

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

## ANÁLISIS POR SOBRECALENTAMIENTO DE LA BIELA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR CHISPA

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA  
ING. ARTURO SERRANO SERRANO

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. CELERINO RESÉNDIZ ROSAS

SINODALES:  
DR. ABDIEL GÓMEZ MERCADO  
DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA

102 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo noviembre de 2018.



SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pachuca

Pachuca, Hidalgo, **06/NOVIEMBRE/2018**

OFICIO No. DEPI-204-2018

**C. ING. ARTURO SERRANO SERRANO  
PRESENTE**

La que suscribe, Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

“Análisis por sobrecalentamiento de la biela de un motor  
de combustión interna encendido por chispa”

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*“EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA”*

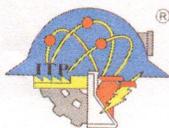


**MTRA. KARLA MARTÍNEZ TAPIA  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MÉXICO  
PACHUCA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Coordinación de Ingeniería Mecánica  
Archivo

KMT/Imppp



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. C.P. 42080

A. P. 276. Tels. : (01 771) 710 52 51, 170 03 45, 170 03 01, 170 06 87,

Fax (01 771) 711 33 99

[www.itpachuca.edu.mx](http://www.itpachuca.edu.mx)

**División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
ACTA**

Siendo las 13:00 horas del 16 de Febrero de 2018, reunidos en el aula U6, el Consejo de Posgrado en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del trabajo de Tesis titulado: Análisis por sobrecalentamiento de la biela de un motor de combustión interna encendido por chispa, con el siguiente contenido:

Resumen/Abstract

Nomenclatura

Introducción

Contenido

Índice de cuadros, gráficas y figuras.

1. Estado del arte
2. Marco Teórico
3. Metodología
4. Análisis e interpretación de resultados
5. Análisis y discusión

Conclusiones

Bibliografía

Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Arturo Serrano Serrano obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Celerino Reséndiz Rosas, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

**ATENTAMENTE**

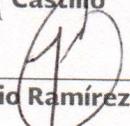
*"EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA"*

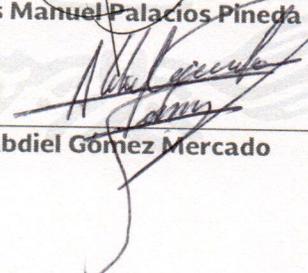
**EL CONSEJO DE POSGRADO**

  
Dr. Mario Emigdio Rodríguez  
Castillo

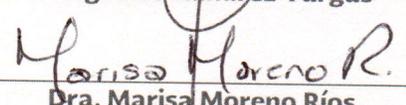
  
Dr. Luis Manuel Palacios Pineda

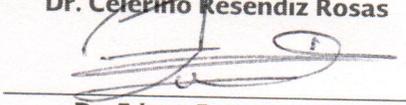
  
Dra. Erika Osiris Ávila Dávila

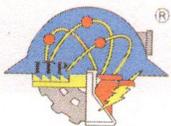
  
Dr. Ignacio Ramírez Vargas

  
Dr. Abdiel Gómez Mercado

  
Dr. Celerino Reséndiz Rosas

  
Dra. Marisa Moreno Ríos

  
Dr. Edgar Ernesto Vera  
Cárdenas



## **DEDICATORIAS**

Dedico el presente trabajo con todo mi cariño a la memoria de mis padres Elena y Merced, pues la mejor herencia percibida se plasma en la formación profesional, legado de la visión que siempre tuvieron que el mejor camino para el logro de nuestras metas es la educación. También en memoria de mi hermana Margarita por la dedicación e ímpetu incondicional por parte de ella. Y toda mi familia por estar siempre presentes.

Además, a todas las personas que de manera directa o indirectamente contribuyeron a el logro de esta meta profesional y personal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Fundación Telmex por darme la oportunidad de formar parte de tan distinguida organización y por el apoyo recibido durante el periodo de permanencia del programa de posgrado de maestría.

Así mismo reconozco el apoyo recibido por medio del Instituto Tecnológico de Pachuca y por ende del Tecnológico Nacional de México, y al Consejo de Posgrado por su paciencia y dedicación, en especial al Dr. Celerino por su comprensión y amistad incondicional.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIAS</b> .....	I
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	II
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	III
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	VI
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	VII
<b>RESUMEN</b> .....	VIII
<b>ABSTRACT</b> .....	IX
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1. Planteamiento del problema.....	1
1. Propósito de la investigación.....	2
2. Justificación de la investigación.....	3
3. Objetivos.....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivos específicos.....	4
4. Alcances.....	4
5. Organización del estudio.....	5
<b>CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE</b> .....	6
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	10
2.1 Conceptualización del motor.....	10
2.2 Clasificación de motores.....	11
2.2.1 Motores eléctricos.....	11
2.2.2 Motores térmicos.....	12
2.2.3 Motores híbridos.....	12
2.2.4 Motores de combustión externa.....	13
2.3 Motores de combustión interna.....	14
2.3.1 Clasificación de los motores de combustión interna.....	15
2.3.2 Elementos de un motor de combustión interna.....	16
2.4 Conceptualización de la biela.....	16
2.4.1 Elementos de una biela.....	17
2.4.2 Características de los metales de una biela.....	18
2.4.3 Fallas en las bielas del motor.....	19

2.5	Conceptualización del pistón .....	19
2.6	Conceptualización del cigüeñal .....	21
2.7	Conceptualización de Cojinetes .....	22
2.7.1	Clasificación de los cojinetes.....	23
2.8	Motor encendido por chispa de cuatro tiempos .....	25
2.8.1	Ciclo Otto de cuatro tiempos .....	25
2.9	Sistema de encendido .....	27
2.9.1	Funcionamiento de la inyección directa .....	27
2.9.2	Ventajas de la inyección directa.....	28
2.9.3	Desventajas de la inyección directa .....	28
2.9.4	Descripción del proceso de encendido .....	29
2.9.5	Componentes del sistema de encendido.....	30
2.10	Sobrecalentamiento .....	30
2.10.1	Análisis cinemático del motor.....	32
2.10.2	Análisis cinético del motor .....	33
2.10.3	Análisis por transferencia de calor.....	33
2.11	Simulación y diseño mecánico .....	34
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>		<b>36</b>
3.1	Enfoque de la investigación .....	36
3.2	Alcance de la investigación .....	37
3.3	Formulación de la hipótesis .....	38
3.4	Diseño de la investigación.....	39
3.5	Selección de la muestra .....	40
3.6	Recolección de datos.....	41
3.7	Procesamiento y análisis de los datos.....	42
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>43</b>
4.1	Generalidades .....	43
4.2	Motor VW Golf MK4 GTI 1.8T .....	44
4.2.1	Aplicaciones del 1.8T.....	44
4.3	Análisis de datos.....	45
4.3.1	Análisis cinemático.....	45
4.3.2	Análisis cinético.....	48
4.3.3	Análisis termodinámico.....	50

4.3.4 Temperatura real de combustión .....	59
4.3.5 Análisis de transferencia de calor por convección.....	64
4.4 Simulación .....	66
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
5.1 Conclusiones relativas a los objetivos .....	70
5.2 Aportaciones originales .....	72
5.3 Recomendaciones para futuros estudios .....	72
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>
<b>PRODUCTOS ACADÉMICOS .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura. 1.Estado del arte.</i>	9
<i>Figura. 2. Motor eléctrico.</i>	11
<i>Figura.3. Motor híbrido.</i>	12
<i>Figura. 4. Motor de combustión externa (turbina de gas)</i>	13
<i>Figura. 5. Motor de combustión interna.</i>	14
<i>Figura. 6.Biela</i>	17
<i>Figura. 7. Partes de la biela</i>	18
<i>Figura.8. Pistón.</i>	19
<i>Figura.9.Unión pistón y biela.</i>	20
<i>Figura 10.Cigüeñal.</i>	21
<i>Figura 11.Unión de biela, pistón y cigüeñal.</i>	22
<i>Figura 12.Cojinetes.</i>	22
<i>Figura 13.Cojinetes de fricción.</i>	24
<i>Figura 14.Cojinetes de rodamiento.</i>	24
<i>Figura 15.Motor de cuatro tiempos.</i>	25
<i>Figura 16. Funcionamiento de un motor de 4 tiempos.</i>	26
<i>Figura 17.Componentes de un sistema de inyección directa.</i>	27
<i>Figura.18. Sistema de encendido.</i>	29
<i>Figura. 19.Metodología de la investigación del presente trabajo</i>	36
<i>Figura 20.Diagrama de bloques de un motor de combustión interna.</i>	43
<i>Figura 21.VW Golf</i>	44
<i>Figura 22. Nomenclatura.</i>	45
<i>Figura 23. Desplazamiento.</i>	46
<i>Figura 24.Velocidad del pistón</i>	47
<i>Figura 25.Aceleración del pistón.</i>	47
<i>Figura 26.Fuerzas alternativas.</i>	48
<i>Figura 27. Fuerzas en la biela.</i>	49
<i>Figura 28.Diagrama par-motor.</i>	49
<i>Figura 29.Par-motor de explosión.</i>	50
<i>Figura 30. Ciclo termodinámico Otto, presión-volumen</i>	51
<i>Figura 31. Eficiencia térmica.</i>	53
<i>Figura 32. Cámara de combustión del motor</i>	55
<i>Figura 33.Modelo de malla.</i>	66
<i>Figura 34.Distribución de temperatura.</i>	67
<i>Figura 35.Flujo transitorio y estático estructural.</i>	67
<i>Figura 36.Importación de la temperatura de la biela</i>	68
<i>Figura 37. Estado final de esfuerzos de la biela</i>	68
<i>Figura. 38 Análisis por sobrecalentamiento de la biela</i>	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conceptualización de variable .....	39
Tabla 2. Características del motor.....	40
Tabla 3. Porcentaje de composición química del acero usado. ....	41
Tabla 4. Tratamiento térmico y propiedades mecánicas. ....	41
Tabla 5. Valores de entalpías para mezcla teórica.....	56
Tabla 6. Valores de entalpía para mezcla pobre. ....	57
Tabla 7. Entalpía de formación y entalpía en el estado de referencia de 298 °K. Mezcla rica .....	57
Tabla 8. Valores de entalpía para mezcla rica.....	58
Tabla 9. Entalpía de formación y entalpía en el estado de referencia de 298 °K. Mezcla teórica real.....	60
Tabla 10. Valores de entalpías para mezcla teórica real.....	61
Tabla 11. entalpia de formación y entalpía en el estado de referencia de 298 °K. Mezcla pobre real .....	62
Tabla 12. Valores de entalpías para mezcla pobre real. ....	62
Tabla 13. Entalpía de formación y entalpía en el estado de referencia de 298 °K. Mezcla rica real .....	64
Tabla 14. Valores de entalpías para mezcla rica real. ....	64

## **RESUMEN**

Esta investigación es de tipo y alcance: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo, con un enfoque mecánico y cuantitativo. Que tiene la finalidad de identificar las fallas en una biela que es una parte móvil de un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa (ECH) accionado con octano. Mediante el análisis del comportamiento térmico y estructural del objeto de estudio de esta investigación, con base en los tres posibles diagramas para mezclas de aire combustible: estequiométrica, rica y pobre, y mediante el análisis de transferencia de calor por convección se determina el coeficiente correspondiente, para cuando la biela es sometida a sobrecalentamiento. Subsecuentemente se realizaron los análisis cinético y cinemático, con base características del motor VW Golf MK4 Gti 1.8T, utilizando el software de MATLAB. Posteriormente se generó la geometría de la biela con dimensiones reales en el software SOLIDWORKS, por último, se simuló el comportamiento y reacción la biela, tanto para un flujo térmico transitorio como estructural en ANSYS. Los resultados obtenidos muestran que los esfuerzos y deformaciones en la biela, en comparación con los límites de cedencia del material, se encuentran dentro de los límites permisibles, además de la identificación de los puntos vulnerables a una posible falla o fractura.

Palabras clave: biela, motor de combustión interna, sobrecalentamiento, termo-estático

## **ABSTRACT**

This research is of type and scope: exploratory, descriptive, correlational and explanatory, with a mechanical and quantitative approach. Which has the purpose of identifying the faults in a connecting rod that is a moving part of a four-stroke internal combustion engine and four cylinders, ignition by spark powered by octane. When analyzing the thermal and structural behavior of the object of study of this research, based on the three possible diagrams for combustible air mixtures: stoichiometric, rich and poor, and by analysis of heat transfer by convection, the corresponding coefficient is determined, for when the connecting rod is subjected to overheating. Subsequently, kinetic and kinematic analyzes were performed, based on the characteristics of the VW Golf MK4 Gti 1.8T engine, using the MATLAB software. Following, the geometry of the connecting rod with real dimensions was generated in the SOLIDWORKS software. Finally, the behavior and reaction of the connecting rod were simulated, both for transient and structural thermal flow in ANSYS. The results obtained show that the efforts and the deformations in the connecting rod, in comparison with the performance limits of the material, are within the permissible limits, in addition to the identification of the vulnerable points before a possible failure or fracture.

Keywords: connecting rod, internal combustion engine, overheating, thermo-static

## INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna son los más usados en los automóviles, los cuales en ocasiones presentan fallas mecánicas, tan diversas como la cantidad de componentes del motor. Diferentes autores han determinado dentro de la diversidad de problemas relacionados con la biela del motor los siguientes: la fatiga, el pasador que conecta a la biela del pistón el cual recibe una gran cantidad de desgaste, el motor revolucionado, el agua que ingresa al cilindro del motor en el momento de la chispa la cual puede ocasionar que la biela se doble y deformaciones de la biela por sobrecalentamiento por ello es importante que el sistema de lubricación se encuentre en buen estado. Asociado a esto, es importante que se verifique el tratamiento térmico de los cigüeñales de tal forma que se tenga una resistencia adecuada. Que en caso de presentarse alguno de estos problemas la reparación del motor implica no solo la reposición de la biela sino de todas las piezas afectas e incluso el cambio o restitución completa del motor.

### 1. Planteamiento del problema

Preferentemente, cuando se realiza la reparación de un motor de auto, se debe comprobar el estado de todas las piezas móviles y fijas antes de la realización de un trabajo de verificación, pero en la mayoría de ocasiones los brazos de biela son reutilizados sin una previa revisión de su estado. Una biela es un elemento fundamental en el funcionamiento de un motor ya que transforma la energía química generada por la combustión en una energía cinética, siendo el enlace entre la absorción de la energía mecánica, por lo que la biela es el elemento más tensionado de un motor y su correcto diseño y fabricación son muy importantes. Por lo anterior, la biela es robusta en su diseño, pero a la vez debe ser lo más ligera posible para reducir la inercia y soportar los esfuerzos mecánicos a los que se encuentra sometida [1].

La biela soporta los continuos empujes del pistón hacia abajo, y los constantes esfuerzos del cigüeñal hacia arriba, un trabajo realmente duro el que realiza la biela. Se construye de acero forjado con una técnica denominada estampación que permite al material aguantar ese inmenso trabajo y consiste en golpear un trozo de metal repetidas veces hasta conseguir la forma de la biela [2].

Asociado a esto, al no tener un adecuado sistema de lubricación en las partes móviles, se presentan desgastes excesivos y prematuros los cuales pueden ocasionar una falla, es por esto importante considerar un buen sistema de lubricación durante el funcionamiento del motor. La temperatura en la cámara de combustión debe ser superior a los 2000 °K, siendo ésta una temperatura instantánea, pues disminuye durante el tiempo de expansión y escape de gases. Es por lo tanto necesario disipar el calor producido en la explosión, y si el sistema no funciona correctamente la resistencia mecánica de la biela se verá afectada teniendo como consecuencia deformaciones importantes por sobrecalentamiento [3].

Una biela arqueada o retorcida sobre su eje provoca un ruido en el motor y este arqueamiento es ocasionado por un diámetro excesivo en el pie o cabeza de la biela, o por un peso inadecuado del elemento [4]. En la rectificación de un motor de combustión interna se rectifican 21 brazos de biela en un mes, lo que significa que estos elementos no son cambiados, ya que los brazos de biela están diseñados para tener una vida infinita y está sometido a millones de repeticiones de ciclos de carga [5].

Es pertinente mencionar que con relación a las fallas mecánicas de los motores relacionadas a la biela de un motor se han encontrado investigaciones realizadas en diversos países como: Ecuador, Brasil Argentina, España e incluso México, las cuales se detallan en apartados posteriores. Que conjuntamente a la constante evolución tecnológica de la ingeniería en general y el diseño mecánico en particular, se decidió analizar cuáles son los factores que influyen en el comportamiento de una biela en un motor de combustión interna encendido por chispa (ECH). Se plantea entonces el siguiente problema de investigación:

¿Cuáles son los elementos que causan las fallas de una biela de un motor de VW<sup>1</sup> Golf MK4 Gti 1.8 T?

### **1. Propósito de la investigación**

El propósito de la presente investigación consiste en estudiar y analizar el comportamiento termo-estático de una biela en un motor de combustión interna encendido por chispa (ECH), que

---

<sup>1</sup> VW. Agencia de Autos Volkswagen

es accionado con gasolina como combustible y 100% aire teórico. La finalidad es identificar las fallas de una biela de un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa, accionado por gasolina, que sirva de apoyo para el buen funcionamiento de la misma y que contribuya a incrementar su vida útil.

## **2. Justificación de la investigación**

Frecuentemente la reparación de un auto depende del cuidado y buen mantenimiento que se dé al vehículo, caso contrario esto va influir en el desgaste anticipado de los elementos fijos y móviles de un motor. Además, en muchas ocasiones los brazos de biela son reutilizados sin una previa revisión de su estado o de un análisis de sus propiedades mecánicas. Por tales razones la justificación de la presente investigación está basado en diferentes aspectos, los cuales se describen a continuación:

- **Conveniencia:** Reparar el motor tiene varias fases y las fallas tienen diferentes consecuencias, por lo cual hay que hacer un buen diagnóstico en cada una de sus piezas, principalmente en las bielas; sin embargo, no se conoce específicamente cuales son los problemas que origina la falla de esta pieza. El resultado esperado para la presente investigación será realizar un análisis termo-estático que permitirá identificar los esfuerzos y deformaciones, para tomar decisiones acertadas y precauciones de riesgo que puede generar el sobrecalentamiento del motor.
- **Implicación práctica:** El analizar el comportamiento termo - estático de una biela en un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa, permitirá determinar la fuerza axial, para posteriormente identificar la temperatura de combustión adiabática. Con estos datos, junto con la simulación de la geometría estática y estructural de la biela permitirán identificar posibles deformaciones. Los resultados podrán confirmar su aplicabilidad, ya que, ayudarán a tomar precauciones importantes para que el motor tenga un excelente funcionamiento, evitando riesgos fatales que pueden extenderse a la destrucción total del motor. Se evidenciará la necesidad de más investigaciones, destacándose los beneficios de la simulación, poniendo en evidencia su relevancia social y su practicidad. Finalmente, este estudio participa en el avance positivo en el campo de la ingeniería mecánica.
- **Relevancia Social:** Al tener una posible solución aproximada mediante el análisis del elemento finito, el análisis estructural de la fuerza sobre la biela y la realización de la

simulación para esfuerzos y deformaciones, se podrán tener productos de calidad a menor costo, mejorar los procesos existentes y también estudiar fallos de un componente estructural o un equipo, teniendo un impacto positivo debido a que, permitirá que el motor de combustión interna tenga menos daños.

- **Valor Teórico:** La elaboración del trabajo de investigación traerá como beneficio herramientas metodológicas para estudios relacionados con las ciencias exactas, contribuyendo con aportes significativos a la aplicación de la teoría de motores de combustión interna, lo que permitirá el enriquecimiento de la ingeniería mecánica.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Analizar cuáles son los elementos que causan las fallas de una biela de un motor VW Golf MK4 Gti 1.8T.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Identificar el comportamiento termo - estático de la biela en un motor de combustión interna de 4 tiempos y 4 cilindros encendido por chispa.
- Determinación de la fuerza axial que actúa en una biela en un motor VW Golf MK4 Gti 1.8T.
- Obtener la temperatura de combustión adiabática para una reacción de combustión estequiométrica.
- Identificar posibles deformaciones de la biela con base en la simulación de su geometría estática y estructural.
- Elaborar un análisis de las posibles fallas de la biela de un motor VW Golf MK4 Gti 1.8T.

### **4. Alcances**

- La investigación se realizó en una biela de un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa.
- Se trabajaron las etapas de análisis termo - estático y determinación de la temperatura de combustión adiabática dentro de la cámara del cilindro.

- Para la realización de estas etapas se utilizó el software SolidWorks para generar la geometría real de la biela. Se utilizó así mismo ANSYS para la simulación estática estructural para identificar esfuerzos y deformaciones de la biela.

## **5. Organización del estudio**

El desarrollo de esta investigación comprende cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

**Capítulo 1. Estado del Arte:** la descripción de las investigaciones relación a las fallas mecánicas de los motores relacionadas a la biela de un motor, relacionadas en diversos países como: Ecuador, Brasil Argentina, España e incluso México.

**Capítulo 2. Marco Teórico:** se desarrolla inicialmente el marco conceptual sobre las bielas, los componentes de las bielas, análisis estático y térmico, motor de combustión, haciendo énfasis en el diseño mecánico de una biela.

**Capítulo 3. Metodología:** se abordan los aspectos metodológicos de la investigación, como son enfoque, alcance, formulación de hipótesis, diseño, selección de la muestra, recolección de datos y el procesamiento y análisis de datos.

**Capítulo 4. Análisis e interpretación de Resultados:** se analizan e interpretan los resultados obtenidos en las pruebas de simulación.

**Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones:** se presentan las conclusiones, recomendaciones y aportaciones de la experiencia adquirida durante la investigación realizada.

## **CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE**

Como ya se mencionó anteriormente el propósito de la presente investigación consiste en estudiar y analizar el comportamiento termo-estático de una biela en un motor de combustión interna encendido por chispa (ECH), que es accionado con gasolina como combustible y 100% aire teórico. Y con la finalidad de identificar las fallas de la biela y que estos resultados sirvan de apoyo para el buen funcionamiento de la misma y que contribuya a incrementar su vida útil.

Resultado de la búsqueda sobre las investigaciones relacionadas con el propósito de esta investigación. Se encontró que, en Ecuador, Reyes, Cañizares y Villacres [6] realizaron un estudio el cual consistió en analizar un brazo de biela de un motor que ha alcanzado el kilometraje necesario para una reparación y no presenta ninguna falla en su estructura, y comparar los resultados con el brazo de una biela nueva. Para desarrollar este análisis realizaron un ensayo de tracción bajo la norma ASTM con el fin de obtener los valores del límite de fluencia y la resistencia a la tracción del material del que está hecho el elemento. A partir de los resultados obtenidos, los valores prácticos de las propiedades mecánicas de los brazos de biela cumplen con los datos teóricos del tipo de material del cual están fabricadas. A su vez, se demostró que el brazo de biela de un vehículo con un recorrido de 1,197,599 km, mejoró su estructura y sus propiedades mecánicas debido a la temperatura de los ciclos de trabajo del motor que van entre los 800 y 950 °C. Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas del elemento mejoraron con el tiempo y con la temperatura de funcionamiento del motor debido al tratamiento térmico de normalización. A partir de los análisis realizados se determinó que el brazo de biela usado se encuentra en condiciones óptimas para ser utilizado en una reparación de motor, asegurando así el adecuado funcionamiento y evitando el reemplazo del elemento, lo que dio como resultado un ahorro económico.

Estudios elaborados en Brasil por Valdéz, et al. [7], indican que los motores de combustión interna son los más usuales en los automóviles y sirven para producir fuerza. Entre los problemas que se han encontrado son las fallas de las bielas, relacionadas con otras fallas y específicamente de los cigüeñales, los cuales fueron analizados dando un incorrecto rectificado de los muñones, produciendo alta generación de calor sobre las superficies en contacto, originando pequeñas fisuras por fatiga térmica. El valor de dureza promedio obtenido del núcleo del cigüeñal fue de 26 puntos en la escala Rockwell C, que equivale aproximadamente a 255 puntos en la escala Brinell y a una

resistencia de  $85 \text{ kg/mm}^2$ . Se concluye que el tratamiento térmico de bonificado realizado sobre el cigüeñal se desarrolló fuera de las normas, obteniéndose una resistencia menor al límite mínimo recomendado. De los resultados del análisis metalográfico se pudo identificar la presencia de austenita retenida, cuya proporción afecta inversamente la dureza y la resistencia final. En los resultados que se obtuvieron, los autores mencionan que es necesario realizar un tratamiento térmico de endurecimiento superficial, como la nitruración. También recomiendan estudiar la bitácora del tratamiento térmico utilizado en la producción del cigüeñal, con el fin de identificar la etapa del tratamiento térmico que presenta el problema [8].

De igual forma, indagaciones elaboradas en Argentina por Cravino, et. Al. [9], mencionan que existen diversos problemas cuando llegan a tener fallas las bielas de un motor, por lo que los autores mencionan que analizaron las dificultades desde el punto de vista dimensional, metalúrgico y mecánico a fin de determinar las causas probables de dichas fallas. Según los resultados obtenidos el material de la biela corresponde a un acero del tipo SAE 1141, que no concuerda con el requerido por el fabricante. No se encontraron defectos microestructurales o superficiales en el material asociados con la falla. La superficie de fractura presenta un comienzo débil que finaliza con las características fibrosas de un proceso dúctil. La causa probable de la falla del componente se atribuye a una sobrecarga que produjo superación en el límite elástico del material y que posteriormente dio lugar al pandeo plástico del componente, variando su geometría y fracturándose totalmente. Esta falla se debió a que el elemento estuvo sometido a un esfuerzo mayor al que correspondería en condiciones normales de funcionamiento.

Estudios realizados en España por González [10], mencionan que la naturaleza de las fuerzas que afectan a la biela son fundamentalmente de dos tipos, las de combustión y las de inercia. En la investigación sobre el diseño de una biela el autor utilizó el software de aplicación Working Model, que ayudó para el análisis cinemático y dinámico mediante la simulación. La finalidad fue calcular las fuerzas aplicadas en la cabeza y el pie de la biela, para posteriormente hacer un análisis de elementos finitos que definieran los esfuerzos. En los resultados obtenidos, se logró disminuir la longitud de la biela la cual permitió compactar más el motor y reducir su peso. De esta forma, el consumo y las emisiones del motor serán menores, que es uno de los grandes objetivos actualmente de la industria automovilística. Al realizar la simulación para el pandeo de la biela se aplicó un

valor de  $\alpha^2=2$ , obteniendo una carga crítica de pandeo de 379,952.2 N, por lo que, la carga para evitar el fenómeno de pandeo es  $\sigma_{\text{pandeo}}^3 = 1,566.3$  MPa. Con estos datos, el autor afirma que la biela no va a sufrir pandeo en ningún caso, considerando además que el cuerpo está sobredimensionado.

Aunado a lo anterior, investigaciones realizadas en México por Espinoza, indican que las fallas de los autos se deben al kilometraje recorrido de los cuales causan desgastes inevitables para el motor, provocando todo tipo de fallas, incluyendo los de las bielas. Los propietarios de los vehículos necesitan por lo tanto recurrir a expertos que reparen los vehículos y garanticen su funcionamiento [11]. En el Estado de México, en especial en la zona de Texcoco, se cuenta con talleres que se encargan de la reparación de vehículos en general. Éstos, aun cuando ofrecen el servicio de reparación de motores, no trabajan directamente con este tipo de específico de reparación, sino que acuden a talleres especializados en rectificación para remediar los daños internos en los mismos. Muchas veces no se dedican a la reparación de fallas de bielas debido a que existen muchos factores que influyen en este tipo de descompostura. En los motores la principal fuente de energía es la gasolina que es el combustible empleado con mayor frecuencia, por lo tanto, es importante la calidad de ella para el óptimo funcionamiento [12].

De igual forma, Riesco, et. al. [13], en estudios realizados en Hidalgo para comparar los modelos de transferencia de calor y duración de la combustión en el comportamiento de los ciclos termodinámicos de los motores de combustión interna alternativos. Dentro de los resultados obtenidos, los autores mencionan que los ciclos de aire estándar con leyes de quemado permiten tener resultados más aproximados a los reales, que los ciclos teóricos de aire estándar. Esto se debe principalmente a que con los métodos de simulación se toman en cuenta las pérdidas de energía por refrigeración y no se supone que la adición de calor se realice a presión o volumen constante, sino que su velocidad se controla mediante expresiones empíricas. Los resultados muestran que la elección tanto del modelo de transferencia de calor como el de la duración de la combustión es muy subjetiva y debido a que los sistemas de los motores se cambian constantemente, se deberán ajustar las constantes que aparecen en dichos modelos para cada motor en particular.

---

<sup>2</sup> Desplazamiento angular de la manivela respecto a la posición correspondiente a P.M.S.

<sup>3</sup> Inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal e compresión.



Figura. 1. Estado del arte.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Un auto está compuesto por diferentes piezas, entre las cuales se encuentran: filtro de aire, carburador, distribuidor, bomba de gasolina, bobina de encendido, filtro de aceite, bomba de aceite, cárter, aceite lubricante, toma de aceite, cables de alta tensión de bujías, bujía, balancín, muelle de válvula, válvula de escape, válvula de admisión, lumbrera de admisión, cámara de combustión, varilla empujadora, árbol de levas, aros de pistón, pistón, biela, bulón, cigüeñal, múltiple de escape, refrigeración del motor, varilla medidora de aceite, volante y motor de arranque.

### 2.1 Conceptualización del motor

La palabra motor proviene del latín *motoris*, que significa mover, y en lo que se refiere a automóviles, estos se encuentran diseñados por varios elementos entre los cuales se encuentran los motores, el cual da vida a un auto, sin él no hay movimiento. Un automóvil utiliza una fuente de energía mecánica para poder moverse la cual se obtiene mediante una transformación de otros tipos de energía dentro del motor, como la eléctrica, de combustión o la combinación de ambas.

Según Renzo [14], el motor de un auto es un motor de combustión interna, el cual obtiene energía mecánica desde la energía química que se genera cuando explota el combustible en el interior. El motor está formado por un conjunto de cámaras de combustión, llamadas cilindros, dentro de las cuales se producen sus cuatro tiempos de funcionamiento: admisión, compresión, explosión y escape.

Para Fersainz [15], un motor es una máquina que convierte el calor producido por la explosión (en el caso de los de gasolina) o la combustión (en el caso de diésel) del combustible en un movimiento con suficiente fuerza para que las ruedas giren y el vehículo pueda desplazarse. El autor menciona que, en los motores convencionales, los autos se ponen en movimiento debido a una chispa, que se genera en la mezcla de vapor de combustible y aire comprimido dentro de un cilindro sellado, haciendo que la mezcla se quemara rápidamente y proporciona energía.

Se puede concluir que un motor es una máquina compuesta por varios elementos, el cual puede proporcionar energía utilizando algún tipo de combustible para que tenga un funcionamiento adecuado.

## 2.2 Clasificación de motores

Existen diferentes tipos de motores, entre los cuales se encuentran: los eléctricos, los térmicos, éstos se subdividen en motores de: combustión externa e interna y los híbridos. Los cuales se describen a continuación.

### 2.2.1 Motores eléctricos

En este tipo de autos el combustible utilizado es la electricidad. Ésta se convierte en energía mecánica mediante una interacción entre campos magnéticos opuestos generados por imanes y un conductor de electricidad. Debido a una constante atracción y repulsión magnética entre ellos, se produce una rotación continua dentro del motor generando energía necesaria para el movimiento del vehículo [16]. La figura. 2, muestra un motor eléctrico.

Para Enriquez [17], los motores eléctricos representan, los "caballos de batalla" de la industria y del movimiento en general. Su uso se da además en hospitales, escuelas, edificios de oficinas y centros comerciales, en donde se usan para aplicaciones en suministro de agua, calefacción, enfriamiento y muchas otras rutinas de trabajo. Estos motores son usados en los automóviles modernos, aunque son más complejos que el simple cableado eléctrico, y se usan en casi todos los aspectos operativos del automóvil [18].

Un motor eléctrico transforma la energía eléctrica en energía mecánica, para impulsar el funcionamiento de una máquina [19].



*Figura. 2. Motor eléctrico.*

Se puede concluir que un motor eléctrico es una máquina que tiene la capacidad de transformar energía eléctrica en mecánica, de tal forma que permita el movimiento de un vehículo. Su tamaño y su volumen es reducido y su potencia puede ser alta.

### **2.2.2 Motores térmicos**

Los motores térmicos son máquinas que tienen por objeto transformar energía calorífica en energía mecánica directamente utilizable [20]. Éstos se clasifican en motores de combustión externa y motores de combustión interna, los cuales se describen en las secciones 2.2.4 y 2.3 respectivamente.

### **2.2.3 Motores híbridos**

Un sistema híbrido se basa en una fuente de combustión interna de gasolina combinado con un motor eléctrico para propulsar el vehículo, tal como se visualiza en la figura. 3.

Este tipo de motor reduce las emisiones y aumenta la eficiencia de combustible. Los vehículos híbridos utilizan la energía mucho más eficientemente que los sistemas de gasolina convencionales [19]. Se denomina motor híbrido a un vehículo en el cual la energía eléctrica que lo impulsa proviene de baterías y de un motor de combustión interna que mueve un generador. Entre sus ventajas se encuentran: 1) su autonomía, ya que ésta depende del combustible almacenado en el tanque, 2) tiene un alto y uniforme rendimiento incluso a bajas temperaturas, 3) el motor de combustión interna funciona bajo un estrecho margen de carga y velocidad, lo que incrementa su eficiencia [21].



*Figura.3. Motor híbrido.*

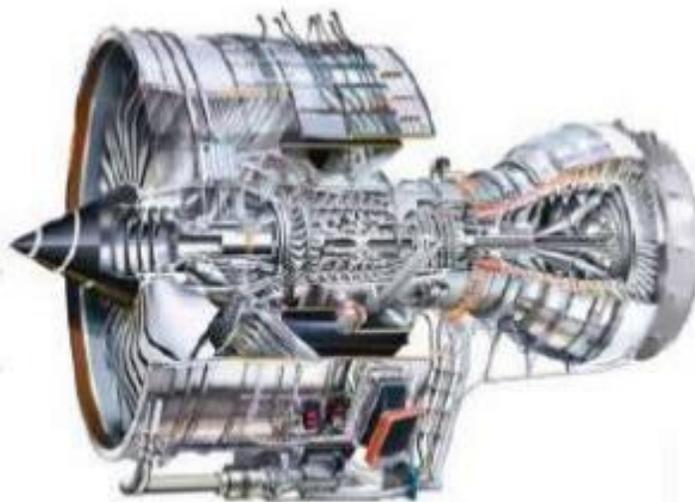
Para Chang [22], un motor híbrido, es aquel que combina un motor de combustión interna y un motor eléctrico, los cuales tienen una mayor eficiencia energética, y esto se debe a que este tipo de motores son más pequeños y por lo tanto consumen poca energía.

Por lo expuesto anteriormente, se puede decir que un motor híbrido es aquel que tiene una combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico. Esta combinación optimiza su funcionamiento para un mejor rendimiento.

#### **2.2.4 Motores de combustión externa**

En la figura. 4, se muestra un ejemplo de motor de combustión externa. Al igual que los motores de combustión interna, son motores térmicos, en los cuales el motor alcanza un estado térmico mayor mediante la transmisión de energía térmica [23].

Su principal función es hacer trabajo mecánico a expensas de la expansión y contracción de un gas en un recinto cerrado. El motor cuenta con un desplazador que hace que el gas pase de la zona fría a la zona caliente y luego a la zona fría nuevamente, produciéndose consecuentemente su tendencia a la expansión y su posterior contracción [24].



*Figura. 4. Motor de combustión externa (turbina de gas)*

Los motores de combustión externa según Meza [24], son máquinas que realizan una conversión de energía calorífica en energía mecánica. El rendimiento térmico de estos los motores se ve limitado por varios factores, principalmente por la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

### **2.3 Motores de combustión interna**

Un motor de combustión interna es un motor térmico, en el cual se produce una combustión del fluido del motor, transformando la energía química en térmica, a partir de la cual se obtiene energía mecánica. Un ejemplo de este tipo de motor se aprecia en la figura 5.

Estos motores tienen como principal fuente de energía la gasolina. Éste es el combustible empleado con mayor frecuencia por lo que es importante su calidad para un óptimo funcionamiento. Un buen combustible debe tener un octanaje aceptable, ya que la gasolina debe explotar dentro del cilindro para generar el movimiento del pistón [26].

Este tipo de motores transforma el calor generado por el combustible, ya sea diésel o gasolina, en movimiento mecánico del automóvil. Durante este proceso el oxígeno del aire se mezcla con el combustible y hace que este último explote (en el caso de la gasolina) generando gases cuya fuerza de expansión térmica acciona sobre el pistón que, a su vez, empuja el cigüeñal y hace que éste ponga en movimiento las ruedas del automóvil [28].



*Figura. 5. Motor de combustión interna.*

Según Creus [29], un motor de combustión interna utiliza la energía interna del combustible para que el motor realice un trabajo. Dichos motores son ampliamente utilizados como fuentes de alimentación en lugares de difícil acceso. Sin embargo, los motores de combustión interna de diésel, tienen un rango de fallo, por cada año de explotación, de entre 2.5 a 50.

Se conoce como motores de combustión interna (o endotérmicos) alternativos a cualquier tipo de máquinas, que a partir de energía química sean capaces de convertirla y obtener energía mecánica para su uso. El arranque de los motores se lleva a cabo en su cámara interna y sucede al momento de ser encendido [20].

El motor de combustión interna es la unidad energética y motriz de los medios de transporte, máquinas y equipos que se utilizan en actividades de diversas ramas de la economía [30].

Se puede decir que un motor de combustión interna es aquel que es capaz de convertir la energía química en mecánica, para que se pueda utilizar de manera óptima.

### **2.3.1 Clasificación de los motores de combustión interna**

La clasificación de los motores puede ser extensa, esto debido al diseño y mecanismos mecánicos. A continuación, se describen algunas clasificaciones.

- **Respecto a la forma de los cilindros:** Su distribución puede ser en “V” o “en línea”, esto depende de la cantidad de cilindros existentes, los cuales van en función de la potencia del motor. Normalmente los motores de automóviles son de 4 o 6 cilindros distribuidos en “V”.
- **Referente a la forma de refrigeración:** Pueden ser refrigerados por líquido que normalmente es agua, donde el calor es evacuado al radiador del auto. También pueden ser refrigerados por aire, donde se necesita de un ventilador que ayude a circular el aire alrededor del motor.
- **Concerniente a las caras de los pistones:** Los motores convencionales utilizan una cara activa de los pistones, que se conocen como pistones de simple efecto. Son aquellos que se encuentran en contacto con el fluido activo y recibe el impacto de la energía química. De igual forma, existen motores que utilizan los pistones de doble efecto, los cuales funcionan en dos direcciones y usan dos cilindros con dos pistones y dos bielas, conectados a su respectivo cigüeñal.

- **Respecto a la presión del aire a la cámara de combustión:** En las máquinas convencionales el aire de la atmósfera entra directamente a la cámara y la presión es la atmosférica. Dichos motores usan un compresor que se encargan de comprimir el fluido antes de conducirlo al interior del motor.
- **Referente a la introducción de combustible a la cámara interna:** Se clasifican en motores de inyección y carburación, en estos últimos se mezclan los fluidos operantes para posteriormente introducirlo a la cámara por medio de una válvula reguladora.
- **Concerniente al ciclo operativo:** Se refiere a la cantidad de operaciones que el fluido activo ejecuta en el cilindro. La duración del ciclo la mide el pistón.
- **Respecto al tipo de encendido:** Esta clasificación radica en el modo de encendido con el ciclo termodinámico con el que opera la máquina [28].

### **2.3.2 Elementos de un motor de combustión interna**

Los elementos de un motor de combustión interna son biela, pistón y cigüeñal, los cuales se describen en los siguientes apartados.

### **2.4 Conceptualización de la biela**

La biela es el elemento del motor encargado de transmitir al cigüeñal la presión de los gases que actúa sobre el pistón. Es un elemento de difícil lubricación y es una parte crítica del motor, por lo que su diseño y fabricación son muy importantes [31]. Por lo general las bielas se fabrican de acero templado, aunque en motores de altas prestaciones se suelen utilizar bielas de aluminio o de titanio [32], tal como se muestra en la figura. 6.

Para Morillo, Ibaquingo & Benavides [33], una biela es un elemento mecánico que conecta el pistón al cigüeñal. Sirve además para transmitir al cigüeñal la fuerza recibida del pistón transformando esta fuerza de lineal a rotativa.



*Figura. 6. Biela*

Para Alzallú [34], por otro lado, la biela, se encuentra intercalada entre el pistón y el cigüeñal. Soporta los continuos empujes del pistón hacia abajo, y los constantes esfuerzos del cigüeñal hacia arriba. Se construyen de acero forjado con una técnica denominada estampación que permite al material aguantar ese inmenso trabajo y consiste en golpear un trozo de metal repetidas veces hasta conseguir la forma de la biela. Su cuerpo adopta una forma de “doble T”.

Las bielas están sometidas en su trabajo a esfuerzos de compresión, tracción y también de flexión muy grandes, y por ello, se fabrican con materiales resistentes, pero a la vez han de ser lo más ligeros posibles. Generalmente están fabricadas de acero con silicio, manganeso y cromo. Son perforadas, es decir, se les crea un conducto por donde circula el aceite bajo presión desde la cabeza hasta el pasador, con el fin de lograr una buena lubricación [27].

#### **2.4.1 Elementos de una biela**

En la figura 7, como puede apreciarse, está conformada por el pie, que es el extremo que va unido al bulón, que, a su vez, va enganchado en el cigüeñal. Este es el extremo más pequeño de la biela. El Cuerpo es la zona central de la biela, que debe soportar la mayor parte de los esfuerzos, pero al estar en continuo movimiento también debe de ser ligero, por ello se suele construir con forma de doble T.

La Cabeza igual que el Pie y Cuerpo es la parte que va unida al cigüeñal. A diferencia del pie, la cabeza va dividida en dos mitades, una de ellas unida al cuerpo, y la otra (sombbrero) separada de éste, requiriéndose dos tornillos para unirse a él. Están también el casquillo o cojinete, Tornillos de dilatación, y vástago de biela. Por lo general las bielas se fabrican de acero templado, aunque en motores de altas prestaciones se suelen utilizar bielas de aluminio o de titanio [35].



*Figura. 7. Partes de la biela*

La biela es la pieza que está encargada de transmitir al cigüeñal la fuerza recibida del pistón.

#### **2.4.2 Características de los metales de una biela**

Los metales de los que están hechas las bielas deben reunir diversas características las cuales se describen a continuación:

- **Resistencia a la fatiga:** La firmeza que recubre a la biela debe ser mayor que la presión de la carga dinámica en la película del aceite, mayor de las cargas de explosiones en la cámara de combustión y mayor que las cargas por inercia de las masas rotantes.
- **Conformidad:** El casquillo del metal de la biela, debe tener la geometría exacta para mantener el aceite en un nivel consistente con la resistencia a la fatiga de la aleación.
- **Compatibilidad:** Es la resistencia que tiene el material de las diferentes áreas de unión.
- **Resistencia a la corrosión:** El lubricante debe tener un determinado grado de acidez que corroerá la superficie del material, por lo que el metal de la biela debe ser capaz de resistir lo mejor posible este efecto.
- **Incrustabilidad:** En el aceite de los motores se encuentran partículas de basura que la superficie del metal de la biela debe ser capaz de aceptar con el menor daño posible [36].

### 2.4.3 Fallas en las bielas del motor

Existen diferentes circunstancias por las que puede fallar una biela en un motor, entre las cuales se encuentran:

- **Fatiga:** Es una falla de las bielas rotas, y aunque la estructura de las bielas de motor está hecha para resistir las altas fatigas, producto de las altas revoluciones en el motor, esto no durará para siempre.
- **Pasador:** El pasador que conecta la biela al pistón, recibe una gran cantidad de desgaste. Si este pasador suelta, la varilla de conexión ya no estará conectada al motor lo que resulta en un problema para él.
- **Motor revolucionado:** Un motor revolucionado es la principal causa de falla de las varillas de conexión de los motores nuevos y de alto rendimiento.
- **Agua en el motor:** Si entra mucha agua en el cilindro en el momento de la chispa, la biela se puede doblar o romper [37].

### 2.5 Conceptualización del pistón

El pistón es el encargado de darle la fuerza generada por la explosión a la biela, para que ella haga el resto y debido a los esfuerzos tanto de fricción como de calor a los que está sometido el pistón, se fabrica con materiales muy resistentes al calor y al esfuerzo físico, pero siempre empleando materiales ligeros, para aumentar su velocidad fácilmente y poder alcanzar regímenes de rotación elevados [38]. Los pistones se fabrican de aluminio, silicio, níquel y magnesio [39], un ejemplo de pistón se muestra en la figura. 8.



*Figura.8. Pistón.*

Según Goñi & Rojas [40], se denomina pistón a uno de los elementos básicos del motor de combustión interna. Se trata de una pieza que se ajusta al interior de las paredes del cilindro mediante aros flexibles llamados anillos. Efectúa movimientos, obligando al fluido que ocupa el cilindro a modificar su presión y volumen.

Un pistón está constituido por partes: cabeza, arcos y cubos del perno. La función del pistón es cerrar y obturar la cámara de combustión interna, así como, recibir la fuerza causa en la combustión a través de la biela y transmitirla al cigüeñal como fuerza de torsión; también transmite el calor producido por los gases de combustión hacia las paredes del cilindro para que sean refrigeradas por el lubricante. El pistón se desplaza rápidamente por el interior de los cilindros, el cual tiene segmentos, los cuales consiguen la estanquidad necesaria entre el pistón y las paredes del cilindro. De este modo se evita que parte del gas comprimido se escape hacia la parte inferior del motor. Por ese motivo el pistón debe estar fabricado de un material ligero y resistente a la vez. Atravesando el pistón se observa un orificio pasante. A través de este orificio, el pistón se une a la biela por mediación de un bulón de acero [41].

El pie de la biela es el que la une al pistón por medio del bulón, el cuerpo por su parte asegura la rigidez de la pieza, y la cabeza gira sobre el codo del cigüeñal, como puede apreciarse en la figura 9.

Los pistones del motor mantienen un movimiento constante hacia arriba y hacia abajo mientras que el cigüeñal genera un movimiento circular de modo que el auto puede avanzar. Los pistones de un motor se mueven arriba y abajo por el cigüeñal dentro de los cilindros en el motor. Las explosiones que ocurren en estos cilindros de empuje contra los pistones permiten llevarlos de vuelta y comenzar el ciclo otra vez. Los pistones están conectados al cigüeñal para asegurar que se mueva con ellos y mantener sus movimientos regulados [42].



*Figura.9.Unión pistón y biela.*

## 2.6 Conceptualización del cigüeñal

En la figura 10, se aprecia el cigüeñal, encargado de transformar el movimiento de la biela en movimiento rotatorio o circular. Junto con el pistón y la biela, se considera la pieza más importante del motor. Es una pieza que ha de soportar grandes esfuerzos, por eso se construye de materiales muy resistentes para que puedan aguantar cualquier movimiento sin romperse.

El cigüeñal es un árbol de transmisión que junto con las bielas transforma el movimiento alternativo en circular, o viceversa. Consiste en un conjunto de manivelas, una de ellas llamada muñequilla, y dos brazos que acaban en el eje giratorio del cigüeñal. Los cigüeñales se utilizan en los motores de combustión de los automóviles, donde el movimiento lineal de los pistones dentro de los cilindros se trasmite a las bielas y se transforma en un movimiento rotatorio del cigüeñal que, a su vez, se transmite a las ruedas y otros elementos como un volante de inercia. El cigüeñal es un elemento estructural del motor [43].

Para Álvarez [42], el cigüeñal está situado en el motor de un vehículo y convierte la fuerza creada por los pistones del motor. El cigüeñal está conectado a todos los pistones en el motor y el volante.

En la figura 11, se puede observar la articulación de la biela, el pistón y el cigüeñal, donde el movimiento es rotativo para su adecuado funcionamiento. Estos tres elementos no pueden funcionar en forma separada.



*Figura 10. Cigüeñal.*



*Figura 11. Unión de biela, pistón y cigüeñal.*

Debido a los impulsos provocados por los pistones se presentan diferentes vibraciones determinadas por el número de revoluciones, las cuales pueden provocar la rotura del cigüeñal y ruido excesivo en el motor. Su función es impulsar la fuerza de cada uno de los cilindros a través del mecanismo de las bielas. Están fabricados con materiales de acero cementado templado y con aleaciones de níquel y cromo. Estos materiales permiten tener un tratamiento térmico.

## **2.7 Conceptualización de Cojinetes**

Desde hace tiempo la ingeniería automotriz se ha enfocado en el diseño y la fabricación de superficies que permitan reducir la fricción, principalmente en los cojinetes [36,45,46].

Los cojinetes son los encargados de unir la biela con el cigüeñal para evitar que haya rozamiento entre ellos y evitar pérdidas de potencia y averíos. Tienen forma de media luna, tal como se aprecia en la figura 12, y se colocan entre el cigüeñal y la cabeza de las bielas. Estos deben ser construidos con gran precisión, pues cualquier mala elaboración puede impactar en el funcionamiento del motor.



*Figura 12. Cojinetes.*

Según Suárez [47], los cojinetes son punto de apoyo de ejes para sostener su peso, guiarlos en su rotación y evitar deslizamientos. Van colocados directamente en el bastidor de la pieza y los cojinetes trabajan en forma conjunta con la biela y el cigüeñal.

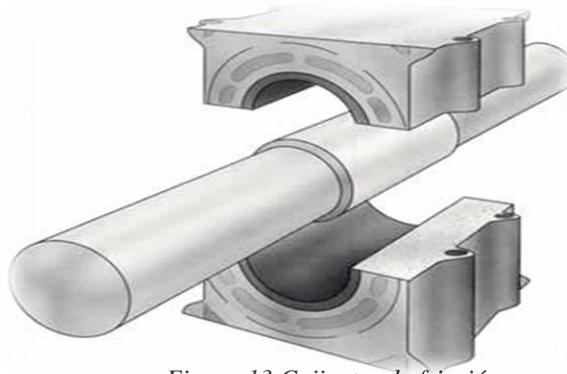
De acuerdo con Suárez, Toro & Vélez [48], los cojinetes son que piezas de metal que descansan y giran en cualquier eje de un motor. Son dispositivos que se colocan entre la porción fija y la porción giratoria de un motor y sirven para reducir al mínimo la fricción entre ambas. Los cojinetes se fabrican con pequeñas esferas metálicas, sin embargo, no garantizan una vida útil extensa. El rendimiento de los cojinetes es afectado por las condiciones de velocidad, materiales en contacto, temperatura, lubricación, tipo de carga, entre otros.

### **2.7.1 Clasificación de los cojinetes**

Los cojinetes se clasifican por fricción o deslizamiento, y de rodamiento. Éstos se explican a continuación.

- **Cojinetes de fricción o deslizamiento:** El cojinete de fricción está compuesto por dos pistas, una interior y otra exterior. Éstas tienen contacto directo por medio de deslizamiento o fricción. La reducción del rozamiento se realiza según la selección de materiales y lubricantes. Los lubricantes tienen la función de crear una película deslizante que separe los dos materiales o evite el contacto directo. Para Vélez [49], los cojinetes de fricción son aquellas piezas que entre mayor es la fricción, es más difícil el movimiento entre los dos objetos. En el caso de máquinas la fricción ocasiona el desgaste de las piezas.

Según Arias [50], los cojinetes de fricción son puntos de apoyo de ejes y árboles para sostener su peso, guiarlos en su rotación y evitar deslizamientos. Van montados en soportes para facilitar su montaje, tal como se aprecia en la figura 13. Mientras que, para Espitia [51], es el elemento mecánico capaz de soportar los gorriones de los ejes giratorios, que se caracteriza por un reducido coeficiente de rozamiento, así como por la posibilidad de ser lubricado constantemente. Otra característica importante reside en el hecho de que el material del cojinete debe ser más blando que el eje, para evitar el deterioro de éste en el caso de una lubricación defectuosa.



*Figura 13. Cojinetes de fricción.*

- **Cojinetes de rodamiento:** Es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de rodadura, el cual sirve de apoyo y facilita su desplazamiento. Los elementos de rodadura pueden ser bolas o rodillos, son piezas que requieren facilitar la ejecución de rigurosos tratamientos térmicos para obtener piezas de gran resistencia al desgaste y a la fatiga. Se caracterizan por ser de escaso rozamiento, sobre todo en el arranque, por tener mayor velocidad admisible y un menor consumo de lubricante. Para Mérida [52], los cojinetes de rodamiento son elementos mecánicos que aseguran un enlace móvil entre dos elementos de un mecanismo, uno de los cuales se encuentra en rotación con respecto al otro. Su función principal es la rotación relativa de dichos elementos bajo carga, con precisión y con un rozamiento mínimo.

Según Galicia [53], estos tipos de cojinetes están constituidos por dos anillos rodantes separados entre sí por unos cuerpos, también rodantes, interpuestos entre éstos, cuya forma varía según su uso, pudiendo ser de diferentes formas: bolas, rodillos, cilíndricos, agujas, etc. En ellos el gorrón del árbol y la superficie de rodadura del soporte están separados por elementos rodantes, de forma que con el giro del gorrón o del cojinete, se genera un movimiento de rodadura y no de deslizamiento, tal como se muestra en la figura 14.



*Figura 14. Cojinetes de rodamiento.*

Según Jaramillo [54], cerca de 40% de la energía total transformada por un motor de combustión interna de un automóvil se disipa como trabajo de las fuerzas de fricción. La disminución de las pérdidas por fricción es un factor clave para lograr un mejor uso de los combustibles y la protección del medio ambiente. El sistema anillo-pistón-camisa, responde por pérdidas equivalentes a 50 o 60% del total de las pérdidas por fricción en un motor de estos.

## 2.8 Motor encendido por chispa de cuatro tiempos

En la figura 15, se puede observar la estructura básica de un motor de cuatro tiempos, el cuál es conocido por motor OTTO [55]. Se usa como máquina motriz en automóviles comerciales consta de un ciclo de cuatro procesos, los cuales se describen a continuación

### 2.8.1 Ciclo Otto de cuatro tiempos

Como se mencionó anteriormente, el ciclo consta de cuatro tiempos. El primer tiempo corresponde al de admisión, que es el momento que el pistón está en el punto más alto conocido como Punto Muerto Superior (PMS). Posteriormente la válvula de admisión se abre y el propio pistón por el vacío que se crea dentro del cilindro aspira la mezcla (aire y combustible) hasta llegar al punto más bajo del cilindro del Punto Muerto Inferior (PMI).

El segundo tiempo, se refiere a la compresión, donde el pistón se encuentra en el punto más bajo (PMI). En este momento la válvula de admisión se cierra y el pistón empieza a ascender comprimiendo la mezcla hasta llegar al punto más alto del cilindro (PMS).

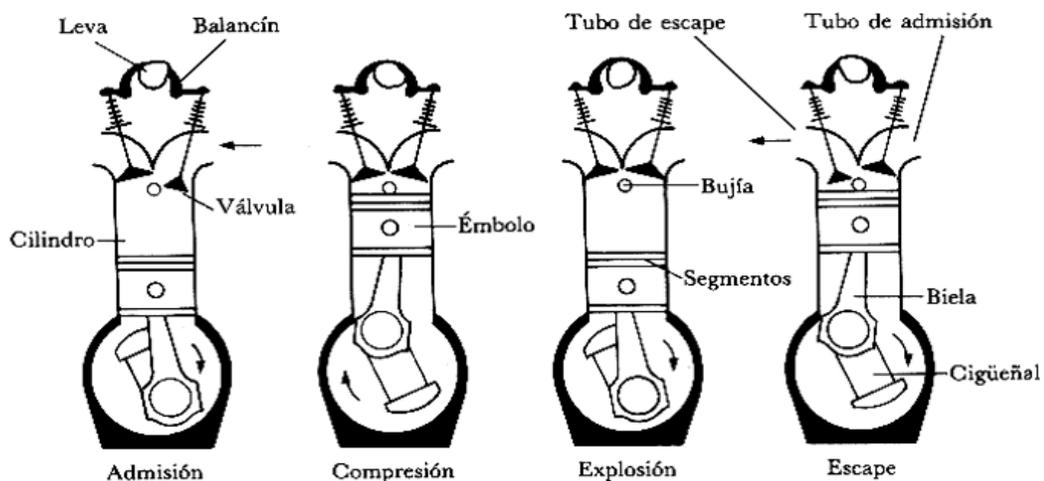


Figura 15. Motor de cuatro tiempos.

Respecto al tercer tiempo, que concierne a la expansión, una vez que se ha comprimido la mezcla, la bujía hace saltar una chispa y enciende la mezcla, aumentando la presión en el cilindro y haciendo descender el pistón hacia el punto más bajo (PMI).

En el cuarto tiempo, que corresponde al escape de gases, es cuando el pistón llega al punto más bajo (PMI), se abre la válvula de escape, y el pistón empieza a ascender empujando los gases quemados hacia el exterior. En el momento que llega al punto más alto (PMS) la válvula de escape se cierra. En la figura 16, se muestra el funcionamiento de un motor de combustión interna encendido por chispa basado en el ciclo Otto, de cuatro tiempos o fases importantes: admisión, compresión, explosión y escape [56].

Otto, propuso cuatro principios del motor de cuatro tiempos, que son: máximo volumen del cilindro con mínima superficie de paredes, máxima velocidad de trabajo posible, máxima relación de expansión posible y máxima presión posible al comienzo de la expansión.

En los motores de cuatro tiempos el pistón sube y baja cuatro veces en el interior del cilindro para realizar el ciclo completo. La distribución se compone de válvulas que se abren y cierran totalmente sincronizadas con el movimiento del pistón. Cuando el pistón desciende el cilindro se llena de aire y gasolina, para lo cual la válvula de admisión permanece abierta. Posteriormente, después de producirse la explosión en el interior del cilindro, la válvula de escape se abre para que los humos procedentes de la explosión puedan salir hacia el tubo de escape del automóvil. En este tipo de motores se requiere de dos válvulas por cada cilindro.

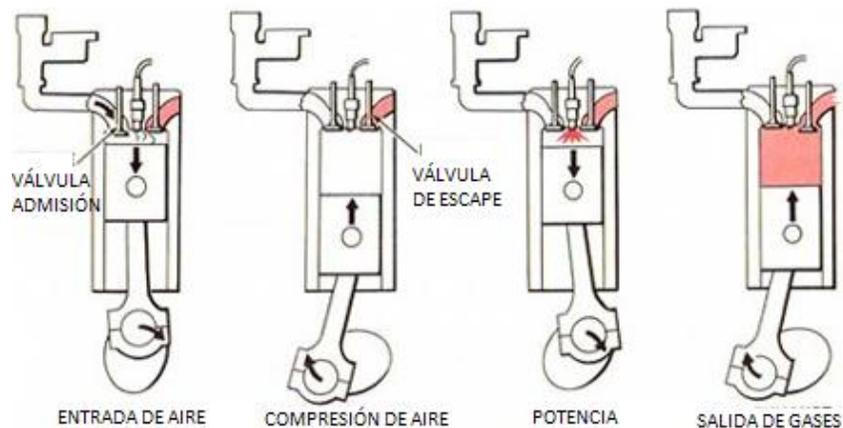


Figura 16. Funcionamiento de un motor de 4 tiempos.

## 2.9 Sistema de encendido

El sistema de encendido es el encargado de encender la mezcla de aire y de combustible en el momento que se requiera. Para esta investigación el sistema de encendido es por inyección directa de gasolina o por chispa que son aquellos que inyectan la gasolina directamente dentro del cilindro. Este sistema permite un mayor control de la mezcla y por tanto del comportamiento del motor. En los motores de gasolina, la mezcla se enciende gracias a la bujía que proporciona una chispa lo suficientemente potente como para comenzar la reacción. El propio sistema de encendido tiene que controlar el momento en el que la chispa ha de saltar para que se encienda la mezcla y sea lo más eficaz y factible posible. La combustión se realiza en el momento en que el pistón está en el punto más alto (PMS), de esta manera la mezcla se empieza a encender.

### 2.9.1 Funcionamiento de la inyección directa

La característica principal de la inyección directa de gasolina es que la mezcla se produce dentro de la cámara de combustión. Durante la admisión sólo entra aire por la (s) válvula (s) de admisión, la gasolina es inyectada directamente en la cámara de combustión por inyectores de alta presión [57], tal como se aprecia en la figura 17.

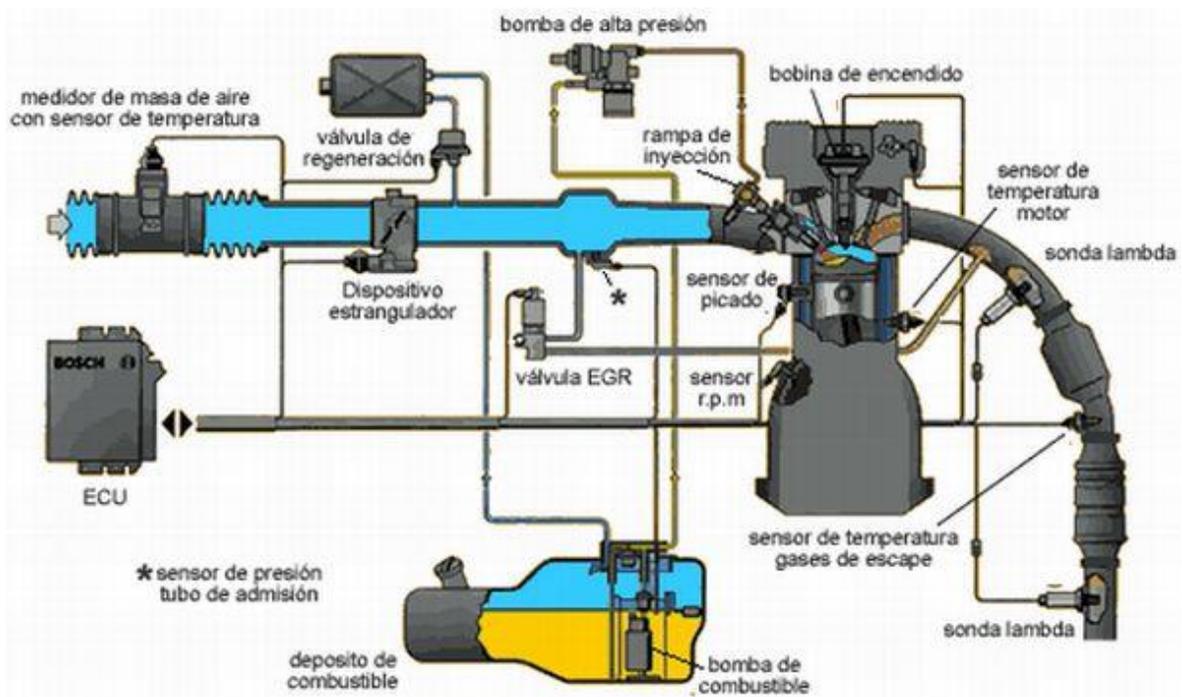


Figura 17. Componentes de un sistema de inyección directa.

## **2.9.2 Ventajas de la inyección directa**

Existen ventajas cuando se usa el encendido por chispa, las cuales se describen a continuación.

- La gasolina se evapora directamente dentro del cilindro absorbiendo el calor del aire contenido en éste, reduciendo la temperatura de la mezcla en la cámara de combustión, lo que disminuye el riesgo de autoencendido e incrementa el rendimiento y la potencia.
- Ayuda a aumentar el rendimiento inyectando la gasolina directamente en el cilindro.
- Con respecto a la prevención del autoencendido, la mayor contribución de la inyección directa de gasolina es cuando el motor trabaja en carga estratificada y por tanto no inflamable, lo que evita el autoencendido.
- Eficiencia en el periodo de admisión, debido a que, sólo entra aire al cilindro, inyectando la gasolina después.
- Disminución del consumo de gasolina, si se tiene poca gasolina el motor puede llegar a funcionar, esto permite que el motor aporte la energía requerida con un aporte de gasolina sustancialmente menor. Esta disminución del consumo de gasolina disminuye también de emisiones de  $CO_2$ . Este contaminante es un producto del proceso de combustión que sólo puede reducirse disminuyendo el consumo de gasolina.
- Mejor rendimiento del motor debido a que la mezcla que se encuentra cerca de las paredes es escasa y la temperatura de los gases de combustión es mucho menor por lo que las pérdidas por calor cedido a las paredes del cilindro también se ven reducidas [58].

## **2.9.3 Desventajas de la inyección directa**

Estos motores de encendido por chispa o inyección directa, tienen también algunas desventajas, las cuales son:

- Se requiere de una bomba de alta presión para proveer la gasolina a los inyectores con la presión requerida. Ésta bomba toma la gasolina del depósito y la alimenta regulando su presión de salida.
- Los inyectores deben ser aptos para resistir las altas presiones para inyectar gasolina directamente en el cilindro y también deben soportar las condiciones de la cámara de combustión, tanto las altas temperaturas como las altas presiones derivadas de la combustión.

- El sistema de encendido debe ser capaz de suministrar más energía, debido a que el chorro de gasolina puede impactar directamente con la bujía mojándola o la chispa apagarse debido a las fuertes corrientes de aire y necesitar una segunda chispa.
- Se requiere de una sonda lambda de banda ancha que permita medir las variaciones en la carga estratificada.
- Se necesita que la Unidad de Control de Motor (ECU) tenga mayor potencia de cálculo para administrar las señales que recibe y las salidas de control, pues el motor tiene distintos modos de operación y la ECU debe ser capaz de administrar las señales que recibe para cada uno de ellos y procesar las órdenes en consecuencia.
- La cabeza del pistón tiene que ser rediseñada para que, cuando el motor trabaja con carga estratificada, dirija la nube de mezcla rica en gasolina correctamente hacia la bujía [59].

#### 2.9.4 Descripción del proceso de encendido

Para encender el motor de gasolina, se necesita una chispa entre los dos electrodos de la bujía para producir la temperatura necesaria para que la mezcla encienda, para lo cual se requieren tensiones muy altas. En la figura 18 se aprecia que en el momento en que se pone en contacto la llave de arranque se cierra el circuito y la batería comienza a entregar voltaje, el cual es muy bajo, ya que corresponde a 12 voltios. Para incrementarlo entre los electrodos de las bujías, la bobina, con ayuda del ruptor, consigue cambiar a 30,000 voltios. Esta tensión es enviada al delco, donde se encuentra el distribuidor giratorio que reparte la tensión a la bujía correspondiente [60].

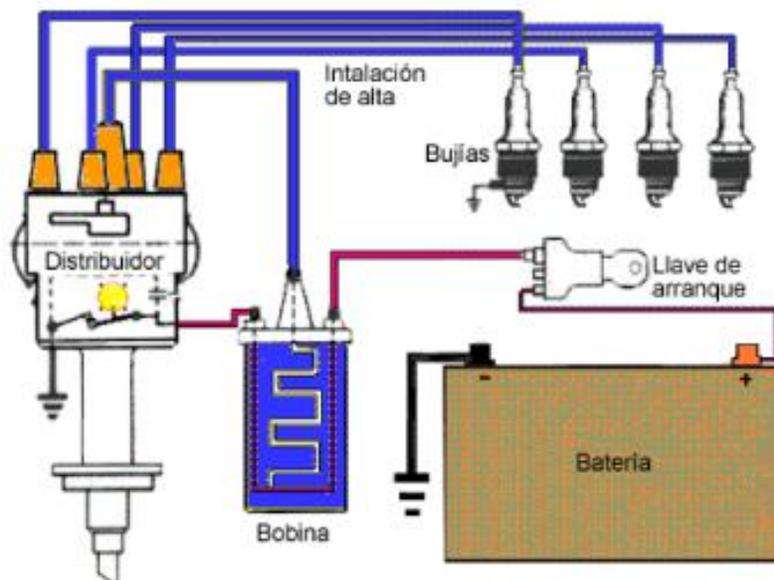


Figura.18. Sistema de encendido.

#### 4.9.5 Componentes del sistema de encendido

El sistema de encendido en motores de gasolina tiene los elementos que se describen a continuación:

- **Alternador:** es un dispositivo que se acciona directamente por el motor que se encarga de generar corriente para cargar batería. Al estar directamente accionado por el motor, si se suben las revoluciones del motor, también aumenta la corriente generada.
- **Batería:** Es la encargada de suministrar la energía eléctrica para que circule hacia la bujía. Dicha energía viene dada por la reacción química del plomo y ácido sulfúrico.
- **Bobina.** Se encarga de transformar la baja tensión que proviene de la batería en una tensión alta para hacer saltar la chispa entre los electrodos de la bujía, la cual consta de dos filamentos enrollados. Cuando el primero recibe la corriente de la batería el ruptor interrumpe la corriente que pasa por éste, entonces al filamento secundario se le induce una corriente más alta capaz de hacer saltar la chispa entre los electrodos de la bujía y encender la mezcla.
- **Ruptor.** Se encuentra situado dentro del distribuidor y se encarga de interrumpir periódicamente la corriente en el filamento primario de la bobina para que la corriente sea inducida en el secundario. Esta interrupción es en base a la apertura de dos contactos los cuales son comandados por una leva, accionado por y a la misma velocidad que el árbol de levas.
- **Distribuidor.** Es el encargado de repartir la alta tensión a la bujía en cada momento. Va centrado en el delco donde también se sitúa el ruptor y los reguladores de encendido.
- **Bujía.** Es el elemento que se encarga de hacer saltar la chispa para que encienda la mezcla de aire y gasolina. Está recubierta de un aislante para disipar el calor generado en la cámara de combustión, ya que está ‘en contacto directo con las explosiones.

#### 2.10 Sobrecalentamiento

El sobrecalentamiento del motor es la condición en la cual la temperatura del motor se eleva a valores más altos de lo normal, y si se mantiene mucho tiempo llega a producir daños graves en el motor, como torceduras y roturas de válvulas, brazos de biela, soplado de empaques, torceduras de culatas, roturas de pistones, etc.

El tiempo de calentamiento de los motores modernos es prolongado sobre todo cuando las condiciones ambientales son desfavorables y cuando la calefacción del motor se enciende. Durante

el calentamiento del motor la vaporización del combustible se dificulta y el catalizador no funciona a plenitud, por esto la reducción del tiempo de calentamiento del motor es esencial. Para lo cual es necesario reducir el volumen de refrigerante, la masa del motor, mejorar el aislamiento del motor, emplear sistemas calentadores adicionales, emplear una unidad electrónica de control para manipular la termodinámica del motor y de esta misma manera controlar el desempeño térmico; todas estas medidas servirán para reducir el tiempo del calentamiento y ayudarán a un mejor funcionamiento del motor [61].

El sobrecalentamiento del motor puede ser causado por cualquier cosa que disminuya la capacidad del sistema de refrigeración, para absorber, transportar y disipar el calor. Por lo tanto, los motores pueden sobrecalentarse por una variedad de razones. Algunas se deben a que el termostato se encuentre en mal estado, debido a que es una válvula que abre y cierra conforme se encuentre la temperatura del motor. Es decir, el refrigerante del motor caliente pasa a través del radiador cuando el termostato está en posición abierta. Cuando se encuentra en posición cerrada el refrigerante se queda en el motor y rápidamente se calienta, ocasionando un sobrecalentamiento del motor.

De igual forma, el tener un radiador con fugas u obstrucciones conduce a elevadas temperaturas del motor y sobrecalentamiento del mismo. Así como el tener mangueras con agujeros hace que se produzcan fugas o se interrumpa el flujo del refrigerante. También un ventilador con oscilación libre y teniendo un aspa rota, no puede mantener una velocidad adecuada, lo que origina sobrecalentamiento del motor.

En los motores de combustión interna modernos sólo una tercera parte de la energía interna se convierte en trabajo útil. Las dos terceras partes restantes de la energía se transforman en calor a pérdida, evacuadas por el sistema de escape, el sistema de enfriamiento y calor radiado y rechazado por convección a través de las partes sólidas del motor. El sobrecalentamiento durante el ciclo completo del motor genera una distribución de energía dentro de la cámara de combustión. En general el calor se transporta hacia la culata, la camisa, los puertos de escape y el pistón, el cual está ligado a la biela, la cual si tiene defectos acabará por destruir el motor [61].

Es por tanto importante estar pendiente de la temperatura a la cual está trabajando el motor, debido a que un sobrecalentamiento puede provocar daños serios, empezando por la ruptura del empaque, la deformación de los cilindros y desgaste en los anillos. Están también los daños en los codos del cigüeñal y la biela. Esta última ya que se encuentra sometida a fuerzas axiales de compresión convirtiéndola en el elemento más tensionado dentro del motor. Está además expuesta a cargas, producto de la presión generada en la cámara de combustión y por la alta fricción entre los elementos deslizantes. Al no tener un adecuado sistema de lubricación en las partes móviles se presentarán desgastes excesivos y prematuros que pueden ocasionar una falla. Si este sistema no funciona correctamente la resistencia mecánica de la biela se verá afectada teniendo como consecuencia deformaciones importantes por sobrecalentamiento [62].

### **2.10.1 Análisis cinemático del motor**

La cinemática proviene del griego *κινεω*, *kineo*, que significa movimiento. Estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo originan y se limita, esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo [63]. La cinemática se ocupa de aspectos del movimiento aparte de considerar masa y fuerza. Un análisis cinemático simula el movimiento de mecanismos, por lo que cumple los requisitos de los perfiles de los motores cinemáticos y de cualquier conexión de unión, por leva, en ranura o por engranajes. Este tipo de análisis se usa para obtener información sobre la posición, velocidad y aceleración de entidades geométricas y conexiones, interferencia entre componentes, las curvas trazadas del movimiento del mecanismo y los envolventes de movimiento que capturan el movimiento del mecanismo como una pieza.

Según Forno [64], la cinemática analiza los factores de tiempo y espacio del movimiento de un sistema, es decir, describe el movimiento de los cuerpos en términos de tiempo, desplazamiento, velocidad, aceleración y tiempo de desplazamiento.

Para Suárez [65], el análisis cinemático se utiliza para evaluar el movimiento del mecanismo gobernado por motores cinemáticos. Se puede utilizar cualquier motor cinemático de eje de movimiento con un perfil, lo que producirá una aceleración finita.

Las fuerzas que afectan a la biela son fundamentalmente de dos tipos, las de combustión y las de inercia. Una vez conocidas las fuerzas de combustión en el pistón, se usa software especializado

que ayuda en el cálculo del análisis cinemático y dinámico, integrando las fuerzas de inercia debidas a la masa de cada componente del mecanismo biela-manivela [66].

Para realizar este análisis es necesario considerar las masas de cada una de las piezas, así como el régimen de giro. Esto permitirá realizar la simulación y calcular las fuerzas aplicadas en la cabeza y el pie de la biela, para poder luego hacer un análisis de elementos finitos que definan los esfuerzos. En el capítulo III, se describen la pieza construida a través del Software de aplicación SOLIDWORKS.

### **2.10.2 Análisis cinético del motor**

El análisis cinético estudia las fuerzas que provocan que un sistema se mueva, es decir, que produzcan o cambien el movimiento de un objeto. El estudio de las fuerzas que inducen el movimiento parte desde un movimiento lineal o angular. El análisis cinético puede ser de tipo lineal o angular. El primero involucra la descripción de un movimiento en línea recta. Por otro lado, la cinemática angular se refiere a la descripción de un movimiento alrededor de un ángulo fijo [64].

El análisis cinético es cuando un cuerpo está en reposo, para acelerarlo hasta una cierta velocidad y se necesita un determinado trabajo [67]. Esa energía que se obtiene en la aceleración, es conservada por el cuerpo como energía cinética hasta que modifique su velocidad.

Concretamente, se llama cinética o cinemática a la especialidad de la física centrada en el análisis del movimiento, dejando de lado el estudio de las fuerzas que lo originan. La cinética, en este marco, suele estudiar la trayectoria de un cuerpo en movimiento en función del tiempo [68].

### **2.10.3 Análisis por transferencia de calor**

La parte de la física que estudia estos procesos se llama transferencia de calor, la cual se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto, hasta alcanzar el equilibrio térmico, es decir, hasta que se igualan las temperaturas.

Para el desarrollo de esta investigación se usó en el software ANSYS, el cual permitió realizar el análisis térmico que consiste en la aplicación del método de elementos finitos para calcular la distribución de temperatura en una estructura sólida, en este caso la biela de un motor de combustión interna. Con dicho análisis, se resolvió el problema de la transferencia térmica conjugada que involucra el cálculo de la simulación de la conducción, convección e irradiación térmica [66].

Los procesos de los motores de combustión interna son complejos para poder realizar un análisis completo de los mismos, por lo que se requiere el uso de procesos teóricos para realizar cálculos. Éstos son denominados modelos matemáticos para los cuales se usa simulación, herramienta de gran apoyo para estudiar el comportamiento de los motores de combustión interna desde el punto de vista termodinámico. Con estos softwares de apoyo es posible estudiar la influencia de determinados parámetros como son: la geometría, operación y combustión, en las prestaciones de un motor [69].

## **2.11 Simulación y diseño mecánico**

La simulación permite examinar el comportamiento del modelo en condiciones de operación reales. Ayuda a evaluar las características estructurales y el perfil térmico, proporciona también potentes herramientas para examinar el rendimiento de los mecanismos. Sirve para reflejar las fuerzas, materiales y condiciones de límite a las que se verá sometido el modelo real para adaptarlo mejor a criterios de diseño específicos.

Existen diversos Softwares de aplicación para diferentes fines, como es el caso de CAD, que sirve para diseñar modelos en tercera dimensión (3D), que posteriormente se analizan por el método de elementos finitos. Tal es el caso del software CATIA que es uno de los más utilizados actualmente en la industria para encontrar parámetros como las dimensiones de diámetro del pistón, longitud de la biela, ancho de biela, diámetros interiores de cabeza y pie, espesores de cabeza y pie, ancho y alto de la sección tipo I, y diámetro de los tornillos de fijación. Tanto el CAD y CATIA son simuladores que permiten determinar lo antes mencionado.

También existe el Software ANSYS, que sirve para diseñar, analizar y simular partes de piezas sometidas a fenómenos físicos, usadas en ingeniería y diseño mecánico. Ayuda a resolver

problemas físicos como problemas de esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y otras. Dentro de este software se encuentra la sección de Análisis Mecánico que sirve para resolver situaciones muy particulares en diseño mecánico como elementos estructurales lineales, no lineales y análisis dinámico. Con este módulo se puede evaluar el comportamiento, asignar materiales y resolver ecuaciones, elaborar análisis térmicos, acoplamientos físicos que involucren acústica, elementos piezoeléctricos e interacción térmica con eléctrica. El software ANSYS se usó para este proyecto.

Así mismo, es necesario señalar que para el análisis cinemático y cinético del motor se utilizó el software MATLAB, herramienta matemática que ayudó en el desarrollo de la investigación para la representación de datos matriciales, funciones y simulación del sistema del motor. Los resultados de MATLAB, junto con el Software ANSYS permiten predecir cómo se comporta y reacciona la biela en su entorno real. Posteriormente se importa la geometría de la biela con dimensiones reales y se realizan el análisis estático y térmico por medio de la simulación.

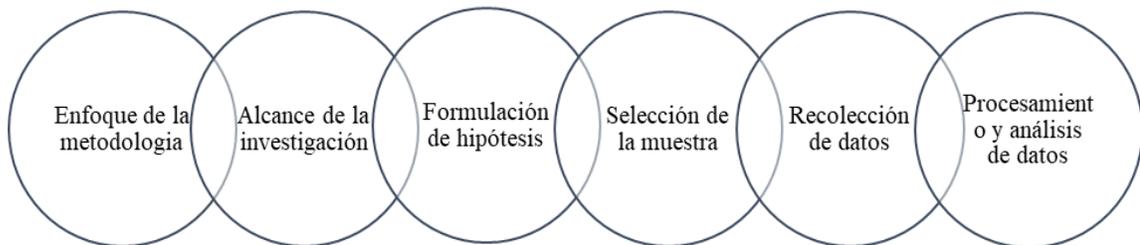
De igual forma, se emplea para esta investigación el software SOLIDWORKS, que se usa para el diseño mecánico con el que se crea geometría en tercera dimensión (3D) usando parámetros sólidos.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se define como la disciplina que se encarga del estudio crítico de los procedimientos y medios aplicados por los seres humanos, que permiten alcanzar y crear el conocimiento en el campo de la investigación científica. Representa la forma en la que se va a organizar el proceso de la investigación, de examinar los resultados y de presentar posibles soluciones al problema. Toda investigación a desarrollar debe llevar un orden lógico. La metodología de la presente investigación está basada en la propuesta de los autores Hernández, Fernández y Baptista [70], ya que tiene un enfoque bastante amplio y flexible que se puede adaptar de manera general a los requerimientos y alcances del estudio, cubriendo los puntos esenciales que guían el diseño y elaboración de la investigación. Los pasos seguidos se muestran en la figura 19.

### 3.1 Enfoque de la investigación

Existen dos enfoques dentro de la investigación, el cuantitativo y el cualitativo. Hernández [70], define a la investigación cuantitativa como aquella investigación que utiliza la recolección de datos para comprobar una hipótesis con base a una medición numérica para establecer un análisis estadístico, con el propósito de conocer la tendencia del comportamiento y la aprobación de teorías. El desarrollo de esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, el cual según Fernández [71], se fundamenta en un esquema deductivo y lógico que busca formular preguntas de investigación e hipótesis para posteriormente probarlas.



*Figura. 19. Metodología de la investigación del presente trabajo*

Esta investigación parte del enfoque mecánico, propuesto por diferentes autores que hacen referencia a los diferentes motores que existen, así como los elementos que lo conforman. La finalidad es identificar el comportamiento termo - estático de una biela en un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa, así como determinar la fuerza axial de la biela. También obtener la temperatura de combustión adiabática para una reacción de combustión estequiométrica y simular la geometría estática y estructural de la biela para identificar posibles deformaciones y posteriormente realizar el análisis cinemático del motor.

### **3.2 Alcance de la investigación**

El alcance de esta investigación es exploratoria, correlacional, descriptiva y explicativa. Al respecto Fernández et [71]. al. se establece que “los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo consiste en examinar un tema poco estudiado”, en este caso los factores que influyen en el sobrecalentamiento de una biela.

El alcance correlacional tiene como finalidad establecer una relación entre dos o más variables [70] y referente a esta investigación se llevó a cabo la correlación de variables del calor liberado en la cámara de combustión y el sobrecalentamiento del motor. Esta correlación implica una relación causal entre dichas variables, ya sea de forma positiva o en forma negativa, y una relación causal implica que un evento es consecuencia de otro que le antecede y que sin éste el último no se presentará.

La investigación también es descriptiva puesto que se describen los fenómenos alcanzados en el transcurso de todo el proceso. Busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice [71], en este caso la relación de compresión, presión atmosférica, área del pistón, presión atmosférica dentro de la cámara de combustión, presión que detona la mezcla dentro de la cámara de combustión, fuerza, temperatura de combustión adiabática y geometría de la biela. En este sentido, en esta investigación se describieron las variables antes mencionadas, mismas que se especifican en el capítulo cuatro, detallando sus propiedades, y características.

De igual forma, la investigación tiene un alcance explicativo, derivado de que, según Hernández, Fernández & Bautista, mencionan que está orientada a la comprobación de hipótesis las cuales

sirven para el análisis de variables [71], que se expresan con hechos verificables para que el investigador tenga la capacidad de análisis y síntesis para su interpretación. En el desarrollo de este trabajo la hipótesis establecida se encuentra en el apartado 3.3 del presente capítulo, y los resultados obtenidos se explican en el capítulo cuatro, donde se explican los fenómenos hallados entre variables, describiendo por qué ocurrieron dichos eventos y en qué condiciones se manifestaron.

### **3.3 Formulación de la hipótesis**

En toda investigación es importante plantear variables, ya que éstas permiten relacionar algunos conceptos que hacen referencia a las características que se van a estudiar. Para Hernández, Fernández & Baptista [70], una variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse, Las variables adquieren valor para la investigación científica cuando llegan a relacionarse con otras variables, es decir, si forman parte de una hipótesis o una teoría. Y una variable independiente se refiere a “aquella donde el investigador puede manipular ciertos efectos; en otras palabras, supone la causa del fenómeno estudiado”. Y la variable dependiente, implica “el efecto producido por la variable independiente, es decir representa lo que se quiere determinar en forma directa en la investigación”.

La hipótesis planteada en este trabajo es una hipótesis correlacional, donde si alguna de las variables sufre alguna modificación, esto afectará a otras variables correspondientes. A continuación, se muestra la hipótesis de la presente investigación.

#### **❖ Hipótesis nula:**

 **H<sub>01</sub>:** El calor liberado en la cámara de combustión influye en el sobrecalentamiento de un motor de combustión interna.

#### **Variables:**

Variables independientes: Calor liberado en la cámara de Combustión.

Variable dependiente: Sobrecalentamiento del motor.

Ya identificadas las variables es necesario establecer la operacionalidad de las mismas y con base a lo anterior se observa en la tabla 1, la clasificación de las mismas.

TABLA 1. CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLE

Variable	Definición Conceptual	Indicadores
<b>Calor liberado en la cámara de combustión</b>	Se refiere a la quema de combustible suministrados por el motor de combustión interna, de tal manera que el aire se expanda y acelere para proporcionar una corriente de gas uniformemente calentada en todas las condiciones requeridas por el motor de combustión interna. Esta tarea debe realizarse con la mínima pérdida de presión y con la máxima liberación de calor para el limitado espacio disponible [31].	Reacción química de la combustión
<b>Sobrecalentamiento del motor</b>	Es la condición en la cual la temperatura del motor se eleva a valores más altos de lo normal y llega a producir daños graves en el motor, como torceduras y roturas de válvulas, brazos de biela, soplado de empaques, torceduras de culatas y roturas de pistones [41].	Lubricación deficiente Fallo en sistema de enfriamiento

❖ **Hipótesis alterna:**

✚ **H<sub>A1</sub>:** El calor liberado en la cámara de combustión no influye en el sobrecalentamiento de un motor de combustión interna.

### 3.4 Diseño de la investigación

El tipo de diseño que se usó fue el no experimental, donde la investigación que se realiza se hace sin la manipulación deliberada de las variables, y donde se observan los fenómenos para posteriormente analizarlos, en este caso, el calor liberado en la cámara de combustión y el sobrecalentamiento del motor, donde dichas variables están relacionadas con diferentes elementos que son la combustión estequiométrica, presión atmosférica, fuerza de la biela y geometría de la biela. Estos elementos sirvieron para poder realizar el análisis cinético, cinemático y térmico por transferencia de calor, motivo de la presente investigación.

A su vez es una investigación transaccional, donde se recolectaron los datos en un momento y tiempo único, permitiéndose describir las variables anteriormente mencionadas. El propósito fue describir las variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

Por otra parte, este trabajo se basó en un diseño no experimental, con la información derivada basada en datos primarios, obtenidos directamente de la realidad. En el desarrollo de la presente investigación la información se obtuvo mediante el modelado mecánico, el cual ayudó a predecir el comportamiento y reacción de la biela en su entorno real.

### 3.5 Selección de la muestra

El desarrollo de esta investigación se realizó tomando como objeto de estudio a un motor VW Golf MK4 Gti 1.8T. En la tabla 2 se muestran las especificaciones de este motor.

Se utilizó un acero SAE 4340 de medio carbono aleado con Cr-Ni-Mo debido a que posee buena resistencia a la fatiga, alta templabilidad, excelente tenacidad, regular maquinabilidad y baja soldabilidad. Es apto para piezas y herramientas de grandes exigencias mecánicas. Se usa para los más altos esfuerzos estáticos y dinámicos en piezas como cigüeñales, bielas, cardanes, piñones, pernos y tornillos de alta resistencia, engranajes para máquinas, discos de freno, barras de torsión y árboles de transmisión [72]. En la tabla 3, se muestran las composiciones químicas.

**TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR**

Variable	Definición Conceptual
Motor	V 4
Combustible	Gasolina
Alimentación	MPI
Situación	Transversal
Cilindrada	1781 cm <sup>3</sup>
Diámetro por carrera	81.0 x 86.4 mm
Válvulas	16 válvulas
Sobrealimentación	Turbo + Intercooler
Relación de Comprensión	9.5
Potencia	210 PS or 207 bhp o 154 kw 5700 rmp
Par máximo	300 Nm o 221 lb.ft 2700 rpm
Caja de cambios	6 velocidades manual

**TABLA 3. PORCENTAJE DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO USADO.**

Composición química (%)	
C	0,38 – 0,43
Mn	0,60 – 0,80
Si	0,15 – 0,35
P	0,035 Máx.
S	0,04 Máx
Cr	0,70 – 0,90
Ni	1,65 – 2,00
Mo	0,20 – 0,30

De igual forma, en la tabla 4, se pueden apreciar las características del tratamiento térmico y las propiedades mecánicas que se deben tener para cumplir con lo establecido para el procedimiento.

### 3.6 Recolección de datos

Para el análisis estático y térmico se emplea la simulación con ANSYS, y poder predecir cómo se comporta y reacciona la biela en su entorno real. El software SOLIDWORKS se emplea para incorporar la geometría de la biela con dimensiones reales.

**TABLA 4. TRATAMIENTO TÉRMICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS.**

Tratamiento térmico (Valores en °C)		Propiedades mecánicas	
Forjado	850 - 1100		Bonificado
Normalizado	870 - 900	Resistencia a la tracción	95 – 105 kgf/mm <sup>2</sup>
Revenido	530 - 670	Límite de fluencia	60 – 74 kgf/mm <sup>2</sup>
Recocido	750 - 850	Dureza (HB)	280 - 340
Templado	Aceite 840 - 880	Elongación	10 – 18%

### **3.7 Procesamiento y análisis de los datos**

Para el análisis cinemático y cinético del motor se utilizó el software de MATLAB, herramienta matemática que ayudó en el desarrollo de la investigación para la representación de datos matriciales, funciones y simulación del sistema del motor. El objetivo de dicho análisis fue identificar la falla de una biela de un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa, accionado por gasolina, cuando por diversas causas alcanza temperaturas elevadas, generando esfuerzos y deformaciones superiores a los límites de cedencia del material. Para este análisis, se determinó la fuerza axial generadora del máximo torque aplicado al cigüeñal del motor. Como se trata de un motor alternativo, el movimiento parte desde el punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI), recorriendo el pistón una longitud de carrera  $C=2r$  por cada vuelta del cigüeñal. Ya que se trata de un motor de cuatro tiempos, el cigüeñal dará dos vueltas por ciclo termodinámico [73]. En este caso se consideró solamente un punto donde la biela es normal a la manivela que es donde se produce el máximo toque. Se hizo el análisis el elemento finito (FEA, por su siglas en ingles *Finite Element Analysis*), para obtener una solución aproximada a este problema de ingeniería, para obtener un producto de calidad a menor costo, mejorando así procesos existentes, o para estudiar fallos de éste componente estructural. El análisis térmico por transferencia de calor, cinético y cinemático se describe en el capítulo 4 del presente trabajo.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Generalidades

Los motores de los autos, principalmente los de combustión interna (MCI), son motores donde los gases generados en la reacción exotérmica resultan de un proceso de combustión que empuja al pistón, desplazándolo en el interior de un cilindro y haciendo girar al cigüeñal. El funcionamiento cíclico de estos motores suele tener fallas constantes debido a múltiples factores entre los cuales destacan problemas con los cojinetes, fallas en las bielas, pistón, cigüeñal, entre otros.

El arranque de los motores de combustión se lleva a cabo en su cámara interna, en donde se forma el fluido activo. Esta cámara forma parte de un cilindro dentro del cual se mueve un pistón, mismo que forma parte del mecanismo en forma conjunta con la biela y el cigüeñal. Y para que un motor tenga un buen funcionamiento es necesario tener una buena lubricación, refrigeración y suministro de energía eléctrica, tal como se aprecia en la figura 20.

La lubricación debe mantener engrasados los mecanismos móviles, también sirve como refrigerante al absorber el calor disipado. Su principal función radica en la aplicación de un manto superficial de aceite recubriendo así los elementos móviles. El sistema refrigerante es el que mantiene una temperatura constante del motor durante su funcionamiento y lo hace mediante la eliminación de exceso de calor que se pudiera generar en su funcionamiento. Gracias a la energía eléctrica funcionan los dispositivos, tales como las bombas hidráulicas, agua, refrigerante, los cuales provocan el flujo que hace posible la circulación de los fluidos a lo largo de los ductos correspondientes.

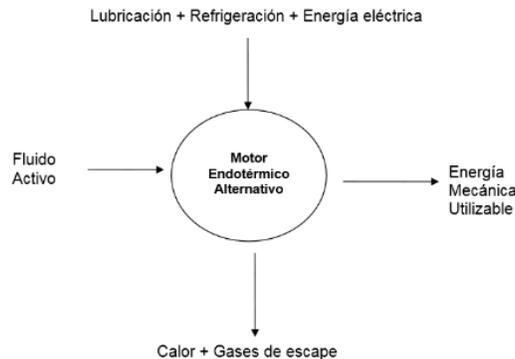


Figura 20. Diagrama de bloques de un motor de combustión interna.

## 4.2 Motor VW Golf MK4 GTI 1.8T

Para el desarrollo de esta investigación se consideró el auto VW Golf [74], tal como se aprecia en la figura 21.

Este auto tiene un motor MK4 GTI 1.8T, de cuatro cilindros con turbocompresor, formalmente conocido como el "1.8 20VT R4" e informalmente conocido simplemente como el "1.8T". Se ha utilizado en casi todas las aplicaciones de cuatro cilindros de VW. Utiliza un bloque de motor de hierro fundido y culata de aluminio con doble árbol de levas y cinco válvulas por cilindro. Parte de la fuerza inherente de este motor viene del uso de un cigüeñal de acero forjado a troque, dividido en bielas forjadas y pistones forjados. Su potencia es de 150 caballos de fuerza a 5,800 rpm. Su principal característica es su sistema de turbo y de inducción. Utiliza un turbocompresor de VW de origen, algo equivalente a un Garrett T30.

### 4.2.1 Aplicaciones del 1.8T

El 1.8T se ha utilizado en casi todos los autos que tienen cuatro cilindros de VW, como son: VW Polo GTI, Golf MkIV, Bora, Jetta, New Beetle S, Passat B5 y Sagitar. Desde Audi que es la marca de lujo de VW, el motor también se ha trasladado a los modelos en esa división, incluyendo la A3, A4, A6 y TT Quattro Sport. Otros fabricantes de automóviles en utilizar el 1.8T han sido el fabricante español SEAT (en el Leon Mk1, Cupra R y Toledo) y Skoda para su edición limitada Octavia VRS.



*Figura 21. VW Golf*

El 1.8T utiliza un bloque de motor de hierro fundido y una culata de aluminio con doble árbol de levas y cinco válvulas por cilindro. Parte de la fuerza inherente de este motor se debe al uso de un cigüeñal de acero forjado a troquel, bielas “Split forjado” y pistones Mahle forjado. El 1.8T ha llegado en docenas de diferentes configuraciones desde que se ofreció por primera vez, con potencias que van desde 150 caballos de fuerza a 5.800 rpm (en la mayoría de los polos, Golf hoteles, escarabajos y Passat) hasta 236 caballos de fuerza a 5.700 rpm para el Audi TT Quattro Sports.

En lo que respecta a la inducción, aparte de su cabeza, la principal característica del 1.8T es su sistema turbo e inducción. El turbo alimenta uno de los pocos verdaderos colectores de admisión de longitud variable en el mercado de hoy. A bajas revoluciones, el aire fluye a través de un conjunto de tubos de colada, la ingesta de largas y delgadas, para mejorar el par a bajo régimen y la facilidad de conducción. A altas revoluciones, una solapa se abre para conectar gran espacio abierto del colector de admisión (plenum) casi directamente a la culata, sin pasar por los tubos y aumentar el poder de gama alta.

### 4.3 Análisis de datos

#### 4.3.1 Análisis cinemático

El movimiento alterno del pistón se transforma en movimiento circular continuo del eje mediante el sistema biela-manivela. Para efectos de cálculo, el movimiento circular de la manivela se considera uniforme, sin error apreciable. En la figura 22 se muestra la nomenclatura que se utilizó en este análisis [73].

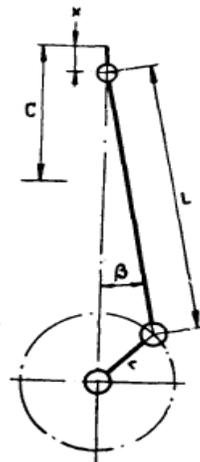


Figura 22. Nomenclatura.

Donde:

L=Longitud de la biela

r=Radio de la manivela

C=Carrera del pistón

x=Deslizamiento del pistón referido al P.M.S

$\alpha$ =Desplazamiento angular de la manivela respecto a la posición correspondiente al P.M.S

$\beta$ = Ángulo que forma el eje de la biela con el del cilindro

## I. Desplazamiento

De acuerdo a la geometría del motor y como muestra la figura 22, se obtiene la ecuación para el desplazamiento (x) correspondiente entre el PMS y PMI, donde  $\lambda$  es un parámetro de la relación del radio a la longitud de la biela, (Ver Anexo I), la cual es:

$$x = r \left( (1 - \cos \alpha) + L(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}) \right).$$

Donde:  $\lambda = \frac{r}{L}$  que representa una relación aleatoria

Si la biela fuera de longitud infinita ( $\lambda=0$ ) se desplazaría manteniéndose siempre paralela a sí misma; por lo que tendríamos la expresión simplificada

$$x = r(1 - \cos \alpha)$$

Se utilizó el software MATLAB para graficar cómo se comporta el sistema, del punto muerto superior al punto muerto inferior correspondiente a los 360 grados del movimiento de la Manivela. Se obtiene la figura 23, misma que se muestra a continuación.

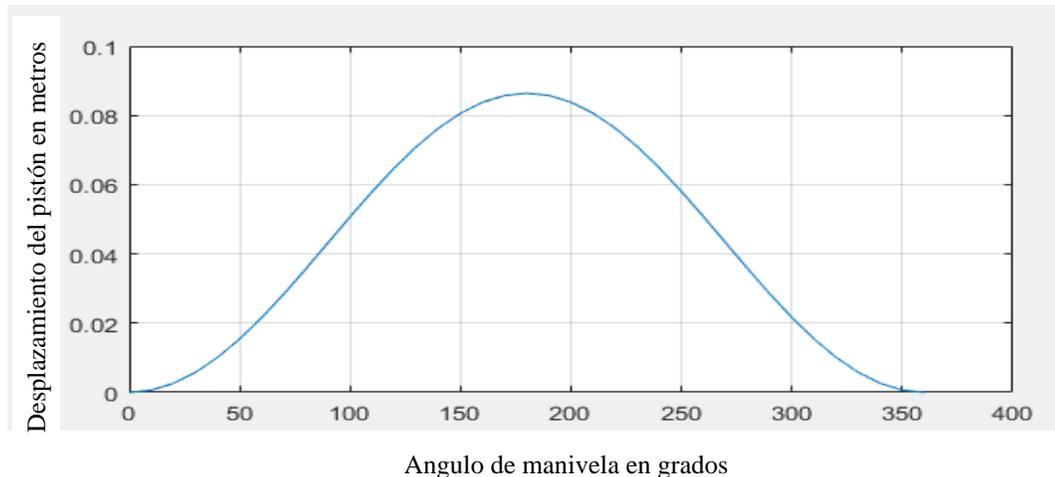


Figura 23. Desplazamiento.

## II. Velocidad

Para obtener la ecuación de la velocidad, se derivó la ecuación de desplazamiento (ver Anexo II), guardándola en una nueva variable (V), lo que se puede apreciar en la figura 24.

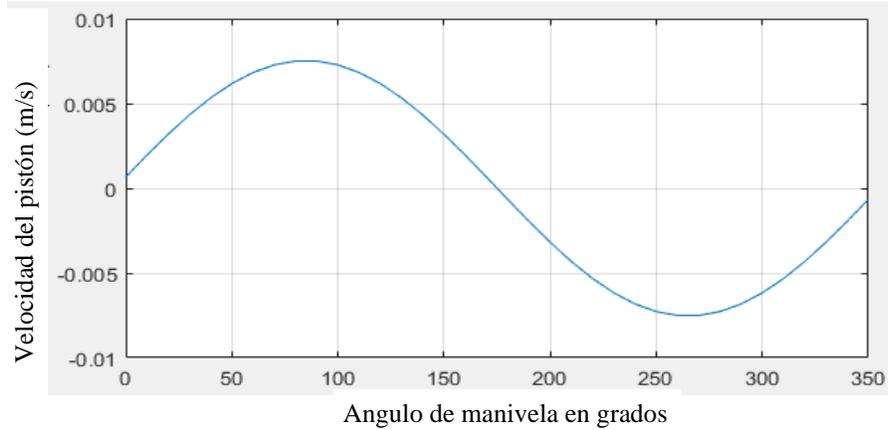


Figura 24. Velocidad del pistón

## III. Aceleración

Para obtener la ecuación de la aceleración, se derivó la ecuación de velocidad (Ver Anexo III), asignando su valor a una nueva variable (A), la cual se muestra en la figura 25.

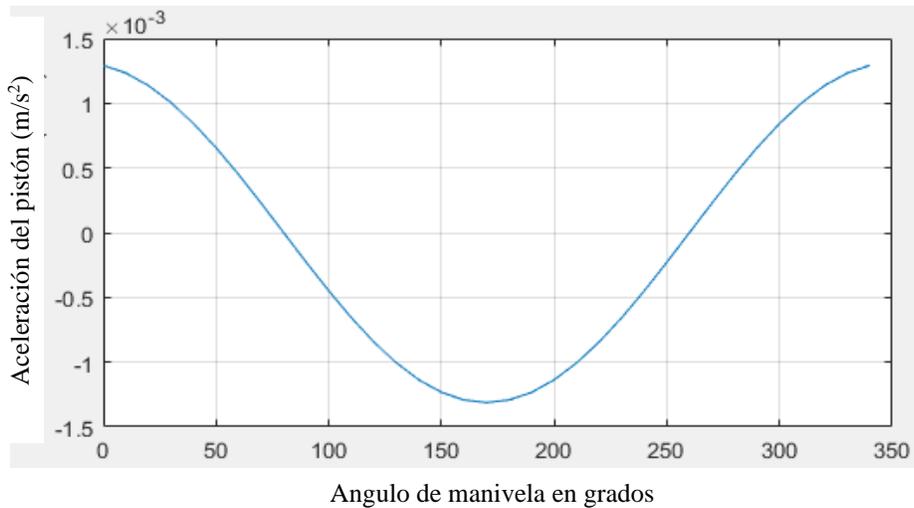


Figura 25. Aceleración del pistón.

### 4.3.2 Análisis cinético

#### I. Fuerzas alternativas de inercia

Conociendo las leyes que regulan el movimiento del conjunto biela manivela, resulta fácil obtener una relación de las fuerzas que generan dicho movimiento. En efecto, las partes dotadas de movimiento alternativo están sometidas a fuerzas de inercia calculadas por medio de la segunda ley de Newton, que, expresada en función de la segunda derivada del desplazamiento dan como resultado.

$$F = -m * \omega^2 * r (\cos \alpha + \lambda * \cos 2\alpha)$$

La primera y segunda parte de la ecuación representan, respectivamente, las fuerzas alternativas de primero y segundo orden (ver Anexo IV). En la ecuación anterior “m” corresponde a la masa de la biela, que para la muestra seleccionada tiene un valor de 0.66 kg, se muestra en la figura 26.

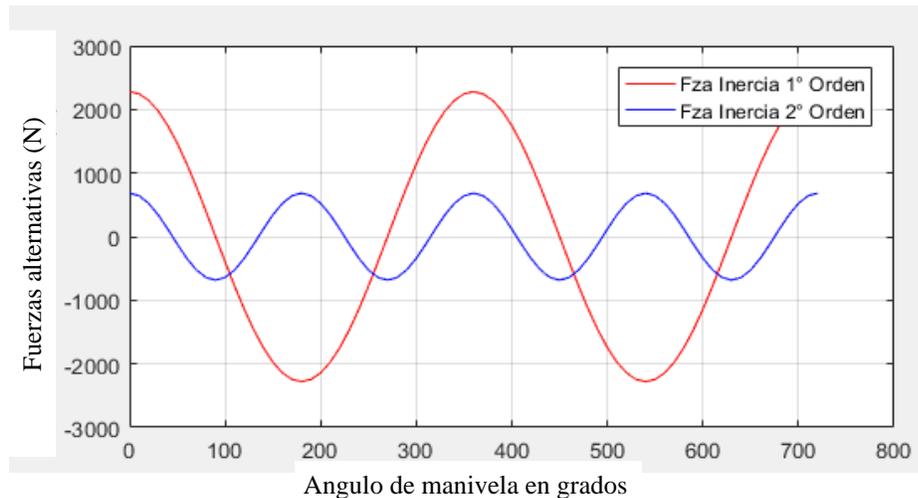


Figura 26. Fuerzas alternativas.

La fuerza axial que actúa sobre la biela varía de acuerdo a la posición cinemática. En la figura 27 se puede observar el movimiento al considerar las fuerzas debidas a la presión del gas durante el proceso de expansión. De este resultado se obtiene la fuerza máxima para posteriormente considerarla en el análisis estático de la simulación en el software de ANSYS. Los resultados se encuentran en el Anexo V, y en la figura 27 se aprecia la representación gráfica del análisis de la biela. Este análisis se hizo mediante el software de MATLAB.

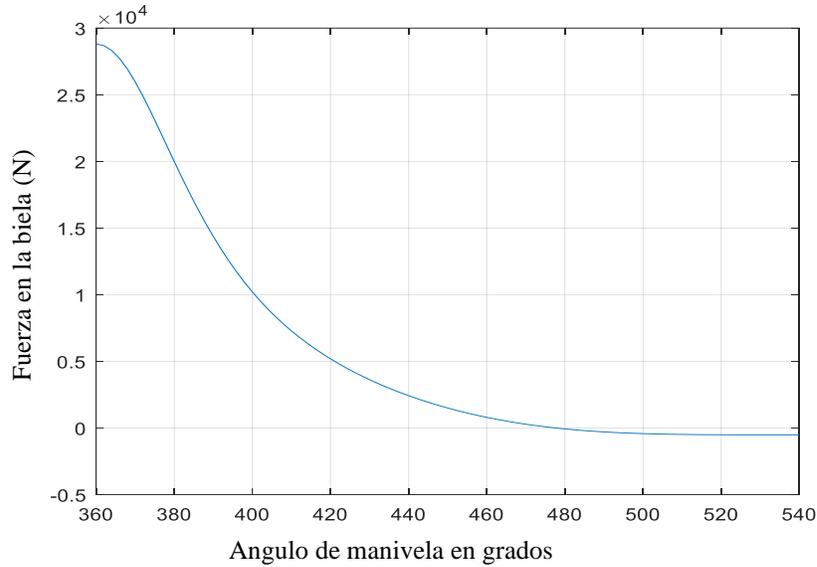


Figura 27. Fuerzas en la biela.

## II. Diagrama par-motor

La fuerza resultante que actúa sobre el pistón corresponde a la suma de las fuerzas alternativas de inercia y de la correspondiente a la presión del gas durante la explosión. Ésta equilibrada por la fuerza de reacción en la biela y varía en cada posición del movimiento. La figura 28 muestra el diagrama par motor que se utiliza para este análisis. La nomenclatura es la misma que se utilizó en el análisis cinemático, con la inclusión de las fuerzas [73].

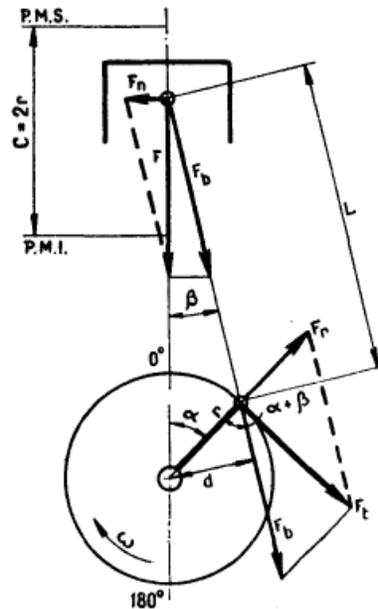


Figura 28. Diagrama par-motor.

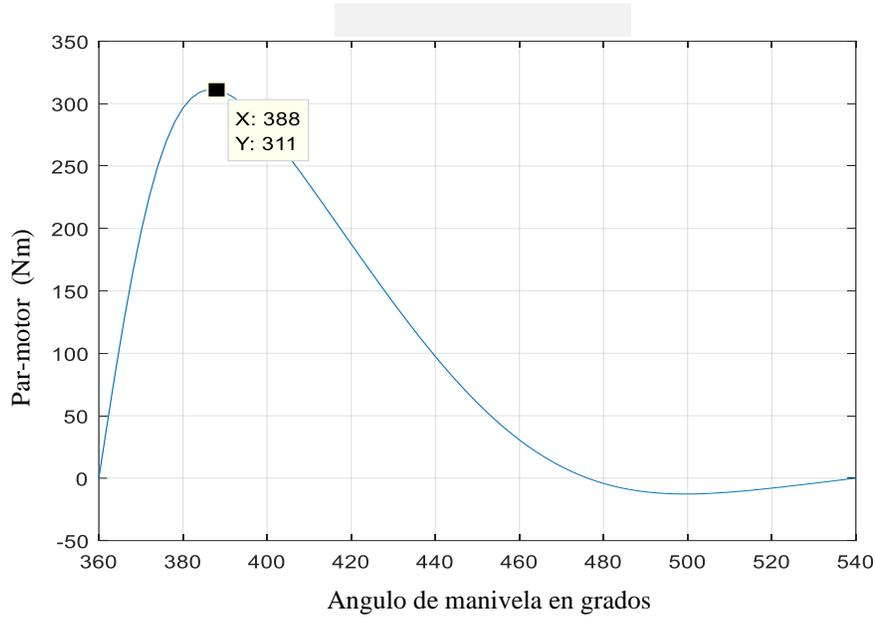


Figura 29. Par-motor de explosión.

Nuevamente mediante el software MATLAB se realiza el análisis de movimiento durante el proceso de expansión de  $360^\circ$  a  $540^\circ$ , debido a que se trata de un motor de 4 tiempos, lo que implica que el cigüeñal gire dos vueltas, correspondiéndole a la primera vuelta la admisión y compresión (Ver Anexo VI), lo cual se aprecia en la figura 29.

El punto máximo de esta gráfica, representa un par-motor de 311 N-m, que se aproxima al par motor que el fabricante ofrece para este motor seleccionado como muestra. Es importante considerar que a este punto le corresponde un ángulo de  $388^\circ$  equivalente a  $28^\circ$  a partir del punto muerto superior y será considerado para obtener la fuerza axial en la biela de su correspondiente gráfica.

### 4.3.3 Análisis termodinámico

#### I. Eficiencia del ciclo Otto ideal

La figura 30 muestra el ciclo en un diagrama P-v. La eficiencia o rendimiento del ciclo es la relación entre el trabajo neto y la cantidad de calor que entra al sistema [75].



Realizando la igualación se obtiene la temperatura para el estado dos del ciclo

$$T_2 = T_1 r^{k-1}$$

De manera similar para el proceso 3-4 de expansión isentrópica, la ecuación de proceso es:

$$P_3 V_3^k = P_4 V_4^k \therefore \frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^k = r^k$$

Y la ecuación correspondiente de los gases ideales es:

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_4 v_4}{T_4} \therefore \frac{P_3}{P_4} = \frac{v_4}{v_3} \cdot \frac{T_3}{T_4} = r \frac{T_3}{T_4} = r^k$$

Realizando la igualación correspondiente se obtiene la temperatura para el estado 3 del ciclo

$$T_3 = T_4 r^{k-1}$$

Con las relaciones de temperatura para los estados 2 y 3, se obtiene la eficiencia del ciclo Otto en función de la relación de compresión:

$$e_{otto} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_4 r^{k-1} - T_1 r^{k-1}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{r^{k-1}(T_4 - T_1)}$$

$$e = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Para el análisis de la muestra seleccionada, le corresponde una relación de compresión de  $r=9.5$ , obteniéndose una eficiencia térmica del 60%.

$$e = 1 - \frac{1}{9.5^{1.4-1}} = 0.6$$

En la figura 31, se muestra un referente de la eficiencia térmica en función de la relación de compresión para un motor Otto y Diesel [75].

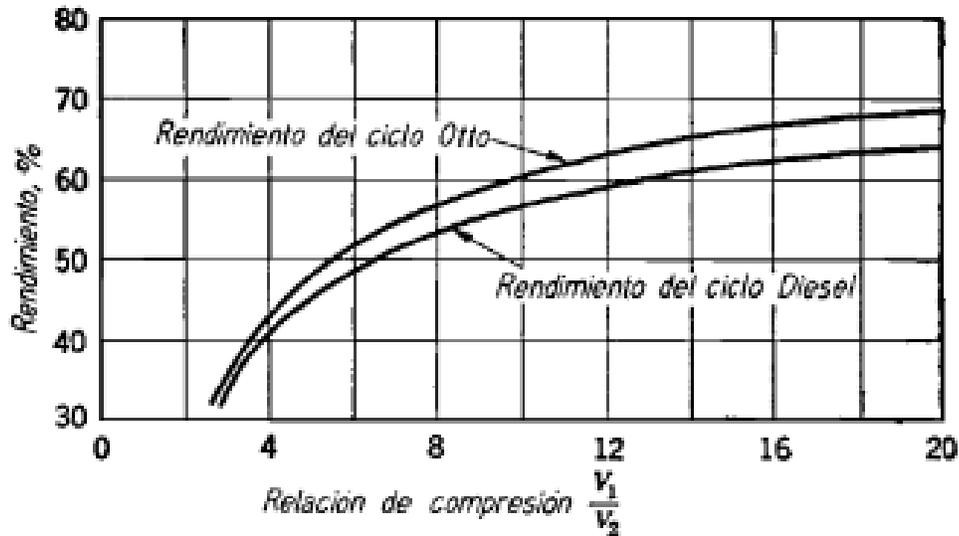


Figura 31. Eficiencia térmica.

## II. Temperatura de combustión adiabática

Cuanto más pequeña es la pérdida de calor, tanto mayor resulta el aumento de la temperatura. En el caso límite que no haya pérdida de calor hacia los alrededores ( $Q=0$ ), la temperatura de los productos alcanzará un máximo conocido como temperatura de flama adiabática o combustión adiabática.

La temperatura de flama adiabática de un proceso de combustión de flujo estacionario se determina aplicando la primera ley de la termodinámica, considerando la cámara de combustión como un volumen de control totalmente aislado (adiabático), con la siguiente ecuación:

$$H_{prod} = H_{react}$$

$$\sum N_p(h_f + h - h^\circ) = \sum N_r(h_f + h - h^\circ)$$

Dónde:  $N_p$ = número de moles de los productos

$N_r$  = número de moles de los reactivos

$h_f$ = entalpía de formación

$h - h^\circ$  = variación de entalpía

Una vez que se especifican los reactivos y los estados, resulta fácil determinar las entalpías de los reactivos. Sin embargo, debido a que la temperatura de los productos no se conoce antes de los cálculos, el cálculo de la entalpía de los productos no es directa. Por consiguiente, la determinación

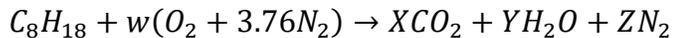
de la temperatura de flama adiabática requiere el uso de una técnica iterativa, a menos que se disponga de ecuaciones para los cambios de entalpía sensible de los productos de combustión.

La temperatura de flama adiabática, se determina luego a partir de estos dos resultados mediante interpolación. Cuando el oxidante es aire, los gases producto se componen principalmente de  $N_2$  y una buena primera suposición para la temperatura de flama adiabática, se obtiene tratando todos los gases productos como  $N_2$ . En las cámaras de combustión, la temperatura máxima a la que se puede llegar esta limitada por condiciones metalúrgicas [75]. Se analizaron los tres tipos de mezcla para motores encendidos por chispa, que corresponden a una mezcla teórica o estequiométrica, mezcla pobre y mezcla rica.

### II.1 Mezcla teórica (100 % de aire)

El modelo utilizado para los tres tipos de mezcla es una cámara de combustión, en la cual se simula la inyección de combustible octano  $C_8H_{18}$  con las cantidades de aire suministrado, siendo la composición química del aire de  $O_2 + 3.76N_2$ , lo que equivale a 79% de  $N_2$  y 21% de  $O_2$ . Tanto el combustible como el aire se consideran como los reactivos, y los gases de escape como productos, tal como se aprecia en la figura 32.

La ecuación teórica para este caso es:



Dónde: W; X; Y; Z representan los coeficientes estequiométricos, determinándose por balanceo de los elementos químicos de la ecuación:

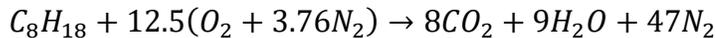
$$C: \quad 8 = X$$

$$H: \quad 18 = 2Y \quad \therefore \quad Y = 9$$

$$O: \quad 2W = 2X + Y \quad \therefore \quad W = 12.5$$

$$N: \quad 3.76(2)W = 2Z \quad \therefore \quad Z = 47$$

Se obtiene así la ecuación estequiométrica balanceada:



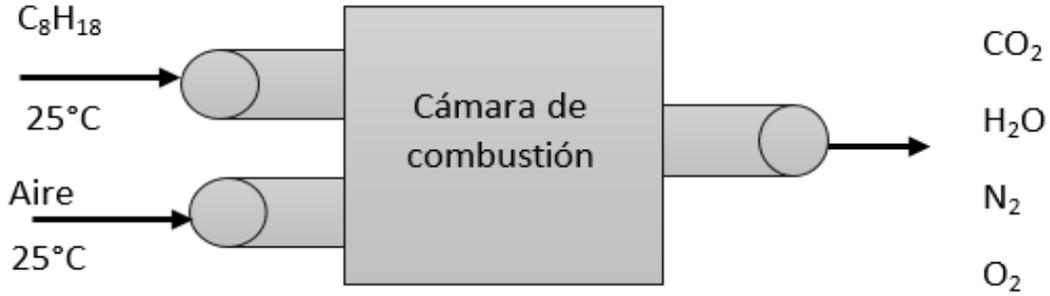


Figura 32. Cámara de combustión del motor

Aplicando Primera Ley de la Termodinámica para sistemas reactivos y considerando un proceso adiabático, se obtiene la ecuación para los tres tipos de mezcla:

$$\sum_{prod} Ni(h_{f,298} + \Delta h) = \sum_{react} Ni(h_{f,298} + \Delta h)$$

Donde:

$h_{f,298}$  = Entalpía de deformación durante la reacción

$\Delta h$  = Variación de la entalpía con respecto al estado de referencia

Los valores de entalpías para esta reacción se obtienen de las tablas A-18, A-19, A-20, A-23 y A-26 [75]. Para este caso resulta:

$$\begin{aligned} & 8[-393,520 + h_{CO_2} - 9324] + 9[-241,820 + h_{H_2O} - 9904] \\ & + 47[0 + h_{N_2} - 8,669] = 1[-249,950 + 0] - 12.5[0 + 0] - 47[0 + 0] \\ & 8h_{CO_2} + 9h_{H_2O} + 47h_{N_2} = 5,646,081 \end{aligned}$$

La solución de esta ecuación se realiza iterativamente proponiendo como inicio que toda la energía es absorbida por el  $N_2$ , ya que es el elemento que posee el mayor número de moles.

$$64h_{N_2} = 5,646,081$$

$$h_{N_2} = 88,220.015 \frac{kJ}{kmol}$$

De la tabla A-18 [75], se obtiene el valor de temperatura aproximado de

$$T = 2650^{\circ}K$$

Y tabulando la entalpía de la sustancia con su correspondiente temperatura se obtienen los valores que se muestran en la tabla 5.

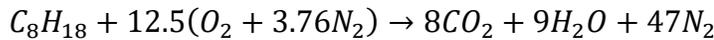
TABLA 5. VALORES DE ENTALPÍAS PARA MEZCLA TEÓRICA.

Temperatura	T=2600°K	T=2450°K	T=2200°K
Sustancia	h(kJ/kmol)		
8CO <sub>2</sub>	1099592	1025752	903512
9H <sub>2</sub> O	1028457	955647	836460
47N <sub>2</sub>	4072550	3814003	3385880
Σ	6130599	5795402	5125852

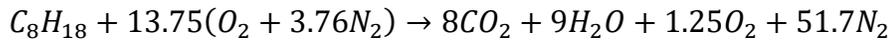
Interpolando los valores obtenidos de las entalpías entre los valores de 2450°K y 2200°K, se obtiene la temperatura:  $T = 2394.24^{\circ}K$

## II.2 Mezcla pobre (110% de aire)

La ecuación teórica es:



Ecuación real (10% exceso de aire) es:



Aplicando Primera Ley de la Termodinámica para sistemas reactivos:

$$\Sigma_{prod} Ni(h_{f,298^{\circ}} + \Delta h) = \Sigma_{react} Ni(h_{f,298^{\circ}} + \Delta h)$$

Sustituyendo los valores de las tablas A-18, A-19, A-20, A-23 y A-26 [75], se obtiene:

$$\begin{aligned} & 8[-393520 + h_{CO_2} - 9364] \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{CO_2}} + 9[-241820 + h_{H_2O} - 9904] \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{H_2O}} \\ & + 1.25[0 + h_{N_2} - 8682] \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{O_2}} + 51.7[0 + h_{N_2} - 8669] \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{N_2}} \\ & = 1[-249950 + 0] \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{C_8H_{18}}} \end{aligned}$$

$$8h_{CO_2} + 9h_{H_2O} + 1.25h_{O_2} + 51.7h_{N_2} = 5697677.8 \text{ kJ/kmol}$$

Considerando como primer análisis que todo es Nitrógeno.

$$69.95h_{N_2} = 5697677.8$$

$$h_{N_2} = 81453.57827 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

TABLA 6. VALORES DE ENTALPÍA PARA MEZCLA POBRE.

Temperatura	T=2400°K	T=2450°K	T=2200°K	T=2250°K
<b>Sustancia</b>	<b>h(kJ/kmol)</b>			
<b>8 CO<sub>2</sub></b>	1001216	1025752	903512	927872
<b>9 H<sub>2</sub>O</b>	931572	955647	836460	860058
<b>1.25 O<sub>2</sub></b>	103967.5	106390	94355	96746.25
<b>51.7 N<sub>2</sub></b>	4100844	4195403.3	3724468	3818355.2
<b>Σ</b>	6137605.5	6283192.3	5558795	5703031.45

De la tabla A-18 [75], se obtiene el valor de la temperatura

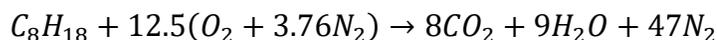
$$T = 2500^{\circ}K$$

Nuevamente tabulando la entalpía de la sustancia con su correspondiente temperatura se obtienen los valores que se muestran en la tabla 6.

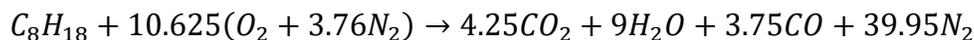
Realizando la interpolación de los valores obtenidos de las entalpías entre los valores de 2200°K y 2250°K se obtiene la temperatura:  $T = 2248.144^{\circ}K$

### II.3 Mezcla rica (85% de aire)

La ecuación teórica es la siguiente:



La ecuación real (85% de aire) es:



Aplicando la primera ley de la termodinámica para sistemas reactivos y adiabático, se obtiene:

$$\Sigma_{prod} Ni(h_{f,298^{\circ}} + \Delta h) = \Sigma_{react} Ni(h_{f,298^{\circ}} + \Delta h)$$

TABLA 7. ENTALPÍA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA EN EL ESTADO DE REFERENCIA DE 298 °K. MEZCLA RICA

Sustancia	$h_f$	$h_{298^{\circ}K}$
	KJ/Kmol	
<b>C<sub>8</sub>H<sub>18</sub></b>	-249950	-----
<b>O<sub>2</sub></b>	0	8682
<b>N<sub>2</sub></b>	0	8669
<b>H<sub>2</sub>O</b>	-241820	9904
<b>CO<sub>2</sub></b>	-393520	9364
<b>CO</b>	-110530	8669

Posteriormente tabulando la entalpía de la sustancia con su correspondiente temperatura se obtienen los valores que se muestran en la tabla 7.

Y sustituyendo los valores en la fórmula antes mencionada se obtienen los resultados siguientes:

$$\begin{aligned}
 &4.25 (-393520 + h_{CO_2} - 9364) + 3.75 (-110530 + h_{CO} - 8669) + (-241820 \\
 &\quad + h_{H_2O} - 9904) + 39.95 (0 + h_{N_2} - 8669) - 1(-249950 \\
 &\quad + 0) - 10.625 (0 + 0) - 39.95 (0 + 0) = 0 \\
 &4.25 h_{CO_2} + 3.75 h_{CO} + 9 h_{H_2O} + 39.95 h_{N_2} = 4521145.8
 \end{aligned}$$

Considerando como primer análisis que todo es Nitrógeno.

$$56.95 h_{N_2} = 4521145.8$$

$$h_{N_2} = 79387.98 = 79388 \text{ kJ/kmol}$$

De la tabla A-18 [75] de propiedades del nitrógeno se obtiene el valor de la temperatura

$$T = 2400^\circ K$$

Tabulando los valores correspondientes de la entalpía a la temperatura indicada, se muestran en la tabla 8.

Interpolando entre los valores de 2300°K y 2200°K, se obtiene la temperatura para esta mezcla,  $T = 2223.305^\circ K$

**TABLA 8. VALORES DE ENTALPÍA PARA MEZCLA RICA.**

Temperatura	T=2400	T=2300	T=2200
Sustancia	h(KJ/Kmol)		
4.25 Co <sub>2</sub>	531896	505898.75	479990.75
3.75 Co <sub>2</sub>	300056.25	286293.75	272580
9 H <sub>2</sub> O	931572	883791	836460
39.95 N <sub>2</sub>	3168834	3023256.2	2877998
Σ	4932358.25	4699239.7	4467028.75

#### 4.3.4 Temperatura real de combustión

Las temperaturas de combustión adiabática obtenidas en el apartado que aborda el tema de la temperatura de combustión adiabática, para los tres tipos de mezclas reflejan un parámetro cuantitativo, sin embargo, no es posible que el motor alcance dichos valores. Esto es debido a la Segunda Ley de la Termodinámica en su postulado de Kelvin Plank, refiriéndose precisamente al rendimiento del motor, que de acuerdo a la relación de compresión establecida se determinó que es de 60 %. Este valor equivale al máximo rendimiento posible con el cual se determinará la temperatura real del motor para los tres tipos de mezclas. Ésta temperatura será considerada para el análisis de transferencia de calor en la biela.

##### I. Mezcla teórica (100% de aire)

El poder calorífico del combustible representa la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo en un proceso de flujo estacionario. En este análisis se considera el poder calorífico inferior, debido a que el agua en los productos se considera en fase de vapor, correspondiéndole un valor de 44430 kJ/kmol [75].

Involucrando una eficiencia de 60% se determina la cantidad de calor real utilizado en los tres diagramas y mediante el análisis de estequiometría se obtiene la temperatura real correspondiente al máximo valor del ciclo en el proceso de explosión.

El análisis parte de la ecuación teórica (100% de aire), para los tres tipos de mezclas que se analizan en este apartado

De acuerdo con la primera ley de la Termodinámica, para esta reacción de combustión, la ecuación de la cantidad de calor liberado es:

$$- Q_{real} = \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)$$

El valor de  $Q_{real}$  se determina al involucrar el rendimiento de 60% del poder calorífico del combustible, y a la vez multiplicándolo por la masa molar del combustible de 114.231 kg/kmol, obteniendo un valor de  $3045170 \frac{kJ}{kmol}$ .

Los valores de  $\bar{h}_f^\circ$  y  $\bar{h}$  de los componentes a 298°K son los que se muestran, en la tabla 9 [75].

TABLA 9. ENTALPÍA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA EN EL ESTADO DE REFERENCIA DE 298 °K. MEZCLA TEÓRICA REAL

Sustancia	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298^\circ k}$ kJ/kmol
$C_8H_{18}$	-249,950	-
$O_2$	0	-
$N_2$	0	-
$CO_2$	-393,520	9,364
$H_2O$	-241,820	9,904

Sustituyendo en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & -3045170 \frac{kJ}{kmol} \\
 & = 8(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) \frac{kJ}{kmol_{CO_2}} \\
 & + 9(-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) \frac{kJ}{kmol_{H_2O}} + 47(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) \frac{kJ}{kmol_{N_2}} \\
 & - 1(-249950) \frac{kJ}{kmol_{C_8H_{18}}}
 \end{aligned}$$

Lo que genera la siguiente ecuación en función de las entalpías de los elementos de los productos, que se resuelve por el método iterativo:

$$8\bar{h}_{CO_2} + 9\bar{h}_{H_2O} + 47\bar{h}_{N_2} = 2600911 \text{ kJ/kmol}$$

Una primera suposición se obtiene al dividir el lado derecho de la ecuación por el número total de moles, lo que produce:

$$\frac{2600911 \text{ kJ}}{(8 + 9 + 47) \text{ kmol}} = 40639.23 \frac{kJ}{kmol}$$

Ya que el  $N_2$  tiene el mayor número de moles se busca en la tabla correspondiente la entalpia que se aproxime al valor obtenido, correspondiéndole un valor de  $T=1313.74^\circ K$ . A partir de este valor se proponen valores inferiores, y posteriormente realizar una interpolación lineal, como se muestra en la tabla 10 [75].

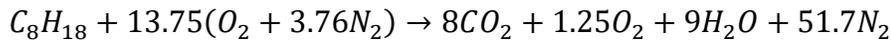
TABLA 10. VALORES DE ENTALPÍAS PARA MEZCLA TEÓRICA REAL.

Temperatura	T=1180°K	T=1200°K	T=1220°K
Sustancia	h(KJ/Kmol)		
8 CO <sub>2</sub>	421792	430784	439816
9 H <sub>2</sub> O	391581	399420	407304
47 N <sub>2</sub>	1696888	1728519	1760244
Total	2510261	2558723	2607364

Interpolando entre las temperaturas de 1200°K y 1220°K, se obtiene que la temperatura real de combustión es: **T = 1217.347 °K**

## II. Mezcla pobre (110% aire)

La ecuación real de combustión con 10% de exceso de aire es:



La ecuación de combustión de acuerdo con la primera ley de la Termodinámica:

$$-Q_{real} = \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)$$

Los valores de las entalpías  $\bar{h}_f^\circ + \bar{h}$  de las sustancias a T= 298°K son los que se muestran, en la tabla 11 [75].

Sustituyendo valores correspondientes en la ecuación se obtiene:

$$\begin{aligned} & -3045170 \frac{kJ}{kmol} \\ & = 8(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) \frac{kJ}{kmol_{CO_2}} + 1.25(0 + \bar{h}_{O_2} - 8682) \frac{kJ}{kmol_{O_2}} \\ & + 9(-241820 + \bar{h}_{H_2O} - 9904) \frac{kJ}{kmol_{H_2O}} + 51.7(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) \frac{kJ}{kmol_{N_2}} \\ & - 1(-249950) \frac{kJ}{kmol_{C_8H_{18}}} \end{aligned}$$

**TABLA 11. ENTALPIA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA EN EL ESTADO DE REFERENCIA DE 298 °K. MEZCLA POBRE REAL**

Sustancia	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298^\circ K}$ kJ/kmol
$C_8H_{18}$	-249950	-
$O_2$	0	-
$N_2$	0	-
$CO_2$	-393520	9364
$O_2$	0	8669
$H_2O$	-241820	9904

Lo que genera la siguiente ecuación:

$$8\bar{h}_{CO_2} + 1.25\bar{h}_{O_2} + 9\bar{h}_{H_2O} + 51.7\bar{h}_{N_2} = 2652507.8 \text{ kJ}$$

Una primera suposición se obtiene al dividir el lado derecho de la ecuación por el número de moles, lo que produce:

$$\frac{2652507.8 \text{ kJ}}{(8 + 1.25 + 9 + 51.7) \text{ kmol}} = 37920.0543 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$$

Ya que el  $N_2$  tiene el mayor número de moles se busca en la tabla correspondiente la entalpia que se aproxime al valor obtenido, siendo  $T=1240^\circ K$ . Nuevamente se propondrán valores inferiores a la temperatura obtenida, para obtener la entalpía correspondiente a cada sustancia, por interpolación lineal obtener el resultado correcto. Se muestran, los valores de la tabla 12 [75].

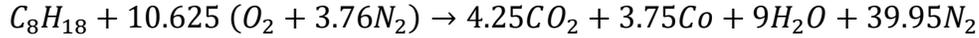
La interpolación entre las temperaturas de  $1160^\circ K$  y  $1140^\circ K$  da el resultado de la temperatura real para esta mezcla:  $T = 1151.5385^\circ K$ .

**TABLA 12. VALORES DE ENTALPÍAS PARA MEZCLA POBRE REAL.**

Temperatura	T=1200°K	T=1160°K	T=1140°K	T=1120°K
Sustancia	h(kJ/kmol)			
$8CO_2$	430784	412816	403872	394952
$1.25O_2$	48058.75	46278.75	45392.5	44507.5
$9H_2O$	399420	383778	376020	327384
$51.7N_2$	1901370.9	1831731	1797092	1762556.4
Total	2779633.65	2674603.75	2622376.5	2529399.9

### III. Mezcla rica (85% de aire)

La ecuación real de combustión incompleta genera la aparición de monóxido de carbono (CO) en los productos.



De la primera ley de la Termodinámica:

$$-Q_{real} = \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ) - \sum N_r(\bar{h}_f^\circ)$$

Los valores de  $\bar{h}_f^\circ + \bar{h}$  de los componentes a la temperatura de 298°K son los que se muestran, en la tabla 13 [75].

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$\begin{aligned} & -3045170 \frac{kJ}{kmol} \\ & = 4.25(-393520 + \bar{h}_{CO_2} - 9364) \frac{kJ}{kmol_{CO_2}} \\ & + 3.75(-110530 + \bar{h}_{CO} - 8669) \frac{kJ}{kmol_{O_2}} \\ & + 9(-241820 + \bar{h}_{HO_2} - 9904) \frac{kJ}{kmol_{HO_2}} + 39.95(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669) \frac{kJ}{kmol_{N_2}} \\ & - 1(-249950) \frac{kJ}{kmol_{C_8H_{18}}} \end{aligned}$$

$$4.25\bar{h}_{CO_2} + 3.75\bar{h}_{CO} + 9\bar{h}_{HO_2} + 39.95\bar{h}_{N_2} = 1475975.8 \text{ kJ/kmol}$$

Ésta debe resolverse por iteraciones sucesivas. Una primera suposición se obtiene al dividir el lado derecho de la ecuación por el número de moles, obteniéndose

$$\frac{1475975.8 \text{ kJ}}{(4.25 + 3.75 + 9 + 39.95) \text{ kmol}} = 25917 \frac{kJ}{kmol}$$

Ya que el  $N_2$  tiene el mayor número de moles se busca en la tabla correspondiente a esta entalpia la temperatura aproximada, siendo  $T=870^\circ\text{K}$ . Realizando un procedimiento similar a las mezclas anteriores se obtiene la tabla 14 [75].

**TABLA 13. ENTALPÍA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA EN EL ESTADO DE REFERENCIA DE 298 °K. MEZCLA RICA REAL**

Sustancia	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298^\circ k}$ kJ/kmol
$C_3H_{18}$	-249950	-
$O_2$	0	8682
$N_2$	0	8669
$CO_2$	-393520	9364
Co	-110530	8669
$H_2O$	-241820	9904

**TABLA 14. VALORES DE ENTALPÍAS PARA MEZCLA RICA REAL.**

Temperatura	T=860°K	T=850°K	T=840°K	T=830°K	T=820°K
Sustancia	h(KJ/Kmol)				
4. 25 $CO_2$	150008	147785.25	145566.75	143352.5	141151
3. 75 $CO$	96630	95422.5	94215	93011.25	91811.25
9 $H_2O$	272160	268614	265086	261558	258048
39. 95 $N_2$	1023119.5	1010415.4	997711.3	985087.1	972462.9
Total	1541917.5	1522237.15	1502579.05	1483008.85	1463473.15

Interpolando entre las temperaturas de 830°K y 820°K, se obtiene una temperatura de combustión para esta mezcla de  $T = 826.4^\circ K$

#### 4.3.5 Análisis de transferencia de calor por convección

En el apartado 4.3.3 se determinó una cantidad de calor liberado por la reacción química de combustión de  $Q = 3,045,170 \text{ kJ/kmol} = 26658 \text{ kJ/kg}$ . Esta energía en forma de calor se tomará en cuenta para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para este análisis se considera un modo de transferencia de calor por convección entre un sólido y un gas adyacente. Según Cengel, entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección [76].

De acuerdo con la ley de Newton del enfriamiento esta forma de transferencia de calor se expresa mediante la ecuación honorífica de este autor:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Dónde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección

$A_s$  = área superficial a través de la cual tiene lugar la  
transferencia de calor

$T_s$  = temperatura de la superficie

$T_\infty$  = temperatura de los gases de combustión

Para determinar el área superficial a través de la cual tiene lugar la convección, se considera un cilindro con las dimensiones de la muestra seleccionada con un tamaño de 81 mm de diámetro, por 86.4 mm de carrera, entonces:

$$A_s = \pi DL = \pi(8.1 \text{ cm})(8.64 \text{ cm}) = 219.8612 \text{ cm}^2 = 219.8612 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Es necesario determinar la rapidez o tasa de transferencia de calor, para lo cual se determina la relación aire combustible para una mezcla con 85% de aire.

$$r_{a/c} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{N_a M_a}{N_c M_c} = \frac{(10.625)(4.26)(28.97)}{114.231} = 11.5 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

Dónde:

$N_a, N_c$  corresponden al número de moles del aire y el combustible respectivamente

$M_a, M_c$  son la masa molar del aire y la mezcla respectivamente

$$\text{Desplazamiento por cilindro} = V_1 - V_2 = 1800 \text{ cm}^3/4 = 450 \text{ cm}^3$$

$$\text{Relación de compresión: } r = 9.5 = V_1/V_2$$

$$\text{Resolviendo se obtiene un volumen inicial } V_1 = 502.941 \text{ cm}^3$$

Utilizando condiciones iniciales: presión de 100 kPa y temperatura de 298°K. Mediante la ecuación de estado se determina la masa de aire:

$$m_a = \frac{P_1 V_1 M}{R_u T_1} = \frac{(100)(5.0294 \times 10^{-4})(28.97)}{(8.314)(298)} = 0.000588 \text{ kg}$$

Con la relación aire combustible se determina la masa del combustible:

$$m_c = \frac{m_a}{r_{a/c}} = \frac{0.000588}{11.5} = 0.00005113 \text{ kg}$$

El calor total liberado durante la combustión es:

$$Q = qm_c = 26658 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (0.00005113 \text{ kg}) = 1.363035 \text{ kJ}$$

El flujo de calor por cilindro para una velocidad del motor de 2700 rpm es:

$$\dot{Q} = 1.363035 \text{ KJ} \left( \frac{1}{2 \frac{\text{ciclos}}{\text{rev}}} \right) \left( 2700 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left( 1 \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \right) = 30.6682 \text{ kW}$$

Esta es la cantidad de flujo de calor que se considera para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección de la siguiente forma:

$$h = \frac{\dot{Q}_{conv}}{A_s (T_s - T_\infty)} = \frac{30668.2 \text{ W}}{(219.8612 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (25 - 553.3)^\circ \text{C}} = 2639.8355 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C}$$

#### 4.4 Simulación

Durante el presente análisis, la geometría de la biela fue elaborada en Solid Works, para posteriormente importarla al software de ANSYS en la simulación correspondiente. Se selecciona un modelo de malla refinado, tal como se muestra en la figura 33 para una solución precisa y con resultados confiables, en el análisis térmico - transitorio y estructural.

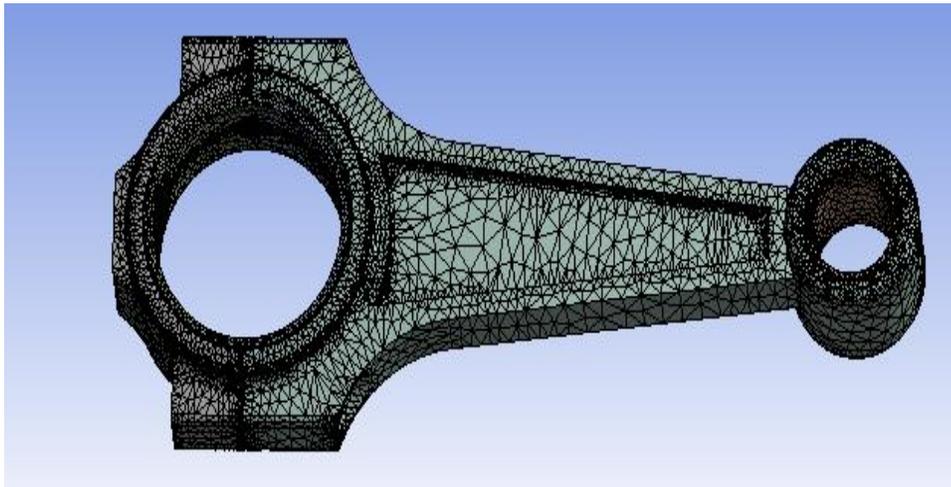


Figura 33. Modelo de malla.

Se inicia con un análisis térmico transitorio, tomando en cuenta los datos de la muestra del motor seleccionado, así como también los resultados obtenidos en el análisis térmico de combustión y por transferencia de calor. El tiempo transitorio se determina con la velocidad de rotación de 2700 rpm, tomando en cuenta que el cigüeñal gira 2 revoluciones por ciclo termodinámico, resultando ser de 0.04444 segundos. El primer resultado muestra la distribución de temperatura mediante la transferencia de calor por convección, tal como se visualiza en la figura 34.

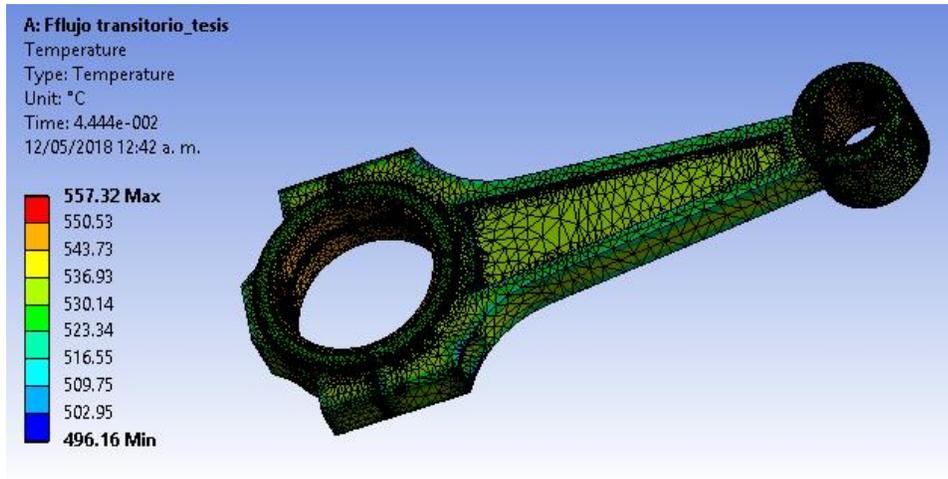


Figura 34. Distribución de temperatura.

El segundo análisis es una simulación estática estructural, vinculada con el análisis térmico transitorio, como se aprecia en la figura 35.

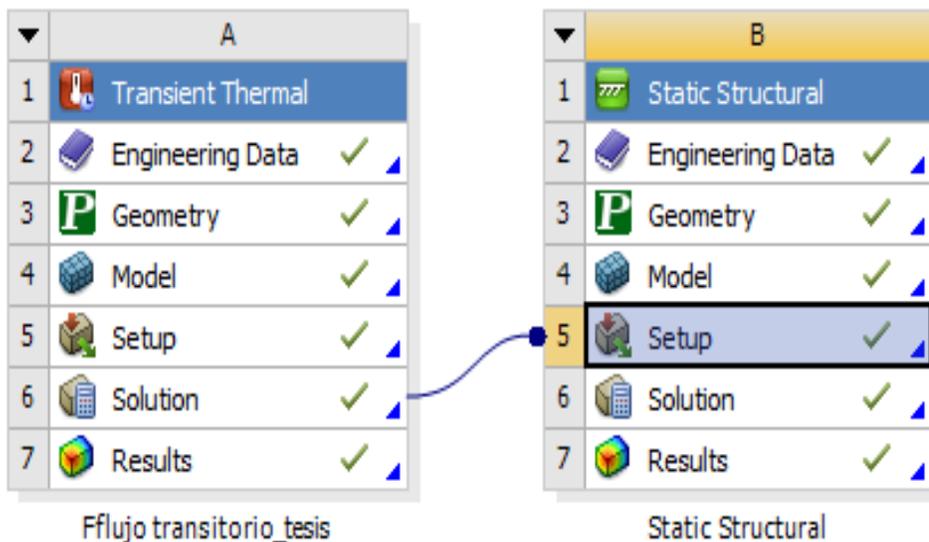


Figura 35. Flujo transitorio y estático estructural.

Para el análisis estático estructural es necesario saber la fuerza axial que actúa sobre la biela, para lo cual durante el análisis cinético realizado en el software de Matlab se obtuvieron resultados del par-motor durante el movimiento de la biela del PMS al PMI. El par máximo o torque se obtiene a los 28° a partir del PMS, punto en el cual la fuerza axial en la biela resulta ser de 15380 N. Es importante mencionar que el fabricante estima un par máximo de 300 Nm a 2700 rpm; y el software de Matlab arroja un resultado de 310 Nm. La distribución de temperatura es importada para el análisis térmico estructural, tal como se aprecia en la figura 36.

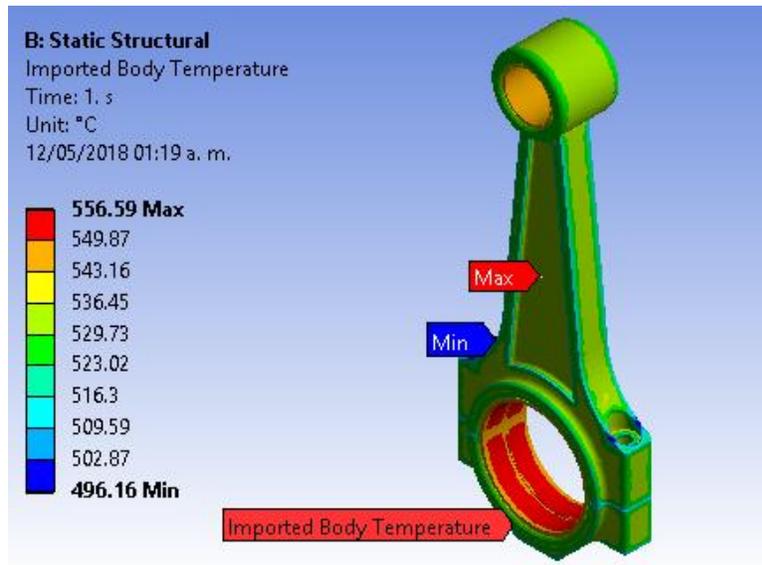


Figura 36. Importación de la temperatura de la biela

Mediante simulación final del análisis de flujo térmico-transitorio y estático-estructural, se obtienen resultados de los esfuerzos principales de Von Mises, tal como se visualiza en la figura 37.

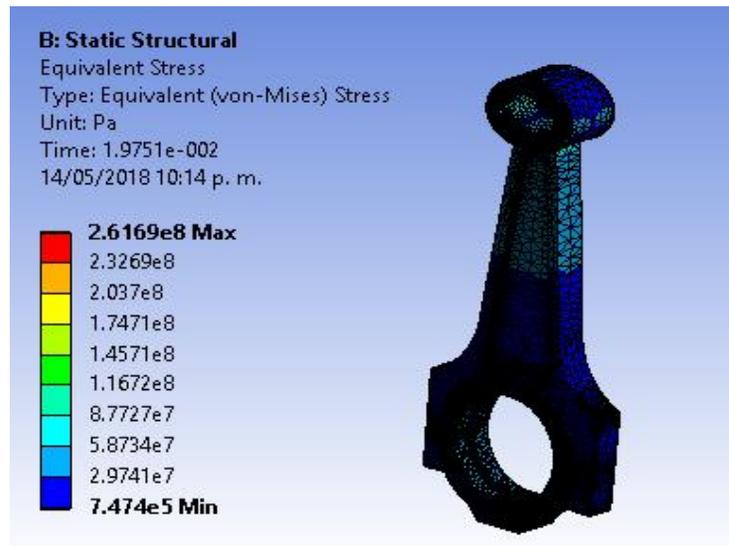


Figura 37. Estado final de esfuerzos de la biela

Un parámetro comparativo es la resistencia a la cedencia del material recomendado para la fabricación de la biela. Se utilizó para este caso un acero 4140; con una resistencia de 470 MPa (recosido), y de 862 MPa (normalizado). Durante este tiempo, la biela resiste con toda seguridad el impacto de carga y temperatura. Sin embargo, la realidad es que normalmente el motor se mantiene acelerado por más tiempo. Por ejemplo, considerando que el motor trabaje durante un minuto a la velocidad de 2700 rpm, la solución que se obtiene mediante ANSYS resulta muy considerable, ya que el sobrecalentamiento se genera por estas causas. La solución obtenida se muestra en la figura 38.

Definitivamente el esfuerzo máximo rebasa el límite de cedencia del material; esto implica que en algún momento la parte más vulnerable de la biela estará propensa a sufrir alguna fractura, lo que comúnmente se conoce como “desbielar” el motor. Esto es lo que genera mantener un motor revolucionado; aunque también existen otras causas que contribuyen al sobrecalentamiento, como un sistema deficiente de lubricación y enfriamiento, que en otro caso pueden considerarse motivo de una investigación específica.

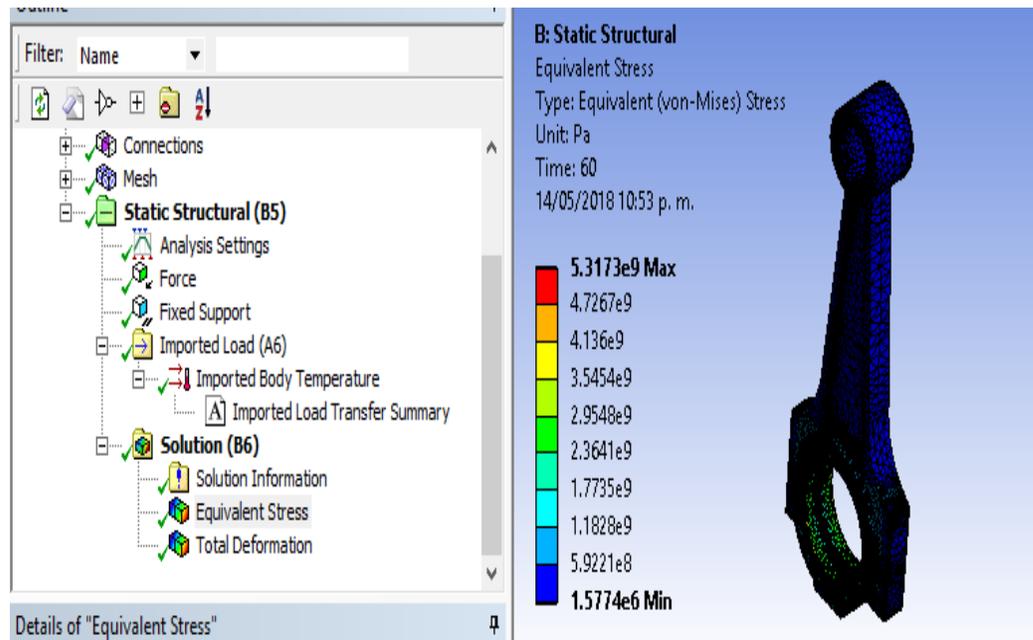


Figura. 38 Análisis por sobrecalentamiento de la biela

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Conclusiones relativas a los objetivos

**Cumplimiento del Objetivo general:** “Analizar cuáles son los elementos que causan las fallas de una biela de un motor de combustión interna de cuatro y cuatro cilindros encendido por chispa.”

A partir de los nuevos conocimientos obtenidos en esta investigación, se puede dar por cumplido el objetivo general, teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- Se realizó el análisis de los elementos que ocasionan la falla en un motor de cuatro tiempos, esto mediante el análisis cinemático, donde se consideró el desplazamiento conforme a la geometría del motor y la velocidad, tomando en cuenta el desplazamiento. De igual forma, se tomó en cuenta la aceleración y se realizó el análisis cinético.

**Cumplimiento del objetivo específico:** “Identificar el comportamiento termo estático de una biela en un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa.”

- A éste respecto, se identificó el comportamiento termo estático, mediante las leyes de la termodinámica para la eficiencia de un motor Otto ideal; así como la compresión isentrópica, la relación de compresión y gases, obteniéndose la eficiencia térmica del ciclo Otto correspondiente al 60%.

**Cumplimiento del objetivo específico:** “Determinar la fuerza axial de una biela en un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa.”

- Mediante el análisis cinético y de las fuerzas alternativas de inercia, se da por cumplido el objetivo específico. La fuerza axial que actúa sobre la biela, varía de acuerdo a la posición cinemática. También es necesario considerar las fuerzas debidas a la presión del gas durante el proceso de expansión, pues de este resultado se obtiene la fuerza máxima que actúa sobre el pistón.

**Cumplimiento del objetivo específico:** “Obtener la temperatura de combustión adiabática para una reacción de combustión estequiométrica.”

- Mediante el análisis térmico y transferencia de calor, se obtuvo la temperatura de flama adiabática, a partir de los resultados mediante interpolación. Se analizaron los tres tipos de mezcla para motores encendidos por chispa, que corresponden a una mezcla estequiométrica, una mezcla pobre y una mezcla rica. En el caso de la mezcla al 100% de aire se obtuvo una estequiométrica balanceada, donde se hizo la tabulación de la entalpía con su correspondiente sustancia, al igual que la mezcla pobre, obteniéndose una temperatura de  $T = 2248.144^{\circ}K$ . Referente a la mezcla rica, se realizó la interpolación entre los valores de  $2300^{\circ}K$  y  $2200^{\circ}K$ , resultando una temperatura para esta mezcla de  $T = 2223.305^{\circ}K$ , por lo que, se da por cumplido este objetivo específico.

**Cumplimiento del objetivo específico:** “Simular la geometría estática y estructural de la biela para identificar posibles deformaciones.”

- Se realizó la simulación con un modelo de malla refinado, en el Software de Aplicación Solid Works, donde posteriormente se importó al software ANSYS. Se inició con el análisis térmico transitorio. El tiempo transitorio se determina con una velocidad de rotación de 2700 rpm. Tomando en cuenta que el cigüeñal gira dos revoluciones por ciclo termodinámico, este tiempo resulta ser de 0.04444 segundos. El primer resultado mostró la distribución de temperatura mediante la transferencia de calor por convección.

Para el análisis estático estructural se usó el software de MATLAB. El par máximo corresponde a  $28^{\circ}$  a partir del PMS, punto en el cual la fuerza axial en la biela resulta ser de 15380 N. Es importante mencionar que el fabricante estimó un par máximo de 300 Nm a 2700 rpm, mientras que el software de MATLAB arrojó un resultado de 310 Nm. Por lo que, se da por cumplido el objetivo específico.

**Cumplimiento del objetivo específico:** “Elaborar un análisis de las posibles fallas de la biela de un motor de combustión interna de cuatro tiempos y cuatro cilindros encendido por chispa”

- Respecto al análisis cinético y cinemático se encontró que para la fabricación de la biela es recomendable la resistencia de la cedencia, es decir un acero 4140; con una resistencia de 470 MPa (recosido), y de 862 MPa (normalizado). Con estos parámetros, la biela resistirá con toda seguridad el impacto de carga y temperatura.

## **5.2 Aportaciones originales**

La presente investigación tiene cuatro aportaciones, las cuales se describen a continuación:

- Un primer aporte de esta investigación consistió en haber realizado un análisis cinemático, considerando el desplazamiento, la velocidad y aceleración, lo cual fue el objeto de estudio, para producir cambios en la biela de un motor VW Golf MK4 GTI 1.8T. Respecto a la revisión de las fuentes primarias, se encontraron los fundamentos teóricos necesarios para la elaboración de dicha investigación, que al ser analizado y aplicado dio un diagnóstico de la situación actual de las fallas de una biela.
- Una segunda aportación fue el haber realizado el análisis estático estructural para saber la fuerza axial que actúa sobre la biela. Para esto, durante el análisis cinético, se utilizó el software de MATLAB con el que se obtuvieron resultados del par-motor durante el movimiento de la biela del PMS al PMI
- La tercera aportación de esta investigación consistió en realizar un análisis térmico por transferencia de calor para poder identificar la temperatura de combustión adiabática, considerando tres tipos de mezcla que son: 100% de aire, mezcla pobre y mezcla rica. Así como la determinación de la temperatura real de combustión y sus mezclas correspondientes, para obtener la temperatura de combustión adiabática para una reacción de combustión estequiométrica.
- La cuarta aportación de esta investigación fue la generación de la geometría de la biela usando el software en Solid Works, posteriormente importada al software de ANSYS, la obtención de una solución precisa y con resultados confiables, en el análisis térmico transitorio y estructural.

|

## **5.3 Recomendaciones para futuros estudios**

Se recomienda para futuros estudios profundizar en la temática de mecánica. Los problemas que deja abiertos esta investigación para futuros estudios son los siguientes:

- Se evidencia la necesidad de que las empresas dedicadas a la fabricación de piezas mecánicas establezcan parámetros y realicen simulaciones adecuadas de las piezas que conforman los autos para que no tengan fallas en un futuro.
- Se recomienda realizar investigaciones en el área de mecánica que dé seguimiento a las líneas de investigación de termo fluidos y diseño; implementando un laboratorio de pruebas de motores de combustión interna, que aunado a la simulación los resultados serían más eficientes.
- Difusión de los resultados de esta investigación con la presentación de los mismo en congresos y revistas.
- Finalmente se recomienda realizar investigaciones correspondientes a las fallas mecánicas diferentes a las abordadas en este estudio en relación con los motores de combustión interna y los factores que inciden negativamente.

## REFERENCIAS

1. Porras, E. Rodríguez, S. y Coronado, J (2010). «*Análisis de la fractura de una biela de compresor de refrigeración,*» Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v30n1/v30n1a22.pdf>.
2. Alzallú, S, J. (2016). “ *Pistón, biela, cigüeñal y distribución en los motores*”. Obtenido de <http://www.publiaciones didácticas.com>.
3. Serrano, S. Reséndiz, R. Licon, O, y Rivera, G (2016). “*Análisis termo-estático de una biela de un motor de combustión interna encendido por chispa*”. Journal of Aplicaciones de la ingeniería, vol 1, 1-15.
4. Escudero, E. González, J. Rivas y Suarez, (2009). Madrid: *MACMILLAN Profesional*.
5. Anrango, A. (2013). “*Estudio y clasificación de los desechos de la rectificación de un motor de combustión interna*”. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec:8080/handle/21000/6413>.
6. Reyes, Cañizares y Villacres (2017). “*Análisis Mecánico del brazo de biela mediante norma ASTM e8*” Journal de Revista mensual de la UIDE extensión Guayaquil. Vol. 2, No. 5, p. 190, 204
7. Valdéz, J. Coronado, J. y García J. (2006). “*Comparación y estudio de la fractura del cigüeñal de un motor de cuatro cilindros en línea*”. Journal of Scientia et Technic.
8. Silva, F. S. Analysis of a vehicle crankshaft failure. Engineering Failure Analysis, Vol. 10, Issue 5, p. 05616, 2003.
9. Cravino, G. Cardus, H. Svoboa y H. De Rosa, (2003). “*Evaluación de la falla de una biela de automotor*”. Obtenido de <http://www.sm2000.coppe.ufrj.br/mirror/sarra/artigos/artigo10229/10229.pdf>
10. González, A. (2016). “*Diseño de una biela para un motor de combustión. Tesis de Ingeniería Mecánica*”. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valladolid, España.
11. Espinoza, T. (2016). “*Análisis Económico del Proyecto del Rectificado y/o Reconstrucción de Motores*”. Facultad de Economía, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM, Texcoco.
12. Guerrero, O. (1999). “*El motor del automóvil*”. Clara. México: Servicios de Edición Mexico S.A. de C.V. Obtenido de <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=IFME&u=pu&id=GALE|A62683467&v=2.1&it=r&sid=summon&authCount=1>

13. Riesco, A. J. M; Rivera, R. G; Belman, F. J. M; Martínez, M. S; Sánchez, C. F. A; Carrera, E. J. L (2013). “*Análisis de modelos para la simulación de motores de combustión interna*”.
14. Renzo, C. (2015). “*Motor de auto: funcionamiento, tipos y características. NeoAuto*” Recuperado de: <https://neoauto.com/noticias/novedades-cat/mercado/motor-de-auto-funcionamiento-caracteristicas-y-mantenimiento>
15. Fersainz, R. (2016). “*Mecánica básica: cómo funciona un motor de coche. AutoBild.*” Recuperado de: <https://www.autobild.es/practicos/como-funciona-motor-coche-286423>.
16. Miller, R; Miller, M. (2008). “*Industrial Electricity and Motors Control*”. United States of America: McGraw – Hill.
17. Enriquez, H. G. E. (2003). “*El ABC del control electrónico*”. México: Limusa recuperado de: <https://latam.casadellibro.com/libro-el-abc-del-control-electronico-de-las-maquinas-electricas/9789681861544/851507>
18. Ribbens, W. (2007). “*Electrónica Automotriz*”. Limusa. Recuperado de: [https://www.iberlibro.com/servlet/BookDetailsPL?bi=22767073147&searchurl=tn%3Delectronica%2Bautomotriz%2Bunderstanding%2Bautomotive%2Belectronics%26sortby%3D17%26an%3Dribbens%2Bwilliam&cm\\_sp=snippet-\\_-srp1-\\_-title1](https://www.iberlibro.com/servlet/BookDetailsPL?bi=22767073147&searchurl=tn%3Delectronica%2Bautomotriz%2Bunderstanding%2Bautomotive%2Belectronics%26sortby%3D17%26an%3Dribbens%2Bwilliam&cm_sp=snippet-_-srp1-_-title1)
19. Mallahan, J. (2016). “*El motor del automóvil*”. AutoScout. Recuperado de: <http://www.autoscout24.es/tematicas/tecnologia-del-automovil/traccion-coche/motor-coche/>
20. Giacosa, D. (1970). “*Motores endotérmicos: Motores de encendido por chispa: de carburación y de inyección. Motores de encendido por compresión diesel, lentos y veloces. Motores rotativos. Turbinas de gas. Teoría. Construcción. Pruebas*”. Editorial Hoepli
21. Miller, J. (2003). “*Power Electronics in Hybrid Electric Vehicle*”, PE, PHD, 2003.
22. Chang, G. (2000). “*Rules for the PI Gains of Field – Oriented Controllers of Induction Motors, IEEE Transactions on Industrial electronics*”, Vol. 74, No. 3, June 2000.
23. Dales, D. y Thiessen (2002). “*Manual de Electrónica Automotriz y Rendimiento del motor*”. Segunda Edición. Prentice Hall.
24. González, A. (2007). “*Motor Térmico Didáctico de Combustión Externa*”. Extraído de [http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/sitio/upload/proyectomotor\\_stirling\\_1.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/sitio/upload/proyectomotor_stirling_1.pdf)
25. Meza, J. M. (2013). “*Grupo Carman*”. Ciudad de México. Recuperado de: <http://grupocarman.com/blog/motores-de-combustion-interna-y-externa/>

26. Guerrero, O. (1999). “*El motor del automóvil. Clara. México: Servicios de Edición Mexico S.A. de C.V.*”. Obtenido de <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=IFME&u=pu&id=GALE|A62683467&v=2.1&it=r&sid=su mmon&authCount=1>
27. Fernández, F; Duarte, J. “*Módulo para la medición de variables en motores de combustión interna.*” Entramado [en línea] 2013, 9 (Julio-Diciembre): [Fecha de consulta: 16 de febrero de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265429948018>> ISSN 1900-3803
28. Groenendijk, A., and Müller, E. (2002). “*Mixture formation and combustion control for low emission DI diesel combustion with HCCI-characteristics. Proceedings THIESEL 2002, Conference on Thermo- and FluidDynamics Processes in Diesel Engines*”, pp.145-157, Valencia, Spain, September 2002.
29. Creus S. (2005). “*Análisis y Fiabilidad y seguridad*”. A. Creus Solé. Segunda parte. Ediciones Técnicas.
30. Herrera, A., García, M., Quintana, R., & Acevedo, M. (Abril - Junio de 2001). “*Recuperación de árboles cigüeñales de motores de combustión interna*”. Centro Azúcar, 28(2), 27-32. Obtenido de <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=IFME&u=pu&id=GALE|A146742423&v=2.1&it=r&sid=s ummon&authCount=1>
31. Hidalgo, B; Villavicencio, D. “*La fiabilidad en motores de combustión interna diesel estacionarios Ciencias Holguín*”, vol. XVII, núm. 2, abril-junio, 2011, pp. 1-10 Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba Holguín, Cuba
32. Llana, H, F. (1978). “*Proyecto de una biela para un motor de explosión*”.
33. Morillo, V. Imbaquingo, R. y Benavides, I. (2013). “*Determinación de la carga mecánica máxima que soportan las bielas del motor de una camioneta mazda bt-50 diésel mediante ensayos estáticos de esfuerzo experimental y por elementos finitos*”. Journal of Scientific Paper
34. Alzallú. (2016). “*Pistón, biela, cigüeñal y distribución en los motores*”. Obtenido de <http://www.publicaciones didacticas.com>.
35. Sanz, A. J. (2010). “*Análisis Cinético Químico del proceso de Auto encendido de combustible diésel en condiciones de carga homogénea*”. Departamento de mecánica aplicada e Ingeniería de proyectos. Escuela Superior de ingenieros industriales. Universidad de Castilla la Mancha.
36. Kligerman Y., Etsion I (2001). “*Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. Tribology Transactions*”, 45(4):444-449. 2002.

37. Bowden F.P., Tabor D. (2001). “*The Friction and Lubrication of Solids*”, Oxford, Clarendon Press.
38. Dec, J.E., and Kelly-Zion, P.L. (2000). “*The effects of injection timing and diluent addition on latecombustion soot burnout in a DI diesel engine based on simultaneous 2-D imaging of OH and soot*”. SAE Paper 2000-01-0238.
39. Payri. J.M. (2011). “*Motores de combustión interna alternativos*”. 2011. Editorial Reverté.
40. Goñi, J, and Rojas, D. (2014). “*Combustibles alternativos en motores de combustión interna*”. Ingeniería Industrial [en línea] 2014, (Enero-Diciembre) : [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337432679009>> ISSN 1025-9929
41. Riesco, J.M., Gallegos, A., Montefort, J.M., Martínez, S., (2005). “*Procesos alternativos de combustión en motores de combustión interna*”. Acta Univers. “itaria [en línea] 2005, 15 (enero-abril) : [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41615105>> ISSN 0188-6266.
42. Álvarez, F. A. (2012). “*Mecánica y Motores*”. Obtenido de <http://www.mecanicaymotores.com/que-es-un-cigenal.html>
43. Pulido, A: (2009). “*El cigüeñal*”. Recuperado de <https://aprendemostecnologia.org/2009/05/02/el-ciguenal/>
44. Brizmer V., Kligerman Y., Etsion I. (2003). “*A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing. Tribology Transactions*”, 46(3):397-406.
45. Etsion I., Halperin G., Brizmer V., Kligerman Y.(2004). “*Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings. Tribology Letters*”, 17(2):295-300.
46. Kovalchenko A., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G., Etsion I. (2005). “*The Effect of Laser Surface Texturing on Transitions in Lubrication Regimes During Unidirectional Sliding Contact. Elsevier. Tribology International*”, 38:219-225.
47. Suárez F.A.(2008). “*Efecto de la textura superficial en el desempeño a fricción de un cojinete plano de deslizamiento*”. Tesis (Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 124 p.
48. Suárez, B; Toro, B. & Vélez, R. (2010). “*Efecto de la textura superficial en el desempeño a fricción de cojinetes de empuje*”. Journal Ingeniería, Investigación y Tecnología.
49. Vélez, M. (2012). “*Efecto de la textura superficial en el desempeño a fricción de cojinetes de empuje*”. Research Gate. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/262623110\\_Efecto\\_de\\_la\\_textura\\_superficial\\_en\\_el\\_desempeno\\_a\\_friccion\\_de\\_cojinetes\\_de\\_empuje](https://www.researchgate.net/publication/262623110_Efecto_de_la_textura_superficial_en_el_desempeno_a_friccion_de_cojinetes_de_empuje)

50. Arias, J. (2002). “*Cojinetes y rodamientos. Rodamientos*”. Recuperado de: <https://rodamientos.wordpress.com/>
51. Espitia, M. (2015). “*Cojinetes de Fricción. MotorGIGA*”. Recuperado de: <https://motorgiga.com/diccionario/cojinete-de-friccion-definicion-significado/gmx-niv15-con193604.htm>
52. Merida, M. (2010). “*Rodamientos. Universidad de los Andes*”. Recuperado de: <http://www2.ula.ve/dsiportal/dmdocuments/elementos/RODAMIENTOS.pdf>
53. Galicia, X. (2017). “*Soporte, cojinetes y rodamientos*”. Xunta de Galicia. Recuperado de: [https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/613\\_soporte\\_cojinetes\\_y\\_rodamientos.html](https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/613_soporte_cojinetes_y_rodamientos.html)
54. Jaramillo, O. A. (2007). “*El motor de combustión interna (ciclo de Otto)*”. Obtenido de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/node45.html>
55. Jaramillo, O. A. (2008). “*Termodiámica para Ingeniería*”. México: UNAM.
56. Cengel, M. A. (2015). “*Termodinámica*”. México: Mc Graw Hill.
57. Haya, A. S. (2015). “*Motores de inyección directa de encendido por chispa: Análisis conceptual de las tecnologías e implicaciones en las prestaciones*”. Tesis de Ingeniería industrial. Facultad de Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla, España.
58. Ghadikolaei, M. (2014). “*History of gasoline direct compression ignition (GDCI) engine- A review*”. International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol.3 Issue.3 (2014) 335-342.
59. Singh, A; Lanjewar, A; Rhman, A. “*Direct Fuel Injection System in Gasoline Engine - A Review*”. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, Vol.4 Issue.4 (2014) 21-28
60. Martínez, A. V. (2007). “*Motores de combustión Interna*”. Treball de recerca
61. Romero, P. C; Carrazna. S. Y; Quintero, R. H (2009). “*Modelado del Calentamiento de los Motores de Combustión*”. Internal combustion engines warm-up modelling.
62. Serrano, S. Reséndiz, R. Licona, O y Rivera, G (2016). “*Análisis termo-estático de una biela de un motor de combustión interna encendido por chispa*”. Journal of Aplicaciones de la ingeniería, vol 1, 1-15.
63. Pérez, L. (2012). “*Reflexión sobre la cinemática y cinética. La Cinética y la cinemática*”. Recuperado de: <http://psmmara.blogspot.mx/>

64. Forno, C. (2016). “**Biomecánica**”. Universidad Pedro de Valdiva. Recuperado de: [http://academico.upv.cl/doctos/KINE-4017/%7BF54167D-14E0-4CCC-9ABA-71A014819712%7D/2012/S1/Clase2VESP%20\[Modo%20de%20compatibilidad\].pdf](http://academico.upv.cl/doctos/KINE-4017/%7BF54167D-14E0-4CCC-9ABA-71A014819712%7D/2012/S1/Clase2VESP%20[Modo%20de%20compatibilidad].pdf)
65. Suarez, G. (2012). “**Acerca del análisis cinemático. Pensar en Movimiento**”. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pem/article/view/19749/22463>
66. Sanz, J.M. (2016). “**Diseño de una biela para un motor de combustión**”, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
67. Molina, C. (2013). “**Análisis cinético**”. Elsevier. Recuperado de: <http://www.elsevier.es/es-revista-rehabilitacion-120-articulo-analisis-cinetico-cinematico-del-gesto-S0048712011000211>
68. Valverde, M. (2017). “**Análisis cinemático y cinético de la marcha. Bitstream**”. Recuperado de: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/3769/1/TD%20Valverde%20Bleda%2C%20Manuel.pdf>
69. Riesco-Ávila José Manuel. (2013). “**Análisis de modelos para la simulación de motores de combustión interna**”.
70. Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2012). “**Metodología de la investigación**”. 5ta Edición, Editorial McGraw Hill. México.
71. Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2010). “**Metodología de la investigación**”. 5ta Edición, Editorial McGraw Hill. México.
72. Herrera, A., García, M., Quintana, R., & Acevedo, M. (2001). “**Recuperación de árboles cigüeñales de motores de combustión interna**”. Centro Azúcar, 28(2), 27-32. Obtenido de <http://go.galegroup.com/ps/i.do?p=IFME&u=pu&id=GALE|A146742423&v=2.1&it=r&sid=summon&authCount=1>
73. Giacosa, D. (1989). “**Motores Endotermicos**”. México, México: Omega
74. UltimateSPECS. (2000). “**Volkswagen Golf 4 GTI 1.8T**”. Obtenido de [https://www.ultimatespecs.com/es/car-specs/Volkswagen/3126/Volkswagen-Golf-4-GTI-18T-Edition-\(210\).html](https://www.ultimatespecs.com/es/car-specs/Volkswagen/3126/Volkswagen-Golf-4-GTI-18T-Edition-(210).html)
75. Yunus A, C. (2015). “**Termodinámica (Octava ed.)**”. (S. S. Virgilio González y Pozo, Trad.) México: Mc Graw Hill.
76. Cengel, Y. A. (2016). “**Transferencia de Calor y Masa**”. México: Mc. Graw Hill

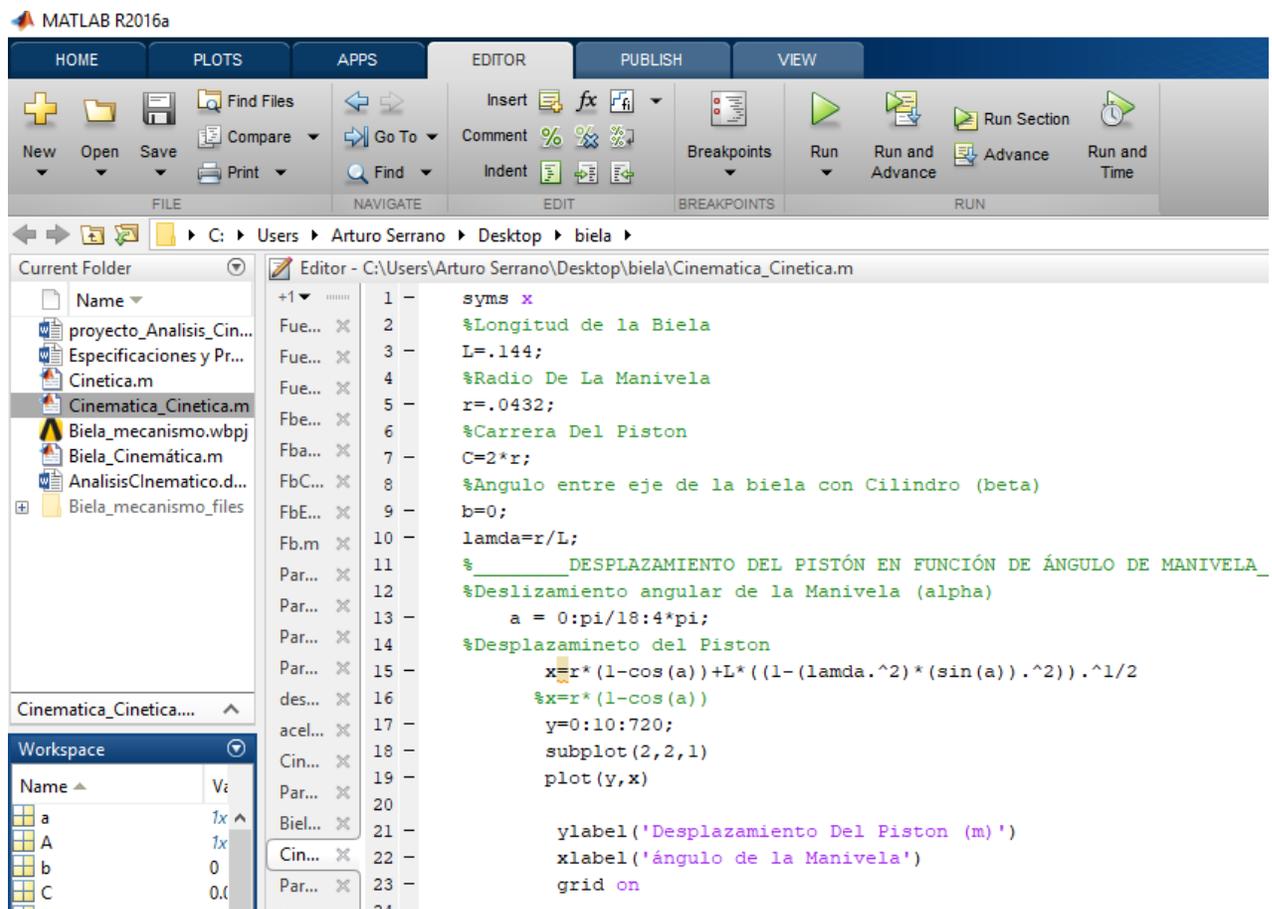
## ANEXOS

### ANEXO I

Para el análisis cinemático y utilizando la nomenclatura de la figura 22, se determinaron el desplazamiento, velocidad y aceleración correspondientes, por medio del software de MATLAB. El análisis completo corresponde al movimiento alternativo durante un ciclo termodinámico.

#### DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN.

Programa para determinar el desplazamiento “x” del pistón durante un movimiento angular de 360 grados.



The image shows a screenshot of the MATLAB R2016a software interface. The main window displays a script titled 'Cinematica\_Cinetica.m' with the following code:

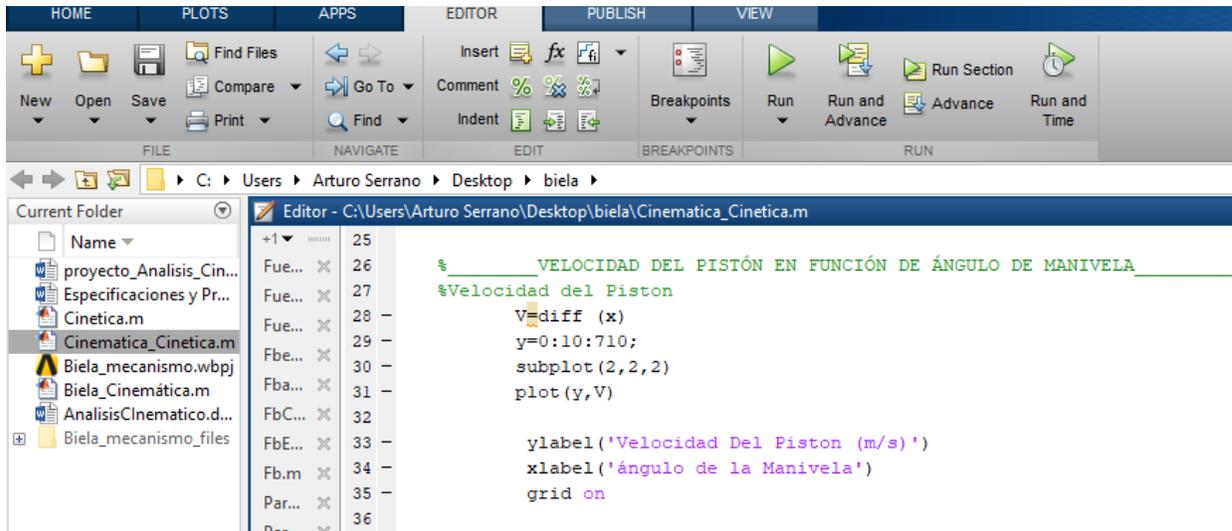
```
1 - syms x
2 - %Longitud de la Biela
3 - L=.144;
4 - %Radio De La Manivela
5 - r=.0432;
6 - %Carrera Del Piston
7 - C=2*r;
8 - %Angulo entre eje de la biela con Cilindro (beta)
9 - b=0;
10 - lamda=r/L;
11 - % _____ DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE MANIVELA_
12 - %Deslizamiento angular de la Manivela (alpha)
13 - a = 0:pi/18:4*pi;
14 - %Desplazamiento del Piston
15 - x=r*(1-cos(a))+L*((1-(lamda.^2)*(sin(a)).^2)).^1/2
16 - %x=r*(1-cos(a))
17 - y=0:10:720;
18 - subplot(2,2,1)
19 - plot(y,x)
20 -
21 - ylabel('Desplazamiento Del Piston (m)')
22 - xlabel('ángulo de la Manivela')
23 - grid on
```

The interface also shows a file explorer on the left with the current folder 'C:\Users\Arturo Serrano\Desktop\biela' and a workspace window at the bottom left containing variables 'a', 'A', 'b', and 'C'.

## ANEXO II

### VELOCIDAD DEL PISTÓN.

Programa para determinar la velocidad “v” del pistón durante un movimiento angular de 360 grados



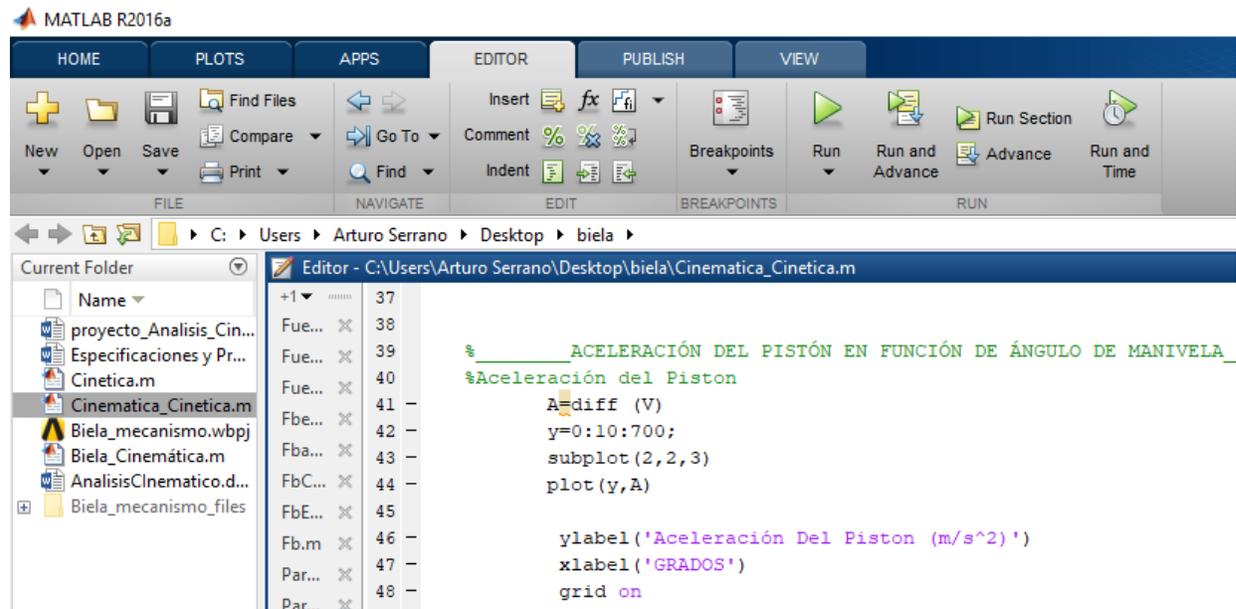
The screenshot shows the MATLAB editor interface. The title bar indicates the file path: `C:\Users\Arturo Serrano\Desktop\biela\Cinematica_Cinetica.m`. The editor contains the following MATLAB code:

```
+1 25
Fue... 26 %----- VELOCIDAD DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE MANIVELA -----
Fue... 27 %Velocidad del Piston
Fue... 28     V=diff (x)
Fue... 29     y=0:10:710;
Fbe... 30     subplot (2,2,2)
Fba... 31     plot (y,V)
FbC... 32
FbE... 33     ylabel ('Velocidad Del Piston (m/s)')
Fb.m 34     xlabel ('ángulo de la Manivela')
Par... 35     grid on
Der 36
```

## ANEXO III

### ACELERACIÓN DEL PISTÓN.

Programa para determinar la aceleración “a” del pistón durante un movimiento angular de 360 grados



The screenshot shows the MATLAB R2016a environment. The editor window displays a script named 'Cinematica\_Cinetica.m' with the following code:

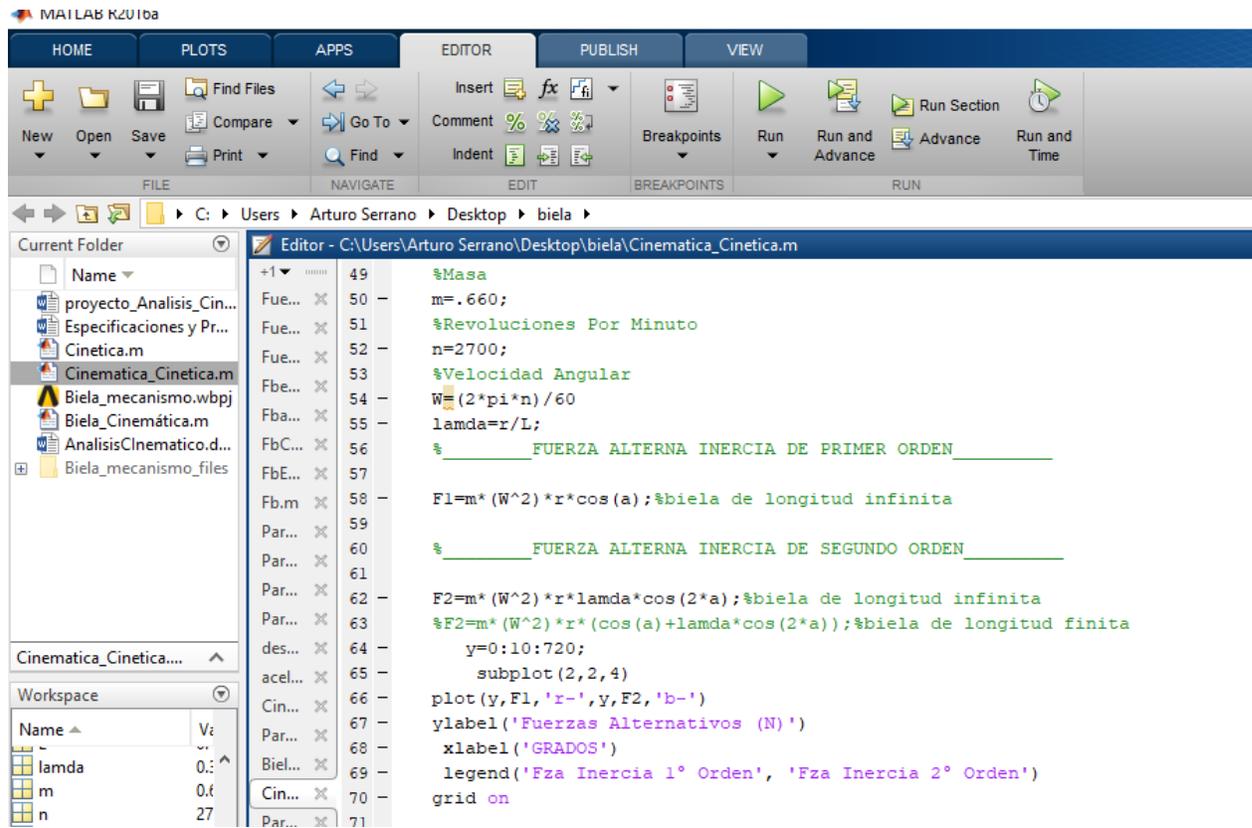
```
37  
38  
39  
40 % _____ ACELERACIÓN DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE MANIVELA_  
41 % Aceleración del Piston  
42 A=diff (V)  
43 y=0:10:700;  
44 subplot (2,2,3)  
45 plot (y,A)  
46  
47 ylabel ('Aceleración Del Piston (m/s^2)')  
48 xlabel ('GRADOS')  
49 grid on
```

## ANEXO IV

### FUERZAS ALTERNATIVAS.

En el análisis cinético, las fuerzas alternativas representan parte de la carga que actúa en el pistón, considerando la aceleración del mismo en la segunda ley de Newton. Se utilizó el software de MATLAB durante este análisis.

Programa para determinar las fuerzas alternativas de primer orden y segundo orden, durante un movimiento alternativo del pistón.



```
49 %Masa
50 m=.660;
51 %Revoluciones Por Minuto
52 n=2700;
53 %Velocidad Angular
54 W=(2*pi*n)/60
55 lamda=r/L;
56 % _____FUERZA ALTERNA INERCIA DE PRIMER ORDEN_____
57
58 F1=m*(W^2)*r*cos(a);%biela de longitud infinita
59
60 % _____FUERZA ALTERNA INERCIA DE SEGUNDO ORDEN_____
61
62 F2=m*(W^2)*r*lamda*cos(2*a);%biela de longitud infinita
63 %F2=m*(W^2)*r*(cos(a)+lamda*cos(2*a));%biela de longitud finita
64 y=0:10:720;
65 subplot(2,2,4)
66 plot(y,F1,'r-',y,F2,'b-')
67 ylabel('Fuerzas Alternativas (N)')
68 xlabel('GRADOS')
69 legend('Fza Inercia 1° Orden', 'Fza Inercia 2° Orden')
70 grid on
71
```

LA PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE DE MATLAB PARA EL DESPLAZAMIENTO, LA VELOCIDAD, LA ACELERACIÓN Y FUERZAS ALTERNATIVAS DE INERCIA ES:

```
syms x
```

```
% Longitud de la Biela
```

```
L=.144;
```

```
% Radio De La Manivela
```

```
r=.0432;
```

```
% Carrera Del Piston
```

```
C=2*r;
```

```
% Angulo entre eje de la biela con Cilindro (beta)
```

```
b=0;
```

```
lamda=r/L;
```

```
% _____ DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE  
MANIVELA _____
```

```
% Deslizamiento angular de la Manivela (alpha)
```

```
a = 0:pi/18:4*pi;
```

```
% Desplazamiento del Piston
```

```
x=r*(1-cos(a))+L*((1-(lamda.^2)*(sin(a)).^2)).^1/2
```

```
% x=r*(1-cos(a))
```

```
y=0:10:720;
```

```
subplot(2,2,1)
```

```
plot(y,x)
```

```
ylabel('Desplazamiento Del Piston (m)')
```

```
xlabel('ángulo de la Manivela')
```

```
grid on
```

```
% _____ VELOCIDAD DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE  
MANIVELA _____
```

```
% Velocidad del Piston
```

```
V=diff (x)
```

```
y=0:10:710;
```

```
subplot(2,2,2)
```

```
plot(y,V)
```

```
ylabel('Velocidad Del Piston (m/s)')
```

```
xlabel('ángulo de la Manivela')
```

```
grid on
```

```
%_____ACELERACIÓN DEL PISTÓN EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE  
MANIVELA_____
```

```
%Aceleración del Piston
```

```
A=diff (V)
```

```
y=0:10:700;
```

```
subplot(2,2,3)
```

```
plot(y,A)
```

```
ylabel('Aceleración Del Piston (m/s^2)')
```

```
xlabel('GRADOS')
```

```
grid on
```

```
%Masa
```

```
m=.660;
```

```
%Revoluciones Por Minuto
```

```
n=2700;
```

```
%Velocidad Angular
```

```
W=(2*pi*n)/60
```

```
lamda=r/L;
```

```
%_____FUERZA ALTERNA INERCIA DE PRIMER ORDEN_____
```

```
F1=m*(W^2)*r*cos(a);%biela de longitud infinita
```

```
%_____FUERZA ALTERNA INERCIA DE SEGUNDO ORDEN_____
```

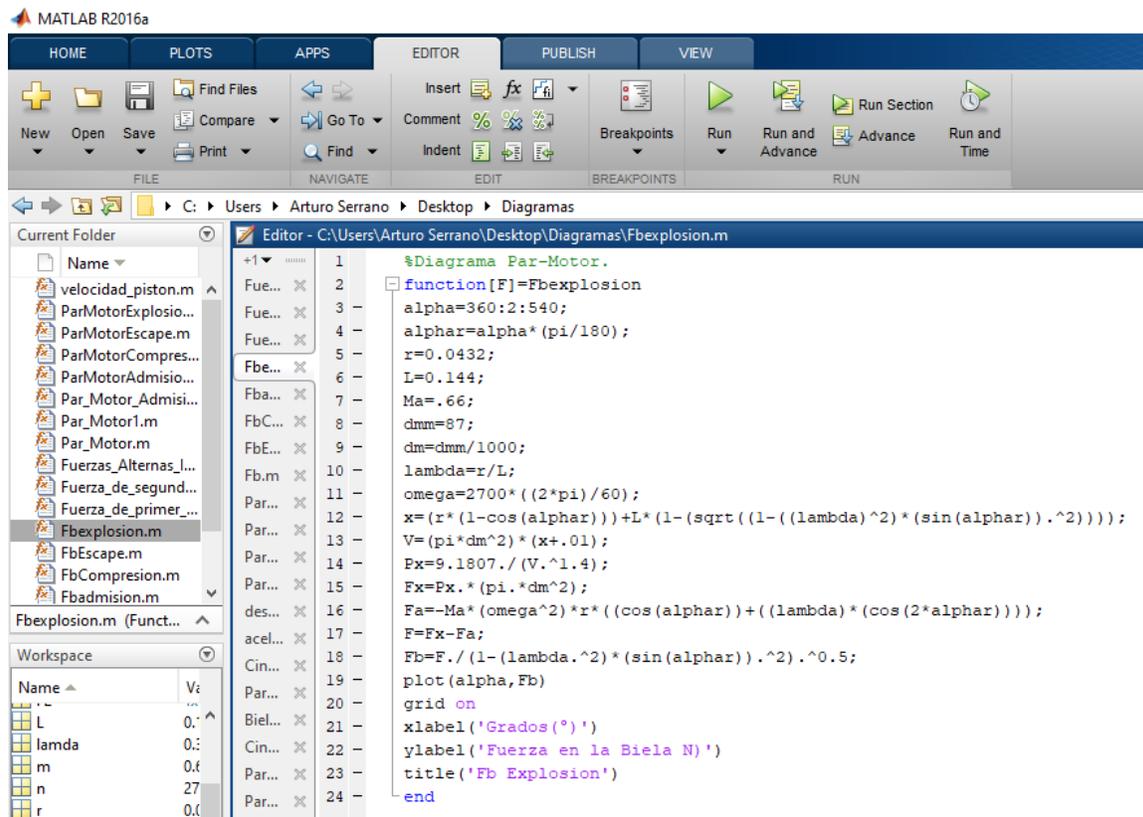
```
F2=m*(W^2)*r*lamda*cos(2*a);%biela de longitud infinita
```

```
%F2=m*(W^2)*r*(cos(a)+lamda*cos(2*a));%biela de longitud finita
y=0:10:720;
subplot(2,2,4)
plot(y,F1,'r-',y,F2,'b-')
ylabel('Fuerzas Alternativos (N)')
xlabel('GRADOS')
legend('Fza Inercia 1° Orden', 'Fza Inercia 2° Orden')
grid on
```

## ANEXO V

### ANÁLISIS DE LA FUERZA EN LA BIELA

Programa para determinar la fuerza durante el movimiento alternativo del pistón.



```
%Diagrama Par-Motor.
function[F]=Fbexplosion
alpha=360:2:540;
alphan=alpha*(pi/180);
r=0.0432;
L=0.144;
Ma=.66;
dmm=87;
dm=dmm/1000;
lambda=r/L;
omega=2700*((2*pi)/60);
x=(r*(1-cos(alphan))+L*(1-sqrt(1-(lambda)^2*(sin(alphan)).^2)));
V=(pi*dm^2)*(x+.01);
Fx=9.1807./(V.^1.4);
Fx=Fx.*(pi.*dm^2);
Fa=-Ma*(omega^2)*r*((cos(alphan))+((lambda)*(cos(2*alphan))));
F=Fx-Fa;
Fb=F./(1-(lambda.^2)*(sin(alphan)).^2).^0.5;
plot(alpha,Fb)
grid on
xlabel('Grados (°)')
ylabel('Fuerza en la Biela N')
title('Fb Explosion')
end
```

LA PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE DE MATLAB PARA LA FUERZA EN LA BIELA ES:

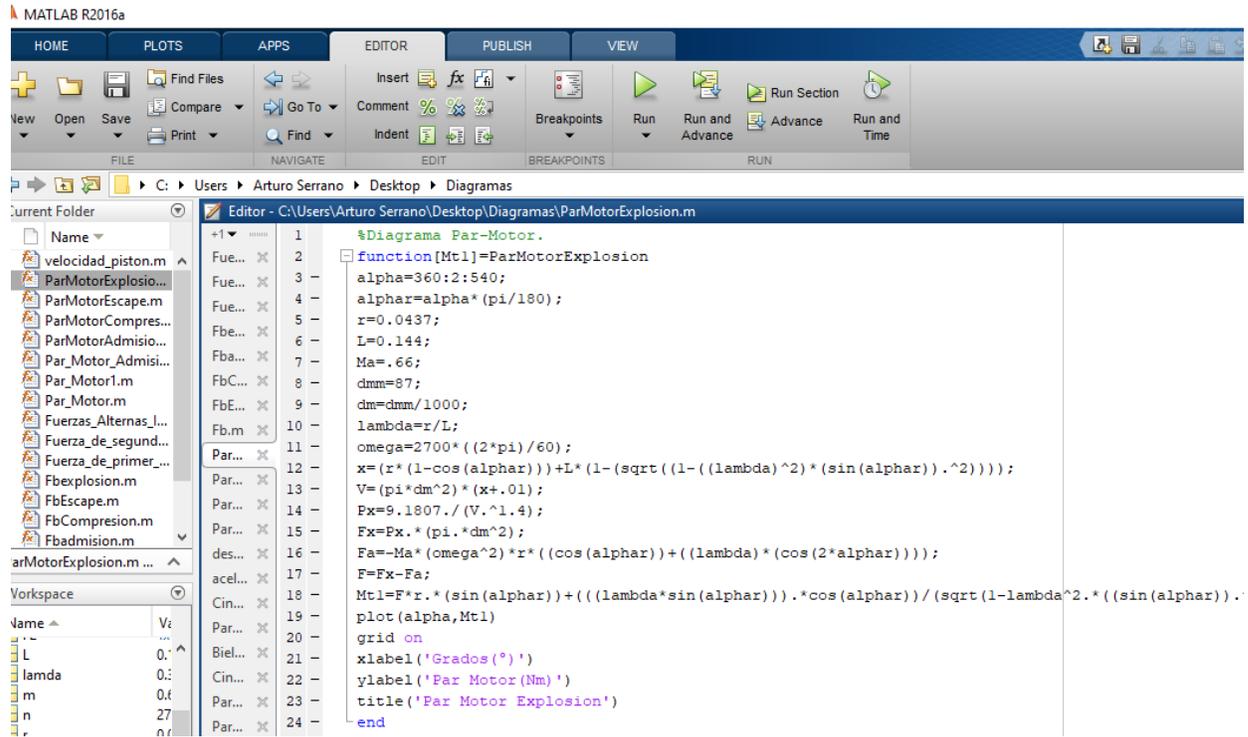
```
%Diagrama Par-Motor.
function[F]=Fbexplosion
alpha=360:2:540;
alphan=alpha*(pi/180);
r=0.0432;
L=0.144;
Ma=.66;
dmm=87;
dm=dmm/1000;
```

```
lambda=r/L;
omega=2700*((2*pi)/60);
x=(r*(1-cos(alphar))+L*(1-sqrt((1-((lambda)^2)*(sin(alphar)).^2))));
V=(pi*dm^2)*(x+.01);
Px=9.1807./(V.^1.4);
Fx=Px.*(pi.*dm^2);
Fa=-Ma*(omega^2)*r*((cos(alphar))+((lambda)*(cos(2*alphar))));
F=Fx-Fa;
Fb=F./(1-(lambda.^2)*(sin(alphar)).^2).^0.5;
plot(alpha,Fb)
grid on
xlabel('Grados(°)')
ylabel('Fuerza en la Biela N')
title('Fb Explosion')
end
```

## ANEXO VI

### DIAGRAMA PAR-MOTOR

Programa para determinar el par-motor durante el movimiento alternativo del pistón.



```
1 %Diagrama Par-Motor.
2 function[Mt1]=ParMotorExplosion
3 alpha=360:2:540;
4 alpha=alpha*(pi/180);
5 r=0.0437;
6 L=0.144;
7 Ma=.66;
8 dmm=87;
9 dm=dmm/1000;
10 lambda=r/L;
11 omega=2700*(2*pi)/60;
12 x=(r*(1-cos(alpha))+L*(1-sqrt(1-(lambda^2)*(sin(alpha))^2)));
13 V=(pi*dm^2)*(x+.01);
14 Fx=9.1807./(V.^1.4);
15 Fx=Fx.*(pi.*dm^2);
16 Fa=-Ma*(omega^2)*r*(cos(alpha)+(lambda)*cos(2*alpha));
17 F=Fx-Fa;
18 Mt1=F*r.*(sin(alpha))+((lambda*sin(alpha)).*cos(alpha))/(sqrt(1-lambda^2.*(sin(alpha)).
19 plot(alpha,Mt1)
20 grid on
21 xlabel('Grados(*)')
22 ylabel('Par Motor (Nm)')
23 title('Par Motor Explosion')
24 end
```

LA PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE DE MATLAB PARA EL PAR-MOTOR ES:

**%Diagrama Par-Motor.**

```
function[Mt1]=ParMotorExplosion
alpha=360:2:540;
alphan=alpha*(pi/180);
r=0.0437;
L=0.144;
Ma=.66;
dmm=87;
dm=dmm/1000;
lambda=r/L;
omega=2700*((2*pi)/60);
x=(r*(1-cos(alphan))+L*(1-sqrt(1-((lambda)^2)*(sin(alphan)).^2)))));
V=(pi*dm^2)*(x+.01);
Px=9.1807./(V.^1.4);
Fx=Px.*(pi.*dm^2);
Fa=-Ma*(omega^2)*r*((cos(alphan))+((lambda)*(cos(2*alphan))));
F=Fx-Fa;
Mt1=F*r.*(sin(alphan))+(((lambda*sin(alphan)).*cos(alphan))/(sqrt(1-
lambda^2.*((sin(alphan)).^2))));
plot(alpha,Mt1)
grid on
xlabel('Grados(°)')
ylabel('Par Motor(Nm)')
title('Par Motor Explosion')
end
```

## PRODUCTOS ACADÉMICOS



Otorga el presente

### Reconocimiento

a

**Serrano Arturo RESÉNDIZ ROSAS Celerino  
LICONA OLMOS Jazmín RIVERA GUTIÉRREZ Lizet**

Por su participación como ponente en el

**“III Congreso Nacional Multidisciplinario de Educación,  
Ciencia y Tecnología”**  
Con el trabajo

**Análisis termo-estático de una biela de un motor de combustión interna encendido  
por chispa**

Realizado del 15 al 17 de noviembre del presente en esta institución.

Pachuca de Soto, Hgo. a 17 de noviembre de 2017.



**ING. FRANCISCO RAFAEL SALDANA IBARRA** SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA I.T. PACHUCA  
DIRECCIÓN



## Certificate of Publication - Research Journal



RENIECYT  
CONACYT

RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA  
UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar - DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

CDMX-Mexico, November 21 - 2017

**SERRANO-SERRANO, Arturo, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino, LICONA-OLMOS, Jazmín, y RIVERA-GUTIÉRREZ, Lizet**  
*Instituto Tecnológico de Pachuca*  
**PRESENT:**

Through this letter we state that **SERRANO-SERRANO, Arturo, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino, LICONA-OLMOS, Jazmín, y RIVERA-GUTIÉRREZ, Lizet**, has been published in *Revista de Ingeniería Mecánica*, with an article entitled "**Análisis termo-estático de una biela de un motor de combustión interna encendido por chispa**", in Volume 1, Number 4, with ISSN: 2531-2189, at pages 27-33 segment.

License: Creative Commons Attribution-No commercial 2.5 Mexico and GNU/GPL

The Research Journal is Arbitrated by peer review is Indexed and deposited in Databases:

19502 For indexing in Latin America and the Caribbean  
20-281 HB9 For indexing Latin American Dating in Social Sciences and Humanities  
671 For indexing in scientific journals Electronic Spanish and Latin American  
7045008 For disclosure and publication in the Ministry of Education and Culture-Spain  
25409 For repository in the Library University-Madrid  
16258 For indexing Dialnet Foundation-University of La Rioja  
20589 For indexing in journals published in the countries of Latin America and the Caribbean-UNAM  
15048 For international registration of Congresses and Symposia-International  
2007-1582 For registration to the International Index in print  
2007-3682 For registration to the International Index in electronic format

This research is published in:

[http://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria\\_Mecanica/vol1num4/ECORFAN\\_Revista\\_de\\_Ingenieria\\_Mecanica\\_V1\\_N4\\_4.pdf](http://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria_Mecanica/vol1num4/ECORFAN_Revista_de_Ingenieria_Mecanica_V1_N4_4.pdf)

We issue this certificate for the purposes of science, technology and innovation

Regards.

**Maria Ramos-Escamilla, PhD.**  
**CEO-ECORFAN-México, S.C.**  
**CONACYT-RENIECYT: 2015-20795**

ECORFAN-México, S.C.  
244 - 2 Itzopan Street  
La Florida, Etzapa Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
Email: [comunicacion@ecorfan.org](mailto:comunicacion@ecorfan.org)

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

### Holdings

Bolivia	Honduras	China	Nicaragua
Costa Rica	Guatemala	Francia	República de Congo
El Salvador	Cuba	Ecuador	Dominico
Peru	Spain	Cuba	Haiti
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela