4,606	1269	255,8	379,5	42,63	10,67	1440	344,4	441,3	57,39
4,727	1274	259	381,5	43,16	10,79	1442	345,4	442	57,56
4,848	1278	262	383,4	43,67	10,91	1445	346,3	442,8	57,72
4,97	1283	265	385,3	44,17	11,03	1448	347,3	443,6	57,89
5,091	1287	267,9	387,2	44,65	11,15	1450	348,3	444,3	58,05
5,212	1291	270,7	389	45,12	11,27	1453	349,2	445	58,2
5,333	1295	273,4	390,8	45,57	11,39	1455	350,1	445,8	58,36
5,455	1299	276,1	392,6	46,01	11,52	1458	351,1	446,5	58,51
5,576	1304	278,6	394,2	46,43	11,64	1460	352	447,2	58,66
5,697	1308	281	395,9	46,84	11,76	1463	352,9	447,9	58,81
5,818	1312	283,4	397,5	47,24	11,88	1465	353,7	448,6	58,96
5,939	1316	285,8	399,1	47,63	12	1468	354,6	449,3	59,1
6,061	1319	288,1	400,6	48,01	12,12	1470	355,5	449,9	59,24
6,182	1323	290,2	402,1	48,37	12,24	1473	356,3	450,6	59,38
6,303	1327	292,3	403,5	48,72	12,36	1475	357,1	451,3	59,52
6,424	1331	294,4	404,9	49,07	12,48	1477	358	451,9	59,66
6,545	1335	296,4	406,3	49,4	12,61	1480	358,8	452,5	59,79
6,667	1338	298,3	407,6	49,72	12,73	1482	359,6	453,2	59,93
6,788	1342	300,3	408,9	50,04	12,85	1485	360,3	453,8	60,06
6,909	1345	302,1	410,2	50,35	12,97	1487	361,1	454,4	60,18
7,03	1349	304	411,5	50,66	13,09	1489	361,9	455	60,31
7,152	1352	305,8	412,8	50,96	13,21	1492	362,6	455,6	60,44
7,273	1356	307,5	414,1	51,25	13,33	1494	363,4	456,2	60,56
7,394	1359	309,2	415,3	51,54	13,45	1496	364,1	456,8	60,68
7,515	1363	310,9	416,5	51,82	13,58	1498	364,8	457,4	60,8

7,636	1366	312,5	417,7	52,09	13,7	1501	365,5	457,9	60,92
7,758	1369	314,1	418,8	52,36	13,82	1503	366,3	458,5	61,04
7,879	1372	315,7	419,9	52,62	13,94	1505	367	459,1	61,16
8	1376	317,2	421	52,87	14,06	1507	367,7	459,7	61,28
8,121	1379	318,7	422,1	53,12	14,18	1510	368,4	460,3	61,4
8,242	1382	320,2	423,2	53,37	14,3	1512	369,1	460,8	61,51
8,364	1385	321,6	424,2	53,6	14,42	1514	369,7	461,4	61,62
8,485	1388	323	425,2	53,84	14,55	1516	370,4	461,9	61,74
8,606	1391	324,4	426,2	54,06	14,67	1518	371,1	462,5	61,85
8,727	1394	325,7	427,2	54,29	14,79	1520	371,7	463	61,95
8,848	1397	327	428,2	54,51	14,91	1522	372,4	463,5	62,06
8,97	1400	328,3	429,2	54,72	15,03	1525	373	464	62,16
9,091	1403	329,6	430,1	54,94	15,15	1527	373,6	464,5	62,27
9,212	1406	330,9	431,1	55,15	15,27	1529	374,2	465	62,37
9,333	1409	332,1	432	55,36	15,39	1531	374,8	465,5	62,47
9,455	1412	333,4	432,9	55,56	15,52	1533	375,4	466	62,57
9,576	1415	334,6	433,8	55,76	15,64	1535	376	466,5	62,66
9,697	1418	335,7	434,7	55,95	15,76	1537	376,6	467	62,76
9,818	1421	336,9	435,6	56,14	15,88	1539	377,1	467,4	62,86
9,939	1423	338	436,4	56,33	16	1541	377,7	467,9	62,95

APÉNDICE M.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 800 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	1465	311,4	482,2	38,93	10,06	1642	446,4	575,7	55,8
4,121	1470	316,6	485,4	39,57	10,18	1645	447,9	576,8	55,99
4,242	1475	321,5	488,5	40,19	10,3	1647	449,3	577,9	56,17
4,364	1480	326,2	491,5	40,78	10,42	1650	450,8	579	56,34
4,485	1484	330,8	494,4	41,35	10,55	1653	452,1	580,1	56,52
4,606	1489	335,2	497,3	41,9	10,67	1655	453,5	581,2	56,69
4,727	1493	339,4	500	42,43	10,79	1658	454,9	582,2	56,86
4,848	1498	343,5	502,6	42,94	10,91	1660	456,2	583,3	57,02
4,97	1502	347,5	505,2	43,44	11,03	1663	457,5	584,3	57,19
5,091	1506	351,4	507,8	43,92	11,15	1665	458,8	585,3	57,35
5,212	1510	355,1	510,3	44,39	11,27	1668	460,1	586,3	57,51
5,333	1514	358,7	512,8	44,84	11,39	1670	461,3	587,3	57,66
5,455	1518	362,2	515,1	45,28	11,52	1673	462,5	588,3	57,82
5,576	1522	365,6	517,3	45,7	11,64	1675	463,8	589,2	57,97
5,697	1526	368,8	519,5	46,1	11,76	1678	465	590,2	58,12
5,818	1530	372	521,6	46,5	11,88	1680	466,2	591,1	58,27
5,939	1534	375,1	523,7	46,88	12	1683	467,3	592	58,41
6,061	1538	378,1	525,8	47,26	12,12	1685	468,5	593	58,56
6,182	1541	381	527,9	47,63	12,24	1687	469,6	593,9	58,7
6,303	1545	383,8	529,8	47,98	12,36	1690	470,7	594,8	58,84
6,424	1549	386,6	531,7	48,33	12,48	1692	471,8	595,7	58,98
6,545	1552	389,3	533,6	48,66	12,61	1694	472,9	596,5	59,11
6,667	1556	391,9	535,5	48,99	12,73	1697	474	597,4	59,25
6,788	1560	394,5	537,3	49,31	12,85	1699	475	598,2	59,38
6,909	1563	397	539,1	49,63	12,97	1701	476,1	599,1	59,51
7,03	1566	399,4	540,8	49,93	13,09	1704	477,1	599,9	59,64
7,152	1570	401,8	542,5	50,23	13,21	1706	478,1	600,7	59,76
7,273	1573	404,1	544,2	50,52	13,33	1708	479,1	601,5	59,89
7,394	1576	406,4	545,8	50,8	13,45	1710	480,1	602,3	60,01
7,515	1580	408,6	547,4	51,08	13,58	1713	481,1	603,1	60,13

7,636	1583	410,8	549	51,35	13,7	1715	482	603,9	60,25
7,758	1586	413	550,6	51,62	13,82	1717	483	604,6	60,37
7,879	1589	415,1	552,1	51,88	13,94	1719	483,9	605,4	60,49
8	1593	417,1	553,6	52,14	14,06	1721	484,9	606,2	60,61
8,121	1596	419,1	555,1	52,39	14,18	1724	485,8	607	60,72
8,242	1599	421,1	556,6	52,64	14,3	1726	486,7	607,7	60,84
8,364	1602	423	558	52,88	14,42	1728	487,6	608,4	60,95
8,485	1605	424,9	559,4	53,11	14,55	1730	488,5	609,2	61,06
8,606	1608	426,8	560,8	53,34	14,67	1732	489,4	609,9	61,17
8,727	1611	428,6	562,1	53,57	14,79	1734	490,3	610,6	61,28
8,848	1614	430,3	563,4	53,79	14,91	1736	491,1	611,4	61,39
8,97	1617	432,1	564,8	54,01	15,03	1738	492	612,1	61,5
9,091	1620	433,8	566,1	54,23	15,15	1740	492,8	612,8	61,6
9,212	1622	435,5	567,3	54,44	15,27	1742	493,7	613,5	61,71
9,333	1625	437,1	568,6	54,64	15,39	1744	494,5	614,2	61,81
9,455	1628	438,8	569,8	54,85	15,52	1746	495,3	614,9	61,92
9,576	1631	440,4	571	55,04	15,64	1748	496,2	615,6	62,02
9,697	1634	441,9	572,2	55,24	15,76	1750	497	616,3	62,12
9,818	1637	443,4	573,4	55,43	15,88	1752	497,9	617,1	62,23
9,939	1639	444,9	574,5	55,62	16	1754	498,7	617,8	62,34

APÉNDICE N.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1000 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	1680	383,2	593,3	38,32	10,06	1853	551,7	711,4	55,17
4,121	1685	389,6	597,5	38,96	10,18	1856	553,5	712,8	55,35
4,242	1690	395,9	601,5	39,59	10,3	1859	555,3	714,2	55,53
4,364	1694	401,7	605,2	40,17	10,42	1861	557,1	715,6	55,71
4,485	1699	403,9	603,6	40,39	10,55	1864	558,8	716,9	55,88
4,606	1703	403,9	599,1	40,39	10,67	1866	560,5	718,3	56,05
4,727	1707	404,4	595,6	40,44	10,79	1869	562,2	719,6	56,22
4,848	1712	406,7	595	40,67	10,91	1872	563,8	720,9	56,38
4,97	1716	411,9	598,9	41,19	11,03	1874	565,5	722,2	56,55
5,091	1720	421,5	609,1	42,15	11,15	1877	567,1	723,5	56,71
5,212	1724	436,3	627	43,63	11,27	1879	568,7	724,8	56,87
5,333	1728	446	637,5	44,6	11,39	1881	570,3	726	57,03
5,455	1732	451,3	641,8	45,13	11,52	1884	571,9	727,3	57,19
5,576	1736	453,9	642,3	45,39	11,64	1886	573,4	728,5	57,34
5,697	1740	454,9	640,8	45,49	11,76	1889	575	729,8	57,5
5,818	1744	458,4	642,9	45,84	11,88	1891	576,5	731	57,65
5,939	1748	462,3	645,6	46,23	12	1894	578	732,2	57,8
6,061	1751	466,2	648,4	46,62	12,12	1896	579,4	733,4	57,94
6,182	1755	470,1	651,3	47,01	12,24	1898	580,9	734,6	58,09
6,303	1758	473,9	654,2	47,39	12,36	1901	582,3	735,8	58,23
6,424	1762	477,7	657	47,77	12,48	1903	583,7	736,9	58,37
6,545	1766	481,3	659,8	48,13	12,61	1905	585,1	738	58,51
6,667	1769	484,9	662,5	48,49	12,73	1907	586,4	739,1	58,64
6,788	1773	488,4	665,2	48,84	12,85	1910	587,8	740,2	58,78
6,909	1776	491,8	667,8	49,18	12,97	1912	589,1	741,3	58,91
7,03	1779	495,1	670,4	49,51	13,09	1914	590,4	742,3	59,04
7,152	1783	498,3	672,8	49,83	13,21	1916	591,7	743,4	59,17
7,273	1786	501,5	675,2	50,15	13,33	1919	592,9	744,4	59,29
7,394	1789	504,5	677,5	50,45	13,45	1921	594,2	745,4	59,42
7,515	1792	507,5	679,8	50,75	13,58	1923	595,4	746,4	59,54

7,636	1796	510,4	682	51,04	13,7	1925	596,6	747,4	59,66
7,758	1799	513,2	684,2	51,32	13,82	1927	597,8	748,4	59,78
7,879	1802	515,8	686,1	51,58	13,94	1929	599	749,4	59,9
8	1805	518,2	687,8	51,82	14,06	1932	600,2	750,4	60,02
8,121	1808	520,6	689,5	52,06	14,18	1934	601,4	751,4	60,14
8,242	1811	522,9	691,1	52,29	14,3	1936	602,5	752,3	60,25
8,364	1814	525,1	692,7	52,51	14,42	1938	603,7	753,3	60,37
8,485	1817	527,3	694,2	52,73	14,55	1940	604,8	754,2	60,48
8,606	1820	529,4	695,6	52,94	14,67	1942	605,9	755,1	60,59
8,727	1823	531,4	697	53,14	14,79	1944	607	756,1	60,7
8,848	1826	533,4	698,4	53,34	14,91	1946	608,1	757	60,81
8,97	1829	535,4	699,8	53,54	15,03	1948	609,2	757,9	60,92
9,091	1832	537,3	701,1	53,73	15,15	1950	610,3	758,8	61,03
9,212	1834	539,2	702,5	53,92	15,27	1952	611,3	759,7	61,13
9,333	1837	541,1	703,8	54,11	15,39	1954	612,4	760,6	61,24
9,455	1840	542,9	705,1	54,29	15,52	1956	613,4	761,4	61,34
9,576	1843	544,7	706,3	54,47	15,64	1958	614,4	762,3	61,44
9,697	1845	546,4	707,6	54,64	15,76	1960	615,4	763,1	61,54
9,818	1848	548,2	708,8	54,82	15,88	1962	616,4	764	61,64
9,939	1851	549,9	710,1	54,99	16	1964	617,4	764,8	61,74

APÉNDICE O.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1200 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	1891	453,6	702,4	37,8	10,06	2061	655,7	845,5	54,64
4,121	1896	461,3	707,3	38,44	10,18	2064	657,9	847,3	54,83
4,242	1900	468,6	712	39,05	10,3	2067	660,1	849	55,01
4,364	1905	475,6	716,6	39,64	10,42	2069	662,2	850,6	55,18
4,485	1909	482,4	721	40,2	10,55	2072	664,3	852,3	55,36
4,606	1914	489	725,4	40,75	10,67	2074	666,4	853,9	55,53
4,727	1918	495,3	729,5	41,28	10,79	2077	668,4	855,6	55,7
4,848	1922	501,4	733,6	41,78	10,91	2079	670,4	857,2	55,87
4,97	1926	507,3	737,5	42,27	11,03	2082	672,4	858,7	56,03
5,091	1930	513	741,4	42,75	11,15	2084	674,4	860,3	56,2
5,212	1934	518,5	745,2	43,21	11,27	2087	676,3	861,9	56,36
5,333	1938	523,9	748,8	43,66	11,39	2089	678,2	863,4	56,52
5,455	1942	529,1	752,4	44,09	11,52	2092	680,1	864,9	56,67
5,576	1946	534,1	755,8	44,51	11,64	2094	682	866,4	56,83
5,697	1950	539	759,2	44,92	11,76	2096	683,8	867,9	56,98
5,818	1954	543,7	762,5	45,31	11,88	2099	685,6	869,4	57,13
5,939	1957	548,4	765,8	45,7	12	2101	687,4	870,8	57,28
6,061	1961	552,9	768,9	46,07	12,12	2103	689,1	872,2	57,43
6,182	1965	557,2	772	46,44	12,24	2106	690,8	873,6	57,57
6,303	1968	561,5	775	46,79	12,36	2108	692,5	875	57,71
6,424	1972	565,6	778	47,13	12,48	2110	694,2	876,3	57,85
6,545	1975	569,6	780,8	47,47	12,61	2112	695,8	877,7	57,98
6,667	1979	573,6	783,7	47,8	12,73	2115	697,4	879	58,12
6,788	1982	577,4	786,4	48,12	12,85	2117	699	880,3	58,25
6,909	1985	581,2	789,1	48,43	12,97	2119	700,6	881,6	58,38
7,03	1989	584,8	791,8	48,73	13,09	2121	702,2	882,9	58,51
7,152	1992	588,5	794,5	49,04	13,21	2124	703,7	884,1	58,64
7,273	1995	592	797,2	49,34	13,33	2126	705,2	885,4	58,77
7,394	1998	595,5	799,8	49,63	13,45	2128	706,7	886,6	58,89
7,515	2001	599	802,5	49,92	13,58	2130	708,2	887,8	59,02

7,636	2004	602,2	804,7	50,18	13,7	2132	709,7	889	59,14
7,758	2007	603,7	804,9	50,31	13,82	2134	711,1	890,2	59,26
7,879	2011	603,9	803,3	50,33	13,94	2137	712,5	891,4	59,38
8	2014	603,9	801,5	50,32	14,06	2139	714	892,6	59,5
8,121	2017	603,9	799,8	50,33	14,18	2141	715,4	893,8	59,61
8,242	2020	604,3	798,6	50,35	14,3	2143	716,8	895	59,73
8,364	2023	605,1	798,2	50,43	14,42	2145	718,1	896,1	59,85
8,485	2026	606,8	798,8	50,56	14,55	2147	719,5	897,3	59,96
8,606	2028	609,4	800,7	50,78	14,67	2149	720,8	898,4	60,07
8,727	2031	613,1	804,1	51,09	14,79	2151	722,2	899,5	60,18
8,848	2034	618,2	809,4	51,52	14,91	2153	723,5	900,6	60,29
8,97	2037	625,7	817,9	52,15	15,03	2155	724,8	901,7	60,4
9,091	2040	634,1	827,4	52,84	15,15	2157	726,1	902,8	60,51
9,212	2043	641	835	53,42	15,27	2159	727,3	903,9	60,61
9,333	2045	645,8	839,9	53,81	15,39	2161	728,6	904,9	60,72
9,455	2048	649,2	843,2	54,1	15,52	2163	729,8	906	60,82
9,576	2051	651,6	845	54,3	15,64	2165	731,1	907	60,92
9,697	2053	653,2	845,8	54,44	15,76	2167	732,3	908	61,02
9,818	2056	654,2	845,9	54,52	15,88	2169	733,5	909,1	61,12
9,939	2059	654,8	845,5	54,56	16	2171	734,7	910,1	61,22

APÉNDICE P.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1400 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	2099	523,4	810,5	37,39	10,06	2267	758	977,4	54,14
4,121	2103	532,2	816,1	38,02	10,18	2270	760,6	979,5	54,33
4,242	2108	540,7	821,6	38,62	10,3	2273	763,1	981,5	54,51
4,364	2112	548,9	826,9	39,21	10,42	2275	765,6	983,4	54,68
4,485	2117	556,8	832,1	39,77	10,55	2278	768	985,4	54,86
4,606	2121	564,3	837,1	40,31	10,67	2280	770,4	987,3	55,03
4,727	2125	571,6	841,9	40,83	10,79	2283	772,8	989,1	55,2
4,848	2129	578,6	846,5	41,33	10,91	2285	775,1	991	55,37
4,97	2133	585,4	851,1	41,82	11,03	2287	777,4	992,8	55,53
5,091	2137	592,1	855,6	42,29	11,15	2290	779,7	994,6	55,69
5,212	2141	598,5	860,1	42,75	11,27	2292	781,9	996,4	55,85
5,333	2145	604,8	864,4	43,2	11,39	2295	784,1	998,2	56,01
5,455	2149	610,8	868,5	43,63	11,52	2297	786,2	1000	56,16
5,576	2153	616,6	872,5	44,04	11,64	2299	788,4	1002	56,32
5,697	2157	622,2	876,4	44,44	11,76	2302	790,6	1003	56,47
5,818	2160	627,7	880,3	44,84	11,88	2304	792,7	1005	56,62
5,939	2164	633,1	884,1	45,22	12	2306	794,8	1007	56,77
6,061	2168	638,3	887,8	45,6	12,12	2309	796,8	1009	56,91
6,182	2171	643,5	891,5	45,96	12,24	2311	798,8	1010	57,06
6,303	2175	648,4	895	46,31	12,36	2313	800,7	1012	57,19
6,424	2178	653,2	898,4	46,66	12,48	2316	802,5	1013	57,32
6,545	2182	657,9	901,8	46,99	12,61	2318	803,6	1014	57,4
6,667	2185	662,5	905,2	47,32	12,73	2320	803,8	1013	57,42
6,788	2188	667	908,4	47,64	12,85	2322	803,9	1012	57,42
6,909	2192	671,3	911,6	47,95	12,97	2324	803,9	1012	57,42
7,03	2195	675,6	914,7	48,26	13,09	2327	803,9	1011	57,42
7,152	2198	679,8	917,8	48,56	13,21	2329	803,9	1010	57,42
7,273	2201	683,9	920,8	48,85	13,33	2331	804	1009	57,43
7,394	2205	687,8	923,7	49,13	13,45	2333	804,2	1009	57,44
7,515	2208	691,7	926,6	49,41	13,58	2335	804,5	1009	57,47

7,636	2211	695,6	929,5	49,68	13,7	2337	805,1	1009	57,51
7,758	2214	699,3	932,3	49,95	13,82	2340	806	1009	57,57
7,879	2217	703	935	50,21	13,94	2342	807,1	1010	57,65
8	2220	706,5	937,7	50,47	14,06	2344	808,6	1011	57,76
8,121	2223	710,1	940,4	50,72	14,18	2346	810,4	1013	57,89
8,242	2226	713,5	943	50,96	14,3	2348	812,7	1015	58,05
8,364	2229	716,9	945,6	51,2	14,42	2350	815,4	1017	58,24
8,485	2232	720,2	948,1	51,44	14,55	2352	818,6	1021	58,47
8,606	2235	723,4	950,5	51,67	14,67	2354	822,7	1025	58,77
8,727	2238	726,5	952,9	51,9	14,79	2356	827,6	1031	59,12
8,848	2240	729,7	955,3	52,12	14,91	2358	832,4	1036	59,46
8,97	2243	732,7	957,7	52,34	15,03	2360	837	1041	59,79
9,091	2246	735,7	960	52,55	15,15	2362	840,6	1045	60,05
9,212	2249	738,7	962,4	52,77	15,27	2364	843,6	1048	60,26
9,333	2251	741,6	964,6	52,97	15,39	2366	846,1	1051	60,43
9,455	2254	744,5	966,8	53,18	15,52	2368	848,1	1053	60,58
9,576	2257	747,3	969	53,38	15,64	2370	849,8	1054	60,7
9,697	2259	750	971,2	53,57	15,76	2372	851,2	1055	60,8
9,818	2262	752,7	973,3	53,77	15,88	2374	852,3	1056	60,88
9,939	2265	755,4	975,4	53,96	16	2376	853,1	1057	60,94

APÉNDICE Q.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1600 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	2304	591,2	915,5	36,95	10,06	2471	848,7	1094	53,04
4,121	2309	601,2	921,9	37,58	10,18	2474	851,3	1096	53,21
4,242	2313	610,8	928,1	38,17	10,3	2476	853,9	1098	53,37
4,364	2318	620	934	38,75	10,42	2479	856,4	1100	53,53
4,485	2322	628,8	939,8	39,3	10,55	2481	858,9	1102	53,68
4,606	2326	637,4	945,5	39,84	10,67	2484	861,3	1104	53,83
4,727	2330	645,6	950,9	40,35	10,79	2486	863,6	1105	53,98
4,848	2334	653,5	956,2	40,85	10,91	2489	865,9	1107	54,12
4,97	2339	661,2	961,3	41,33	11,03	2491	868,2	1109	54,26
5,091	2343	668,6	966,3	41,79	11,15	2494	870,4	1110	54,4
5,212	2346	675,8	971,2	42,24	11,27	2496	872,6	1112	54,54
5,333	2350	682,8	975,9	42,67	11,39	2498	874,7	1114	54,67
5,455	2354	689,5	980,5	43,1	11,52	2501	876,8	1115	54,8
5,576	2358	696,1	985	43,5	11,64	2503	878,9	1117	54,93
5,697	2362	702,4	989,4	43,9	11,76	2505	880,9	1118	55,06
5,818	2365	708,5	993,6	44,28	11,88	2508	882,9	1120	55,18
5,939	2369	714,5	997,7	44,65	12	2510	884,8	1121	55,3
6,061	2372	720,3	1002	45,02	12,12	2512	886,8	1122	55,42
6,182	2376	725,9	1006	45,37	12,24	2515	888,6	1124	55,54
6,303	2379	731,3	1009	45,71	12,36	2517	890,5	1125	55,65
6,424	2383	736,7	1013	46,04	12,48	2519	892,3	1126	55,77
6,545	2386	741,9	1017	46,37	12,61	2521	894	1128	55,88
6,667	2390	746,9	1021	46,68	12,73	2523	895,8	1129	55,98
6,788	2393	751,9	1024	46,99	12,85	2526	897,4	1130	56,09
6,909	2396	756,7	1027	47,29	12,97	2528	899,1	1131	56,19
7,03	2400	761,3	1031	47,58	13,09	2530	900,7	1133	56,3
7,152	2403	765,9	1034	47,87	13,21	2532	902,3	1134	56,4
7,273	2406	770,3	1037	48,14	13,33	2534	903,9	1135	56,49
7,394	2409	774,6	1040	48,41	13,45	2536	905,4	1136	56,59
7,515	2412	778,8	1043	48,68	13,58	2539	906,9	1137	56,68
7,636	2415	782,9	1046	48,93	13,7	2541	908,4	1138	56,77
7,758	2418	787	1049	49,19	13,82	2543	909,8	1139	56,87
7,879	2421	790,9	1052	49,43	13,94	2545	911,3	1140	56,95
8	2424	794,8	1055	49,67	14,06	2547	912,7	1141	57,04
8,121	2427	798,6	1058	49,91	14,18	2549	914	1142	57,13

8,242	2430	802,2	1060	50,14	14,3	2551	915,4	1143	57,21
8,364	2433	805,8	1063	50,36	14,42	2553	916,7	1144	57,29
8,485	2436	809,3	1065	50,58	14,55	2555	918	1145	57,37
8,606	2439	812,8	1068	50,8	14,67	2557	919,2	1146	57,45
8,727	2442	816,1	1070	51,01	14,79	2559	920,5	1147	57,53
8,848	2445	819,4	1073	51,21	14,91	2561	921,7	1147	57,61
8,97	2447	822,6	1075	51,41	15,03	2563	922,9	1148	57,68
9,091	2450	825,7	1077	51,61	15,15	2565	924	1149	57,75
9,212	2453	828,8	1080	51,8	15,27	2567	925,1	1150	57,82
9,333	2455	831,8	1082	51,99	15,39	2569	926,3	1150	57,89
9,455	2458	834,8	1084	52,18	15,52	2571	927,3	1151	57,96
9,576	2461	837,7	1086	52,36	15,64	2573	928,4	1152	58,02
9,697	2463	840,6	1088	52,53	15,76	2575	929,4	1152	58,09
9,818	2466	843,3	1090	52,71	15,88	2577	930,4	1153	58,15
9,939	2469	846	1092	52,88	16	2578	931,4	1154	58,21

APÉNDICE R.

VALORES DE UN CICLO OTTO REAL PARA UN PODER CALORÍFICO DE 1800 [KJ/KG]

Rc	T3	Wneto	PME		Rc	T3	Wneto	PME	
	[K]	[kJ]	[kPa]			[K]	[kJ]	[kPa]	
4	2508	636,5	985,5	35,36	10,06	2673	854,7	1102	47,48
4,121	2512	646,5	991,4	35,92	10,18	2676	855,7	1102	47,54
4,242	2517	656,2	997	36,45	10,3	2678	856,7	1102	47,6
4,364	2521	665,4	1002	36,97	10,42	2681	857,6	1102	47,64
4,485	2525	674,3	1008	37,46	10,55	2683	858,3	1101	47,69
4,606	2529	682,8	1013	37,93	10,67	2686	859	1101	47,72
4,727	2534	690,9	1018	38,38	10,79	2688	859,6	1100	47,76
4,848	2538	698,6	1022	38,81	10,91	2691	860,2	1100	47,79
4,97	2542	706,1	1027	39,23	11,03	2693	860,6	1099	47,81
5,091	2546	713,2	1031	39,62	11,15	2696	861	1098	47,83
5,212	2550	720,2	1035	40,01	11,27	2698	861,2	1098	47,85
5,333	2553	726,8	1039	40,38	11,39	2700	861,4	1097	47,86
5,455	2557	733,2	1043	40,73	11,52	2703	861,6	1096	47,86
5,576	2561	739,3	1046	41,07	11,64	2705	861,6	1095	47,87
5,697	2565	745,2	1050	41,4	11,76	2707	861,6	1094	47,87
5,818	2568	750,8	1053	41,71	11,88	2710	861,5	1092	47,86
5,939	2572	756,3	1056	42,02	12	2712	861,3	1091	47,85
6,061	2575	761,6	1059	42,31	12,12	2714	861	1090	47,83
6,182	2579	766,7	1062	42,59	12,24	2716	860,6	1088	47,81
6,303	2582	771,5	1065	42,86	12,36	2719	860,2	1087	47,79
6,424	2586	776,1	1068	43,12	12,48	2721	859,7	1085	47,76
6,545	2589	780,6	1070	43,37	12,61	2723	859,1	1084	47,73
6,667	2592	784,9	1072	43,61	12,73	2725	858,4	1082	47,69
6,788	2596	789,1	1075	43,84	12,85	2727	857,6	1080	47,65
6,909	2599	793,1	1077	44,06	12,97	2730	856,8	1078	47,6
7,03	2602	797	1079	44,28	13,09	2732	855,8	1076	47,55
7,152	2605	800,7	1081	44,48	13,21	2734	854,8	1074	47,49
7,273	2609	804,3	1083	44,68	13,33	2736	853,7	1072	47,43
7,394	2612	807,8	1085	44,88	13,45	2738	852,4	1069	47,36
7,515	2615	811,1	1086	45,06	13,58	2740	851,1	1067	47,29
7,636	2618	814,2	1088	45,23	13,7	2742	849,8	1065	47,21
7,758	2621	817,3	1090	45,4	13,82	2744	848,3	1062	47,13
7,879	2624	820,2	1091	45,57	13,94	2746	846,8	1059	47,04
8	2627	823	1092	45,72	14,06	2748	845,2	1057	46,95
8,121	2630	825,7	1094	45,87	14,18	2751	843,4	1054	46,86

8,242	2633	828,3	1095	46,01	14,3	2753	841,6	1051	46,76
8,364	2636	830,7	1096	46,15	14,42	2755	839,8	1048	46,65
8,485	2638	833	1097	46,28	14,55	2757	837,8	1045	46,54
8,606	2641	835,3	1098	46,4	14,67	2759	835,7	1041	46,43
8,727	2644	837,4	1098	46,52	14,79	2761	833,5	1038	46,3
8,848	2647	839,5	1099	46,64	14,91	2762	831,2	1035	46,18
8,97	2650	841,4	1100	46,75	15,03	2764	828,8	1031	46,04
9,091	2652	843,3	1100	46,85	15,15	2766	826,2	1027	45,9
9,212	2655	845,1	1101	46,95	15,27	2768	823,6	1023	45,76
9,333	2658	846,8	1101	47,04	15,39	2770	820,9	1020	45,6
9,455	2660	848,3	1102	47,13	15,52	2772	818	1015	45,44
9,576	2663	849,8	1102	47,21	15,64	2774	815	1011	45,28
9,697	2666	851,2	1102	47,29	15,76	2776	811,9	1007	45,11
9,818	2668	852,4	1102	47,36	15,88	2778	808,7	1002	44,93
9,939	2671	853,6	1102	47,42	16	2780	805,3	997,6	44,74