



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
EXTENSIÓN LATACUNGA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

“ANÁLISIS DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR QUE
FUNCIONA A HIDRÓGENO VERSUS EL MOTOR A
GASOLINA”

BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO
JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ

Tesis presentada como requisito previo a la obtención del
grado de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Año 2013

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

**Nosotros, BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO
JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ**

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“ANÁLISIS DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR QUE FUNCIONA A HIDRÓGENO VERSUS EL MOTOR A GASOLINA”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de ésta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Agosto de 2013.

BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO
C.I. 1104438377

JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ
C.I. 0503144420

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICADO

Ing. FÉLIX MANJARRÉS A. (DIRECTOR)

Ing. ERNESTO SANTILLÁN (CODIRECTOR)

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “**ANÁLISIS DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR QUE FUNCIONA A HIDRÓGENO VERSUS EL MOTOR A GASOLINA**”, realizado por el señor BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO y el señor JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Debido a que es una investigación profunda y expone temas bien fundamentados, que incentivará la investigación en temas afines, **SI** recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN documento empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan al señor BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO y al señor JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ, que lo entregue al Ing. JUAN CASTRO, en su calidad de Director de la Carrera.

Latacunga, Agosto de 2013

ING. FÉLIX MANJARRÉS A.
DIRECTOR

ING. ERNESTO SANTILLÁN
CODIRECTOR

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

Nosotros, BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO
JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el trabajo **“ANÁLISIS DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR QUE FUNCIONA A HIDRÓGENO VERSUS EL MOTOR A GASOLINA”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Agosto de 2013

BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO
C.I. 1104438377

JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSÉ
C.I. 0503144420

DEDICATORIA

La finalización de mi Carrera de Ingeniería Automotriz la dedico a mis padres, Mario Jiménez y Martha Estévez, por su apoyo a lo largo de mis estudios. También lo dedico a mis hermanos Elizabeth, Patricia y Mario por ser un pilar fundamental en mi vida.

Juan José Jiménez Estévez

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi hermana Fernanda (+) que ya no se encuentra físicamente, pero estoy seguro que en todo momento desde que se fue está cuidándome desde el cielo como mi ángel, nunca morirás porque tu recuerdo seguirá siempre latente en mi corazón, por creer siempre en mí, a ti querida hermana, te dedico mi esfuerzo. Te amo.

A toda mi familia en especial a mis padres Orlando Barreto y Rosy Granda por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, aunque hemos pasado momentos muy difíciles siempre han estado apoyándome y bríndame todo su amor.

A mis hermanos Carolina, Nataly y Luis Orlando por apoyarme incondicionalmente. Los amo mucho.

A mis dos amores Rosita y mi hija Rossy Fernanda por el sacrificio de no pasar muchos momentos juntos, apoyarme en los momentos más difíciles, ser el aliento y mi gran motivación para culminar con mis estudios.

Billy

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis profesores que me supieron enseñar ciencia, pero también lecciones de vida que me han hecho una persona con valores y principios. En especial agradezco al Ing. Félix Manjarrés y al Ing. Ernesto Santillán por su acertada guía en la elaboración de este proyecto de investigación.

Juan José Jiménez Estévez

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme llegar hasta este punto muy importante en vida, a mis padres Orlando y Rosy, a mis hermanos Carolina, Nataly y Luis Orlando, y a mis amores Rosita y Rossy Fernanda por todo el apoyo brindado, a toda mi familia en general, a mis abuelitos, tíos, primos, por su ayuda generosa en los momentos oportunos.

A mis maestros en especial al Ing. Félix Manjarrés y al Ing. Ernesto Santillán por contribuir sin egoísmo con sus sabios conocimientos y experiencias, siempre en la búsqueda de cambios radicales y en base a ciencia aportar al cuidado de nuestro planeta.

Billy

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	ii
CERTIFICADO	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xix
ANTECEDENTES	xxi
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	xxiii
JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	xxiv
OBJETIVOS	xxv
RESUMEN	xxvi
SUMMARY	xxviii
CAPÍTULO 1.....	1
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO Y LA GASOLINA.....	1
1.1 HIDRÓGENO.....	1
1.1.1 NOMENCLATURA	1
1.1.2 EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO.....	1
a. NIVELES ENERGÉTICOS ELECTRÓNICOS	2
b. ISÓTOPOS	3
1.1.3 COMPUESTOS.....	5
a. COMPUESTOS COVALENTES	5
b. HIDRUROS.....	6
c. PROTONES Y ÁCIDOS	7
1.1.4 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.....	7
a. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIDRÓGENO	7
b. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL HIDRÓGENO	8
c. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.....	9
1.1.5 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO	11
a. ESTADO GASEOSO.....	11
b. ESTADO LÍQUIDO.....	12
c. OTRAS FORMAS DE ALMACENAMIENTO.....	13
1.1.6 TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DEL HIDRÓGENO.....	14

a. FASE GASEOSA.....	14
b. FASE LÍQUIDA.....	15
1.1.7 PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO.....	16
1.1.8 MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	16
a. ELECTRÓLISIS.....	18
b. REFORMADO DE VAPOR DE GAS NATURAL.....	20
c. GASIFICACIÓN DEL CARBÓN.....	21
d. OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.....	22
e. LA BIOMASA.....	24
f. GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA.....	25
g. PIRÓLISIS DE LA BIOMASA.....	26
h. FERMENTACIÓN.....	26
i. ENERGÍA SOLAR.....	27
j. SISTEMAS ELECTROQUÍMICOS.....	27
k. SISTEMAS TERMOQUÍMICOS.....	28
l. SISTEMAS FOTOELECTROQUÍMICOS (FOTÓLISIS).....	29
m. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	30
1.2 GASOLINA.....	31
1.2.1 COMPONENTES.....	31
1.2.2 CARACTERÍSTICAS.....	31
1.2.3 ÍNDICE DE OCTANO.....	32
1.2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	32
1.2.5 GASOLINA CON PLOMO.....	34
1.2.6 EFECTOS NEGATIVOS DEL PLOMO EN LA GASOLINA.....	34
CAPÍTULO 2.....	36
ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN TEÓRICA DE MOTORES A GASOLINA E HIDRÓGENO.....	36
2.1. EL CICLO OTTO.....	36
2.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS 4 TIEMPOS CICLO OTTO.....	37
2.1.2 EL CICLO OTTO IDEAL, PROCESOS TERMODINÁMICOS.....	38
2.2 COMPOSICIÓN DE UNA MEZCLA DE GASES.....	40
2.2.1 FRACCIONES MOLARES Y DE MASA.....	40
2.2.2 PROPIEDADES DE MEZCLAS DE GASES.....	42
a. GASES IDEALES.....	42
2.3 REACCIONES QUÍMICAS.....	43
2.3.1 COMBUSTIÓN.....	43
2.3.2 ENTALPÍA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA DE COMBUSTIÓN.....	45
2.3.3 PODER CALORÍFICO.....	45
2.4 ANÁLISIS DE LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA PARA SISTEMAS REACTIVOS CERRADOS.....	46
2.4.1 TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA.....	47
2.4.2 HUMEDAD ABSOLUTA Y RELATIVA EN EL AIRE.....	47
2.4.3 PROCESOS ISOENTRÓPICOS DE GASES IDEALES.....	48
2.4.4 CALORES ESPECÍFICOS VARIABLES.....	48
2.5 PROCESO DE COMBUSTION DE HIDROGENO Y GASOLINA.....	49
2.5.1 COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO. (H_2).....	49
2.5.2 COMBUSTIÓN DE LA GASOLINA ($C_8.26H_{15}.5$).....	50
2.6 PROPIEDADES DE LOS MOTORES COMUNES.....	51
2.6.1 CILINDRADA.....	51

2.6.2 RELACIÓN DE COMPRESIÓN.....	51
2.6.3 POTENCIA INDICADA.....	52
2.6.4 PRESIÓN MEDIA EFECTIVA	52
2.7 OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS P-V DEL CICLO OTTO A GASOLINA E HIDRÓGENO.	53
2.7.1 GEOMETRÍA DE UN MOTOR Y SUS PARTES PRINCIPALES.....	53
2.7.2 DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN (S_e).....	54
2.7.3 VELOCIDAD DEL PISTÓN (V_e).....	54
2.7.4 ACELERACIÓN DEL PISTÓN (W_e).....	55
2.8 FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL MECANISMO BIELA MANIVELA.....	55
2.8.1 FUERZA $F\Sigma$	56
2.8.2 FUERZA $N\Sigma$	56
2.8.3 FUERZA $K\Sigma$	56
2.8.4 FUERZA $T\Sigma$	57
2.8.5 FUERZA $Z\Sigma$	57
2.8.6 FUERZAS DE INERCIA	57
2.9 CÁLCULOS TERMODINÁMICOS DEL CICLO OTTO A GASOLINA E HIDRÓGENO.	61
2.9.1 ANÁLISIS PARA CADA PUNTO DEL CICLO OTTO.....	62
2.10 GRÁFICAS	65
CAPÍTULO 3.....	72
DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	72
3.1 DEFINICIÓN.....	72
3.2 CLASIFICACIÓN.....	72
3.3. EL MOTOR ALTERNATIVO.....	72
3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS SEGÚN EL CICLO.	72
3.3.2 APLICACIONES DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS.....	73
3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS.	73
3.4.1 MOTOR EN V.....	73
3.4.2 MOTOR EN LÍNEA.....	74
3.4.3 CILINDROS EN OPOSICIÓN.....	75
a. EL MOTOR BÓXER.....	75
b. EL MOTOR EN V DE 180°.....	75
c. EL MOTOR DE CILINDROS HORIZONTALMENTE OPUESTOS.....	76
3.4.4 FORMA RADIAL O EN ESTRELLA.....	77
3.4.5 FORMA DE H.....	77
3.4.6 FORMA DE W.....	77
3.5 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO.....	77
3.5.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	78
3.5.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	78
a. INYECCIÓN ELECTRÓNICA.....	79
b. LA FUNCIÓN DE LA INYECCIÓN EN MOTORES A GASOLINA.....	79
3.5.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	82
a. VÁLVULAS Y ÁRBOL DE LEVAS.....	82
3.5.4 SISTEMA DE ENCENDIDO.....	83

3.5.5 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	83
3.5.6 SISTEMA DE ARRANQUE.....	84
3.6 TREN ALTERNATIVO.....	84
3.6.1 PISTONES.....	84
a. FABRICACIÓN.....	85
3.6.2 BIELA.....	86
a. PARTES DE LA BIELA.....	87
b. MATERIALES.....	88
3.6.3 CIGÜEÑAL.....	88
3.7 MATERIALES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	89
3.7.1 BLOQUE DE CILINDROS.....	89
3.7.2 PISTONES.....	90
3.7.3 BIELA.....	91
3.7.4 CULATA DE CILINDROS.....	91
3.7.5 VÁLVULAS:.....	92
3.7.6 CARTER.....	92
3.7.7 CILINDROS.....	92
3.7.8 CIGÜEÑAL.....	93
3.7.9 ÁRBOL DE LEVAS.....	94
CAPÍTULO 4.....	95
ANÁLISIS ASISTIDO POR COMPUTADOR.....	95
4.1 MODELADO DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS.....	95
4.1.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD).....	95
a. SOFTWARE INVENTOR.....	95
4.1.2 PROCEDIMIENTO DEL MODELADO.....	96
a. CREACIÓN DE UN BOCETO.....	96
b. RESTRICCIÓN DE LOS BOCETOS.....	96
c. ACOTACIÓN DE BOCETOS.....	97
4.1.3 MODELADO DEL TREN ALTERNATIVO Y EL BLOQUE DE CILINDROS DEL MOTOR EN AUTODESK INVENTOR 2013.....	98
a. MODELADO DEL CIGÜEÑAL.....	98
b. MODELADO DEL PISTÓN.....	99
c. MODELADO DE LA BIELA Y BANCADA.....	99
d. MODELADO DEL BLOQUE DE CILINDROS.....	100
4.1.4 OPERACIONES DE ENSAMBLAJE.....	101
4.1.5 RESTRICCIONES EN ENSAMBLAJES.....	102
a. INGENIERIA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE).....	103
4.2 SOFTWARE ANSYS.....	103
4.2.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	105
4.2.2 ANSYS WORKBENCH.....	106
a. STEADY-STATETHERMAL.....	106
b. STATICSTRUCTURAL Y STATICSTRUCTURAL (SAMCEF).....	106
c. TRANSIENTSTRUCTURAL.....	106
4.2.3 ENSAMBLAJE DEL TREN ALTERNATIVO EN TRANSIENT STRUCTURAL.....	107
4.2.4 DATOS DE INGENIERÍA.....	110
a. HIERRO FUNDIDO.....	111
b. ALUMINIO 6061.....	113
4.2.5 TRANSIENT (CONDICIONES INICIALES).....	114

a. ANALYSIS SETTINGS.....	114
b. THERMAL CONDITIONS.....	115
c. JOINT CONDITION.....	116
4.2.6 MALLADO DEL TREN ALTERNATIVO.....	117
CAPÍTULO 5.....	120
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	120
5.1 INTRODUCCIÓN.....	120
5.1.1 FACTOR DE SEGURIDAD	121
5.2 ANÁLISIS BIELA	122
5.2.1 DEFORMACIÓN TOTAL.....	122
5.2.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA Y MÁXIMA.	124
5.2.3 FACTOR DE SEGURIDAD	127
5.3 ANÁLISIS PISTÓN.....	129
5.3.1 DEFORMACIÓN TOTAL.....	129
5.3.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA Y MÁXIMA.	131
5.3.3 FACTOR DE SEGURIDAD.....	134
5.4 ANÁLISIS CIGÜEÑAL.....	136
5.4.1 DEFORMACIÓN TOTAL.....	136
5.4.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.	138
5.4.3 FACTOR DE SEGURIDAD	141
5.5 ANÁLISIS ESTÁTICO BLOQUE-CABEZOTE.....	143
5.5.1 DEFORMACIÓN TOTAL.....	143
5.5.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.	145
5.5.3 FACTOR DE SEGURIDAD.....	147
5.6 ANÁLISIS TÉRMICO.....	148
5.6.1 DEFORMACIÓN TOTAL.....	149
5.6.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.	151
5.6.3 FACTOR DE SEGURIDAD.....	154
CAPÍTULO 6.....	156
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
6.1 CONCLUSIONES.....	156
6.2 RECOMENDACIONES.....	158
BIBLIOGRAFÍA	160
ANEXO A: PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PIEZAS DISEÑADAS .	162
ANEXO B: DATOS DE VELOCIDADES, ACELERACIONES Y FUERZAS DEL MOTOR EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE GIRO DEL CIGÜEÑAL.....	166
ANEXO C: ARTÍCULO DEL PROYECTO.....	175
ANEXO D: PLANOS	183

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO.....	1
FIGURA 1. 2 REPRESENTACIÓN DEL PROTIO.....	3
FIGURA 1. 3 REPRESENTACIÓN DEL DEUTERIO.....	4
FIGURA 1. 4 REPRESENTACIÓN DEL TRITIO.....	5
FIGURA 1. 5 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO.....	17
FIGURA 1. 6 ESQUEMA DE LA ELECTRÓLISIS.....	18
FIGURA 1. 7 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE REFORMADO DE VAPOR.....	20
FIGURA 1. 8 ESQUEMA DE LA PRODUCCIÓN MEDIANTE OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.....	24
FIGURA 1. 9 PROCESOS SOLARES TERMOQUÍMICOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.	28
FIGURA 2. 1 CICLO OTTO REAL.	36
FIGURA 2. 2 CICLO OTTO, CUATRO TIEMPOS.	37
FIGURA 2. 3 CICLO OTTO IDEAL.	38
FIGURA 2. 4 GEOMETRÍA DEL TREN ALTERNATIVO.	53
FIGURA 2. 5 FUERZAS QUE SE GENERAN EN EL MECANISMO BIELA MANIVELA.	55
FIGURA 2.6 MODELADO DEL MECANISMO BIELA, MANIVELA, CORREDERA.....	58
FIGURA 2.7 MODELADO DEL MECANISMO BIELA, MANIVELA, CORREDERA.....	59
FIGURA 3.1 MOTOR EN V.....	74
FIGURA 3.2 MOTOR EN LÍNEA.....	75
FIGURA 3.3 CILINDROS EN OPOSICIÓN.....	76
FIGURA 3.4 INYECCIÓN DE GASOLINA.	80
FIGURA 3.5 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.	82
FIGURA 3.6 PISTÓN.	85
FIGURA 3.7 BIELA.	87
FIGURA 3.8 CIGÜEÑAL.	88
FIGURA 4.1 CREACIÓN DE UN BOCETO.	96
FIGURA 4.2 ACOTACIÓN DE BOCETO DEL PISTÓN.....	97
FIGURA 4.3 MODELADO FINAL DEL CIGÜEÑAL.....	98
FIGURA 4.4 MODELADO FINAL DEL PISTÓN.....	99
FIGURA 4.5 MODELADO FINAL DEL BRAZO DE BIELA.	100
FIGURA 4.6 MODELADO FINAL DE LA BANCADA DE BIELA.	100
FIGURA 4.7 MODELADO FINAL DEL BLOQUE.....	101
FIGURA 4.8 ENSAMBLAJE FINAL DEL TREN ALTERNATIVO PARA EL ANÁLISIS.	102
FIGURA 4.9 DIAGRAMA DE FLUJO PARA ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA).	104
FIGURA 4.10 EXPORTACIÓN DEL TREN ALTERNATIVO HACIA ANSYS.	107

FIGURA 4.11 TRANSIENTSTRUCTURAL PARA EL ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA IMPORTADA.....	108
FIGURA 4.12 CONNECTION GROUP EN EL ENSAMBLAJE DEL TREN ALTERNATIVO.....	108
FIGURA 4.13 CREATE AUTOMATIC CONNECTIONS, CREACIÓN DE LAS CONECCIONES.....	109
FIGURA 4.14 SELECCIÓN DE LAS JUNTAS EN EL ENSAMBLAJE DEL TREN ALTERNATIVO.....	110
FIGURA 4.15 DATOS DE INGENIERÍA.....	111
FIGURA 4.16. PARÁMETROS DE TIEMPO PARA LA SIMULACIÓN DEL CICLO.....	115
FIGURA 4.17. PARÁMETRO DE TEMPERATURA PARA HIDRÓGENO.....	115
FIGURA 4.18. PARÁMETROS DE TEMPERATURA PARA GASOLINA.....	116
FIGURA 4.19 FUERZA Y VELOCIDAD ROTACIONAL PARA EL HIDRÓGENO.....	116
FIGURA 4.20 FUERZA Y VELOCIDAD ROTACIONAL PARA LA GASOLINA.....	117
FIGURA 4.21 PROPIEDADES GRAFICAS EN LA GEOMETRÍA DE LAS PIEZAS PARA EL MALLADO.....	117
FIGURA 4.22 GENERAR EL MALLADO.....	118
FIGURA 4.23 MALLADO DEL TREN ALTERNATIVO.....	118
FIGURA 5.1 DEFORMACIÓN TOTAL EN LA BIELA, HIDRÓGENO.....	123
FIGURA 5.2. DEFORMACIÓN TOTAL EN LA BIELA, GASOLINA.....	123
FIGURA 5.3 TENSIÓN EQUIVALENTE EN LA BIELA, HIDRÓGENO..	125
FIGURA 5.4 TENSIÓN EQUIVALENTE EN LA BIELA, GASOLINA.....	125
FIGURA 5.5 FACTOR DE SEGURIDAD EN LA BIELA, HIDRÓGENO.	127
FIGURA 5.6 FACTOR DE SEGURIDAD EN LA BIELA, GASOLINA.....	128
FIGURA 5.7 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL PISTÓN, HIDRÓGENO.	130
FIGURA 5.8 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL PISTÓN, GASOLINA.....	130
FIGURA 5.9 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL PISTÓN, HIDRÓGENO.....	132
FIGURA 5.10 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL PISTÓN, GASOLINA.	132
FIGURA 5.11 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL PISTÓN, HIDRÓGENO.....	134
FIGURA 5.12 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL PISTÓN, GASOLINA.....	135
FIGURA 5.13 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL CIGÜEÑAL, HIDRÓGENO.....	137
FIGURA 5.14 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL CIGÜEÑAL, GASOLINA.....	137
FIGURA 5.15 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL CIGÜEÑAL, HIDRÓGENO.....	139
FIGURA 5.16 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL CIGÜEÑAL, GASOLINA.....	139

FIGURA 5.17 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL CIGÜEÑAL, HIDRÓGENO.....	141
FIGURA 5.18 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL CIGÜEÑAL, GASOLINA.	142
FIGURA 5.19 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL BLOQUE-CABEZOTE, HIDRÓGENO.....	144
FIGURA 5.20 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL BLOQUE-CABEZOTE UTILIZANDO GASOLINA.	144
FIGURA 5.21 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL BLOQUE- CABEZOTE, HIDRÓGENO.	146
FIGURA 5.22 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL BLOQUE-CABEZOTE, GASOLINA.	146
FIGURA 5.23 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO BLOQUE-CABEZOTE, HIDRÓGENO	147
FIGURA 5.24 FACTOR DE SEGURIDAD ANÁLISIS BLOQUE- CABEZOTE, GASOLINA.	148
FIGURA 5.25 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, HIDRÓGENO.....	149
FIGURA 5.26 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, GASOLINA.	150
FIGURA 5.27 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, HIDRÓGENO.....	152
FIGURA 5.28 TENSIÓN EQUIVALENTE EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, GASOLINA.	152
FIGURA 5.29 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, HIDRÓGENO.....	154
FIGURA 5.30 FACTOR DE SEGURIDAD EN EL ANÁLISIS TÉRMICO, GASOLINA.	155

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 2.1. FUERZA DE INERCIA, COMPONENTE EN X	60
GRÁFICA 2.2. FUERZA DE INERCIA, COMPONENTE EN Y	61
GRÁFICA 2.3 PRESIÓN VS. VOLUMEN DEL CICLO OTTO REAL GASOLINA E HIDRÓGENO	65
GRÁFICA 2.4 DESPLAZAMIENTO ÉMBOLO VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	66
GRÁFICA 2.5 VELOCIDAD ÉMBOLO VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	67
GRÁFICA 2.6 ACELERACIÓN ÉMBOLO VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	68
GRÁFICA 2.7 FUERZA NE VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	68
GRÁFICA 2.8 FUERZA KE VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	69
GRÁFICA 2.9 FUERZA FE VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	69
GRÁFICA 2.10 FUERZA TE VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	70
GRÁFICA 2.11 FUERZA ZE VS. ANGULO DE GIRO GASOLINA E HIDRÓGENO.....	71
GRÁFICA 5.1. DEFORMACIÓN TOTAL EN LA BIELA HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	124
GRÁFICA 5.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA EN LA BIELA HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	126
GRÁFICA 5.3 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA EN LA BIELA HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	126
GRÁFICA 5.4 FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN LA BIELA HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	128
GRÁFICA 5.5 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL PISTÓN HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	131
GRÁFICA 5.6 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA EN EL PISTÓN HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	133
GRÁFICA 5.7 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA EN EL PISTÓN HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	133
GRÁFICA 5.8 FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL PISTÓN HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	135
GRÁFICA 5.9 DEFORMACIÓN TOTAL EN EL CIGÜEÑAL HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	138
GRÁFICA 5.10 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA EN EL CIGÜEÑAL HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	140
GRÁFICA 5.11 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA EN EL CIGÜEÑAL HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	140

GRÁFICA 5.12 FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL CIGÜEÑAL HIDRÓGENO VS. GASOLINA.....	142
GRÁFICA 5.13 DEFORMACIÓN TOTAL MÍNIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	150
GRÁFICA 5.14 DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	151
GRÁFICA 5.15 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	153
GRÁFICA 5.16 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO HIDRÓGENO VS. GASOLINA.	153
GRÁFICA 5.17 FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL ANÁLISIS TÉRMICO HIDRÓGENO VS. GASOLINA...	155

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. 1 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLES.....	10
TABLA 1. 2 ENTALPÍAS DE REACCIÓN DEL PROCESO DE REFORMADO POR VAPOR	21
TABLA 1. 3 PROPIEDADES DE LA GASOLINA COMO COMBUSTIBLES.....	32
TABLA 2. 1 DATOS MOTOR DISEÑADO	61
TABLA 2. 2 VALORES CALCULADOS MOTOR DISEÑADO	62
TABLA 2. 3 RESULTADOS PROCESO DE ADMISIÓN.....	63
TABLA 2. 4 RESULTADOS PROCESO DE COMPRESIÓN.....	63
TABLA 2. 5 RESULTADOS PUNTO DE PRESIÓN MÁXIMA.....	64
TABLA 2. 6 RESULTADOS PROCESO DE ESCAPE.....	64
TABLA 4.1. CONSTANTES DEL HIERRO FUNDIDO	111
TABLA 4.2. CICLOS DE TENSIÓN	112
TABLA 4.3. PARÁMETROS DE DEFORMACIÓN.....	112
TABLA 4.4. ELASTICIDAD ISOTRÓPICA	112
TABLA 4.5. CONSTANTES DEL ALUMINIO 6061	113
TABLA 4.6. CICLOS DE TENSIÓN	113
TABLA 4.7. PARÁMETROS DE DEFORMACIÓN.....	114
TABLA 4.8. ELASTICIDAD ISOTRÓPICA	114
TABLA 5.1 DESIGNACIÓN DEL MATERIAL PARA CADA PIEZA DEL TREN ALTERNATIVO.	120
TABLA 5.2 FUERZA Y RPM APLICADAS EN EL ANÁLISIS DE LA BIELA.....	122
TABLA 5.3 RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA Y MÍNIMA EN LA BIELA.	122
TABLA 5.4 RESULTADOS DE LA TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMO Y MÍNIMO EN LA BIELA.	124
TABLA 5.5 RESULTADOS FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN LA BIELA.	127
TABLA 5.6 FUERZA, TEMPERATURA Y RPM APLICADAS EN EL ANÁLISIS DEL PISTÓN	129
TABLA 5.7 RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL PISTÓN.....	129
TABLA 5.8 RESULTADOS DE LA TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL PISTÓN DEL MOTOR A HIDRÓGENO Y A GASOLINA.....	131
TABLA 5.9 RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO DEL PISTÓN.....	134
TABLA 5.10 FUERZA Y RPM APLICADAS EN EL CIGÜEÑAL	136
TABLA 5.11 RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL CIGÜEÑAL.....	136

TABLA 5.12 RESULTADOS DE LA TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL CIGÜEÑAL.....	138
TABLA 5.13 RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL CIGÜEÑAL.	141
TABLA 5.14 PRESIÓN Y RPM APLICADAS EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO DEL BLOQUE-CABEZOTE.....	143
TABLA 5.15 RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO BLOQUE-CABEZOTE.	143
TABLA 5.16 RESULTADOS DE LA TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO DEL BLOQUE-CABEZOTE.	145
TABLA 5.17 RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO DEL BLOQUE-CABEZOTE.	147
TABLA 5.18 FUERZA, TEMPERATURA Y RPM APLICADAS EN ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR.	148
TABLA 5.19 RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN TOTAL MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR.....	149
TABLA 5.20 RESULTADOS DE LA TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL MOTOR	151
TABLA 5.21 RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD MÁXIMO Y MÍNIMO EN EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL MOTOR.....	154

ANTECEDENTES

En el proceso de la evolución de la Humanidad, se ha observado que la capacidad de desarrollo de los pueblos ha estado directamente relacionada con su capacidad de disponer, de forma continua, de recursos energéticos. La principal fuente de energía actual, el petróleo y sus derivados, no disponen de una vida ilimitada. Por el contrario, pues se prevé que en unos 40 o 50 años las reservas del mismo quedarán agotadas.

Se estima que para el 2050 las reservas de petróleo en todo el mundo se habrán agotado. La demanda de los países crece continuamente, en la actualidad China es una de los principales demandantes del petróleo y sus derivados, debido a su rápido desarrollo y por su densa población.

El problema de la contaminación derivada de la quema de combustibles en los autos a gasolina y diésel, produce el calentamiento global y el smog de las ciudades, esto hace necesaria la investigación y creación de nuevas tecnologías que sean limpias, y reemplacen a las fuentes de energía no renovables como el petróleo que usamos actualmente.

El hidrógeno será en un futuro muy cercano, un combustible limpio y menos costoso de obtener, el cual ha sido estudiado por las principales fábricas automotrices en todo el mundo, con el objetivo de utilizarlo en motores de combustión interna y en celdas eléctricas que sirvan como combustible para autos que estén al alcance de todas las personas.

El inconveniente que se presenta en la actualidad es la obtención del hidrógeno con costos bajos, ya que los procedimientos actuales son costosos y generan contaminación. Las diferentes maneras de obtener el hidrogeno pueden ser, energía eólica, a través de la electrólisis del agua,

descomposición termoquímica del agua, foto conversiones, procedimientos biológicos, producción a partir de biomasa, procedimientos industriales.

En lo que se refiere a los diseños de los motores que funcionan con hidrógeno son, en esencia, los mismos que los existentes en el caso de los motores de gasolina, teniendo en cuenta, las modificaciones pertinentes, tales como sensores, tuberías y almacenamiento del hidrógeno.

Se debe diferenciar entre los motores de combustión interna de hidrógeno con los motores con pila de combustible de hidrógeno. En los primeros, el hidrógeno se quema de la misma manera que tradicionalmente en los motores de combustión interna de gasolina.

Mientras que los autos eléctricos que utilizan el hidrógeno contienen celdas de combustible, las cuales se encargan de separar el electrón del hidrógeno para que puedan funcionar los motores eléctricos. Dentro de este contexto se han creado varios tipos de celdas de combustible, con el uso de diferentes materiales; y otros sistemas necesarios para el funcionamiento de los autos eléctricos, como los acumuladores y otros elementos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Modelar un motor mediante herramientas CAD, y comparar su funcionamiento teórico y simulado, utilizando como combustibles el hidrógeno y gasolina, para determinar de qué forma influyen dichos combustibles en el funcionamiento general, así como las posibles fallas que pueden ocasionar en el tren alternativo y en su vida útil.

Mediante el estudio teórico y las simulaciones computarizadas del funcionamiento de un motor de combustión interna de 4 cilindros en línea, se pretende determinar con exactitud el grado de mejora en el rendimiento del mismo y el rango de reducción de contaminación que producirá el motor utilizando hidrógeno como combustible.

El presente estudio pretende servir como base científica, técnica y bibliográfica sobre la aplicación del hidrógeno como combustible en el campo automotriz, para contribuir a futuras investigaciones y aplicaciones conforme el avance de la tecnología en el Ecuador.

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El estudio que se pretende realizar tiene como fin analizar las características mecánicas y térmicas del motor que utiliza hidrógeno como combustible, y compararlo con un motor que usa gasolina como combustible.

Actualmente la demanda de los combustibles que provienen del petróleo a aumentado significativamente debido al aumento del parque automotor en todo el mundo, el reto está en usar combustibles alternativos pero con las mismas o mejores prestaciones de los autos modernos, con reducción de contaminantes; es decir fuentes alternativas de energía que permitan mejorar, o a su vez tener los mismos estándares de rendimiento que tiene en estos momentos la industria automotriz.

Para que el hidrógeno pueda ser utilizado en las diferentes aplicaciones dentro del campo automotriz se requiere; estudiar sus características físicas y químicas, así como las presiones y temperaturas a las cuales se encuentra el hidrogeno en sus diferentes estados físicos.

En la actualidad el desafío de las empresas automotrices y de centros de investigación es tratar de reemplazar los autos que usan combustibles derivados del petróleo, como diesel o gasolina, por motores que utilizan combustibles alternativos, debido a la necesidad de reducir las emisiones y buscar nuevas fuentes de energía.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Modelar y analizar el funcionamiento del sistema mecánico alternativo, componentes y partes de un motor a hidrógeno y establecer una comparación de los resultados con un motor alimentado a gasolina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

- Modelar un motor de 4 cilindros en línea mediante el uso de software CAD (Computer Aided Design).
- Determinar el comportamiento del tren alternativo (biela, pistón y cigüeñal), bloque y cabezote del motor modelado, utilizando hidrógeno y luego gasolina. (Software CAE)
- Obtener los parámetros de funcionamiento, diagramas y curvas características de torque, potencia, fuerza, deformación, tensión y factor de seguridad a tensión del motor alimentado a hidrogeno.
- Obtener los parámetros de funcionamiento, diagramas y curvas características de torque, potencia, fuerza, deformación, tensión y factor de seguridad a tensión del motor alimentado a gasolina.
- Comparar los diagramas, datos y curvas características, obtenidos mediante el estudio teórico y la simulación, entre las dos fuentes de energía.

RESUMEN

Uno de los problemas de contaminación más relevantes es la gran cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en la atmosfera, atribuido a la quema de combustibles fósiles principalmente en los autos, considerado el causante del calentamiento global.

En estos días es imperante el desarrollo de estudios que permitan usar nuevas fuentes de energía que reemplacen al petróleo y sus respectivos derivados. Esto se lo puede realizar con la difusión de nuevas tecnologías automotrices como son: vehículos eléctricos con baterías, vehículos con celdas de hidrógeno o vehículos con motores de combustión a hidrógeno.

El interés por el hidrógeno como combustible para autos surge por su alto nivel de energía específica y también por su capacidad de no emitir residuos carbonosos durante su utilización para generar energía, siendo el agua el único residuo después del proceso de oxidación del hidrógeno.

El presente trabajo presenta una investigación sobre el motor de combustión interna que funciona con hidrógeno, realizando simulaciones computarizadas se pretende comparar el funcionamiento de un motor que usa tanto gasolina como hidrógeno, que permitan observar la viabilidad de transformar un motor de gasolina a hidrógeno, o que permita el diseño de motores para trabajar de forma exclusiva con hidrógeno.

En el capítulo 1 se describe al hidrógeno y a la gasolina, tomando en cuenta sus propiedades físicas y químicas; así como su comportamiento como combustible para motores de combustión interna. Se detallan los tipos de compuestos que pueden formar. Los estados físicos a los cuales pueden ser almacenados son tratados en este capítulo. Se detalla las

diferentes formas de obtención del hidrógeno para uso automotriz en particular, como electrólisis y reformado de vapor entre otros.

En el capítulo 2 se presentan los cálculos de fuerza, presión y temperatura para cada punto del ciclo Otto de un motor de combustión interna de encendido por chispa. En función a las propiedades y constantes de la gasolina y del hidrógeno se procedió a realizar estos cálculos. Aquí se presentan las gráficas de esfuerzos que se producen en el motor.

En el capítulo 3 se describen los sistemas de un motor de combustión interna. Se detallan las partes que conforman el tren alternativo de un motor. Se exponen los diferentes materiales utilizados en la elaboración de un motor convencional.

En el capítulo 4 se describe el proceso de diseño de un motor 4 en línea, con el uso de Autodesk Inventor. Se describe también el uso del módulo Workbench del Ansys, la cual permite realizar las diferentes simulaciones del funcionamiento del motor diseñado, utilizando los dos tipos de combustibles analizados.

En el capítulo 5 se tabulan, grafican y se analizan los diferentes resultados obtenidos y se comparan los resultados en función del tipo de combustible utilizado.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó al finalizar este proyecto de investigación.

SUMMARY

One of the major pollution problems is the large amount of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, attributed to the burning of fossil fuels mainly in cars, that produces global warming.

These days it is imperative to develop studies to use new energy sources to replace oil and their derivatives, such as hydrogen. It could be done with the spread of new automotive technologies such as: battery electric vehicles, hydrogen fuel cell vehicles or vehicles with hydrogen combustion engines.

Interest in hydrogen as a fuel for cars comes from its high specific energy and also for its ability to emit no carbon residues during its use, water being the only residue after hydrogen oxidation process.

This thesis presents an investigation into the internal combustion engine that runs on hydrogen, performing computer simulations is to compare the performance of an engine that uses both gasoline and hydrogen, which allow us to observe the viability of a gasoline engine converted to hydrogen or that allows the design of engines to work exclusively with hydrogen.

Chapter 1 describes the hydrogen and gasoline, taking into account their physical and chemical properties as well as their behavior as a fuel for internal combustion engines. Are the types of compounds that can be formed. Physical states which can be stored are discussed in this chapter. Detailed the different ways of obtaining hydrogen in particular for automotive use, such as electrolysis and steam reforming among others.

Chapter 2 presents the calculations of force, pressure and temperature for each point of the Otto cycle internal combustion engine ignition. Depending on the properties and constants of hydrogen gas and proceeded to perform these calculations. Here are the graphs of strain produced in the engine.

Chapter 3 describes the systems of an internal combustion engine. It details the parts that make up the moving assembly. We describe the different materials used in the manufacture of a conventional engine.

Chapter 4 describes the process of designing an inline-4 engine, using Autodesk Inventor. Also described Workbench of Ansys tool, which allows the different simulations designed engine operation, using the two types of fuels studied.

Chapter 5 are tabulated, graphed and analyzed the different results obtained and the results are compared according to the type of fuel used.

Chapter 6 presents the conclusions and recommendations which came at the end of this research project.

CAPÍTULO 1

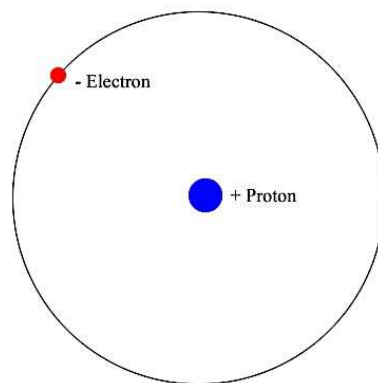
CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO Y LA GASOLINA

1.1 HIDRÓGENO

1.1.1 NOMENCLATURA

La palabra Hidrógeno proviene, del latín "hydrogenium", y éste del griego antiguo hydro: agua y genos: generador. Por lo tanto: generador de agua.

1.1.2 EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO



Fuente: <http://lastmonolith.blogspot.com/2008/06/el-tomo-de-hidrgeno-christie-jeyaratnam.html>

Figura 1. 1 El átomo de hidrógeno

Es el átomo más simple que existe y el único que admite una solución analítica exacta desde el punto de vista de la mecánica cuántica. El átomo de hidrógeno, es conocido también como átomo mono electrónico, debido a que está formado por un protón que se encuentra en el núcleo del átomo y que contiene más del 99% de la masa del átomo, y un sólo electrón que "orbita" alrededor de dicho núcleo (aunque también pueden

existir átomos de hidrógeno con núcleos formados por un protón y 1 o 2 neutrones adicionales, llamados deuterio y tritio).

Se puede hacer una analogía pedagógica del átomo de hidrógeno con un Sistema Solar, donde el sol sería el único Núcleo atómico y que tiene la mayor cantidad de masa 99% y en su órbita tuviera un planeta (Electrón) que conformaría el 1% restante de la masa del sistema solar (átomo de protio (^1H)), esto hace que el hidrógeno sea el más simple de todos los elementos de la tabla periódica.

a. NIVELES ENERGÉTICOS ELECTRÓNICOS

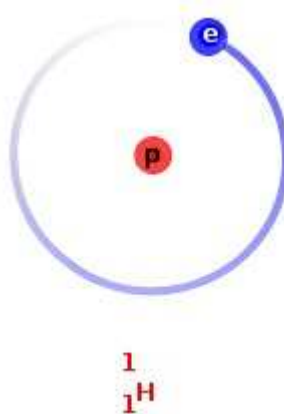
El nivel energético del estado fundamental electrónico de un átomo de hidrógeno es $-13,6$ eV. Los niveles energéticos del hidrógeno pueden calcularse con bastante precisión empleando el modelo atómico de Bohr, que considera que el electrón orbita alrededor del protón de forma análoga a la órbita terrestre alrededor del Sol. Sin embargo, la fuerza electromagnética hace que el protón y el electrón se atraigan, de igual modo que los planetas y otros cuerpos celestes se atraen por la fuerza gravitatoria.

En el hidrógeno gaseoso, el nivel energético del estado electrónico fundamental está dividido a su vez en otros niveles de estructura hiperfina, originados por el efecto de las interacciones magnéticas producidas entre los espines del electrón y del protón. La energía del átomo cuando los espines del protón y del electrón están alineados es superior que cuando los espines no lo están.

b. ISÓTOPOS

El hidrógeno posee tres isótopos naturales que se denotan como ^1H , ^2H y ^3H . Otros isótopos altamente inestables (del ^4H al ^7H) han sido sintetizados en laboratorio, pero nunca observados en la naturaleza.¹

^1H , conocido como protio, es el isótopo más común del hidrógeno con una abundancia de más del 99,98%. Debido a que el núcleo de este isótopo está formado por un solo protón se le ha bautizado como protio, nombre que a pesar de ser muy descriptivo, es poco usado.



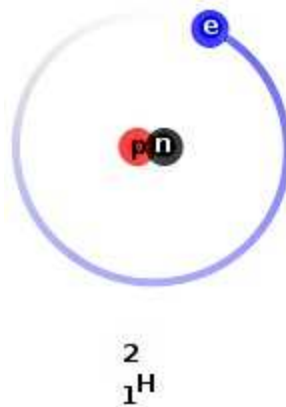
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Is%C3%B3topos_de_hidr%C3%B3geno

Figura 1. 2 Representación del Protio

El otro isótopo estable del hidrógeno ^2H , es conocido como deuterio y su núcleo contiene un protón y un neutrón. El deuterio representa el 0,0026% o el 0,0184% (según sea en fracción molar o fracción atómica) del hidrógeno presente en la Tierra, encontrándose las menores concentraciones en el hidrógeno gaseoso, y las mayores (0,015% o 150 ppm) en aguas oceánicas. El deuterio no es radiactivo, y no representa un riesgo significativo de toxicidad. El agua enriquecida en moléculas que

¹ Gurov YB, Spectroscopy of super heavy hydrogen isotopes in stopped-pion absorption by nuclei. Physics of Atomic Nuclei (2004).

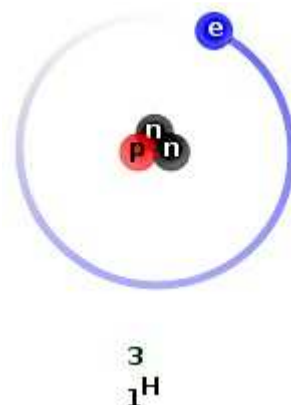
incluyen deuterio en lugar de hidrógeno ^1H (protio), se denomina agua pesada. El agua pesada se utiliza como moderador de neutrones y refrigerante en reactores nucleares. El deuterio es también un potencial combustible para la fusión nuclear con fines comerciales.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Is%C3%B3topos_de_hidr%C3%B3geno

Figura 1. 3 Representación del Deuterio

^3H se conoce como tritio y contiene un protón y dos neutrones en su núcleo. Es radiactivo, desintegrándose en $^3_2\text{He}^+$ a través de una emisión beta. Posee un periodo de semi-desintegración de 12,33 años. Pequeñas cantidades de tritio se encuentran en la naturaleza por efecto de la interacción de los rayos cósmicos con los gases atmosféricos. También ha sido liberado tritio por la realización de pruebas de armamento nuclear.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Is%C3%B3topos_de_hidr%C3%B3geno

Figura 1. 4 Representación del Tritio

El hidrógeno es el único elemento que posee diferentes nombres comunes para cada uno de sus isótopos (naturales). Durante los inicios de los estudios sobre la radiactividad, a algunos isótopos radiactivos pesados les fueron asignados nombres, pero ninguno de ellos se sigue usando. Los símbolos D y T (en lugar de ^2H y ^3H) se usan a veces para referirse al deuterio y al tritio, pero el símbolo P corresponde al fósforo y, por tanto, no puede usarse para representar al protio. La IUPAC² declara que aunque el uso de estos símbolos sea común, no es lo aconsejado.

1.1.3 COMPUESTOS

a. COMPUESTOS COVALENTES

A pesar de que el H_2 no es muy reactivo en condiciones normales, forma multitud de compuestos con la mayoría de los elementos químicos. Se conocen millones de hidrocarburos, pero no se generan por la reacción directa del hidrógeno elemental con el carbono.

² Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (International Union of Pure and Applied Chemistry).

El hidrógeno puede formar compuestos con elementos más electronegativos, tales como los halógenos (flúor, cloro, bromo, yodo) o los calcógenos (oxígeno, azufre, selenio); en estos compuestos, el hidrógeno adquiere carga parcial positiva debido a la polaridad del enlace covalente. Cuando se encuentra unido al flúor, al oxígeno o al nitrógeno, el hidrógeno puede participar en una modalidad de enlace no covalente llamado "enlace de hidrógeno" o "puente de hidrógeno", que es fundamental para la estabilidad de muchas moléculas biológicas.

El hidrógeno puede también formar compuestos con elementos menos electronegativos, tales como metales o semi-metales, en los cuales adquiere carga parcial negativa. Estos compuestos se conocen como hidruros.

Algunos ejemplos de compuestos covalentes importantes que contienen hidrógeno son: amoníaco (NH_3), hidracina (N_2H_4), agua (H_2O), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), etc.

b. HIDRUIROS

A menudo los compuestos del hidrógeno se denominan hidruros, un término usado con bastante inexactitud. Para los químicos, el término "hidruro" generalmente implica que el átomo de hidrógeno ha adquirido carga parcial negativa o carácter aniónico (denotado como H^-).

Aunque los hidruros pueden formarse con casi todos los elementos del grupo principal, el número y combinación de posibles compuestos varía mucho; por ejemplo, existen más de 100 hidruros binarios de boro conocidos, pero solamente uno de aluminio. El hidruro binario de indio no ha sido identificado aún, aunque existen complejos mayores.

c. PROTONES Y ÁCIDOS

La oxidación del H_2 formalmente origina el protón, H^+ . Esta especie es fundamental para explicar las propiedades de los ácidos, aunque el término "protón" se usa imprecisamente para referirse al hidrógeno catiónico o ion hidrógeno, denotado H^+ . Un protón aislado H^+ no puede existir en disolución debido a su fuerte tendencia a unirse a átomos o moléculas con electrones mediante un enlace coordinado o enlace dativo.

Aunque exótico en la Tierra, uno de los iones más comunes en el universo es el H_3^+ , conocido como hidrógeno molecular protonado o catión hidrógeno triatómico.

1.1.4 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno es un elemento peculiar, el único que no pertenece a ninguno de los grupos de la tabla periódica, siendo representado unas veces con los metales alcalinos, otras veces con los halógenos, o simplemente aislado de todos ellos, aunque quizás, debido a su electronegatividad característica, lo mejor sería colocarlo a mitad de camino entre ambos grupos.

a. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido a temperatura ambiente. Es el elemento más liviano que existe, siendo aproximadamente 14 veces menos pesado que el aire.³ Su molécula consiste de dos átomos de hidrógeno (H_2) unidos por un enlace covalente. Posee tres isótopos, de los cuales el más abundante es el

³ <http://quimica.laguia2000.com/general/propiedades-del-hidrogeno>

Protio (99.985%); el Deuterio tiene una abundancia de 0,02% y el tritio es tan escaso que de cada 10^9 átomos de hidrógeno hay uno de tritio.

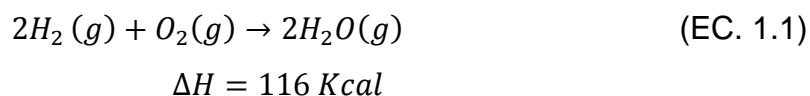
El hidrógeno es fácilmente absorbido por ciertos metales finamente divididos, siendo los principales paladio, platino y oro. Por ejemplo, un volumen de paladio finamente dividido puede adsorber aproximadamente 850 volumen de Hidrógeno a temperatura ambiente. El hidrógeno absorbido es muy activo químicamente.

- Tiene un peso atómico de 100974 uma.
- Posee un estado de oxidación de +1, -1.
- Completa su nivel de valencia con un electrón capturada, para así poder producir el anión H^- .
- Se combina con los metales alcalinos y alcalinotérreos (menos con el berilio y magnesio), a través de enlaces iónicos.
- Forma enlaces tipo covalentes, con los no metales.
- Forma enlaces metálicos con los elementos de transición.
- El hidrógeno, H^+ , siempre se encuentra asociado a otro elemento, menos en el estado gaseoso.
- Posee una estructura cristalina hexagonal.
- Reacciona con la gran mayoría de los elementos de la tabla periódica⁴.

b. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL HIDRÓGENO

Químicamente, el hidrógeno es capaz de combinarse con la mayoría de los elementos cuando se tienen las condiciones adecuadas. El hidrógeno tiene gran afinidad con el oxígeno, con el cual se combina en frío muy lentamente, pero en presencia de una llama o de una chispa eléctrica lo hace casi instantáneamente con explosión. Por esto, las mezclas de hidrógeno y aire deben manejarse con mucha precaución. La reacción es:

⁴ <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>



Una propiedad muy importante del hidrógeno es su poder reductor. En efecto, a altas temperatura el hidrógeno reacciona con algunos óxidos reduciéndolos. Este poder reductor, que se basa en la tendencia del hidrógeno a oxidarse al estado de oxidación +1, tiene además aplicación en muchos procesos químicos.

- En condiciones normales, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y sin sabor.
- Es la molécula más pequeña conocida.
- La densidad del hidrógeno es de 76 Kg./m^3 , y cuando se encuentra en estado de gas, la densidad es de 273 kg./L .
- Posee una gran rapidez de transición, cuando las moléculas se encuentran en fase gaseosa. Debido a esta propiedad, hay ausencia casi total, de hidrógeno en la atmósfera terrestre.
- Facilidad de efusión, así como también de difusión.
- Optima conductividad calorífica.
- Punto de fusión de 14025 K .
- Punto de ebullición de 20268 K .

c. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

A continuación se presenta las propiedades del hidrógeno para ser utilizado como combustible.

- Reservas prácticamente ilimitadas.
- Facilidad de combustión completa.

- Bajo nivel de contaminantes atmosféricos. En estos momentos, con especial atención a la ausencia de CO_2 entre los productos de combustión.

Simultáneamente, algunos aspectos desfavorables han impedido la difusión del uso:

- No existe libre en la naturaleza.
- Los esquemas tradicionales de obtención arrojan un balance energético negativo a lo largo del ciclo de vida.
- En gran medida consecuencia del punto anterior, elevado coste de producción.
- Escasa densidad energética por unidad de volumen, que dificulta y encarece su manipulación.

Propiedades del Hidrógeno		
Poder calorífico inferior	120	KJ/g
Densidad del gas	0.09	Kg/Nm^3
Densidad enegética gas	10.8	MJ/Nm^3
Densidad del líquido	0.071	Kg/l
Límite de inflamabilidad	10.8	MJ/l
Límite de detonación	4 – 75	%
Mínima energía de activación	18.3 – 59	%
Temperatura de combustión espontánea	858	K
Emisiones	0 mg	CO_2/KJ
Visibilidad de la llama	NO	
Toxicidad (combustible y emisiones)	NO/NO	

Fuente: Jaén M., Tecnologías del Hidrógeno y las Pilas de Combustible. Jornadas Técnicas de Ciencias Ambientales. 2004.

Tabla 1. 1 Propiedades del Hidrógeno como combustibles.

1.1.5 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

Uno de los grandes problemas en la utilización del hidrógeno es el almacenamiento de éste. Esto se debe a que esta sustancia tiene riesgos debidos en parte a la naturaleza explosiva del combustible y, por otro lado, a la presión a la que se contiene al hidrógeno en un recipiente en estado gaseoso.⁵

El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso, líquido o sólido. Dependiendo del estado en que se encuentran se utilizan las siguientes denominaciones:

- LH₂ para el hidrógeno líquido (Liquid hydrogen)
- CGH₂ hidrógeno gaseoso comprimido (Compressed Gaseous Hydrogen)
- LCGH₂ hidrógeno líquido a gas comprimido, transformado en la misma hidrogenera (Liquid to compressed hydrogen).

a. ESTADO GASEOSO

La técnica más sencilla para almacenar el hidrógeno es comprimiéndolo en fase gaseosa. Actualmente se almacena a 200 bar, aunque mediante equipos avanzados se llega a los 700 bar. Una manera común hoy en día para el almacenamiento del combustible es a 350 bar en cilindros de materiales compuestos. Por lo que respecta al consumo, el gasto para elevar la presión del gas es elevado pero no es comparable al consumo para el procedimiento de licuefacción.

A 200 bar se consume el 10% de la energía almacenada mientras que a 700 un 15% de ésta. Los tanques o cilindros usados para el almacenaje de gas hidrógeno a alta presión (CGH₂) se pueden dividir en los tipos: I ,

⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Almacenamiento_de_hidrógeno

II, III, IV dependiendo de sus características constructivas.

Los cilindros del tipo I son tanques de metal, generalmente acero o aluminio que admiten una presión máxima de trabajo de 200 bar para el acero y de 175 bar para el aluminio.

Los de tipo II también son metálicos, pero están reforzados con unos filamentos, generalmente fibra de vidrio o carbono. Son más ligeros que los anteriores y pueden trabajar aproximadamente hasta presiones de 263 bar los fabricados en aluminio I fibra de vidrio, mientras que los constituidos por acero y carbono o aramida soportan presiones de hasta 299 bar.

El tercer cilindro, tipo III, está fabricado de materiales compuestos (carbono, fibra de vidrio o kevlar) y una fina capa metálica. Esta capa evita que fugue el hidrógeno, mientras que los materiales compuestos soportan los esfuerzos mecánicos. Pueden trabajar con presiones de hasta 305 bar para los de aluminio I fibra de vidrio y de 438 bar para los de aluminio-kevlar.

Finalmente, el tipo IV está totalmente fabricado de materiales compuestos y es el más ligero de todos. Aun así presenta desventajas debido a la difusividad del hidrógeno a través del polímero.

b. ESTADO LÍQUIDO

Para el almacenamiento Líquido del hidrógeno éste se enfría hasta su licuación a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ a presión ambiente y debe mantenerse en tanques o cilindros criogénicos especiales. A esas temperaturas su manipulación se complica, un aumento de presión producirá pérdidas por sobrepresión, por lo que su uso está más bien reservado a fines industriales. Si se reduce la presión disminuyen los riesgos.

Por otra parte, el consumo energético de esta modalidad es muy elevado. Se consideran unas pérdidas del 30 % respecto a la energía almacenada a la que se tiene que sumar las derivadas del aporte energético que hay que efectuar para mantener el hidrógeno en estado líquido (alrededor del 1 o 2 % diario).

c. OTRAS FORMAS DE ALMACENAMIENTO

El hidrógeno puede almacenarse en materiales especialmente diseñados para actuar como portadores de hidrógeno. Si bien generalmente a estos sistemas se les denomina almacenamiento en estado sólido en la realidad estos sistemas almacenan el hidrógeno, en estado gaseoso, en materiales mediante distintos mecanismos.

Los mecanismos más conocidos para el almacenamiento de hidrógeno basado en materiales son dos: la adsorción, absorción.

En los mecanismos de adsorción, el hidrógeno se une directamente a la superficie del material. Estos procedimientos requieren materiales altamente porosos para maximizar el área superficial disponible para la adsorción del hidrogeno, además, para la liberación del hidrógeno con mayor facilidad.

Las estructuras metal-orgánicas, los clatratos y los hidruros químicos no reversibles son algunos de los materiales que funcionan con el mecanismo de adsorción.

La absorción en cambio, consiste en la disociación de los átomos de Hidrogeno y su posterior incorporación en la red del sólido, en el interior del material. Los sistemas que se utilizan para almacenar mediante absorción son los hidruros metálicos reversibles, los hidruros complejos y los sistemas de nitrógeno.

1.1.6 TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DEL HIDRÓGENO.

Si se pretende que en el futuro la energía se asiente sobre la base de la economía del hidrógeno es preciso crear una infraestructura de distribución de éste para poder abastecer las demandas de la sociedad. Hoy en día está en discusión la logística más adecuada, planteándose diversas alternativas en función del uso final del hidrógeno.

a. FASE GASEOSA.

La distribución de hidrógeno en gas presurizado se presenta muy interesante para el mercado masivo de vehículos privados, que podría recurrir a hidrogeneras ⁶ que suministren hidrógeno presurizado, sirviéndolo licuado para vehículos.

Para aplicaciones estacionarias en el sector residencial-comercial (menos de 200 kW) y generación distribuida (más de 200 kW) podría resultar rentable recurrir a canalizaciones, similares a las actuales de gas natural. Para aplicaciones de vehículos de mucho uso y en aviación el hidrógeno comprimido se podría distribuir en tanques.

Cuando se transportan grandes volúmenes, la distribución por vía de gaseoductos es actualmente la opción más económica. Utilizar los gaseoductos de gas natural para distribuir hidrógeno es una opción que está siendo evaluada para reducir las inversiones necesarias. Puede ser posible mezclar hasta un 30% de hidrógeno con gas natural en los gaseoductos existentes de gas natural sin modificaciones en la infraestructura del gaseoducto. Este método necesitaría de un proceso de separación en el punto de consumo.

⁶ Estación de servicio que dispensa hidrógeno, ya sea en pilas de combustible o como materia prima.

El hidrógeno se suministra hoy en día mediante tuberías en varias áreas industriales de los Estados Unidos, Canadá, y Europa. Las presiones de funcionamiento típicas van de 1 a 3 MPa, con caudales de 310 a 8.900 kg/h.

Los cilindros de gas a alta presión llevan el gas comprimido hasta 40 MPa. y almacenan alrededor de 1.8 kg. de hidrógeno, pero son muy costosos de manejar y transportar. Los camiones de tubos consisten en varios cilindros de acero montados en un marco protector. Pueden ser configurados para transportar entre 63 y 460 kg. de hidrógeno, dependiendo del número de tubos. Las presiones de operación son 20-60 MPa.

b. FASE LÍQUIDA.

Para su transporte por carretera la licuación del hidrógeno es económicamente viable cuando los volúmenes necesarios son pequeños. El hidrógeno líquido es transportado usando tanques de doble pared aislados para prevenir la evaporación instantánea del hidrógeno líquido.

Algunos tanques utilizan un escudo de nitrógeno líquido para enfriar la pared exterior del contenedor de hidrógeno líquido para minimizar la transferencia de calor.

Los camiones cisterna pueden transportar 360-4300 kg. de hidrógeno líquido. Los vagones tienen mayores capacidades, transportando entre 2900-9100 kg. de hidrógeno. Las tasas de evaporación instantánea en los camiones es de entre 0,3-0,6 %/día.

Otra opción para el transporte de hidrógeno líquido es a través de gaseoducto aislado que también incluiría un cable superconductor. El

hidrógeno líquido actuaría como refrigerante para el superconductor y permitiría el transporte de la electricidad a largas distancias sin las altas pérdidas actuales de las líneas de potencia actuales. El principal problema con el transporte de hidrógeno líquido sería la especialización en las necesidades de aislamiento y las pérdidas de bombeo y re-enfriamiento del hidrógeno líquido durante el camino.

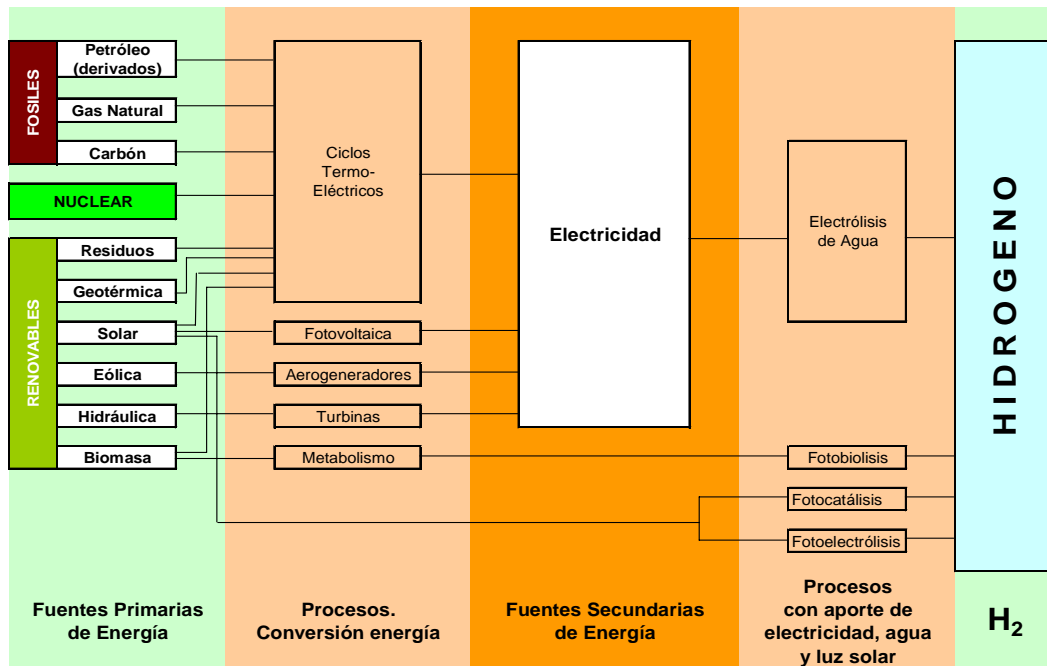
1.1.7 PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental, sino que tiene que ser producido a partir de otras fuentes como pueden ser el agua y el gas natural, y con la aportación de energía. Idealmente, la energía aportada sería igual a la energía contenida en el gas sintetizado. Sin embargo, la producción de hidrógeno a partir de cualquier proceso implica una transformación de energía. Y desgraciadamente, las transformaciones de energía siempre tienen asociada pérdidas de energía⁷.

1.1.8 MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Uno de los grandes beneficios del hidrógeno es que puede ser producido por un gran rango de fuentes potenciales incluyendo el agua, los combustibles fósiles y la materia orgánica. En la figura 1.5 se describen las principales vías, no todas, de producción de hidrógeno en la actualidad. Cada uno de los caminos tiene sus propias ventajas e inconvenientes que deben ser consideradas en términos de coste, emisiones, viabilidad, escala y logística.

⁷ <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>



Fuente: www.cnh2.es

Figura 1. 5 Métodos de producción del hidrógeno

Si el hidrógeno se obtiene a partir de un combustible fósil, como es el carbón, el petróleo o el gas natural, durante su producción se producen emisiones de CO₂. A este hidrógeno se le denomina hidrógeno sucio, porque su uso ha implicado la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por el contrario, si el hidrógeno se obtiene a partir del agua y con el aporte energético de energías renovables durante la vida completa del hidrógeno no se habrían producido emisiones de CO₂.

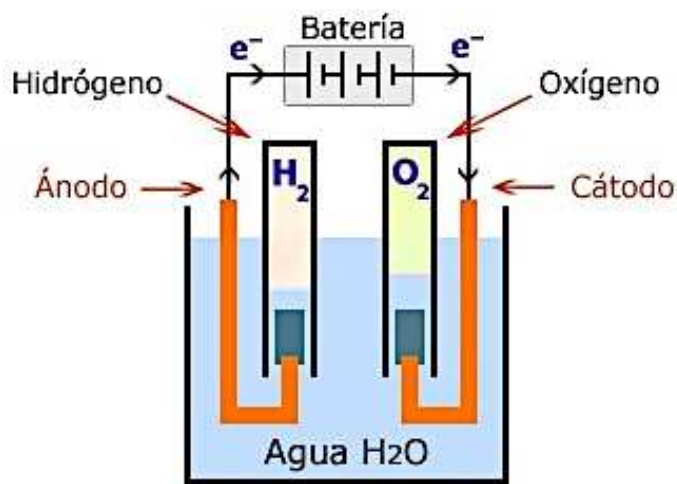
En el caso de la biomasa el tema de las emisiones de CO₂ es más complejo, ya que para la producción de hidrógeno se ha emitido CO₂ sin embargo, ese CO₂ fue capturado previamente por las plantas, durante la fotosíntesis para la producción de la propia biomasa.

Por otro lado, teniendo en cuenta los métodos de producción, aquellos que no originan la producción de dióxido de carbono, se resumen en: la electrólisis, siempre que la electricidad necesaria provenga de una fuente renovable, los ciclos termoquímicos del agua y la fotólisis del agua.

La eficiencia térmica de un proceso de producción de hidrógeno se puede definir como el poder calorífico inferior del hidrógeno producido dividido entre la energía suministrada al sistema desde todas las fuentes. El hidrógeno útil es aquel que llega al consumidor, por lo tanto los costes de purificación y almacenamiento también deberían ser considerados a la hora de estimar el coste total. Sin embargo, los mayores costes de la producción de hidrógeno resultan de la energía suministrada.

a. ELECTRÓLISIS

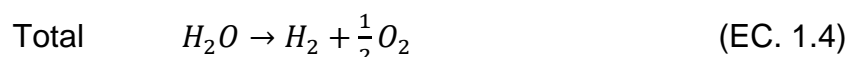
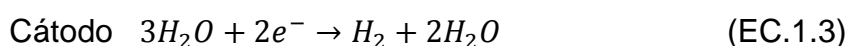
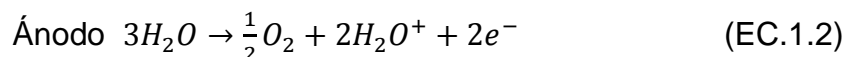
La electrólisis es la hidrólisis del agua, separación de los átomos que constituyen sus moléculas, por medio de la electricidad. Es el método mejor conocido para la producción de hidrógeno.



Fuente: <http://www.energiamadre.com/energias-renovables-hidrogeno.php>

Figura 1. 6 Esquema de la electrólisis

Las reacciones fundamentales que hacen la electrólisis posible son las semi reacciones de los iones del agua:



Los electrodos, el cátodo y el ánodo, se sitúan en la solución y generan el movimiento de electrones. El hidrógeno se forma en el cátodo, mientras que el oxígeno lo hace en el ánodo. Para mejorar la producción de hidrógeno, u oxígeno, por vía de la electrólisis, se suele variar la composición del agua, generalmente con la adición de sales, para aumentar la velocidad de reacción.

Debido a que la electrólisis utiliza electricidad, la eficiencia térmica del proceso incluye la eficiencia de la generación de la energía eléctrica, así como la electrólisis en sí misma. El proceso de electrólisis tiene una eficiencia generalmente del 75 %. La eficiencia de producción de energía eléctrica varía dependiendo del medio por el que se produzca ésta. Lo que significa que la eficiencia total para la producción de hidrógeno mediante esta tecnología se encuentra entre el 25-45 % o incluso menos si es producido por fuentes de energía renovable⁸.

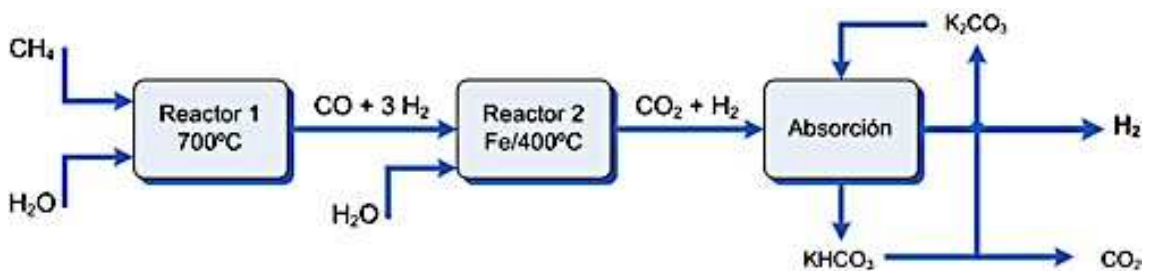
La producción de hidrógeno usando la electrólisis tiene el potencial de estar completamente libre de emisiones si la electricidad se genera a partir de una fuente de energía renovable limpia como puede ser la energía solar y eólica.

⁸ <http://quimica.laguia2000.com/general/propiedades-del-hidrogeno>

b. REFORMADO DE VAPOR DE GAS NATURAL

El hidrógeno también puede ser extraído de los hidrocarburos a partir del reformado. Reformado de vapor, o reformado catalítico de un hidrocarburo ligero, como el gas natural, bajo una atmósfera de vapor, es la tecnología dominante para la producción de hidrógeno. De hecho el 95 % del hidrógeno producido en los Estados Unidos es a partir de este proceso.⁹ El hidrógeno producido por este proceso necesita una purificación antes de ser utilizado en procesos posteriores.

El reformado de vapor es un proceso termodinámico que consiste en hacer reaccionar metano, o más comúnmente gas natural, y vapor a una alta temperatura.



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno/produccion>

Figura 1. 7 Proceso de producción de hidrógeno mediante reformado de vapor

Se producen dos reacciones. La primera, la reacción de reformado, que es fuertemente endotérmica, y que transcurre con un catalizador y a una alta temperatura.

La segunda reacción es exotérmica. A continuación se produce el proceso de separación, se elimina el dióxido de carbono y se purifica el hidrógeno.

⁹ <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells>.

Las entalpías de estas reacciones se muestran en la tabla 1.2.¹⁰

Pasos	Reacción	Nombre	ΔH
1	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	Reformado	205,82
2	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	Cambiar Reacción	-41.17
3	Etapa de separación		-

Fuente: Grupo investigador

Tabla 1. 2 Entalpías de reacción del proceso de reformado por vapor

El proceso convencional transcurre en un reactor químico a temperaturas entre 700-900 °C. Cuando estas temperaturas se consiguen con combustibles fósiles, se convierte en el método más barato para producir hidrógeno actualmente. El calor es generalmente suministrado quemando el exceso de metano. Esto conlleva la pérdida de reactante como de algo de producto de hidrógeno. Las eficiencias típicas para un proceso de reformado de vapor son en torno al 70%.

c. GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

El proceso básico de gasificación del carbón comienza convirtiendo el carbón en estado gaseoso calentándolo en un reactor de alta temperatura. El carbón gaseoso se trata posteriormente con un vapor y oxígeno y el resultado es la formación de hidrógeno gaseoso, monóxido de carbono y dióxido de carbono.¹¹

Sin embargo, es casi dos veces más caro producir hidrógeno a partir del carbón que a partir del gas natural, debido a que la relación hidrógeno

¹⁰ L. M. Crosbie and D. Chapin. "Hydrogen Production by Nuclear Heat".

¹¹ http://www.fe.doe.gov/coal_power/gasification/index.shtml

carbono, que en el gas natural es de 4:1 y en el carbón es de 0.8:1.¹² Y, a menos que el dióxido de carbono sea capturado en el punto de producción, las emisiones asociadas a la gasificación del carbón son significativas.

Reacciones para producción de hidrógeno a partir de la gasificación son las siguientes:



La primera reacción convierte el carbono del carbón en monóxido de carbono y la segunda reacción lo convierte a dióxido de carbono. En las dos reacciones se produce hidrógeno.

En el proceso, la reacción del vapor con el carbón se produce en el reactor primario a una temperatura de operación de 1000 °C, y los gases producidos se introducen en el segundo reactor, que normalmente opera por debajo de los 400 °C, para producir la reacción EC. 1.6. El proceso necesita dos reactores para producir hidrógeno debido a que las reacciones primera y segunda transcurren a temperaturas diferentes.

d. OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS.

Mediante la oxidación parcial se puede obtener hidrógeno de una gran variedad de materias primas o de subproductos de otras reacciones. Entre éstos se encuentran los hidrocarburos, los residuos industriales, la biomasa, el metano, etc.

¹² <http://www.bellona.no/imaker?id=11191%E2%8A%82=1>

Mediante la oxidación parcial con oxígeno, a temperaturas 1150-1350 °C se produce un gas bruto compuesto de H₂, CO, CO₂ y CH₄. Las impurezas contenidas en el gas bruto dependen de la composición de la materia prima y de las condiciones de desarrollo del proceso (presión y temperatura), encontrándose el azufre procedente de la materia prima prácticamente en su totalidad en forma de H₂S. Luego se realizan unas etapas de depuración y de acondicionamiento, tras las cuales se obtiene hidrógeno puro.

Oxidación parcial:

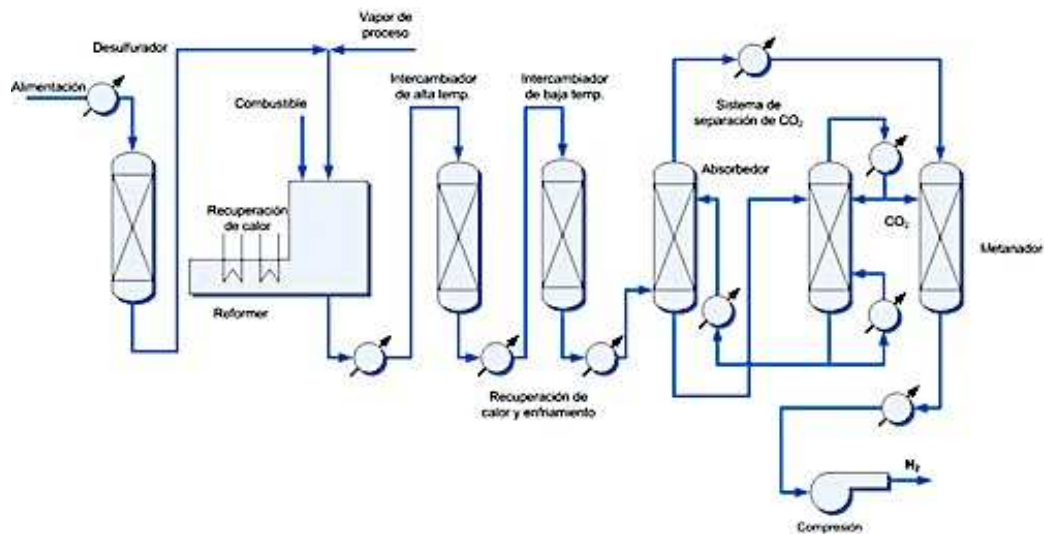


La oxidación parcial se produce para el caso hidrocarburos pesados con una eficiencia del 86%, para el caso del carbón con un 50% y para el caso de la biomasa con un 65%.¹³

La oxidación parcial ofrece algunas ventajas claras con respecto al reformado con vapor en cuanto que utiliza aire, en vez de vapor, y es una reacción exotérmica por lo que no requiere un aporte de energía externa durante la operación. Estas ventajas se contrarrestan con la producción de una cantidad de hidrógeno menor.

El proceso industrial de obtención de hidrógeno a partir de oxidación parcial se esquematiza en la figura 1.8.

¹³ Laborde M. Universidad de Buenos Aires. Marzo 2004.



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno/produccion>

Figura 1. 8 Esquema de la producción mediante oxidación parcial de hidrocarburos.

e. LA BIOMASA

La Biomasa se define como la materia orgánica que está disponible en una base renovable a través de un proceso natural o como subproducto de un proceso que utiliza fuentes renovables. La mayoría de la biomasa se usa en procesos de combustión en fábricas que producen electricidad como generación de producto de uso final.

La producción de hidrógeno a partir de la biomasa ofrece la ventaja de proporcionar un portador renovable de energía con una importante reducción de las emisiones de CO₂.

La biomasa puede ser convertida en hidrógeno a partir de distintos métodos:

- Gasificación seguida de una reacción shift.

- Pirólisis de la biomasa para formar un bio-aceite que puede ser convertido a continuación en hidrógeno a través de un reformado catalítico de vapor y una reacción shift.
- Oxidación parcial de la biomasa con agua en estado supercrítico.
- Fermentación de la materia orgánica por bacterias capaces de producir hidrógeno.

f. GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

En este proceso la biomasa se calienta a alta temperatura en un reactor donde se rompen las uniones de las moléculas que forman la biomasa. Esto genera un gas constituido principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Este metano se transforma en hidrógeno y dióxido de carbono a partir del mismo método de reformado de vapor.

La gasificación de la biomasa presenta una serie de ventajas frente a otros métodos de producción de hidrógeno, ya que las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la gasificación de la biomasa no contribuyen al incremento neto de las emisiones de gases de efecto invernadero.¹⁴

Por otro lado, la gasificación de la biomasa es actualmente uno de los métodos más avanzados de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. Y una gran variedad de residuos agrícolas y otras fuentes de biomasa pueden ser utilizadas para producir hidrógeno, y este hecho, permite que este método pueda ser empleado cerca del punto de uso, reduciendo así los costes.

¹⁴ www.bellona.no : Energy : Hydrogen

g. PIRÓLISIS DE LA BIOMASA.

La pirólisis de la biomasa para la producción de hidrógeno tiene el potencial de ser competitivo económicamente con los actuales procesos comerciales para la producción de hidrógeno. El concepto tiene algunas ventajas frente a la tecnología tradicional de gasificación. El bio-aceite, producido por la pirolisis de la biomasa, se transporta fácilmente de modo que la segunda etapa de reformado de vapor se puede realizar en diferentes localizaciones, cerca de donde se vaya a utilizar o distribuir el hidrógeno.

La segunda ventaja es el potencial para la producción y recuperación de un subproducto valioso del bio-aceite que puede impactar significativamente en la economía del proceso completo.

Un reactor a escala piloto localizado en Scientific Carbons Incorporation, una pequeña compañía en Blankely, Georgia, que produce carbón activo a través de la pirólisis de las cáscaras de cacahuets, está siendo utilizada para examinar la producción de hidrógeno a partir de la biomasa.

h. FERMENTACIÓN

Consiste en dos fermentaciones consecutivas. La primera fermentación la realiza una bacteria termofílica a una temperatura de 70 °C. Las concentraciones típicas de los gases de escape se encuentran entre el 50% en la primera fermentación y superior al 85% en la segunda. Estos gases de escape pueden alimentar directamente una célula de combustible.

La bacteria termofílica produce hidrógeno libremente en la glucosa, xilosa, oligosacáridos y almidón. La celulosa puede ser fermentada en hidrógeno

con una tasa de conversión baja. Para emplear biomasa lignocelulósica son necesarios pre-tratamientos e hidrólisis.

Durante la fermentación de una bacteria termofílica como por ejemplo la *Caldicellulosiruptor saccharolyphilic* se producen como subproductos ácido acético y en mucha menor medida ácido láctico. Los dos ácidos están listos para ser convertidos en hidrógeno y CO₂ por una bacteria fotoheterotrófica como puede ser la *Rhodobacter capsulatus*, a temperatura ambiente y en presencia de luz.

i. ENERGÍA SOLAR

Existen tres métodos de producción de hidrógeno a partir de la energía solar, y estos son:

- Electroquímica (Electrolisis).
- Termoquímica.
- Fotoquímica.

En el primer caso se utiliza la energía del sol para producir electricidad, y ésta será la que después se utilice para producir hidrógeno, por el método de Electrólisis, que se describió anteriormente. El segundo caso, el de la Termólisis, se utiliza la energía del sol para generar un calor que luego será empleado en el proceso que producirá el hidrógeno. Finalmente, los procesos de Fotólisis son aquellos que necesitan expresamente la luz como una entrada al proceso, y sin la cual el proceso no produce hidrógeno. A continuación se describirán los tres sistemas.

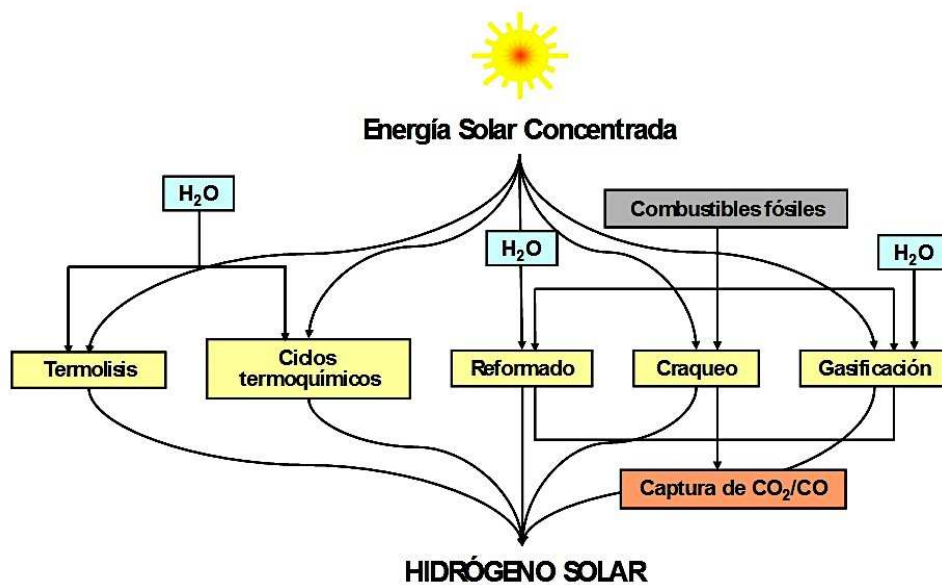
j. SISTEMAS ELECTROQUÍMICOS.

Puesto que la Electrólisis ya se ha descrito, aquí solamente se describirá de forma breve la producción de energía eléctrica por vía solar.

Existen dos métodos de producción de energía eléctrica por vía solar. El primero sería la energía solar fotovoltaica y el segundo sería utilizar la energía solar térmica de alta temperatura, para calentar un fluido térmico hasta una temperatura suficiente como para que pueda ser introducido en una turbina para la producción de energía eléctrica.

k. SISTEMAS TERMOQUÍMICOS.

Los procesos solares termoquímicos son aquellos que utilizan la energía solar como fuente de calor. Estos procesos han sido descritos anteriormente, y podrían utilizar otras fuentes de calor para la producción de hidrógeno. Por lo tanto en este apartado lo que se describirá es la producción de calor por vía solar. A continuación se resumen en la figura 1.9.



Fuente: [http://www.dyna-](http://www.dyna-energia.com/Dyna/cms/noticias/NoticiaFicha.asp?IdMenu=3&IdNoticia=477)

[energia.com/Dyna/cms/noticias/NoticiaFicha.asp?IdMenu=3&IdNoticia=477](http://www.dyna-energia.com/Dyna/cms/noticias/NoticiaFicha.asp?IdMenu=3&IdNoticia=477)

Figura 1. 9 Procesos solares termoquímicos de producción de hidrógeno.

I. SISTEMAS FOTOELECTROQUÍMICOS (FOTÓLISIS).

El proceso por el cual los materiales semiconductores absorben la luz y la convierten esa luz en electricidad se conoce desde hace algún tiempo y es la piedra angular de la industria fotovoltaica. Como alternativa a la generación de electricidad, la energía generada mediante la absorción de luz por un semiconductor podría ser utilizada para una transformación química, y de este modo almacenar la energía para un uso posterior.

Esta es la base de la generación foto-electroquímica de hidrógeno a partir de la luz solar. En este proceso, los electrones generados por la absorción de luz se utilizan para reducir el agua, generando hidrógeno, y los protones son utilizados para oxidar el agua, generando oxígeno.

El hidrógeno generado podría ser utilizado como combustible tanto en un proceso electrolítico como en una combustión. Es más eficiente generar hidrógeno usando directamente la foto-electroquímica ya que los sistemas foto-electroquímicos de conversión directa no sólo eliminan los costes de un electrolizador, sino que también tienen la posibilidad de incrementar la eficiencia global del proceso, comparado con el sistema fotovoltaico/electrólisis¹⁵.

Los requerimientos de los principales materiales para una producción eficiente de hidrógeno son:

- Un semiconductor con un ancho de banda adecuado al espectro solar para maximizar la radiación solar.
- Energía en los bordes de la banda adecuada para los potenciales de reducción y oxidación del agua para minimizar la energía de pérdida.

¹⁵ http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm

- Rápido transporte de electrones entre las fases para minimizar la recombinación.
- Estabilidad en presencia de un electrolito acuoso.

m. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

La energía solar fotovoltaica es aquella que utiliza la radiación solar para excitar una célula solar fotovoltaica, compuesta por un material fotoexcitable, de modo que se produce una diferencia de potencial entre distintas partes del material.

Una célula solar puede estar compuesta por diferentes materiales. Las células que más se utilizan son las que tienen como material fundamental el silicio. Pero es necesario dopar a las células con fósforo (P) y con boro (B). Pero dentro de las de silicio se las puede encontrar de silicio monocristalino, de silicio poli-cristalino y de silicio amorfo. Las dos primeras son las más comerciales. Las de silicio mono-cristalino tienen una eficiencia mejor y son algo más caras que las de poli-cristalino que tienen algo menos de eficiencia pero son más baratas.

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de células solares fotovoltaicas asociadas en serie o en serie-paralelo. Los módulos suelen estar formados por 36, 72, y 108 células. Una instalación fotovoltaica doméstica, con frecuencia está formada por varios módulos fotovoltaicos asociados en serie o paralelo.

Si el objetivo es producir hidrógeno, la energía eléctrica producida por uno o más módulos fotovoltaicos es la que se introduce en el electrolizador para que se produzca la electrolisis necesaria para la producción de hidrógeno.

1.2 GASOLINA

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos alifáticos obtenida del petróleo por destilación fraccionada, que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido por chispa

1.2.1 COMPONENTES

En general se obtiene a partir de la gasolina de destilación directa, que es la fracción líquida más ligera del petróleo (exceptuando los gases). La gasolina también se obtiene a partir de la conversión de fracciones pesadas del petróleo (gasoil de vacío) en unidades de proceso denominadas FCC (craqueo catalítico fluidizado) o hidro craqueo. La gasolina es una mezcla de cientos de hidrocarburos individuales desde C₄ (butanos y butenos) hasta C₁₁ como, por ejemplo, el metilnaftaleno¹⁶.

1.2.2 CARACTERÍSTICAS

Debe de cumplir una serie de condiciones, unas para que el motor funcione bien y otras de tipo ambiental, ambas reguladas por ley en la mayoría de los países. La especificación más característica es el índice de octano que indica la resistencia que presenta el combustible a producir el fenómeno de la detonación.

¹⁶ <https://es.wikipedia.org/wiki/Gasolina>

Propiedades de la Gasolina		
Poder calorífico inferior	44000	<i>KJ/Kg</i>
Densidad	0.72 – 0.78	<i>Kg/L</i>
Densidad energética	32	<i>MJ/L</i>
Entalpía de vaporización	350	<i>KJ/Kg</i>
Calor específico	2.4	<i>KJ/Kg * K</i>
Poder calorífico superior	47300	<i>KJ/Kg</i>

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Gasolina>

Tabla 1. 3 Propiedades de la Gasolina como combustibles.

1.2.3 ÍNDICE DE OCTANO

El Índice de octano o, octanaje, indica la presión y temperatura a que puede ser sometido un combustible carburado mezclado con aire antes de auto-detonar al alcanzar su temperatura de ignición debido a la ley de los gases ideales.

1.2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Normalmente se considera nafta a la fracción del petróleo cuyo punto de ebullición se encuentra aproximadamente entre 28 y 177 °C (umbral que varía en función de las necesidades comerciales de la refinería). A su vez, este subproducto se subdivide en nafta ligera (hasta unos 100 °C) y nafta pesada (el resto). La nafta ligera es uno de los componentes de la gasolina, con unos números de octano en torno a 70.

La nafta pesada no tiene la calidad suficiente como para ser utilizada para ese fin, y su destino es la transformación mediante reformado catalítico,

proceso químico por el cual se obtiene también hidrógeno, a la vez que se aumenta el octanaje de dicha nafta.

Además de la nafta reformada y la nafta ligera, otros componentes que se usan en la formulación de una gasolina comercial son la nafta de FCC, la nafta ligera isomerizada, la gasolina de pirólisis desbencenizada, butano, butenos, alquilato y etanol.

La nafta se obtiene por un proceso llamado *fluid catalytic cracking FCC* (a veces denominada gasolina de FCC) de gasoil pesado. Si no está refinada puede tener hasta 1.000 ppm de azufre. Tiene alrededor de un 40% de aromáticos y 20% de olefinas. Sus números de octano están en torno a 80/93.

La nafta ligera isomerizada (isomerato) se obtiene a partir de la nafta ligera de destilación directa, mediante un proceso que usa catalizadores sólidos en base platino/aluminio. Es un componente libre de azufre, benceno, aromáticos y olefinas, con unos números de octano en torno a 87/89.

La gasolina de pirólisis desbencenizada se obtiene como subproducto de la fabricación de etileno a partir de nafta ligera. Está compuesta aproximadamente por un 50% de aromáticos (tolueno y xilenos) y un 50% de olefinas (isobuteno, hexenos). Tiene en torno a 200 ppm de azufre. El benceno que contiene en origen suele ser purificado y vendido como materia prima petroquímica. Sus números de octano están en torno a 85/105.

El alquilato se obtiene a partir de isobutano y butenos, mediante un proceso que usa catalizadores ácidos (bien ácido sulfúrico bien ácido

fluorhídrico). Tampoco tiene azufre, benceno, aromáticos ni olefinas. Sus números de octano están en torno a 94/95.

1.2.5 GASOLINA CON PLOMO.

A partir de los años 20 y como consecuencia de los mayores requerimientos de los motores de explosión, derivados del aumento de compresión para mejorar su rendimiento, se inicia el uso de compuestos para aumentar su octanaje a base de plomo (Pb) y manganeso (Mn) en las gasolinas.

El uso de antidetonantes a base de plomo y manganeso en las gasolinas obedece principalmente a que no hay forma más barata de incrementar el octanaje en las gasolinas que usando compuestos de ellos, comparando con los costos que conllevan las instalaciones que producen componentes de alto octanaje¹⁷.

A partir de los años 70, el uso de compuestos de plomo en las gasolinas tenía dos razones: la primera era la comentada de alcanzar el octanaje requerido por los motores con mayor relación de compresión y la segunda la de proteger los motores contra el fenómeno denominado Recesión del Asiento de las Válvulas de Escape junto a la labor lubricante que el plomo ejerce en la parte alta del cilindro (pistón, camisa, segmentos y asientos de válvula).

1.2.6 EFECTOS NEGATIVOS DEL PLOMO EN LA GASOLINA

Los metales pesados (plomo, manganeso, mercurio, cadmio, etc.) resultan perniciosos tanto para el medio ambiente como para la salud

¹⁷ <https://es.wikipedia.org/wiki/Gasolina>

humana. Se fijan en los tejidos llegando a desencadenar procesos mutagénicos en las células.

En los años 70, ante los graves problemas de deterioro ambiental y su impacto sobre los seres humanos, los gobiernos de los países iniciaron una serie de acciones para detener y prevenir esta problemática ambiental. Se impusieron leyes a fin de reducir paulatinamente el uso de aditivos con plomo y manganeso de las gasolinas.

Las empresas petroleras se vieron obligadas a desarrollar nuevas gasolinas de mayor octanaje sin plomo o manganeso. Por otro lado, los fabricantes de motores tuvieron que empezar a utilizar materiales más resistentes que no dependiesen de la lubricación del plomo para su mejor conservación.

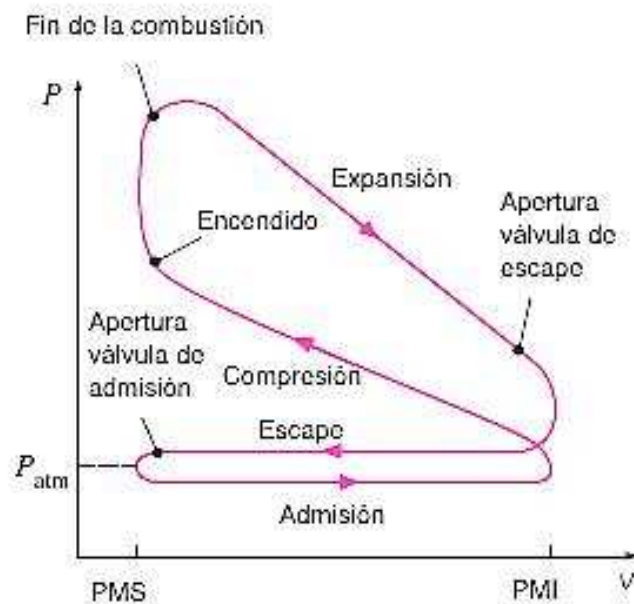
Además, para reducir las emisiones de NOx y de CO a la atmósfera se empezaron a utilizar catalizadores que se destruyen rápida e irremediablemente con el plomo, haciéndolos incompatibles con éste.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN TEÓRICA DE MOTORES A GASOLINA E HIDRÓGENO

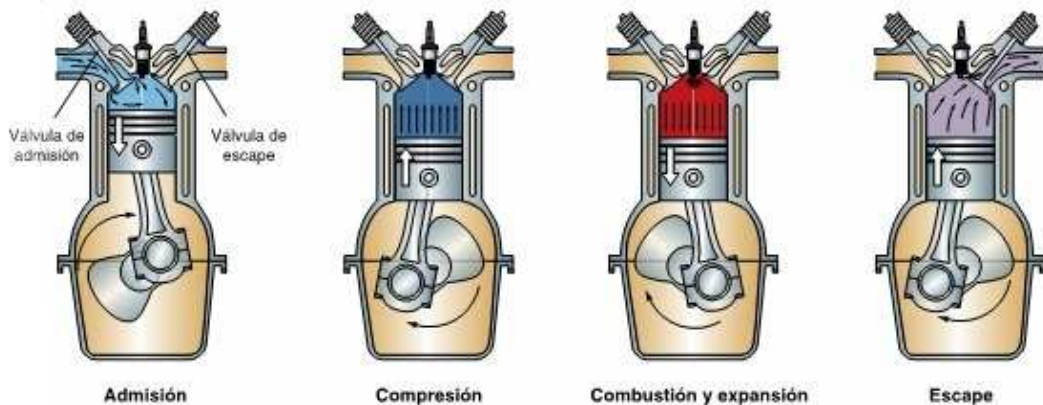
2.1. EL CICLO OTTO

El ciclo Otto es el ciclo ideal de los motores de combustión interna y de encendido por chispa. Este ciclo se completa en 4 tiempos, con dos vueltas del cigüeñal. En la Figura 2.1 se presenta el diagrama P-V (presión - volumen) para un motor de cuatro tiempos de encendido por chispa.



Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto

Figura 2. 1 Ciclo Otto real.



Fuente: <http://maqterm.blogspot.com/2010/11/ciclo-diesel.html>

Figura 2. 2 Ciclo Otto, cuatro tiempos

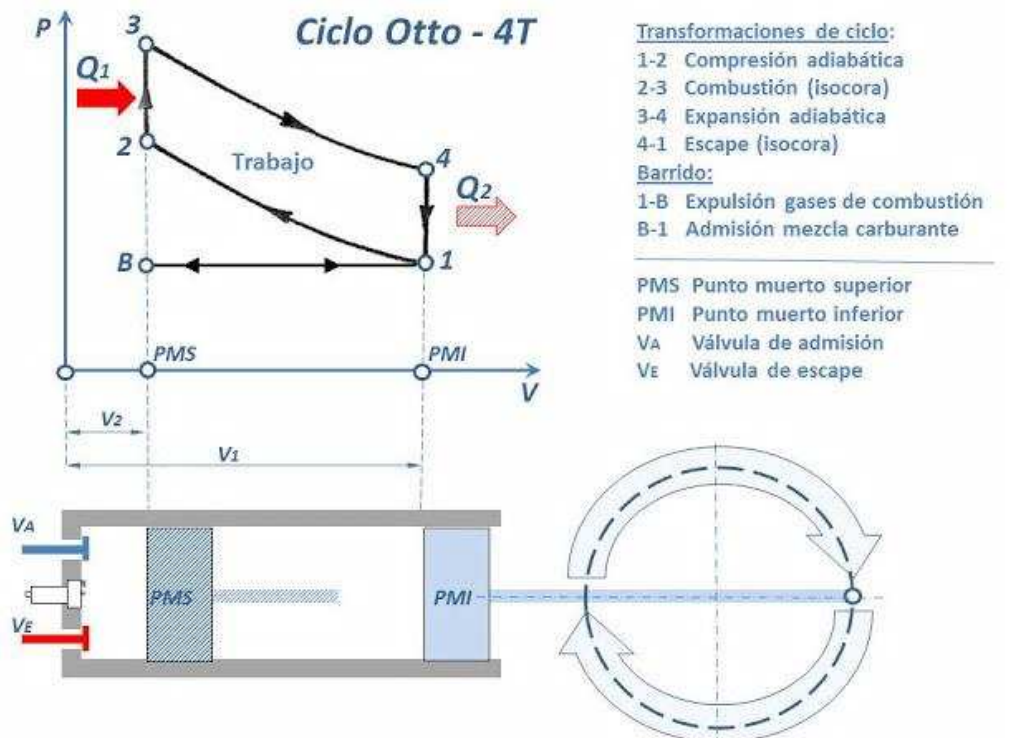
2.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS 4 TIEMPOS CICLO OTTO.

1. Tiempo de admisión: El émbolo se encuentra en el PMS, la válvula de admisión se encuentra abierta, cuando el émbolo desciende al PMI ingresa una cantidad de mezcla fresca de combustible y aire al cilindro.
2. Tiempo de compresión: Las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, el émbolo se desplaza desde el PMI hasta el PMS comprimiendo los gases.
3. Tiempo de expansión: Justo antes que el émbolo termine la carrera de compresión se produce una chispa en la bujía, provocando el aumento de la temperatura del sistema y la expansión de los gases; lo que provoca una fuerza en el émbolo que obliga girar al cigüeñal.

4. Tiempo de escape: El émbolo sube nuevamente desde el PMI hasta el PMS, la válvula de escape se abre y los gases producto de la combustión son expulsados.

2.1.2 EL CICLO OTTO IDEAL, PROCESOS TERMODINÁMICOS.

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



Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Otto

Figura 2. 3 Ciclo Otto Ideal

El balance de energía para cualquiera de los procesos anteriores se define como¹⁸:

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = \Delta u \text{ [KJ/kg]} \text{ (EC. 2.1)}$$

Donde,

$q_{entrada}$, calor de ingreso [KJ/kg]

q_{salida} , calor de salida [KJ/kg]

$w_{entrada}$, trabajo de entrada [KJ/kg]

w_{salida} , trabajo de salida [KJ/kg]

Δu , variación de la energía interna [KJ/kg]

La transferencia de calor hacia el fluido de trabajo y desde el mismo puede expresarse como:

$$q_{entrada} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2) \text{ [KJ/kg]} \quad \text{(EC. 2.2)}$$

$$q_{salida} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \text{ [KJ/kg]} \quad \text{(EC. 2.3)}$$

Donde,

u_x , energía interna en el punto x [KJ/kg]

c_v , calor específico a volumen constante

T_x , temperatura en el punto x [°K]

Entonces la eficiencia para el ciclo Otto ideal es:

$$\eta_{ter.Otto} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad \text{(EC. 2.4)}$$

¹⁸ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. Sexta edición.

Debido a que los procesos 1-2 y 3-4 son isentrópicos y $v_2 = v_3$ y $v_4 = v_1$ entonces,

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad (\text{EC. 2.5})$$

Donde,

k , es la relación de calores específicos c_p/c_v (1.4 para el aire)¹⁹

v_x , volumen en el punto x [cm^3]

Por tanto la eficiencia térmica se simplifica a,

$$\eta_{ter.Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (\text{EC. 2.6})$$

Donde,

r , es la relación de compresión, (adimensional)

De las ecuaciones anteriores se infiere que la eficiencia térmica de un ciclo Otto ideal depende de la relación de compresión y de la relación de calores específicos.

Para un valor de $k = 1.4$, que es el valor que adopta k para el aire a temperatura ambiente, se observa que mientras aumenta la relación de compresión del motor por consiguiente mayor es la eficiencia. Esto se cumple también para el ciclo real.

2.2 COMPOSICIÓN DE UNA MEZCLA DE GASES

2.2.1 FRACCIONES MOLARES Y DE MASA.

¹⁹ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. Sexta edición.

Para describir una mezcla se debe conocer la composición de la misma y las propiedades de sus componentes individuales. Para poder describir una mezcla se puede hacer de dos formas. Mediante la especificación del número de moles, análisis molar. También mediante la especificación de la masa de cada componente denominado análisis gravimétrico.

A continuación se considera una mezcla de gases compuesta de k componentes donde la masa de la mezcla m_m es igual a la suma de las masas de cada componente. Y el número de moles de la mezcla N_m es la suma del número de moles individual.

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \quad (\text{EC. 2.7})$$

$$N_m = \sum_{i=1}^k N_i \quad (\text{EC. 2.8})$$

La relación entre la masa de cada componente y la masa de la mezcla se denomina fracción de masa f_m , y la relación entre el número de moles de cada componente con el número de moles de la mezcla se denomina fracción molar y .

$$f_{m_i} = \frac{m_i}{m_m} \quad (\text{EC. 2.9})$$

$$y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (\text{EC. 2.10})$$

La masa molar de una sustancia y la constante del gas de dicha mezcla puede expresarse por la relación de la constante universal de los gases R_u y M_m ²⁰ :

$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{\sum m_i}{N_m} = \frac{\sum N_i M_i}{N_m} = \sum_{i=1}^k y_i M_i \quad [\text{kg/kmol}] \quad (\text{EC. 2.11})$$

²⁰ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. Sexta edición.

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad [KJ/kg * K] \quad (EC. 2.12)$$

2.2.2 PROPIEDADES DE MEZCLAS DE GASES.

a. GASES IDEALES

Tomando como comparación la masa total de una mezcla es igual a la suma de los componentes individuales, entonces la energía interna, la entalpía y la entropía total de una mezcla se expresa como:

$$U_m = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k m_i u_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{u}_i \quad [KJ] \quad (EC. 2.13)$$

$$H_m = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i \quad [KJ] \quad (EC. 2.14)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{s}_i \quad [KJ/K] \quad (EC. 2.15)$$

Donde,

U_m , la energía interna de la mezcla [\bar{u}_i Kmol]

H_m , la entalpía de la mezcla [\bar{h}_i Kmol]

S_m , entropía de la mezcla [\bar{s}_i Kmol]

Así los cambios en la energía interna, entalpía y la entropía de una mezcla de gases se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^k \Delta U_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta u_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{u}_i \quad [KJ] \quad (EC. 2.16)$$

$$\Delta H_m = \sum_{i=1}^k \Delta H_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{h}_i \quad [KJ] \quad (EC. 2.17)$$

$$\Delta S_m = \sum_{i=1}^k \Delta S_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta s_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{s}_i \quad [KJ/K] \quad (\text{EC. 2.18})$$

La energía interna, la entropía y la entalpía de una mezcla por unidad masa o por unidad de mol de la mezcla se determina dividiendo las ecuaciones anteriores entre la masa de la mezcla o por su número de moles.

$$\bar{u}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{u}_i \quad [KJ/kmol] \quad (\text{EC. 2.19})$$

$$\bar{h}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i \quad [KJ/kmol] \quad (\text{EC. 2.20})$$

$$\bar{s}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{s}_i \quad [KJ/kmol * K] \quad (\text{EC. 2.21})$$

2.3 REACCIONES QUÍMICAS

2.3.1 COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía. Para que la combustión se lleve a cabo se necesitan dos componentes esenciales, que son el combustible y el oxidante. En la mayoría de aplicaciones se usa el aire como oxidante.

Para que existe la combustión debe existir un tercer elemento el cual puede ser una chispa, la cual eleva la temperatura del combustible hasta su temperatura de ignición. Las temperaturas mínimas de ignición son; para la gasolina de 260 °C, para el hidrógeno es de 610 °C.

Para poder realizar el análisis teórico de la reacción de combustión se debe tener claro el principio de la conservación de la masa; el cual en síntesis dice que la cantidad de masa de cada uno los reactivos debe ser igual a la cantidad de masa individual de los productos. Pero no ocurre lo mismo con la cantidad de moles en una reacción química ya que puede ser diferente la cantidad de moles que reaccionan con la cantidad de los productos.

Una medida utilizada en estos procesos químicos es la relación aire-combustible, la cual representa la cantidad de aire utilizada por unidad de masa de combustible.

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad [kg \text{ aire}/kg \text{ comb.}] \quad (\text{EC. 2.22})$$

La masa m de una sustancia se relaciona como el producto de el numero de moles N por la masa molar M .

$$m = NM \quad [kg] \quad (\text{EC. 2.23})$$

Para que exista una combustión completa, es decir que todos los componentes del combustible se quemem se necesita una cantidad exacta de aire denominada aire teórico o estequiométrico. Para obtener los residuos de la combustión teórica se realiza el balance de la reacción química, pero en la realidad es más complicado definir la cantidad de gases residuos de la combustión ya que por lo general se usa más cantidad de aire que la teórica, por lo tanto se usa un analizador de gases.

2.3.2 ENTALPÍA DE FORMACIÓN Y ENTALPÍA DE COMBUSTIÓN.

La entalpía de combustión $h_R = h_C$ se define como la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado especificado y la entalpía de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa. La entalpía de combustión representa la cantidad de calor liberado durante un proceso de combustión, cuando 1 kg. de combustible se quema por completo a una presión y temperatura determinadas, así:

$$h_R = h_C = H_{prod} - H_{react} \quad [KJ/kmol] \quad (EC. 2.24)$$

La entalpía de formación \bar{h}_f , puede considerarse como la entalpía de una sustancia en un estado determinado debido a su composición química. Para establecer un punto especificado se asigna a la entalpía de formación de todos los elementos estables como el hidrógeno H₂, un valor cero en el estado de referencia de 25 °C y 1 atm²¹.

2.3.3 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor liberado por el mismo cuando se quema por completo. Es decir, el poder calorífico es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión.

$$poder\ calorífico = |h_C| \quad [kJ/kg] \quad (EC. 2.25)$$

²¹ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. Sexta edición.

2.4 ANÁLISIS DE LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA PARA SISTEMAS REACTIVOS CERRADOS.

La primera ley de la termodinámica aplicada a sistemas químicamente reactivos puede ser expresada en forma de balance de energía.

La variación de la energía para un sistema cerrado químicamente reactivo, es:

$$(Q_{en} - Q_{sal}) + (W_{en} - W_{sal}) = U_{prod} - U_{react} \text{ [kJ/kmol]} \text{ (EC. 2.26)}$$

Donde,

Q , Calor [KJ/Kg]

W , Trabajo [KJ/Kg]

U_{prod} , energía interna de todos los productos

U_{react} , energía interna de los reactivos

El calor que produce una reacción química de combustión se puede expresar en función de las entalpías de cada uno de los reactivos y de los productos de la combustión, como se muestra a continuación²²:

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_r \quad \text{(EC. 2.27)}$$

Donde,

N_p , Número de moles de los productos [Kmol]

N_r , Número de moles de los reactivos [Kmol]

\bar{h}_f^0 , entalpía de formación [KJ/Kmol]

\bar{h} , entalpía a la que se realiza la combustión [KJ/Kmol]

\bar{h}^0 , entalpía en el estado de referencia [KJ/Kmol]

²² Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. sexta edición.

2.4.1 TEMPERATURA DE FLAMA ADIABÁTICA.

En una cámara de combustión la energía química se transforma en calor que se pierde hacia el exterior y sirve para elevar la temperatura de los residuos. Si el calor que se pierde al exterior es nulo, entonces los residuos de la combustión llegan a un máximo de temperatura que se conoce como temperatura adiabática o de combustión adiabática, la cual se expresa en la ecuación 2.28.

$$\sum N_p (\bar{h}^0_f + \bar{h} - \bar{h}^0)_p = \sum N_r (\bar{h}^0_f + \bar{h} - \bar{h}^0)_r \quad (\text{EC. 2.28})$$

2.4.2 HUMEDAD ABSOLUTA Y RELATIVA EN EL AIRE.

Si se considera que en la combustión se produce vapor de agua y que en ciertos casos esta se condensa produciendo daños a un motor, se procede a analizar la cantidad de humedad contenida en el aire.

Para determinar la cantidad de humedad se determina la masa de vapor de agua existente en una masa unitaria de aire seco, a la que se le denomina humedad absoluta (ω).

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{EC. 2.29})$$

La humedad relativa se conoce como la cantidad de humedad del aire (m_v) en relación con la humedad que puede contener a la misma temperatura (m_g). La humedad relativa puede variar desde 0 hasta un máximo de 1²³.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} = \frac{P_v}{P_T} \quad (\text{EC. 2.30})$$

²³ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. Sexta edición.

Donde,

m_v , masa de vapor de agua [kmol]

m_g , masa de aire seco [kmol]

P_v , presión de vapor

P_g , presión de aire seco [atm]

N_v , número de moles de humedad en el aire

N_T , número de moles de aire seco

P_v , presión de vapor de agua [atm]

P_T , es la presión atmosférica [atm]

2.4.3 PROCESOS ISOENTRÓPICOS DE GASES IDEALES.

En el análisis de la combustión teórica se toman ciertas consideraciones las cuales no pueden coincidir con los resultados reales pero los acercan mucho. Así pues los procesos isoentrópicos se refiere a que se realizan sin transferencia de calor alguna, es decir procesos adiabáticos.

2.4.4 CALORES ESPECÍFICOS VARIABLES.

En el caso en que el calor específico no es constante se deduce una relación isoentrópica que tome en cuenta la variación de los calores específicos con la temperatura.

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{EC. 2.31})$$

Donde,

s_1 , proceso isoentrópico inicial [KJ/kmol* K]

s_2 , proceso isoentrópico final [KJ/kmol* K]

R_u , constante universal de los gases

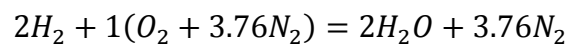
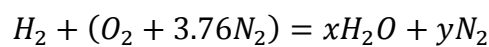
P_1 , presión final [atm]

P_2 , presión inicial [atm]

2.5 PROCESO DE COMBUSTION DE HIDROGENO Y GASOLINA.

2.5.1 COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO. (H_2)

Para igualar la ecuación de combustión del hidrógeno, se procede a igualar el número de átomos de los reactivos con el número de átomos de los productos.



Para obtener la masa del combustible se trabaja con las masas atómicas del hidrógeno y del aire.

Masa del combustible:

$$2 \cdot H_2 = 2 \text{ mol} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 4 \text{ g}.$$

Masa del aire:

$$O_2 + 3.76N_2 = 1 \text{ mol} \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 3.76 \text{ mol} \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 137.28 \text{ g}.$$

Para obtener la relación aire combustible se aplica la ecuación 2.22.

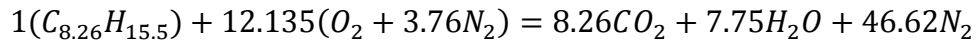
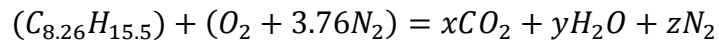
Relación aire combustible:

$$R_{A/C} = \frac{137.28 \text{ g}}{4 \text{ g}} = 34.32$$

Se requiere 34.32 g de aire para quemar 1 g de hidrógeno.

2.5.2 COMBUSTIÓN DE LA GASOLINA ($C_{8.26}H_{15.5}$).

Para igualar la ecuación de combustión de la gasolina, se procede a igualar el número de átomos de los reactivos con el número de átomos de los productos



Para obtener la masa del combustible se trabaja con las masas atómicas del hidrógeno y del aire.

Masa del combustibles:

$$1(C_{8.26}H_{15.5}) = 1 \text{ mol} \cdot 8.26 \cdot 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 15.5 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 114.62 \text{ g}.$$

Masa del aire:

$$12.135(O_2 + 3.76N_2) = 12.135 \text{ mol} \cdot (32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 3.76 \text{ mol} \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}) = 1665.9 \text{ g}.$$

Para obtener la relación aire combustible se aplica la ecuación 2.22.

Relación aire combustible:

$$R_{A/C} = \frac{1665.9 \text{ g}}{114.62 \text{ g}} = 14.53$$

Se requiere 14.53 g de aire para quemar 1g de gasolina.

2.6 PROPIEDADES DE LOS MOTORES COMUNES.

2.6.1 CILINDRADA.

Es el volumen comprendido entre el punto muerto superior, PMS y el punto muerto inferior PMI, y su volumen se halla con la siguiente relación:

$$V_u = \frac{D^2 * \pi}{4} * L \quad (\text{EC. 2.32})$$

Donde,

V_u , volumen unitario [cm^3]

D, diámetro del cilindro [cm]

L, carrera del pistón [cm]

2.6.2 RELACIÓN DE COMPRESIÓN.

La relación de compresión en un motor permite determinar el nivel de compresión al cual se somete la mezcla en el interior del cilindro, y se obtiene de la siguiente manera:

$$R_C = \frac{V_u + V_c}{V_c} = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (\text{EC. 2.33})$$

Donde,

R_C , relación de compresión

V_u , volumen del cilindro

V_c , volumen de la cámara de compresión

2.6.3 POTENCIA INDICADA.

Es la potencia desarrollada en el interior del cilindro por el proceso de combustión, se calcula de la siguiente manera²⁴:

$$P_i = \frac{A_e * p_m * i * s * n}{12000} [KW] \quad (\text{EC. 2.34})$$

Donde,

P_i , potencia indicada [KW]

A_e , superficie del pistón [cm²]

p_m , presión media efectiva [bar]

i , numero de cilindros

s , carrera del pistón [m]

n , número de revoluciones por minuto

2.6.4 PRESIÓN MEDIA EFECTIVA

Es la presión que ejercen los gases sobre la cabeza de cada pistón durante la combustión y expansión de los mismos.

$$p_m = \frac{w_{neto}}{v_{max} - v_{min}} [KPa] \quad (\text{EC. 2.35})$$

Donde,

p_m , presión media efectiva [KPa]

w_{neto} , trabajo neto del ciclo [KJ]

v_{max} , volumen máximo del cilindro [cm³]

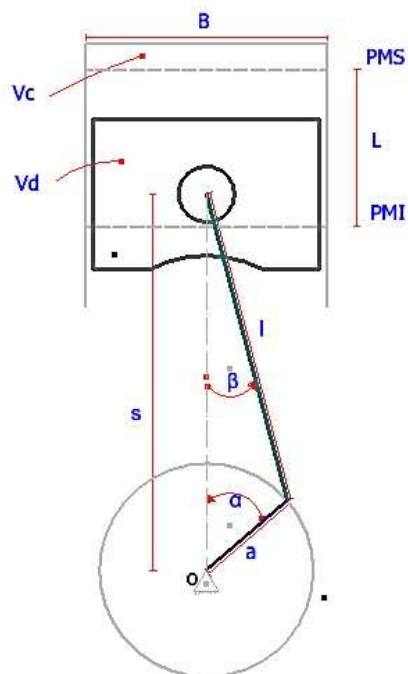
v_{min} , volumen mínimo del cilindro [cm³]

²⁴ M.S. Jójvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

2.7 OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS P-V DEL CICLO OTTO A GASOLINA E HIDRÓGENO.

2.7.1 GEOMETRÍA DE UN MOTOR Y SUS PARTES PRINCIPALES.

Para obtener la ecuación que describe el movimiento de un tren alternativo de un motor en función del giro del cigüeñal, se define las partes de la siguiente manera:



Fuente: Grupo investigador

Figura 2. 4 Geometría del tren alternativo

De la Figura 2.4 se deduce el radio de conexión de la biela al radio del cigüeñal:

$$R = \frac{l}{a} \quad (\text{EC. 2.36})$$

El volumen del cilindro en función de la variación del ángulo α del cigüeñal²⁵:

$$\frac{V_u}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(R_c - 1) \left[R + 1 - \cos \alpha - (R^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \right] \quad (\text{EC. 2.37})$$

2.7.2 DESPLAZAMIENTO DEL PISTÓN (Se).

Cuando el cigüeñal gira un ángulo α , el pistón se desplaza del punto muerto superior al punto muerto inferior una distancia Se, en función del cambio del ángulo α .²⁶

$$Se = R \left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - R \cos \alpha - R \frac{\lambda}{4} \cos 2\alpha \quad [\text{cm}] \quad (\text{EC. 2.38})$$

2.7.3 VELOCIDAD DEL PISTÓN (Ve).

La fórmula de la velocidad del pistón se obtiene de la derivación de la fórmula de posición en función del tiempo, resultando:

$$v_e = R\omega \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos(\beta)} \quad [m/s] \quad (\text{EC. 2.39})$$

²⁵ M.S. Jójvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

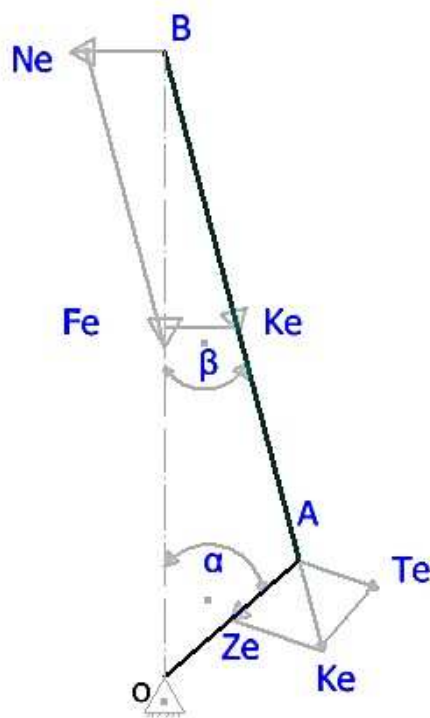
²⁶ M.S. Jójvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

2.7.4 ACELERACIÓN DEL PISTÓN (w_e).

De igual forma la aceleración del pistón se halla de la derivación de la velocidad en función del tiempo, resultando:

$$w_e = R\omega^2(\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha) \quad [m/s^2] \quad (\text{EC. 2.40})$$

2.8 FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL MECANISMO BIELA MANIVELA.



Fuente: Grupo investigador

Figura 2. 5 Fuerzas que se generan en el mecanismo biela manivela

La fuerza de los gases sobre la cabeza del pistón genera una serie de esfuerzos tanto en el pistón como en la biela. Al descomponer las fuerzas se obtienen las siguientes componentes:

2.8.1 FUERZA F_{Σ}

La fuerza resultante que actúa siguiendo la dirección del eje del cilindro está compuesta por la fuerza de la sobrepresión de los gases sobre el émbolo y de la fuerza de inercia de las masas que tienen movimiento alternativo.

$$F_{\Sigma} = P * A \quad [N] \quad (\text{EC. 2.41})$$

Donde,

P, presión de los gases [Pa]

A, área del pistón [cm²]

2.8.2 FUERZA N_{Σ}

La fuerza N_{Σ} , es perpendicular a la pared del cilindro y aprieta el pistón contra ella. Esta fuerza es positiva si su sentido es contrario al de la rotación, y negativa si tiene el mismo sentido que esta²⁷.

$$N_{\Sigma} = F_{\Sigma} \tan \beta \quad [N] \quad (\text{EC. 2.42})$$

2.8.3 FUERZA K_{Σ}

La fuerza K_{Σ} , actúa a lo largo del eje de la biela. Esta fuerza es positiva cuando comprime la biela y negativa cuando la tensa.

²⁷ M.S. Jóvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

$$K_{\Sigma} = F_{\Sigma} \frac{1}{\cos \beta} \quad [N] \quad (\text{EC. 2.43})$$

2.8.4 FUERZA T_{Σ}

Esta fuerza tiene una acción tangencial al círculo que describe el cigüeñal, es decir es la fuerza tangencial. Esta fuerza será positiva cuando tenga el sentido de rotación del cigüeñal.

$$T_{\Sigma} = F_{\Sigma} \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos \beta} \quad [N] \quad (\text{EC. 2.44})$$

2.8.5 FUERZA Z_{Σ}

La fuerza Z_{Σ} , es la fuerza normal que actúa según el radio del cigüeñal. Esta fuerza será positiva si su sentido es hacia el eje del cigüeñal.

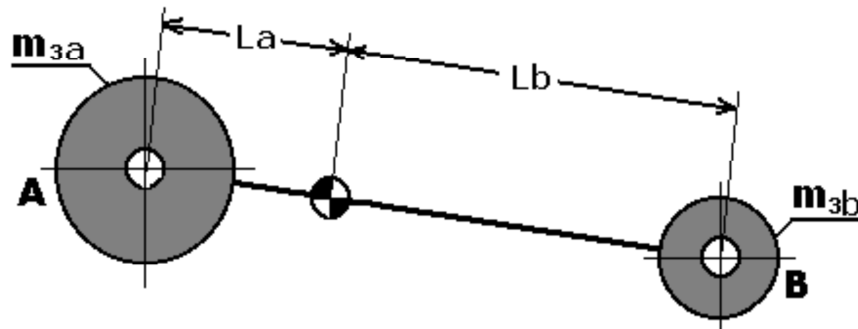
$$Z_{\Sigma} = F_{\Sigma} \frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos \beta} \quad [N] \quad (\text{EC. 2.45})$$

2.8.6 FUERZAS DE INERCIA

Para realizar los cálculos de las fuerzas de inercia, se analiza el mecanismo biela, manivela, corredera con sus respectivas masas. Para este análisis se supone que la manivela tienen un movimiento circular perfecto y el pistón o corredera tiene un movimiento de traslación perfecto, y ambos están unidos por una barra sin masa y rígida (biela)²⁸.

²⁸ Norton Robert L. (2006). Diseño de Maquinaria. Pearson, tercera edición.

Se considera el punto de masa A como la unión entre el pistón y la biela, y el punto de masa B como la unión entre la manivela y la biela, como se observa en la figura 2.6



Fuente: Robert L. Norton. Diseño de maquinaria

Figura 2.6 Modelado del mecanismo biela, manivela, corredera.

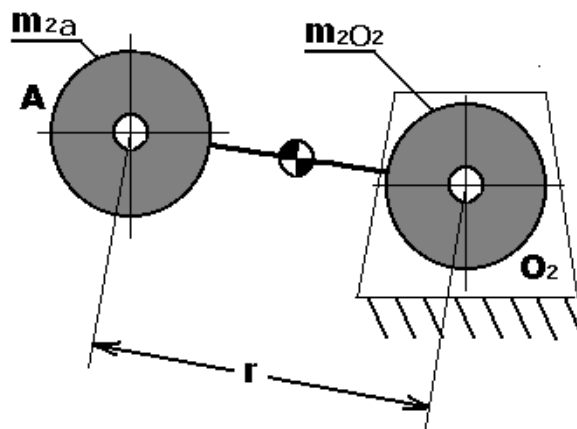
Para obtener el centro de gravedad de la biela, se equilibra en un punto de apoyo A, y se mide la distancia al centro de la cabeza de la misma l_a , l_b es la longitud restante.

Del grafico 2.6 se determina:

$$m_{3a} = m_3 \frac{l_b}{l_a + l_b} \quad (\text{EC. 2.46})$$

$$m_{3b} = m_3 \frac{l_a}{l_a + l_b} \quad (\text{EC. 2.47})$$

Se procede a realizar el modelo simplificado con objeto de cálculo, de la biela como una masa concentrada en A, unida con una barra sin masa y pivotada en O_2 .



Fuente: Robert L. Norton. Diseño de maquinaria

Figura 2.7 Modelado del mecanismo biela, manivela, corredera.

El muñón de la manivela, punto A, tiene dos masas concentradas en él, la masa equivalente de la manivela m_{2a} y la porción de la biela m_{3a} . La suma es m_A . En el pasador del pistón, punto B, hay también dos masas concentradas, la masa del pistón m_4 y la porción restante de la biela m_{3b} . La suma es m_B . Este modelo tiene masas que están en rotación pura (m_A) o en traslación pura (m_B), de modo que los cálculos se simplifican.

$$m_A = m_{2a} + m_{3a} \quad (\text{EC. 2.48})$$

$$m_B = m_{3b} + m_4 \quad (\text{EC. 2.49})$$

Por lo tanto la fuerza de inercia total F_i es igual a la suma de la fuerza centrífuga en el punto A más la fuerza de inercia en el punto B, entonces²⁹:

$$\vec{F}_i = -m_A \vec{a}_A - m_B \vec{a}_B \quad (\text{EC. 2.50})$$

²⁹ Norton Robert L. (2006). Diseño de Maquinaria. Pearson, tercera edición.

$$F_{iX} = -m_A(-rw^2 \cos \alpha) - m_B \left[-rw^2 \left(\cos \alpha + \frac{r}{l} \cos 2\alpha \right) \right] \quad (\text{EC. 2.51})$$

$$F_{iY} = -m_A(-rw^2 \sin \alpha) \quad (\text{EC. 2.52})$$

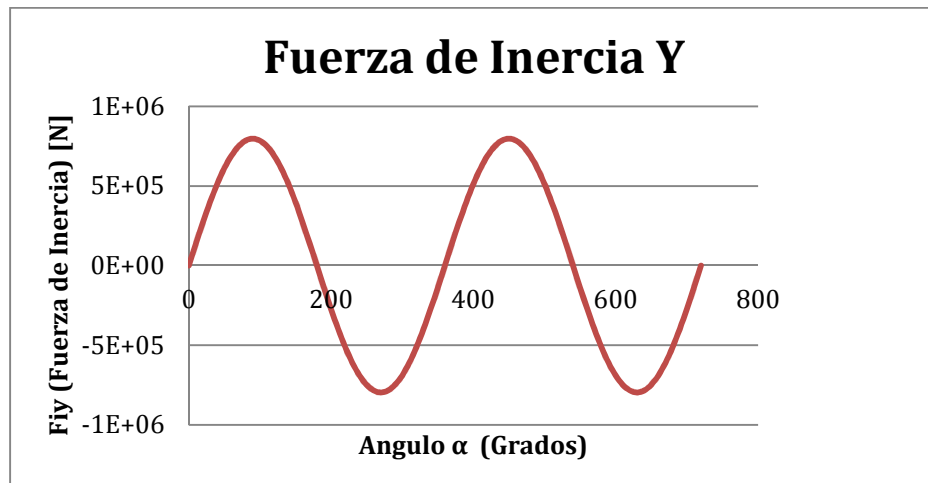
Mediante el uso de una Hoja de Cálculo de Microsoft Excel, se procede a calcular los valores de las fuerzas de inercia en función del giro del cigüeñal, a continuación con los datos calculados se genera las Gráficas 2.1 y 2.2. En este análisis no influye que tipo de combustible se utiliza.



Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.51 – Anexo B

Gráfica 2.1. Fuerza de inercia, componente en X



Fuente: Grupo Investigador
Ec. 2.52 – Anexo B

Gráfica 2.2. Fuerza de inercia, componente en Y

2.9 CÁLCULOS TERMODINÁMICOS DEL CICLO OTTO A GASOLINA E HIDRÓGENO.

Parámetros	Valor	Unidades	Equivalencia	Unidades
Resistencia sistema de admisión ($B^2 + \xi_0$)	3			
Velocidad de la carga en la sección de la válvula (W)	85	m/s		
No. de cilindros (i)	4			
Diámetro del pistón (D)	8.3	cm		
Carrera (S)	10.2	cm		
Longitud de biela (L)	14.5	cm		
Relación de compresión (ϵ)	10			
Rpm a ralentí	800	rpm	83.77	rad/seg
Temperatura inicial (T_0)	298	K		
Presión inicial (P_0)	1	bar	100000	Pa.

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 1 Datos motor diseñado

Cálculos:

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Cilindrada total:	VH	2207.5	cc
Cilindrada unitaria:	Vh	551.8	cc
Volumen de la cámara	Vcc	61.3	cc
Volumen de la cámara de compresión	Va	613.2	cc
Área del pistón	A	54.1	cm ²
Radio de giro del cigüeñal	r	5.1	cm
Relación	λ	0.35	
Densidad del aire	δ	1.1	Kg/m ³

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 2 Valores calculados motor diseñado

2.9.1 ANÁLISIS PARA CADA PUNTO DEL CICLO OTTO

1. Punto A (Admisión)

$$P_a = P_0 - (B^2 + \xi_0) \frac{W_{ad}^2}{2} \delta_0 \cdot 10^{-6} \quad [\text{Bar}]$$

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_{res} T_r}{1 + \gamma_{res}} \quad [^\circ K]$$

$$\gamma_{res} = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}$$

Donde,

γ_{res} , coeficiente de gases residuales, adimensional

0.092 para gasolina, 0.074 para hidrógeno

W , velocidad de carga en la sección de la válvula, 85 [m/s]

δ , densidad del aire, 1.16 [kg/m³]

ξ_0 , coeficiente de resistencia, 0.7^{30}

$(B^2 + \xi_0)$, resistencia sistema de admisión, 3

Motor/Propied.	Pa (Bar)	Ta (°K)	U (KJ/Kg)	S (KJ/Kmol. °K)
Gasolina	0.87	371	213.05	193.75
Hidrógeno	0.87	363	290.08	175.09

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 3 Resultados proceso de admisión.

2. Punto C (Compresión)

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}$$

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}$$

Donde,

n , exponente politrópico, 1.35 para la gasolina, 1.30 para el hidrógeno.³¹

Motor/Propied.	Pc (Bar)	Tc (°K)	Um2 (KJ/Kg. °K)	s_2^0 (KJ/Kmol. °K)
Gasolina	19.5	831.5	505.62	219.06
Hidrógeno	22	813.4	751.49	200.47

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 4 Resultados proceso de compresión.

3. Punto Z (Máxima presión)

$$P_Z = \mu_r \left(\frac{T_Z}{T_C} \right) * P_C$$

³⁰ M.S. Jóvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

³¹ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. sexta edición.

μ_r , coeficiente real de variación molecular, 1.07³²

Motor/Propied.	Pz (bar.)	Tz (°K)	Um3 (KJ/Kg)	Sm3 (KJ/Kmol. °K)	Q (KW)
Gasolina	91.8	3640	1681.48	256.9	44.93
Hidrógeno	66.8	2280	2567.88	262.17	66.87

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 5 Resultados punto de presión máxima.

4. Punto B (Escape)

$$T_b = T_z \left(\frac{V_z}{V_b} \right) = T_z \left(\frac{V_c}{V_a} \right)^{k-1} = T_z \left(\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) = \lambda T_a$$

$$P_b = \frac{P_z}{\varepsilon^{n_2}}$$

n_2 , coeficiente politrópico 2, 0.94 para gasolina, 0.92 para el hidrógeno.³³

Motor/Propied.	Pb (bar.)	Tb (°K)	Q (KJ/Kg)	W(KJ/Kmol. °K)	η (KW)
Gasolina	5.2	2094	22.99	21.94	0.49
Hidrógeno	2.84	972.6	36.58	30.29	0.45

Fuente: Grupo investigador

Tabla 2. 6 Resultados proceso de escape.

³² Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. sexta edición.

³³ Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. sexta edición.

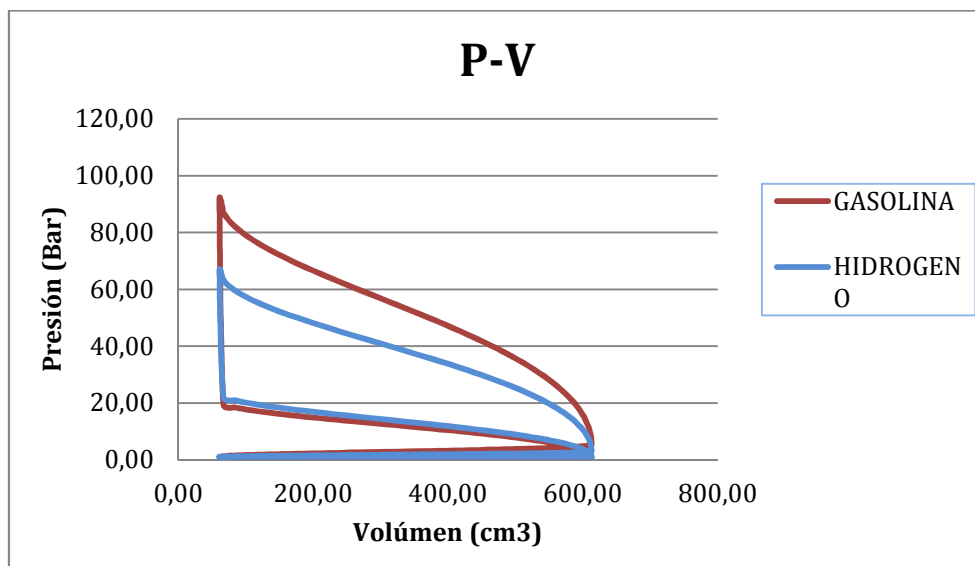
2.10 GRÁFICAS

Las siguientes gráficas representan la presión, volumen, velocidad del pistón y fuerzas que se generan en el tren alternativo en función del ángulo de giro del cigüeñal. A partir de las ecuaciones detalladas en este capítulo se procede a generar los valores y las gráficas respectivas, con la ayuda de una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

Se analizaron los dos tipos de combustibles. Las líneas de color rojo representan el comportamiento del motor cuando se utiliza gasolina, mientras que las líneas azules representan el comportamiento del motor utilizando hidrógeno como combustible.

2.10.1 GASOLINA E HIDRÓGENO

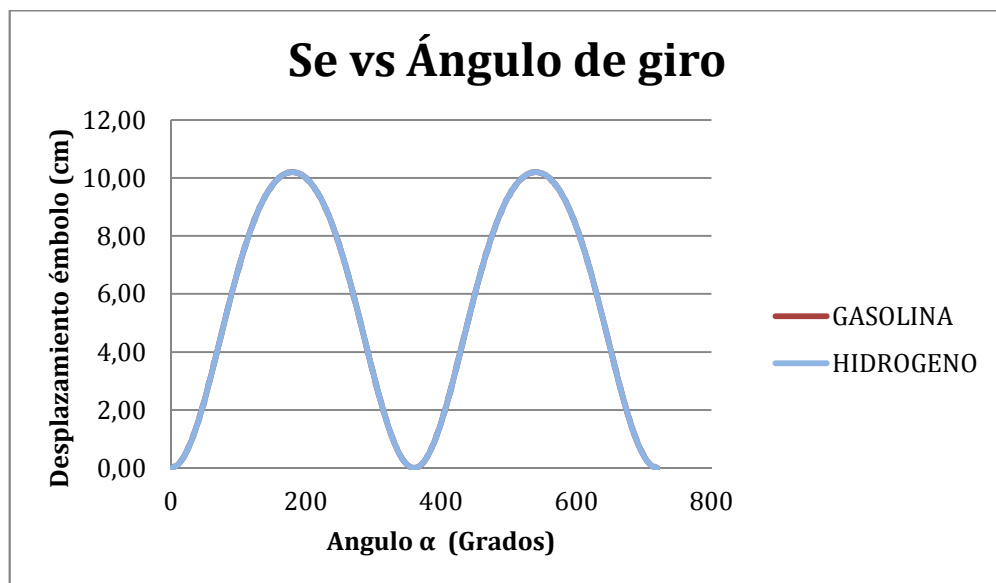
En la gráfica 2.3 se observa la variación de la presión y el cambio del volumen dentro de la cámara de combustión. Existe un pico de presión mayor cuando se utiliza gasolina. Los valores de cada punto dentro del ciclo se encuentran en el Anexo D.



Fuente: Grupo Investigador
Ec. 2.37 – Anexo B

Gráfica 2.3 Presión vs. Volumen del Ciclo Otto Real Gasolina e Hidrógeno

En la gráfica 2.4 se observa el desplazamiento del pistón en cm. en función del giro del cigüeñal. Se observa una sola curva ya que los valores de desplazamiento son los mismos para cualquier tipo de combustible.

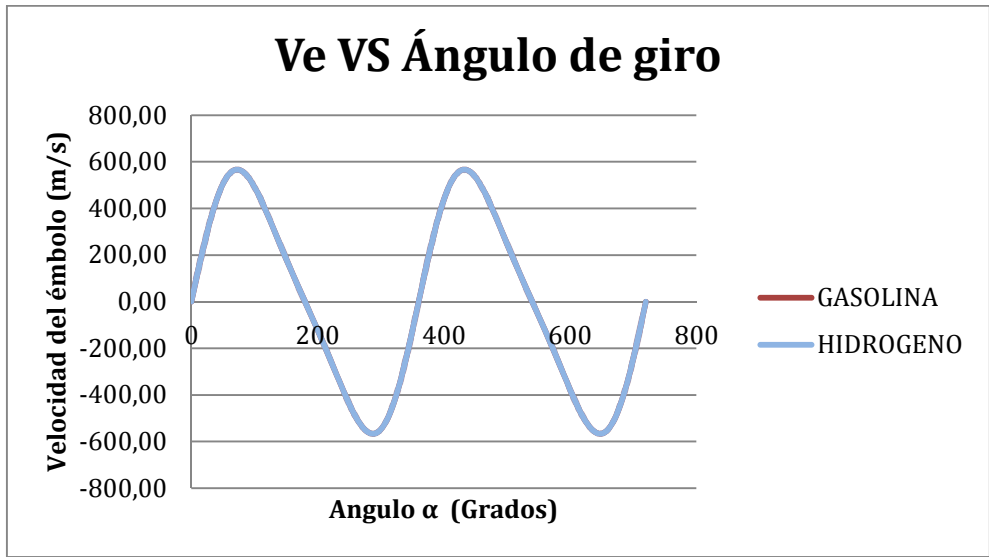


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.38 – Anexo B

Gráfica 2.4 Desplazamiento émbolo vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.5 se observa la velocidad del pistón en m/s. en función del giro del cigüeñal. Se observa una sola curva ya que los valores de velocidad son los mismos para cualquier tipo de combustible.

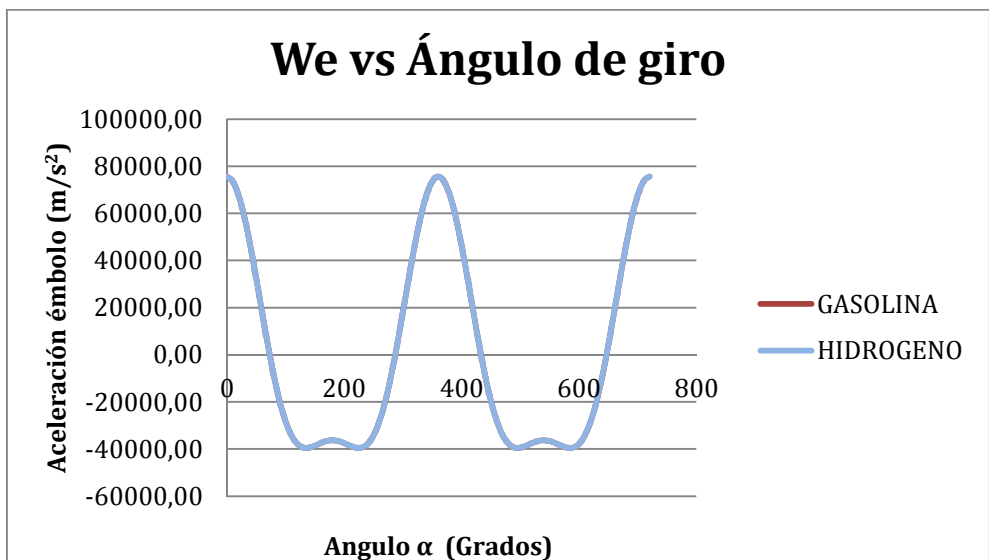


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.39 – Anexo B

Gráfica 2.5 Velocidad émbolo vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.6 se observa la aceleración del pistón en m/s^2 . en función del giro del cigüeñal. Se observa una sola curva ya que los valores de aceleración son los mismos para cualquier tipo de combustible.

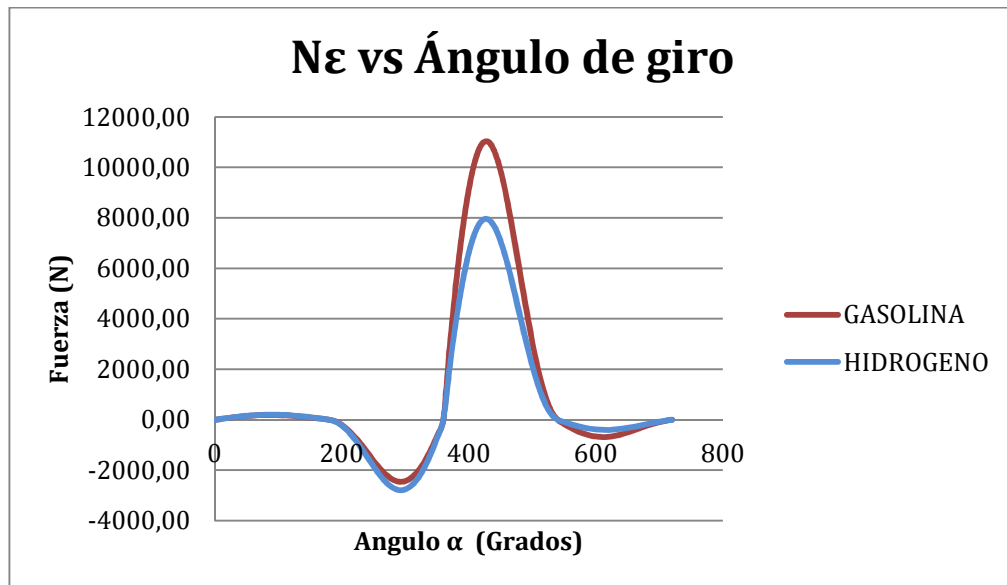


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.40 – Anexo B

Gráfica 2.6 Aceleración émbolo vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.7 se observa la fuerza N_e que se genera en el tren alternativo, la cual es perpendicular a la pared del cilindro como se explicó en el apartado 2.8.2.

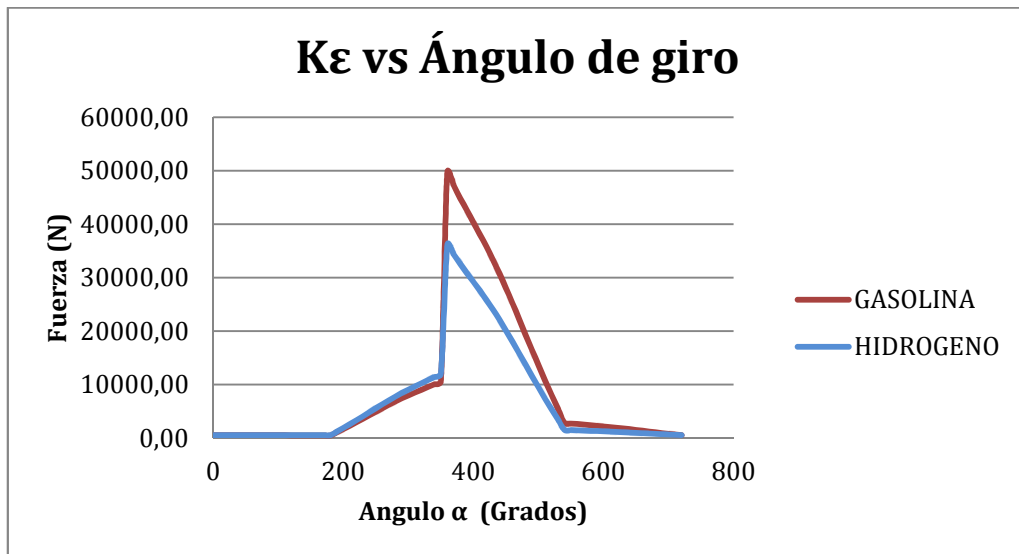


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.42 – Anexo B

Gráfica 2.7 Fuerza N_e vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.8 se observa la fuerza K_e que se genera en el tren alternativo, la cual actúa a lo largo de la biela, como se explicó en el apartado 2.8.3.

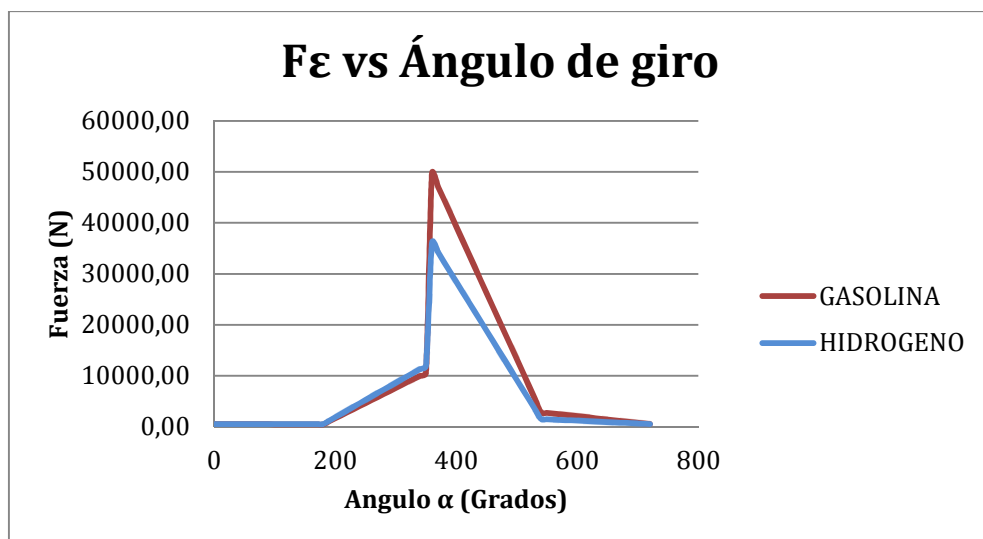


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.43 – Anexo B

Gráfica 2.8 Fuerza KE vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.9 se observa la fuerza F_e que se genera en el tren alternativo, la cual es la resultante de sumar las fuerzas N_e y K_e , como se explicó en el apartado 2.8.1.

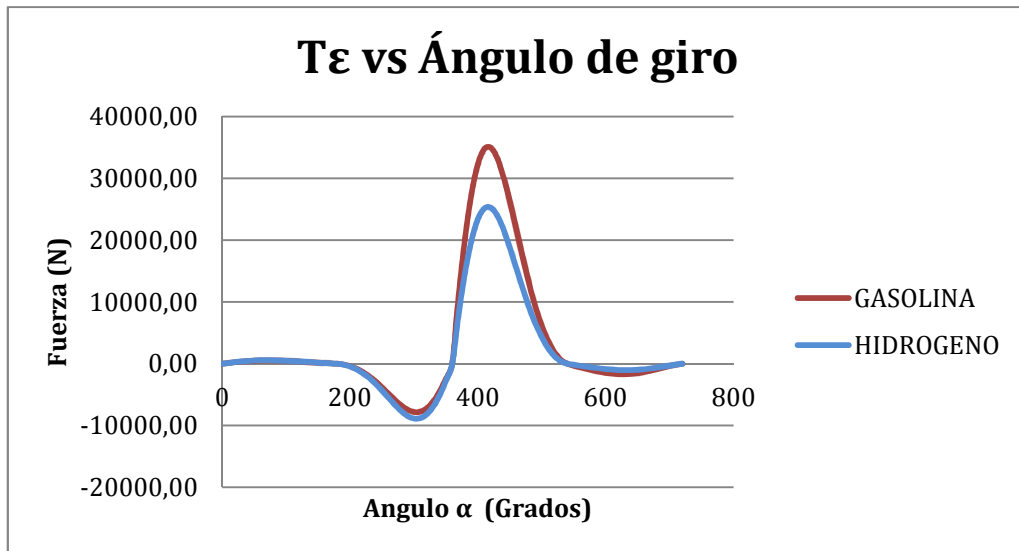


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.41 – Anexo B

Gráfica 2.9 Fuerza FE vs. Angulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

En la gráfica 2.10 se observa la fuerza T_e que se genera en el tren alternativo, la cual tiene una acción tangencial al círculo que describe el cigüeñal, como se explicó en el apartado 2.8.4.

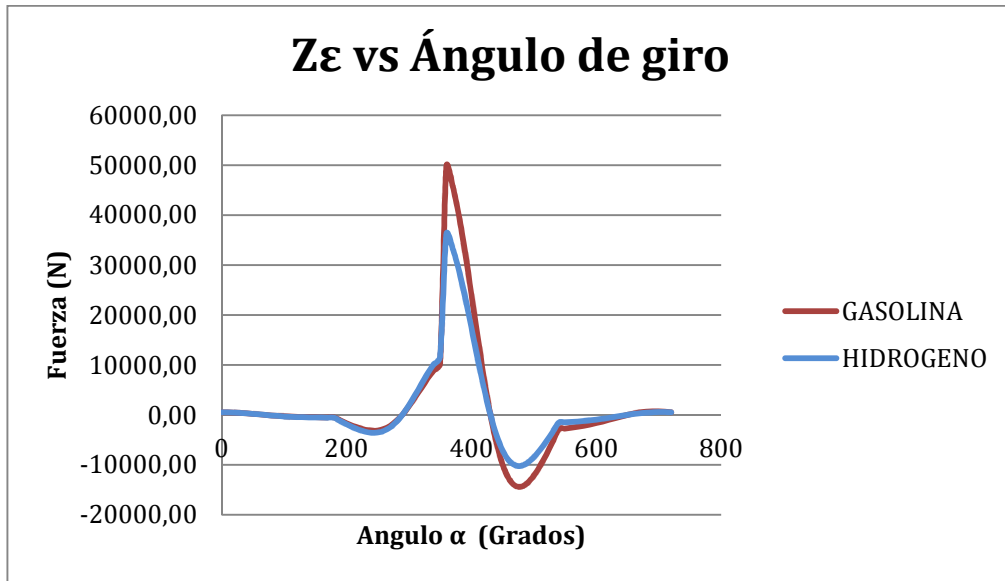


Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.44 – Anexo B

Gráfica 2.10 Fuerza T_e vs. Ángulo de giro Gasolina e Hidrógeno

En la gráfica 2.11 se observa la fuerza Z_e que se genera en el tren alternativo, la cual es normal al radio del círculo que describe el cigüeñal, como se explicó en el apartado 2.8.5.



Fuente: Grupo Investigador

Ec. 2.45 – Anexo B

Gráfica 2.11 Fuerza ZE vs. Ángulo de giro Gasolina e Hidrógeno.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

3.1 DEFINICIÓN.

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en si misma, a diferencia de, por ejemplo, la máquina de vapor.

3.2 CLASIFICACIÓN.

- La turbina de gas.
- El motor rotatorio.
- Motor alternativo

3.3. EL MOTOR ALTERNATIVO.

- El motor de explosión ciclo Otto.
- El motor diésel.

3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS SEGÚN EL CICLO.

- De dos tiempos (2T), efectúan una carrera útil de trabajo en cada giro.
- De cuatro tiempos (4T), efectúan una carrera útil de trabajo cada dos giros.

3.3.2 APLICACIONES DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS.

Las diferentes variantes de los dos ciclos tanto en diésel como en gasolina, tienen cada uno su ámbito de aplicación³⁴.

Dos tiempos gasolina: tuvo gran aplicación en las motocicletas , motores de ultraligeros y motores marinos fuera de borda hasta una cierta cilindrada, habiendo perdido mucho terreno en este campo por las normas de anticontaminación.

Cuatro tiempos gasolina: domina en las aplicaciones en motocicletas de todas las cilindradas, automóviles, aviación deportiva y fuera borda.

Dos tiempos diésel: domina en las aplicaciones navales de gran potencia, hasta 100000 CV.

Cuatro tiempos diésel: domina en el transporte terrestre, automóviles, aplicaciones navales hasta una cierta potencia. Empieza a aparecer en la aviación deportiva.

3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE LOS CILINDROS.

3.4.1 MOTOR EN V.

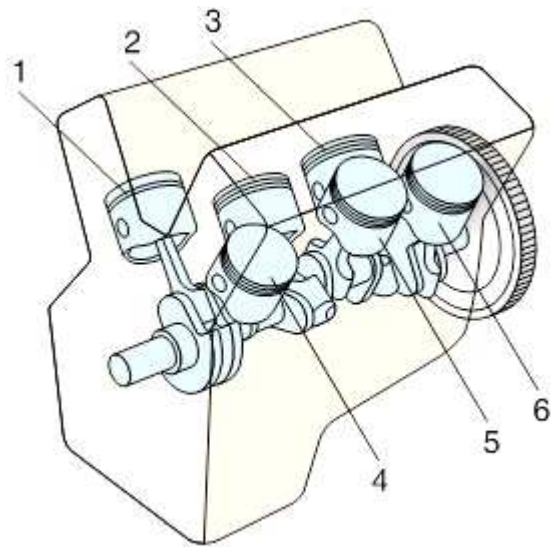
En él los cilindros se agrupan en dos bancadas o filas de cilindros formando una letra V que convergen en el mismo cigüeñal.

Se usa en motores a partir de cinco cilindros, sobre todo en automóviles de tracción delantera, ya que acorta la longitud del motor a la mitad. La apertura de la V varía desde 54° o 60° hasta 90° o 110° aunque las más

³⁴ http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combustión_interna

habituales son 90° y 60°.

Los motores con disposición en V más comunes son los siguientes: V6, V8, V10, V12.

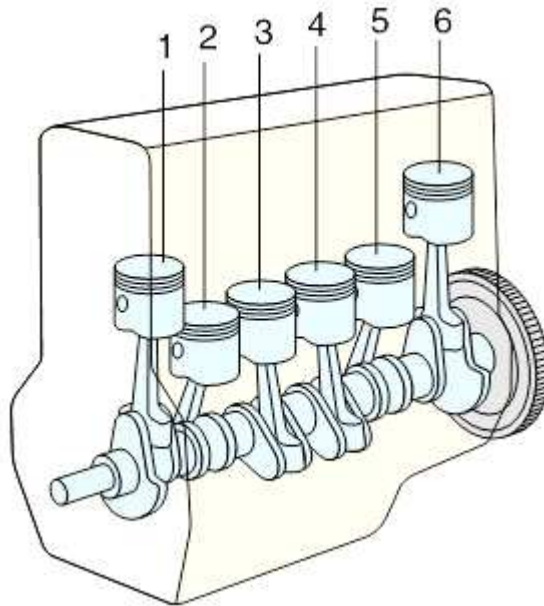


Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Disposici3n_del_motor

Figura 3.1 Motor en V

3.4.2 MOTOR EN LÍNEA.

El motor en línea normalmente se encuentra en configuraciones de 4 a 8 cilindros.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Disposici3n_del_motor

Figura 3.2 Motor en línea

3.4.3 CILINDROS EN OPOSICI3N

Existen tres tipos diferentes de motores con cilindros en oposici3n:

- El motor b3xer
- En V con ángulo de 180°
- El motor de cilindros horizontalmente opuestos.

a. EL MOTOR B3XER.

Es el utilizado en los Volkswagen Escarabajo, Volkswagen Kombi, el Porsche 911, y es muy usado actualmente por Subaru y tienen por lo general entre 4 y 6 cilindros.

b. EL MOTOR EN V DE 180°.

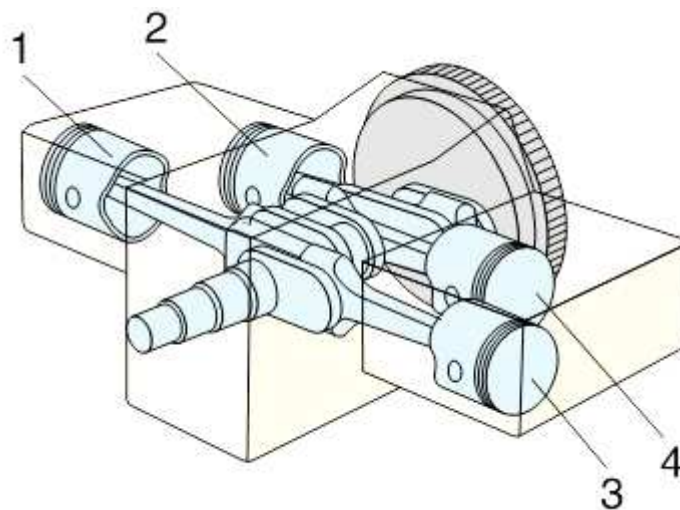
Tiene una configuraci3n muy similar al motor b3xer, es usado por algunas ediciones especiales de Ferrari y Alfa Romeo. La diferencia b3sica

consiste en que ocasionalmente, los motores en V en 180° no usan un muñón largo como en el bóxer, sino que las bielas comparten la misma posición en el cigüeñal, haciendo que mientras un pistón se acerca al cigüeñal el otro se aleje, opuesto a lo que sucede en el Bóxer en el que los pistones se alejan y acercan al mismo tiempo³⁵.

c. EL MOTOR DE CILINDROS HORIZONTALMENTE OPUESTOS.

Es como también se lo conoce al motor bóxer, descrito en el apartado 3.4.3.

La ventaja de estos tres tipos de motores con cilindros en oposición es que tienen una altura menor y el centro de gravedad más bajo que el de sus pares en línea y en "V", tiene una disposición más compacta, y sus elementos al ser de menor longitud garantizan mayor estabilidad. La principal desventaja de los motores Bóxer es su mayor costo de desarrollo y fabricación porque necesita mayor cantidad de piezas.



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Disposici3n_del_motor

Figura 3.3 Cilindros en oposici3n

³⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Disposici3n_del_motor

3.4.4 FORMA RADIAL O EN ESTRELLA.

En este grupo se encuentran dos tipos de motores, ambos con disposición radial de los cilindros: los motores de tipo radial y los motores de tipo rotativo, utilizados ambos principalmente en los motores de aviación y como motores estáticos. La diferencia entre ambos consiste en que los motores de tipo radial mantienen el bloque fijo, girando el cigüeñal en su interior, mientras que los de tipo rotativo, el cigüeñal permanece fijo y es el bloque entero el que gira.

3.4.5 FORMA DE H.

También se encuentra la disposición en H, la cual es una especie de hibridación de dos motores con cilindros en oposición con el uso de dos cigüeñales, quedando una bancada por encima de la otra que generan potencia para un solo eje de transmisión intermedio entre los dos cigüeñales.

3.4.6 FORMA DE W.

Otra disposición es en W que es una especie de doble V combinada en tres o cuatro bancadas de cilindros y un cigüeñal, que data de la década de 1920, y son usadas en algunos vehículos modernos del Grupo Volkswagen, como el Audi A8, el Volkswagen Touareg o el Volkswagen Phaeton.

3.5 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO.

Los motores Otto y los diésel tienen los mismos elementos principales, (bloque, cigüeñal, biela, pistón, culata, válvulas) y otros específicos de cada uno, como la bomba inyectora de alta presión en los diésel, o antiguamente el carburador en los Otto. En los 4T es muy frecuente designarlos mediante su tipo de distribución: SV, OHV, SOHC, DOHC. Es

una referencia a la disposición del (o los) árbol de levas.

3.5.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al cilindro. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por una biela al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

En los motores de varios cilindros, el cigüeñal tiene una posición de partida, llamada espiga de cigüeñal y conectada a cada eje, con lo que la energía producida por cada cilindro se aplica al cigüeñal en un punto determinado de la rotación. Los cigüeñales cuentan con pesados volantes y contrapesos cuya inercia reduce la irregularidad del movimiento del eje.

3.5.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.

El sistema de alimentación de combustible de un motor Otto consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo dosificador de combustible que vaporiza o atomiza el combustible desde el estado líquido, en las proporciones correctas para poder ser quemado. Se llama carburador al dispositivo que hasta ahora venía siendo utilizado con este fin en los motores Otto.

Ahora los sistemas de inyección de combustible lo han sustituido por completo por motivos medioambientales. Su mayor precisión en la inyección combustible reduce las emisiones de CO₂, y aseguran una mezcla más estable.

En los motores diésel se dosifica el combustible gasoil de manera no proporcional al aire que entra, sino en función del mando de aceleración y el régimen motor mediante una bomba inyectora de combustible.

a. INYECCIÓN ELECTRÓNICA.

La inyección electrónica es una forma de inyección de combustible, tanto para motores de gasolina, en los cuales lleva ya varias décadas implantada, como para motores diésel, cuya introducción es relativamente más reciente.

Se puede subdividir en varios tipos: mono punto, multipunto, secuencial, simultánea; pero básicamente todas se basan en la ayuda de la electrónica para dosificar la inyección del carburante y reducir la emisión de agentes contaminantes a la atmósfera y a la vez optimizar el consumo³⁶.

Este sistema ha reemplazado al carburador en los motores de gasolina. Su introducción se debió a un aumento en las exigencias de los organismos de control del medio ambiente para disminuir las emisiones de los motores.

En los motores diésel ha sustituido a la bomba inyectora, por una bomba de alta presión con inyectores electrohidráulicos.

Su importancia radica en su mejor capacidad respecto al carburador para dosificar el combustible y dosificar la mezcla aire / combustible, es decir el factor lambda de tal modo que quede muy próxima a la estequiométrica (14,7:1 para la gasolina) lo que garantiza una combustión completa con reducción de los porcentajes de gases tóxicos a la atmósfera.

b. LA FUNCIÓN DE LA INYECCIÓN EN MOTORES A GASOLINA.

Medir el aire del medio ambiente que es aspirado por el motor, controlado por el conductor mediante la mariposa, en función de la carga motor necesaria en cada caso, con objeto de adaptar el caudal de combustible a

³⁶ http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combustión_interna_alternativo

esta medición y conforme al régimen de funcionamiento del motor.

Dosificar mediante inyección la cantidad de combustible requerida por esta cantidad de aire, necesaria para que la combustión sea lo más completa posible, es decir guardando en la medida de lo posible la proporción estequiométrica, dentro de los límites del factor lambda.



Fuente: <http://www.pro-1performance.com/inyeccionelectronica/inyeccion.htm>

Figura 3.4 Inyección de gasolina

El funcionamiento se basa en la medición de ciertos parámetros de funcionamiento del motor, como son: el caudal de aire, régimen del motor (estos dos son los más básicos), y son los que determinan la carga motor, es decir la fuerza necesaria de la combustión para obtener un par motor, es decir una potencia determinada.

Por otra parte hay que suministrar el combustible a unos 2,5 - 3,5 bar a los inyectores, esto se logra con una bomba eléctrica situada a la salida del depósito o dentro del mismo.

Adicionalmente se toman en cuenta otros datos, como la temperatura del

aire y del refrigerante, el estado de carga (sensor MAP) en los motores turboalimentados, posición de la mariposa y cantidad de oxígeno en los gases de escape (sensor EGO o Lambda), entre otros. Estas señales son procesadas por la unidad de control, dando como resultado señales que se transmiten a los actuadores (inyectores) que controlan la inyección de combustible y a otras partes del motor para obtener una combustión mejorada.

El sensor PAM o MAP (Presión Absoluta del Múltiple o Colector) indica la presión absoluta del múltiple de admisión y el sensor EGO (Exhaust Gas Oxygen) o "Sonda lambda" la cantidad de oxígeno presente en los gases de combustión.

Estos sistemas desde hace algún tiempo tiene incorporado un sistema de autocontrol o autodiagnóstico que avisa cuando algo anda mal, además existe la posibilidad de realizar un diagnóstico externo por medio de aparatos de diagnóstico electrónicos que se conectan a la unidad de control de inyección y revisan todos los parámetros, indicando aquellos valores que estén fuera de rango.

La detección de fallas, llamados "DTC" (Diagnostic Trouble Codes) debe realizarla personal especializado en estos sistemas y deben contar con herramientas electrónicas de diagnóstico también especiales para cada tipo de sistema de inyección.

La reparación de estos sistemas se limita al reemplazo de los componentes que han fallado, generalmente los que el diagnóstico electrónico da como defectuosos.

Los sistemas de inyección electrónicos no difieren de los demás, respecto a las normas de seguridad ya que manipula combustible o mezclas explosivas. Lo mismo para el cuidado del medio ambiente, se debe manipular con la precaución de no producir derrames de combustible.

3.5.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

En los motores de varios cilindros el combustible vaporizado se lleva a los cilindros a través de un tubo ramificado llamado colector de admisión. La mayor parte de los motores cuentan con un colector de escape o de expulsión, que transporta los gases que se producen luego de la combustión fuera del vehículo.



Fuente: <http://eurocrewpr.com/forum/12105-sistemas-de-distribucion-variables>

Figura 3.5 Sistema de distribución.

a. VÁLVULAS Y ÁRBOL DE LEVAS.

Cada cilindro toma el combustible y expulsa los gases a través de válvulas de cabezal o válvulas deslizantes. Un muelle mantiene cerradas las válvulas hasta que se abren en el momento adecuado, al actuar las levas de un árbol de levas rotatorio movido por el cigüeñal, estando el conjunto coordinado mediante la cadena o la correa de distribución.

3.5.4 SISTEMA DE ENCENDIDO.

Los motores necesitan una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. En los motores Otto, el sistema de ignición consiste en un componente llamado bobina de encendido, que es un transformador de alto voltaje al que está conectado un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca un impulso eléctrico de alto voltaje en el secundario.

Dicho impulso está sincronizado con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; el impulso se lleva al cilindro correspondiente (aquel que está comprimido en ese momento) a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía que, fijado en cada cilindro, dispone de dos electrodos separados unos milímetros, entre los cuales el impulso eléctrico produce una chispa, que inflama el combustible.

Si la bobina está en mal estado se sobrecalienta; esto produce pérdida de energía, aminora la chispa de las bujías y causa fallos en el sistema de encendido del automóvil.

3.5.5 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios, de automóviles y de aviones y los motores fuera de borda se refrigeran con aire. Los cilindros de los motores que utilizan este sistema cuentan en el exterior con un conjunto de láminas de metal que emiten el calor producido dentro del cilindro³⁷.

En otros motores se utiliza refrigeración por agua, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de agua que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El agua se refrigera al

³⁷ http://www.todomotores.cl/mecanica/el_motor.htm

pasar por las láminas de un radiador. Es importante que el líquido que se usa para enfriar el motor no sea agua común y corriente porque los motores de combustión trabajan regularmente a temperaturas más altas que la temperatura de ebullición del agua.

3.5.6 SISTEMA DE ARRANQUE.

Al contrario que los motores y las turbinas de vapor, los motores de combustión interna no producen un par de fuerzas cuando arrancan (véase Momento de fuerza), lo que implica que debe provocarse el movimiento del cigüeñal para que se pueda iniciar el ciclo. Los motores de automoción utilizan un motor eléctrico (el motor de arranque) conectado al cigüeñal por un embrague automático que se desacopla en cuanto arranca el motor. Por otro lado, algunos motores pequeños se arrancan a mano girando el cigüeñal con una cadena o tirando de una cuerda que se enrolla alrededor del volante del cigüeñal.

3.6 TREN ALTERNATIVO.

Se denomina tren alternativo al conjunto formado por pistones, bielas y cigüeñal y sus elementos auxiliares. Se describen a continuación cada uno de los elementos que forman parte del tren alternativo.

3.6.1 PISTONES

Se denomina pistón a uno de los elementos básicos del motor de combustión interna.

Se trata de un émbolo que se ajusta al interior de las paredes del cilindro mediante aros flexibles llamados segmentos o anillos. Efectúa un movimiento alternativo, obligando al fluido que ocupa el cilindro a modificar su presión y volumen o transformando en movimiento el cambio de presión y volumen del fluido.

A través de la articulación de biela y cigüeñal, su movimiento alternativo se transforma en rotativo en este último.

Los pistones de motores de combustión interna tienen que soportar grandes temperaturas y presiones, además de velocidades y aceleraciones muy altas. Debido a estos se escogen aleaciones que tengan un peso específico bajo para disminuir la energía cinética que se genera en los desplazamientos.

También tienen que soportar los esfuerzos producidos por las velocidades y dilataciones. El material escogido para la fabricación de pistones es el aluminio y suelen utilizarse aleaciones como: cobre, silicio, magnesio y manganeso entre otros.



Fuente: <http://www.ecured.cu/index.php/Pistón>

Figura 3.6 Pistón

a. FABRICACIÓN.

Básicamente existen dos procesos para la fabricación de los pistones. Estos pueden ser:

- Fundidos

- Forjados

Dependiendo de la cantidad necesaria a producir y especialmente de los esfuerzos, temperaturas, presiones, etc. a los que estarán sometidos (sea un motor diésel, naftero, de gasolina , de competición, etc.) se elige uno u otro método. Los pistones forjados tienen mayor resistencia mecánica. Luego llevan mecanizados varios que son los que determinan la forma final del pistón. Estos mecanizados son hechos con un CNC.

Mecanizado del alojamiento del perno o bulón de pistón: se mecaniza el alojamiento del perno, como este perno estará girando cuando el motor esté en funcionamiento por lo que debe quedar una superficie de buena calidad y rugosidad sin ralladuras. Estos son dos orificios ubicados en paredes opuestas del pistón. Estos agujeros deben ser concéntricos (tener la misma línea de eje) y esta línea debe ser paralela a la línea de eje del muñón del cigüeñal ya que si así no fuese al funcionar el motor la biela se “agarra” con el perno.

3.6.2 BIELA.

Se denomina biela a un elemento mecánico que sometido a esfuerzos de tracción o compresión, transmite el movimiento articulando a otras partes de la máquina. En un motor de combustión interna conectan el pistón al cigüeñal.

Actualmente las bielas son un elemento básico en los motores de combustión interna y en los compresores alternativos. Se diseñan con una forma específica para conectarse entre las dos piezas, el pistón y el cigüeñal. Su sección transversal o perfil puede tener forma de H, I o + . El material del que están hechas es de una aleación de acero, titanio o aluminio. En la industria automotor todas son producidas por forjamiento,

pero algunos fabricantes de piezas las hacen mediante maquinado

a. PARTES DE LA BIELA.

Se pueden distinguir tres partes en una biela.

La parte trasera de biela en el eje del pistón, es la parte con el agujero de menor diámetro, y en la que se introduce el casquillo a presión, en el que luego se inserta el bulón, un cilindro o tubo metálico que une la biela con el pistón.



Fuente: <http://www.electriauto.com/mecanica/motor-de-combustion-interna/>

Figura 3.7 Biela

El cuerpo de la biela es la parte central, está sometido a esfuerzos de tracción-compresión en su eje longitudinal, y suele estar aligerado, presentando por lo general una sección en forma de doble T, y en algunos casos de cruz.

La cabeza es la parte con el agujero de mayor diámetro, y se suele componer de dos mitades, una solidaria al cuerpo y una segunda postiza

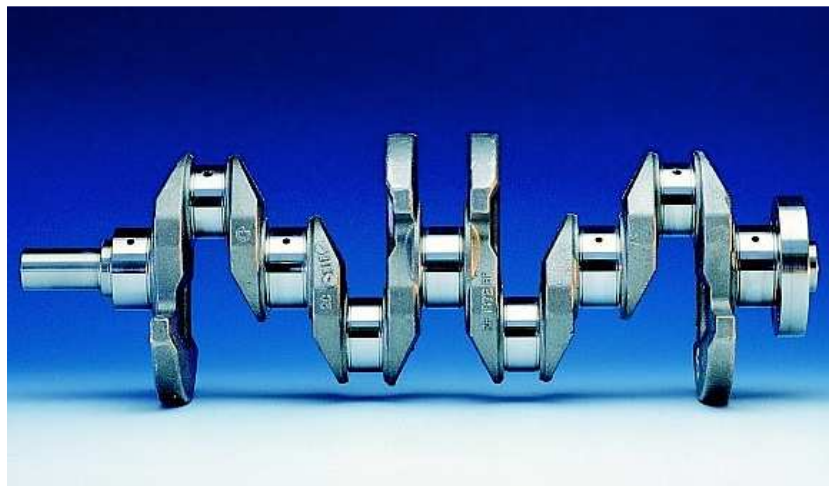
denominada sombrerete, que se une a la primera mediante tornillos.

b. MATERIALES.

Por lo general, las bielas de los motores se realizan en acero templado mediante forja, aunque hay motores de competición con bielas de titanio o aluminio, realizadas por operaciones de arranque de material.

3.6.3 CIGÜEÑAL.

Un cigüeñal es un eje acodado, con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo de biela - manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en rotatorio y viceversa. El extremo de la biela opuesta al bulón del pistón (cabeza de biela) conecta con la muñequilla, la cual junto con la fuerza ejercida por el pistón sobre el otro extremo (pie de biela) genera el par motor instantáneo.



Fuente: <http://www.electriauto.com/mecanica/motor-de-combustion-interna/>

Figura 3.8 Cigüeñal

El cigüeñal va sujeto en los apoyos, siendo el eje que une los apoyos el eje del motor. Normalmente se fabrican de aleaciones capaces de soportar los esfuerzos a los que se ven sometidos y pueden tener perforaciones y conductos para el paso de lubricante. Hay diferentes tipos de cigüeñales; Los hay que tienen un apoyo cada dos muñequillas y los hay con un apoyo entre cada muñequilla. Por ejemplo para el motor de automóvil más usual, el de cuatro cilindros en línea, los hay de tres apoyos, (hoy ya en desuso) y de cinco apoyos, (lo más corriente).

En otras disposiciones como motores en V o bien horizontales opuestos (bóxer) puede variar esta regla, dependiendo del número de cilindros que tenga el motor. El cigüeñal es también el eje del motor con el funcionamiento del pistón.

3.7 MATERIALES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

3.7.1 BLOQUE DE CILINDROS.

Procedimiento: Fundido de aleación de aluminio³⁸.

Material: DIN 1691.

Clasificación:

GG: Hierro fundido con grafito laminar (fundición gris). No maleable, fácilmente mecanizable y fundible, sensible a deformación, resistente a la presión, poca dilatación, buenas características de rozamiento, resistente a vibraciones, corrosión y fuego. Buenas propiedades de deslizamiento, para altas sollicitaciones.

³⁸ <http://librosdemecanica.blogspot.com/2010/08/materiales-del-motor-de-combustion.html>

GG-12: fácilmente mecanizable; para piezas de fundición sometidas a sollicitación mediana, contiene de 3,3 a 3,6 % de C, resistencia a la tracción de 120 N/mm².

GG-20: para piezas de fundición con alta sollicitaciones, 1,6 a 2% Si, con 3,2 a 3,4% C, resistencia a la tracción de 200 N/mm².

GG-25: para piezas de fundición con alta sollicitaciones, 1,2 a 1,8% Si;

3.7.2 PISTONES.

Procedimiento: Sumergen los pistones en un baño de sal con estaño depositándose el estaño sobre el aluminio. Con un pequeño espesor presenta una buena acción de deslizamiento.

Materiales:

Al Si 12 Cu Ni 1: aleación para fundición en coquilla tiene pequeña dilatación térmica y es templable, con Si 12%, Cu 1%, Ni 1%, Mg 1%, el resto Al, resistencia a tracción de 200 a 370 N/mm².

Al-Si 12 Cu Ni: (Si 12%, Cu 1%, Ni 1%, Mg 1%, el resto Al) para fundición en coquilla y pistones moldeados, dilatación térmica = 0,000021 1/k; resistencia a tracción de 200 a 370 N/mm².

Aleación de aluminio: tienen cortes transversales para facilitar la dilatación por el calor de la zona de los anillos y el cuerpo del embolo, livianos que los de hierro fundido, alcanzan velocidades superiores del motor y reducen las pérdidas de energía por el movimiento de vaivén. Se emplean por su baja densidad, buena conductividad térmica.

3.7.3 BIELA

Procedimiento: La superficie de contacto del pie de biela se cubre de metal antifricción para disminuir el roce con el muñón del cigüeñal

Materiales:

34 Cr Mo 4: DIN 17200, Acero bonificado no aleado de medio carbono, para piezas con alta resistencia a fatiga, con 0,34% C; 1% Cr, 0,2% Mo; resistencia a tracción de 800 a 950 N/mm².

37 Mn Si 5: DIN 17200, Acero bonificado no aleado de medio carbono, para piezas con alta resistencia a fatiga, con 0,37% C; 1,25% Si, 1,25% Mn; resistencia a tracción de 900 a 1050 N/mm².

3.7.4 CULATA DE CILINDROS.

Procedimiento: Aleación de aluminio fundida:

Materiales:

GD Al Si 13: 13% Si, el resto Al; fundición a presión; resistencia tracción de 200 a 280 N/mm².

G-Al Si 10 Mg: piezas para fundición resistentes a vibraciones³⁹.

G Fundición; 10% Si, 0,3% Mg, resto Al; resistencia a la tracción de 180 a 240 N/mm².

³⁹ <http://librosdemecanica.blogspot.com/2010/08/materiales-del-motor-de-combustion.html>

3.7.5 VÁLVULAS:

Materiales:

45 Cr Si 93: acero aleado al cromo-silicio de media aleación con 0,45% C, 0,93% Cr, % Si.

X 45 Si Cr 4: acero aleado al cromo-silicio de alta aleación y sollicitación, con 0,45% C, 4% Si y 2,6% Cr, resistencia a la tracción de 900 a 1050 N/mm².

X 45 Cr Si 4: acero aleado al cromo-silicio de alta aleación con 0,45% C, 4% Cr y 2,6% Si, resistencia a la tracción de 900 a 1050 N/mm².

37 Mn Si 5: acero aleado al manganeso-silicio de sollicitación mediana; 1,25% Mn, 1,25% Si y 0,37% C; resistencia a la tracción de 800 a 950 N/mm².

3.7.6 CARTER.

Procedimiento: Estampado de chapa de acero, corcho, neopreno, aluminio fundido.

G-Al Si10 Mg: para piezas de fundición resistentes a las vibraciones, 10% Si, 0,3% Mg, resto Al, resistencia a la tracción de 180 a 240 N/mm².

3.7.7 CILINDROS.

Materiales:

G-Al Si10 Mg: para piezas de aleación fundida y maleable de aluminio-silicio-magnesio, resistentes a las vibraciones, 10% Si, 0,3% Mg, resto Al, resistencia a la tracción de 180 a 240 N/mm².

GG-25: DIN 1691, Hierro fundido con grafito laminar para piezas de fundición con alta solicitaciones, 1,2 a 1,8% Si; 2,8 a 3,2% C; resistencia a la tracción de 250 N/mm².

GG-30: DIN 1691, Hierro fundido con grafito laminar, fundición de alta calidad, endurecible superficialmente, para piezas con solicitaciones muy altas, 1,2 a 1,6% Si; 2,6 a 3% C; resistencia a tracción de 300 N/mm².

3.7.8 CIGÜEÑAL.

Procedimiento: Temple superficial por nitruración. Temple por flameado y inducción. Temple por flameado o con llama oxiacetilénica.

Materiales:

DIN 17100, acero de construcción de uso general no aleado para solicitaciones altas, 0,25 %C, 1: grupo de calidad, resistencia a tracción de 420 a 500 N/mm².

34 Cr Mo 4: acero bonificado de medio carbono con 0,34% C; 1% Cr, 0,2% Mo; resistencia a tracción de 800 a 950 N/mm². Para piezas con alta resistencia a fatiga.

42 Cr Mo 4: acero bonificado de medio carbono con 0,42% C con 1% Cr, 0,2% Mo, resistencia a tracción de 1000 a 1200 N/mm².

GGG-50: DIN 1693: hierro fundido con grafito esferoidal con 3,8% C, resistencia a la tracción de 500 N/mm². Bueno para endurecer superficialmente, estructura ferrítica y perlítica.

GGG-60: DIN 1693: hierro fundido con grafito esferoidal con 3,5% C,

resistencia a la tracción de 600 N/mm². Alta resistencia al desgaste, bueno para endurecimiento superficial, estructura ferrítica y perlítica.

3.7.9 ÁRBOL DE LEVAS

Procedimiento:

Temple superficial por nitruración.

Nitruración en baños de sales (nitruración blanda).

Medio de cementación: baño de sales nitradas, conteniendo cianuro.

Tratamiento térmico: temple por flameado y inducción.

Temperatura de temple de 800 a 900°C, profundidad de capa endurecida de 2 a 3 mm, para piezas de acero bonificado aleado y no aleado con un 0,3 a 0,7% C.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS ASISTIDO POR COMPUTADOR

4.1 MODELADO DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS.

Para el modelado del tren alternativo y el bloque de cilindros se utilizará el software de AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2013.

4.1.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD).

El diseño asistido por computadora CAD (Computer Aided Design) integra herramientas de software, conocimientos y aprendizaje interactivo para proporcionar ayuda en tareas específicas, que nos permite operar a través de una interfaz gráfica que permiten manejar la información de forma lógica. De los modelos pueden obtenerse planos con cotas y anotaciones para generar la documentación técnica, diseñar en dos o tres dimensiones. Estas ayudas incluyen asistencias de impresiones, guías paso a paso, animaciones.

a. SOFTWARE INVENTOR

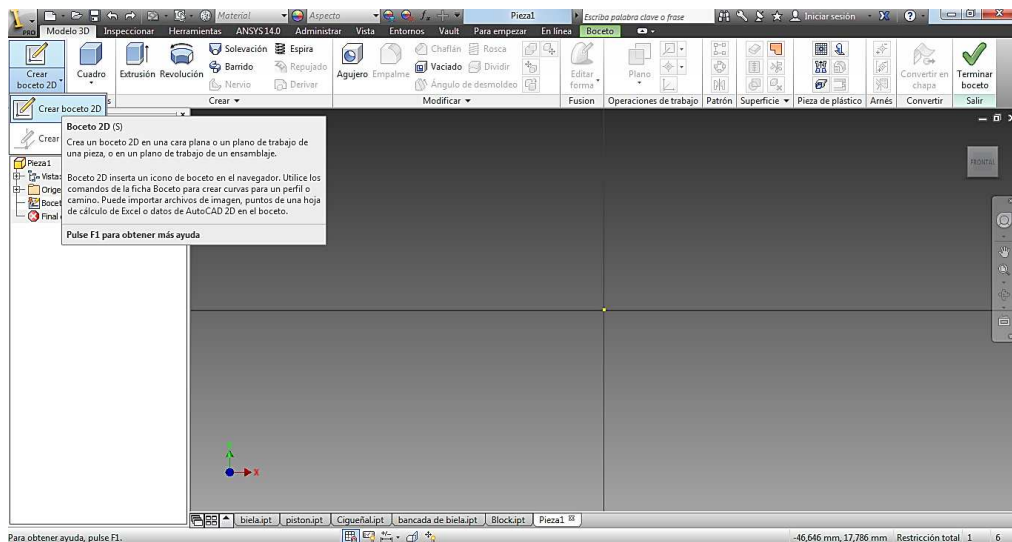
El software de CAD, Autodesk Inventor Professional 2013, ofrece una gama completa de programas para diseño mecánico en 3D, simulación de productos, creación de herramientas y comunicación de diseños. Permite producir modelos en 3D de gran precisión que ayuda a diseñar, visualizar y simular sus productos antes de ser construidos. La creación de prototipos digitales con Inventor contribuye a que las compañías puedan diseñar mejores productos, reducir los costos de desarrollo y llegar al mercado más rápido.

4.1.2 PROCEDIMIENTO DEL MODELADO.

a. CREACIÓN DE UN BOCETO.

Al abrir un nuevo archivo de pieza se activa el entorno de boceto, la rejilla aparece automáticamente e indica el tamaño que tomará la pieza.

El primer paso es seleccionar las diferentes herramientas de boceto como son líneas y curvas de acuerdo a nuestras necesidades.



Fuente: Grupo investigador.

Figura 4. 1 Creación de un boceto.

b. RESTRICCIÓN DE LOS BOCETOS

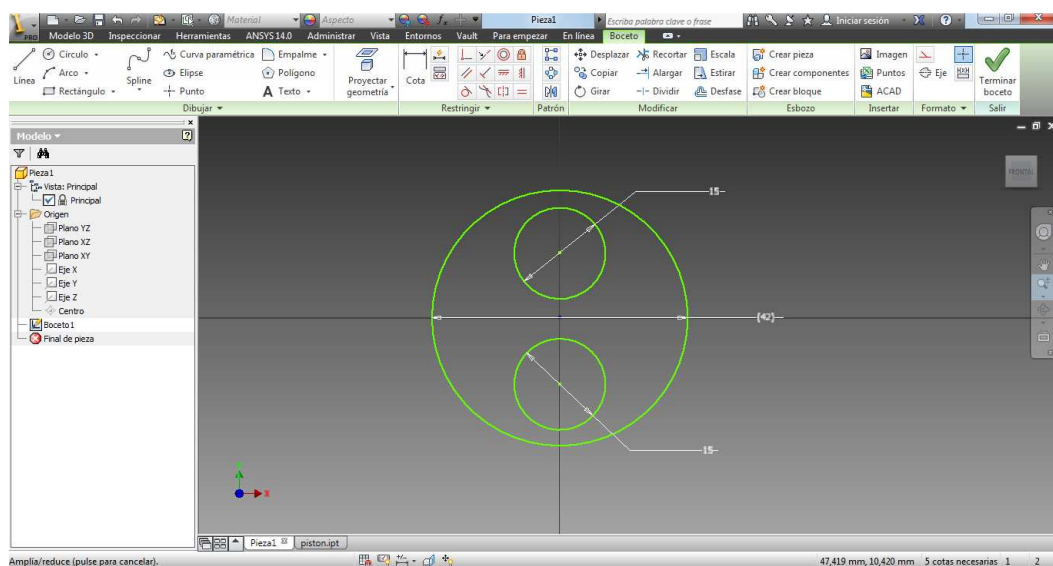
Las restricciones cambian y definen la forma de un boceto. Las restricciones se aplican automáticamente a medida que se crea el boceto. Restricciones como horizontal y vertical aparecerán automáticamente.

Las restricciones en Autodesk Inventor puede referirse tanto a restricciones geométricas como a cotas, las cuales sirven en conjunto para crear un boceto que se ajusta al objetivo del diseño.

c. ACOTACIÓN DE BOCETOS.

Las restricciones horizontal, vertical o paralela pueden aplicarse mientras se trabaja en el boceto, mientras que las cotas se añaden normalmente después de haber colocado la geometría de boceto.

En general las cotas de Autodesk Inventor Professional 2013 son paramétricas, esto significa que el elemento muestra su tamaño real y si se modifica esta cota, el elemento cambia de tamaño. También se puede establecer una cota de referencia, es decir esta cota muestra el tamaño del elemento pero no puede ser utilizada para cambiar dicho tamaño.



Fuente: Grupo investigador.

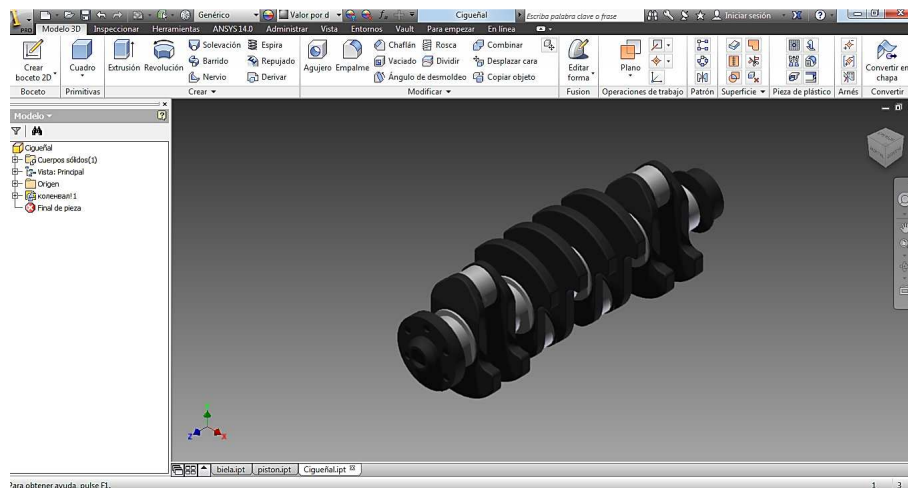
Figura 4. 2 Acotación de boceto del pistón.

4.1.3 MODELADO DEL TREN ALTERNATIVO Y EL BLOQUE DE CILINDROS DEL MOTOR EN AUTODESK INVENTOR 2013

Con la ayuda de las herramientas de Autodesk Inventor Professional 2013 se modeló cada una de las piezas del tren alternativo y el bloque del motor de 4 cilindros, para lo cual se utilizó las operaciones de extrusión, fileteado, chaflanes, revoluciones, empalmes entre otras para obtener las piezas deseadas, con el fin de realizar las pruebas pertinentes utilizando hidrógeno y luego gasolina, como combustibles.

a. MODELADO DEL CIGÜEÑAL

En la figura 4.3 se observa el modelado final del cigüeñal, de su correcto diseño depende que transforme adecuadamente el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.

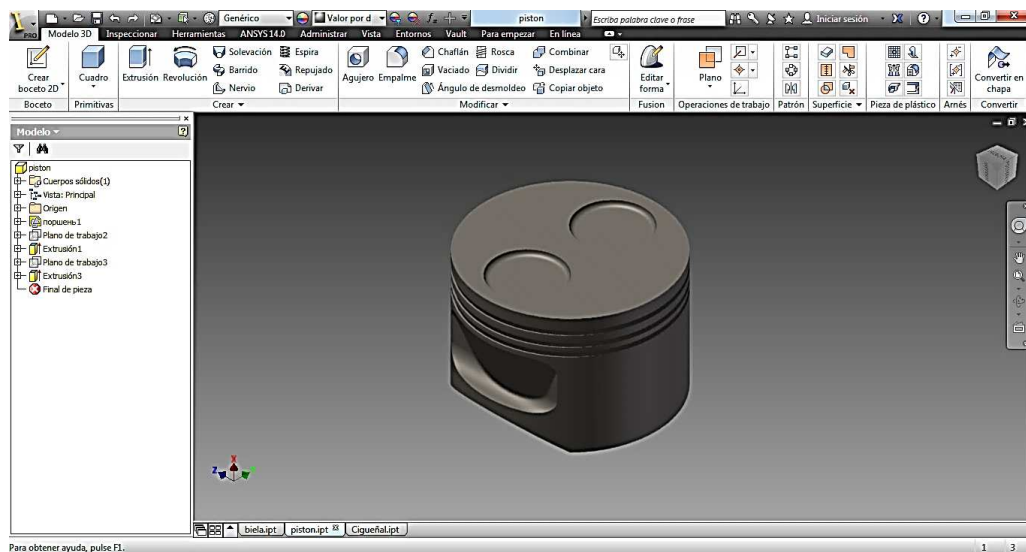


Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.3 Modelado final del cigüeñal

b. MODELADO DEL PISTÓN.

En la figura 4.4 se observa el modelado final del pistón, de su correcto diseño depende que efectué un adecuado movimiento alternativo, obligando al fluido que ocupa el cilindro a modificar su presión y volumen.

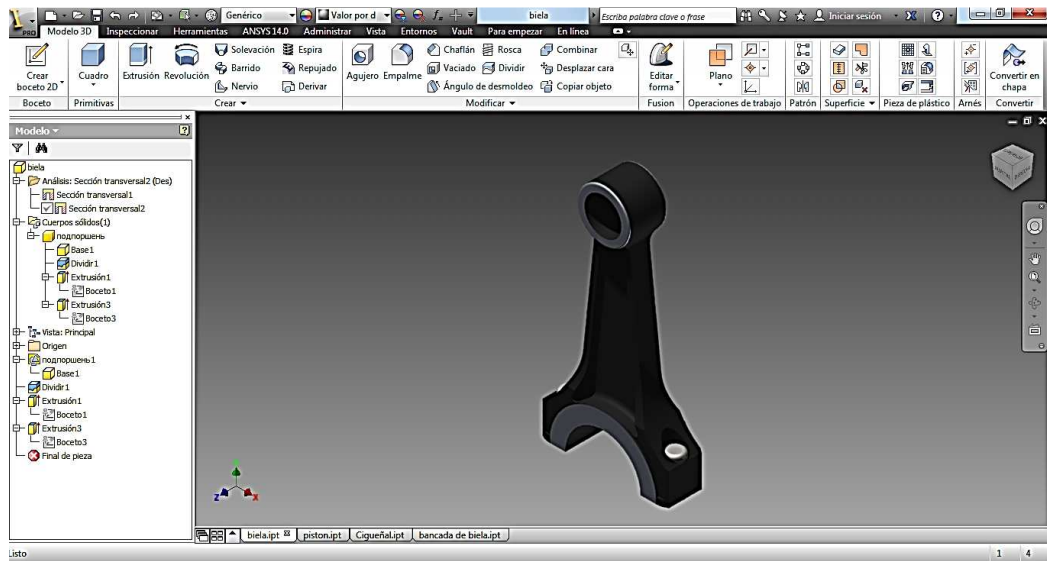


Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.4 Modelado final del pistón

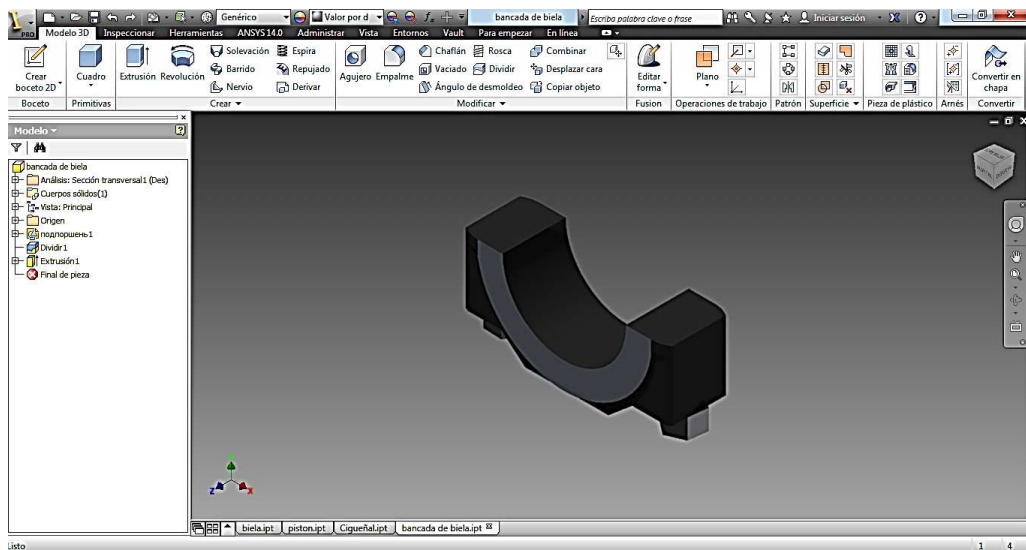
c. MODELADO DE LA BIELA Y BANCADA

En la figura 4.5 y 4.6 se observa el modelado final de la biela y bancada de biela, de su correcto diseño depende que resista los esfuerzos de tracción o compresión generados en el motor.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.5 Modelado final del brazo de biela.

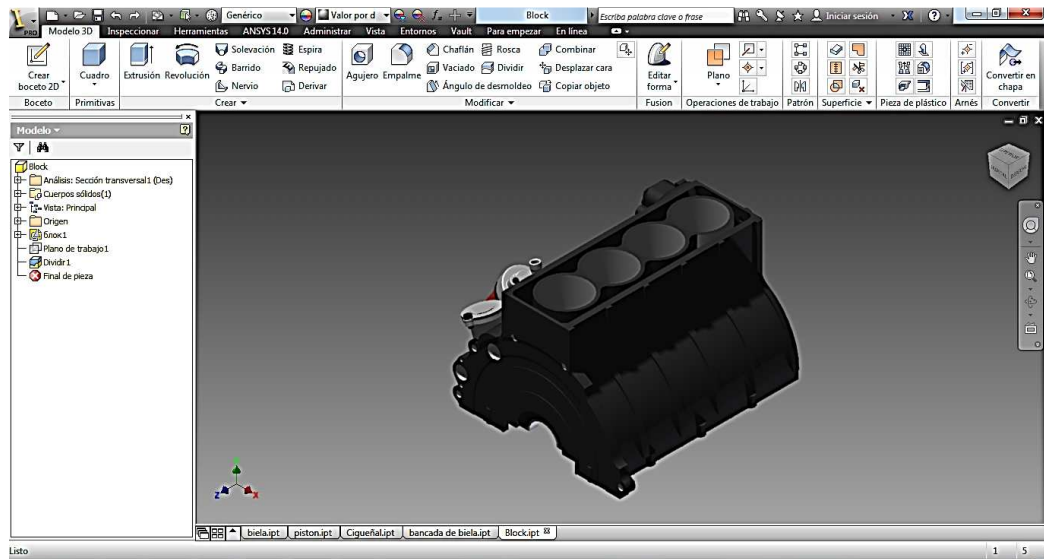


Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.6 Modelado final de la bancada de biela.

d. MODELADO DEL BLOQUE DE CILINDROS.

En la figura 4.7 se observa el modelado final del bloque de cilindros cuya función es alojar el tren alternativo, formado por el cigüeñal, biela y pistón.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.7 Modelado final del Bloque.

4.1.4 OPERACIONES DE ENSAMBLAJE.

Para crear un ensamblaje las herramientas son idénticas a las que se usan para crear un boceto pero cuenta con su propio entorno de ensamblaje.

Las operaciones de ensamblaje son entre otras: chaflanes, empalmes, barridos, operaciones de revolución, extrusiones, agujeros, desplazamiento de caras, patrones de operaciones rectangulares, patrones de operaciones circulares.

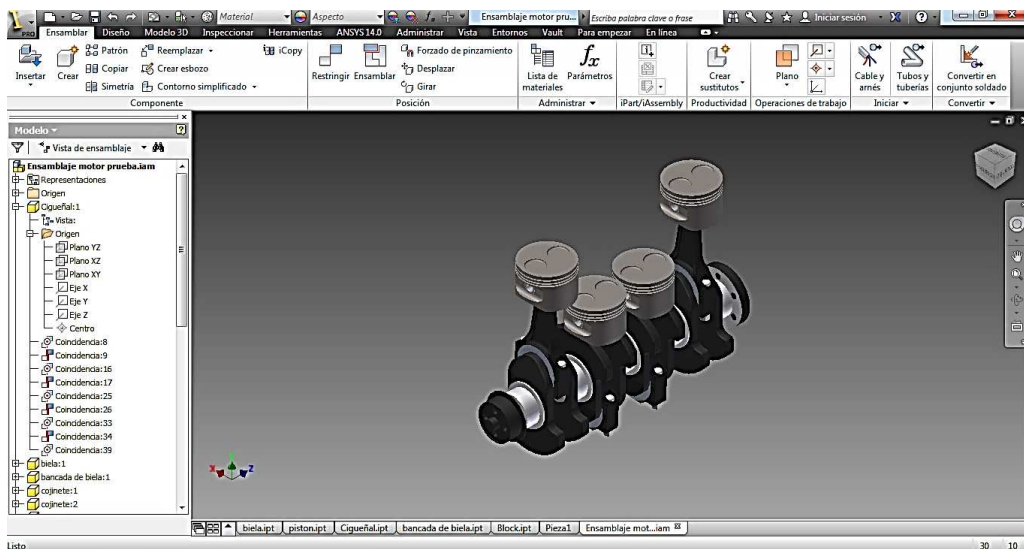
El ensamblaje permite la inserción de un conjunto de piezas o elementos para formar una nueva pieza, y además permite el diseño mediante las correspondientes herramientas de su entorno.

4.1.5 RESTRICCIONES EN ENSAMBLAJES.

Como se explicó anteriormente las restricciones son parámetros que, entre otros establecen la orientación de los componentes en el ensamblaje y definen las relaciones mecánicas entre ellos.

Las restricciones pueden ser: coincidencia entre planos, operaciones concéntricas, operaciones tangentes. Para que las restricciones sean aplicadas a los componentes, el ensamblaje debe ser actualizado constantemente.

Cuando se aplican restricciones sobre cada componente se está limitando o reduciendo sus grados de libertad. En Autodesk Inventor Professional 2013, cada componente posee 6 grados de libertad (GDL); estos grados de libertad es la capacidad del elemento de realizar movimientos de rotación o de traslación sobre los ejes x, y, z.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.8 Ensamblaje final del tren alternativo para el análisis.

a. INGENIERIA ASISTIDA POR COMPUTADOR (CAE).

CAE por sus siglas en inglés (Computer Aided Engineering), es el conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

La mayoría de ellas se presentan como módulos o extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan:

- Análisis cinemático.
- Análisis por elementos finitos (FEA, Finite Elements Analysis).
- Maquinado por control numérico CNC (Computered Numeric Control).
- De exportación de ficheros "Stl" (Estereolitografía) para máquinas de prototipado rápido.

4.2 SOFTWARE ANSYS.

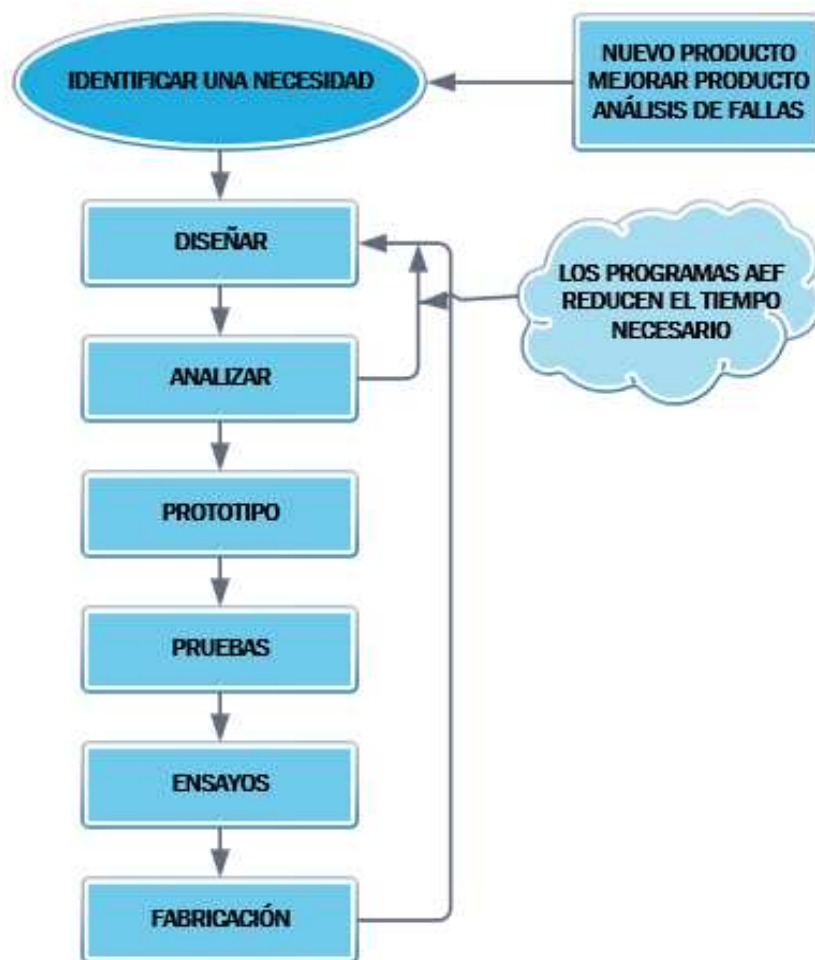
Ansys es un software que se encuentra dentro de la categoría FEA (Análisis por Elementos Finitos), los cuales permiten obtener soluciones aproximadas a problemas de ingeniería y obtener productos de calidad superior a menor costo, también para mejorar procesos existentes o para estudiar los fallos de un componente estructural o un equipo.⁴⁰

Con la ayuda de estas aplicaciones FEA, se puede reducir el tiempo total de desarrollo de un producto reduciendo el tiempo en diseño, pruebas,

⁴⁰ <http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys.pdf>

ensayos y evaluaciones reales, las cuales pueden ser simuladas en el mismo software.

Ansysis es un programa de uso general, lo que quiere decir que incluye muchas capacidades tales como funciones de preprocesador para generar un modelo, soluciones, post procesador, gráficos, modelado paramétrico, y utilidades que facilitan el uso del mismo.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.9 Diagrama de flujo para Análisis por Elementos Finitos (FEA).

4.2.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

La transformación de un sistema de ingeniería (con infinitas incógnitas) a un modelo de elementos finitos es, quizás, uno de los más importantes y que requiere un conocimiento profundo del MEF.

El término elemento finito resume el concepto básico del método: la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por elementos de un tamaño finito.⁴¹

Un nodo es una localización en el espacio de un punto en el que se considera que existen ciertos grados de libertad (desplazamientos, potenciales, temperaturas) y acciones (fuerzas, corrientes, condiciones de contorno) del sistema físico.

Un elemento es una representación matemática matricial, denominada matriz de rigidez, de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nodos. Los elementos pueden ser puntuales, lineales, superficiales, volumétricos, y pueden estar en espacios bi o tridimensionales.⁴²

Las condiciones de contorno estructurales incluyen :

- Restricciones de desplazamientos.
- Fuerzas aplicadas en nodos
- Presiones sobre los elementos
- Temperaturas en nodos
- Cargas volumétricas o de inercia (gravedad).

⁴¹ <http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys.pdf>

⁴² <http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys.pdf>

4.2.2 ANSYS WORKBENCH.

Este programa interactúa con toda la familia de herramientas de ANSYS. ANSYS Workbench está compuesto de varias aplicaciones, a continuación se dará una breve descripción de las herramientas usadas en el análisis :

a. STEADY-STATE THERMAL.

Estado térmico de equilibrio. Un análisis térmico en estado estacionario determina las temperaturas, gradientes térmicos, las tasas de flujo de calor y los flujos de calor en un objeto que son causadas por cargas térmicas que no varían con el tiempo.

b. STATIC STRUCTURAL Y STATIC STRUCTURAL (SAMCEF).

Estructura estática y estructura estática (SAMCEF). Determina los desplazamientos, tensiones, deformaciones y las fuerzas en estructuras o componentes causadas por las cargas que no inducen la inercia considerable y los efectos de amortiguación.

c. TRANSIENT STRUCTURAL.

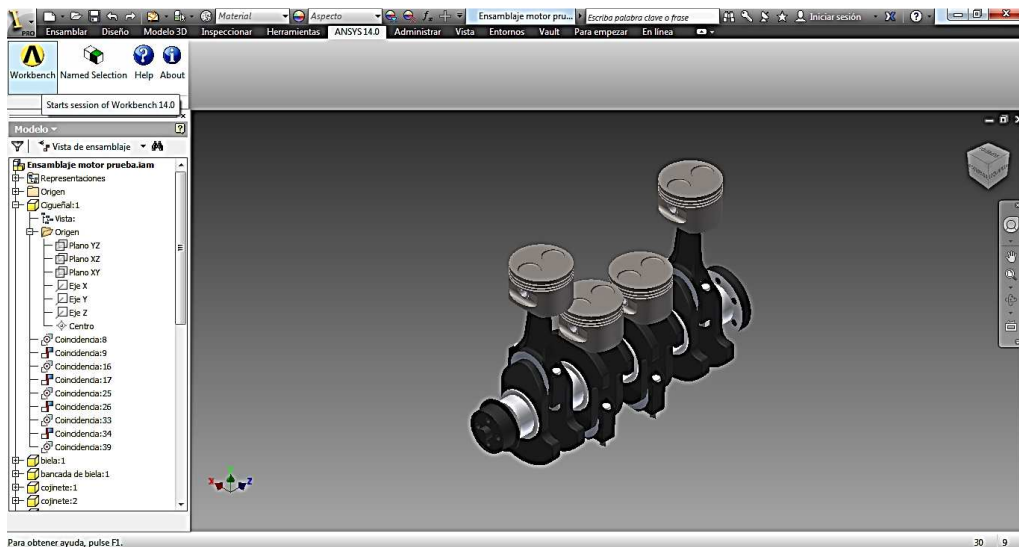
Estructura transitoria. El análisis estructural transitorio proporciona la capacidad de determinar la respuesta dinámica del sistema bajo cualquier tipo de tiempo o cargas variables. A diferencia de los análisis estáticos, los cuerpos pueden ser rígidos o flexibles. Para los cuerpos flexibles, se pueden incluir materiales no lineales para emitir el cálculo de estrés y tensiones. Este tipo de análisis son necesarios para evaluar la respuesta

de los cuerpos al momento de la deformación, cuando los efectos inerciales llegan a ser significativos⁴³.

Se puede acceder de dos formas a la aplicación Ansys, por medio del Menú Inicio, o desde cualquier programa CAD en la barra de herramientas se tendrá acceso a *Workbench*, esta opción permite exportar el sólido desde la misma interfaz del programa CAD.

4.2.3 ENSAMBLAJE DEL TREN ALTERNATIVO EN TRANSIENT STRUCTURAL

Para iniciar el análisis se debe exportar desde Autodesk Inventor Professional el ensablaje final del tren alternativo. En la pestaña ANSYS 14 se ingresa en *Workbench* como muestra la figura 4.10.

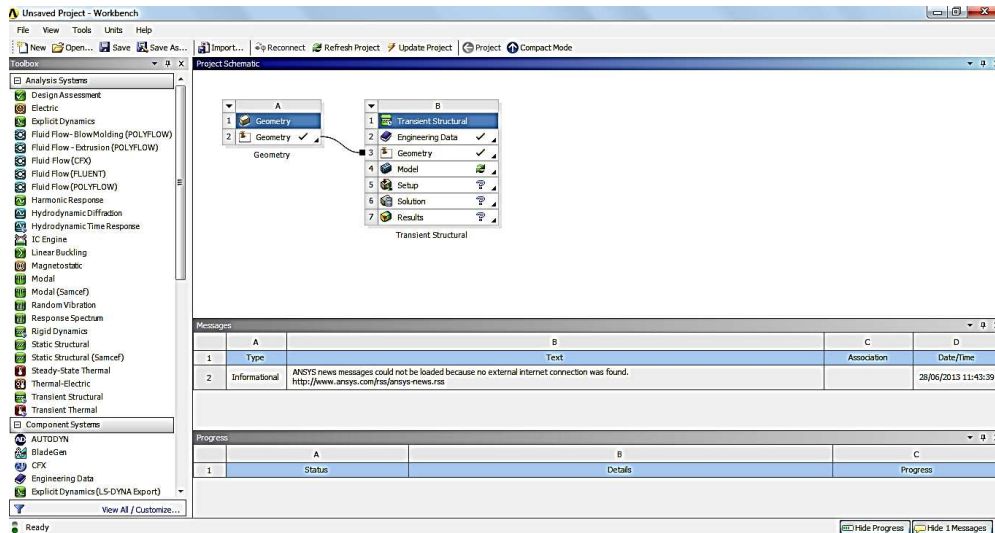


Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.10 Exportación del tren alternativo hacia Ansys.

⁴³ Ansys, Inc. Tutorials Ansys, USA, 2009, Editorial Ansys Inc.

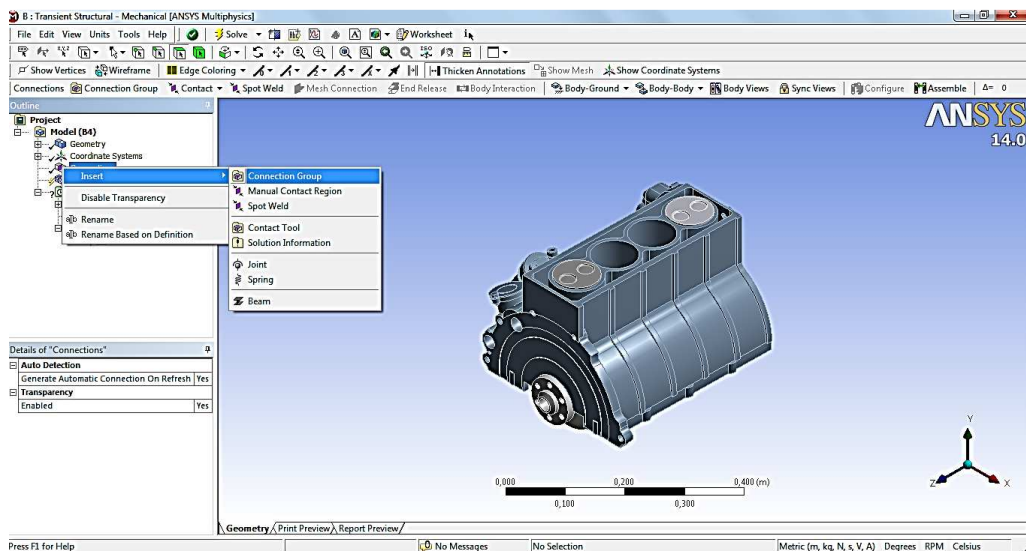
Una vez importada la geometría se procede en el módulo *Transient Structural* a ensamblar el tren alternativo en la ventana *Mechanical*.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.11 TransientStructural para el análisis de la geometría importada.

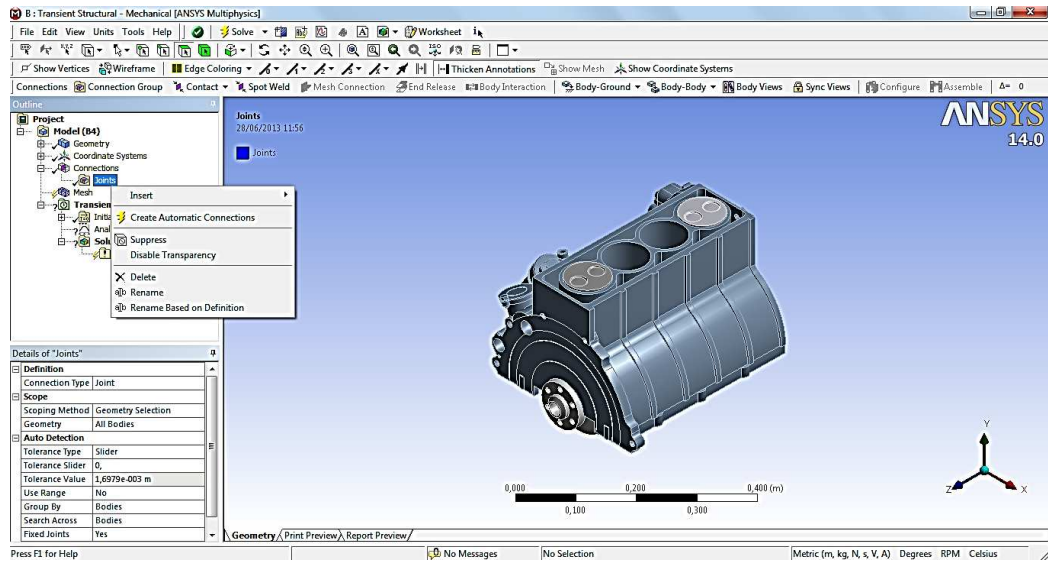
Ya en la ventana *Mechanical*, en la pestaña *Connections*, se inserta la carpeta *Connection Group* como se ve en la figura 4.12.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.12 Connection Group en el ensamblaje del tren alternativo.

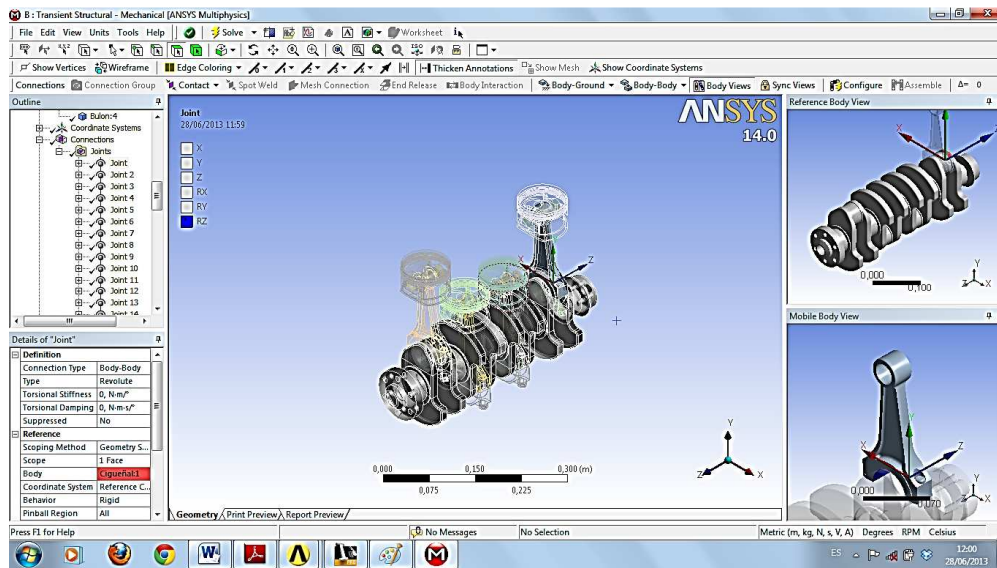
Luego se inserta la carpeta *Joints* y se crea las conexiones automáticamente como se ve en la figura 4.13.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.13 Create Automatic connections, creación de las conexiones.

En este paso se crean varias conexiones, se debe seleccionar las que se requieran, y se eliminan las conexiones erróneas que genera el programa, con la ayuda de la pestaña *body views* se podrá apreciar de una mejor manera cada una de las juntas para el ensamble del tren alternativo.



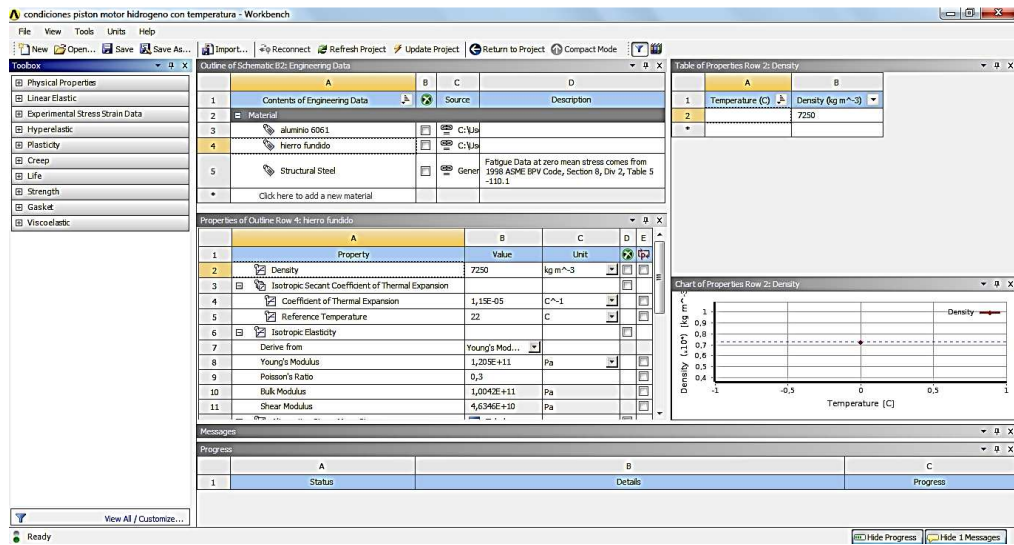
Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.14 Selección de las juntas en el ensamblaje del tren alternativo

4.2.4 DATOS DE INGENIERÍA.

Este menú es parte de todos los proyectos. Se lo puedo abrir de forma individual al momento de desplegar el menú Sistemas de Componente. Este submenú sirve para tener control sobre las propiedades del material utilizado en cualquier diseño.

Los datos de los materiales los despliega tanto en datos específicos como en tablas gráficas indicando las propiedades de cada material. En las respectivas librerías existen un conglomerado de materiales que pueden ser editados en función de las necesidades del diseñador.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.15 Datos de ingeniería.

Los materiales que se utilizaron en el diseño son el Hierro Fundido y el Aluminio 6061. A continuación se detallan las propiedades, y características de estos materiales.

a. HIERRO FUNDIDO

Densidad	$7250, \text{ kg m}^{-3}$
Coefficiente de Expansión Térmico	$1,15\text{e-}005 \text{ C}^{-1}$
Calor Específico	$434, \text{ J kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$
Conductividad Térmica	$79, \text{ W m}^{-1} \text{ C}^{-1}$
Resistividad	$1,7\text{e-}007 \text{ ohm m}$
Límite Elástico de compresión Pa.	$2,75\text{e+}008$
Límite Elástico de tensión Pa.	$2,75\text{e+}008$
Tensión de rotura máxima Pa.	$4,14\text{e+}008$
Temperatura de Referencia °C	22

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.1. Constantes del Hierro Fundido

Tensión Alternativa Pa	Ciclos	Tensión Media Pa
3,999e+009	10,	0,
2,827e+009	20,	0,
1,896e+009	50,	0,
1,413e+009	100,	0,
1,069e+009	200,	0,
4,41e+008	2000,	0,
2,62e+008	10000	0,
2,14e+008	20000	0,
1,38e+008	1,e+005	0,
1,14e+008	2,e+005	0,
8,62e+007	1,e+006	0,

Fuente: Ansys 14

Tabla 4.2. Ciclos de tensión

Coeficiente de resistencia Pa.	Exponente de resistencia	Coeficiente de ductilidad	Exponente de ductilidad	Coeficiente de resistencia cíclica Pa.	Exponente de endurecimiento por deformación cíclico
9,27e+008	-8,7e-002	0,202	-0,696	1,061e+009	0,114

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.3. Parámetros de Deformación.

Temperatura °C	Módulo de Young Pa.	Coeficiente de Poisson	Módulo de Compresibilidad Pa	Módulo de Corte Pa
22	1,205e+011	0,3	1,0042e+011	4,6346e+010

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.4. Elasticidad Isotrópica

b. ALUMINIO 6061

Densidad	2710, kg m ⁻³
Coefficiente de Expansión Térmico	2,35e-005 C ⁻¹
Calor Especifico	434, J kg ⁻¹ C ⁻¹
Conductividad Térmica	237,5 W m ⁻¹ C ⁻¹
Resistividad	1,7e-007 ohm m
Límite Elástico de compresión Pa.	2,76e+008
Límite Elástico de tensión Pa.	2,76e+008
Tensión de rotura máxima Pa.	3,1e+008
Temperatura de Referencia ° C	22

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.5. Constantes del Aluminio 6061

Tensión Alternativa Pa	Ciclos	Tensión Media Pa
3,999e+009	10,	0,
2,827e+009	20,	0,
1,896e+009	50,	0,
1,413e+009	100,	0,
1,069e+009	200,	0,
4,41e+008	2000,	0,
2,62e+008	10000	0,
2,14e+008	20000	0,
1,38e+008	1,e+005	0,
1,14e+008	2,e+005	0,
8,62e+007	1,e+006	0,

Fuente: Ansys 14

Tabla 4.6. Ciclos de tensión

Coeficiente de resistencia Pa.	Exponente de resistencia	Coeficiente de ductilidad	Exponente de ductilidad	Coeficiente de resistencia cíclica Pa.	Exponente de endurecimiento por deformación cíclico
3,83e+008	-5,3e-002	0,207	-0,628	5,343e+008	8,9e-002

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.7. Parámetros de Deformación

Temperatura °C	Módulo de Young Pa.	Coeficiente de Poisson	Módulo de Compresibilidad Pa	Módulo de Corte Pa
	6,89e+010	0,33	6,7549e+010	2,5902e+010

Fuente: Mott, Robert L. "Diseño de Elementos de Máquinas". PEARSON. México 2006

Tabla 4.8. Elasticidad Isotrópica

4.2.5 TRANSIENT (CONDICIONES INICIALES).

a. ANALYSIS SETTINGS.

En la opción Analysis Settings o ajustes del análisis se coloca los parámetros de tiempo con el fin de que la simulación cumpla con el ciclo de cuatro tiempos en dos vueltas del cigüeñal: admisión, compresión, explosión y escape.

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	3,e-002 s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	1,e-002 s
Minimum Time Step	5,e-006 s
Maximum Time Step	3,e-002 s
Time Integration	On

Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.16. Parámetros de tiempo para la simulación del ciclo.

b. THERMAL CONDITIONS.

La carga térmica se coloca en el pistón y esta varía según el combustible que se utilice en las figuras 4.17 y 4.18 se observa la magnitud de la temperatura para el hidrógeno y la gasolina en grados Celsius, valores calculados en el Capítulo 2.

Object Name	<i>Thermal Condition</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Thermal Condition
Magnitude	2006,8 °C (step applied)
Suppressed	No

Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.17. Parámetro de temperatura para hidrógeno.

Object Name	<i>Thermal Condition</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Thermal Condition
Magnitude	3366, °C (step applied)
Suppressed	No

Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.18. Parámetros de temperatura para gasolina.

c. JOINT CONDITION

En este apartado se determina en qué junta se va a colocar la fuerza de presión del combustible, en este caso se define en la junta (Cylindrical-piston:1 To Block:1), los grados de libertad para el desplazamiento será en Z, y la velocidad rotacional se colocará en la junta (Revolute- Ground To Cigüeñal: 1), la magnitud de los valores varía según el combustible a utilizar, estos valores se los calculo en el Capítulo 2.

Object Name	<i>Joint - Force</i>	<i>Joint - Rotational Velocity</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Joint	Cylindrical - piston:1 To Block:1	Revolute - Ground To Cigüeñal:1
Definition		
DOF	Z Displacement	Rotation Z
Type	Force	Rotational Velocity
Magnitude	-36144 N (step applied)	418,88 rad/s (step applied)
Lock at Load Step	Never	
Suppressed	No	

Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.19 Fuerza y Velocidad rotacional para el hidrógeno.

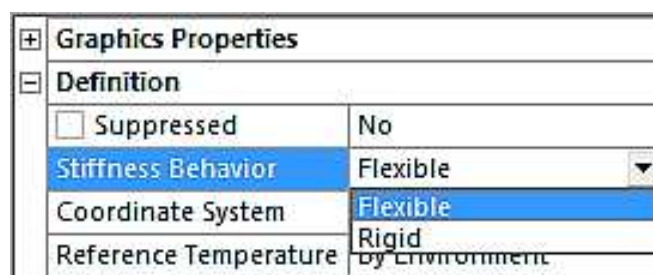
Object Name	<i>Joint - Force</i>	<i>Joint - Rotational Velocity</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Joint	Cylindrical - piston:1 To Block:1	Revolute - Ground To Cigüeñal:1
Definition		
DOF	Z Displacement	Rotation Z
Type	Force	Rotational Velocity
Magnitude	-49693 N (step applied)	418,88 rad/s (step applied)
Lock at Load Step	Never	
Suppressed	No	

Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.20 Fuerza y Velocidad rotacional para la gasolina.

4.2.6 MALLADO DEL TREN ALTERNATIVO.

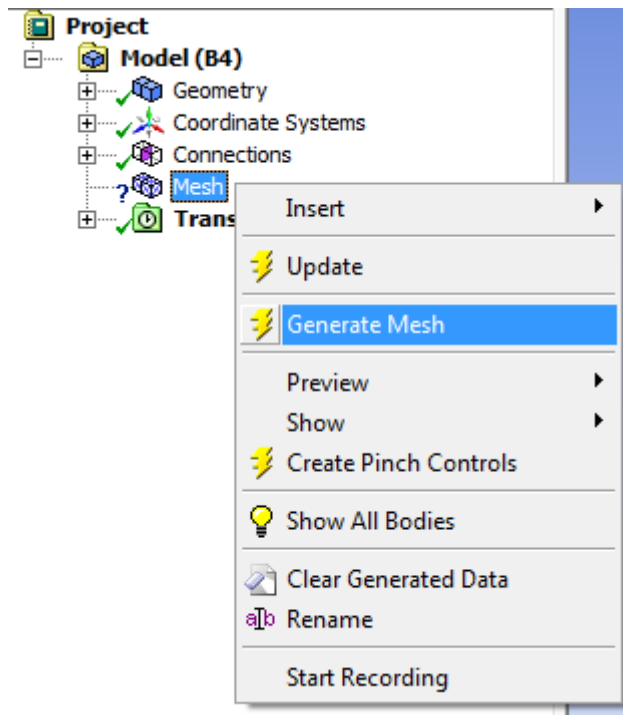
Para proceder al mallado de las piezas del tren alternativo, que se va a analizar, se debe seleccionar las piezas en *Geometry* y en las propiedades graficas de cada una de ellas escoger la opción *Flexible*, todas las demás piezas que no serán analizadas se escoge la opción *Rigid*.



Fuente: Grupo Investigador

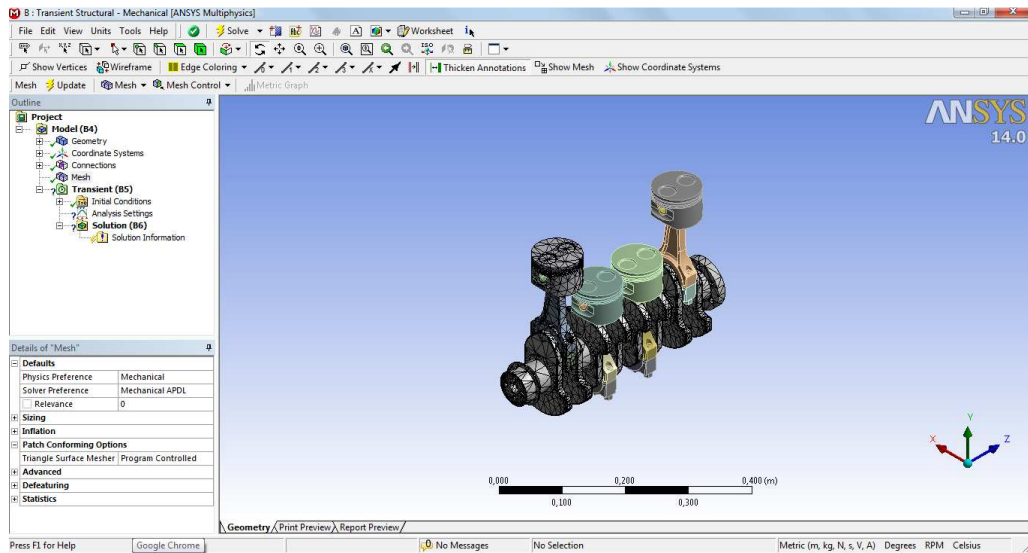
Figura 4.21 Propiedades graficas en la geometría de las piezas para el mallado.

Luego se selecciona la opción *Generate Mesh* y se empezará a cargar el mallado en las piezas del tren alternativo escogidas para el análisis.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.22 Generar el mallado.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 4.23 Mallado del tren alternativo.

Existen varias formas por las cuales el programa establece un mallado dependiendo si se lo va a aplicar a un sólido, a una superficie o vigas. Puede ser de forma automática, en forma de triángulos, de tetraedros, por barrido por multicapas.

La mejor forma de establecer el mallado son en tetraedros con la ventaja que cualquier volumen puede ser cubierto fácilmente. Una vez realizado el mallado, el análisis se concentra en cada uno de las divisiones realizadas, dependiendo del material y de las condiciones iniciales ingresadas, el programa realizara el procesado de datos y genera una solución.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN.

Una vez exportada la geometría del tren alternativo y el bloque de cilindros desde el Autodesk Inventor Professional 2013 a el Software Ansys 14; y una vez terminado el ensamblado en Transient Structural, se determina cada uno de los parámetros que intervienen en el análisis como son: geometría de las piezas, fuerza, presión, temperatura, velocidad rotacional, datos de los materiales y mallado.

A continuación en la tabla 5.1 se indica cada una de las piezas y el respectivo material asignado, para su respectivo análisis.

Material Piezas	ALUMINIO 6061	HIERRO FUNDIDO
BIELA Y BANCADA		X
PISTON	X	
CIGUEÑAL		X
BLOQUE		X

Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.1 Designación del material para cada pieza del tren alternativo.

El análisis de resultados se realiza tomando en cuenta los datos calculados anteriormente, tanto para la presión, temperatura y tiempo; para el hidrógeno como para la gasolina, y así poder determinar en Ansys cómo influyen estos combustibles en la deformación total, tensión equivalente y factor de seguridad en cada una de las piezas que conforman el tren alternativo del motor y el bloque de cilindros.

5.1.1 FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga.

Para predecir correctamente la vida a fatiga en estructuras precargadas hay que incluir una tensión equivalente para cada rango. Los principales criterios de tensión equivalente utilizados hoy en día son los de Gerber, Goodman, Soderberg y Morrow. El método de Goodman es adecuado para materiales frágiles, mientras que Gerber es en general más adecuado para materiales dúctiles, y por último Soderberg es el más conservativo, y es el método aplicado por el Software Ansys.

Durante el análisis, los parámetros de variación de la carga se combinan con otros criterios de fatiga y el Software Ansys realiza los cálculos de fatiga para evaluar la durabilidad de la estructura.

El factor de seguridad a tensión (SSF) es una medida de la resistencia global de la estructura y se evalúa dividiendo el criterio de tensión por la tensión. El Software Ansys calcula el SSF como una función de la historia de la tensión (Von Mises) efectiva para determinar el factor de fallo de la estructura. Los valores comprendidos entre 1 y 1.5 son aceptables, mientras que valores mayores a 1.5 indican exceso de material.

5.2 ANÁLISIS BIELA

Condiciones iniciales aplicadas al análisis de la biela del tren alternativo del motor.

Condiciones Combustible	FUERZA (N)	RPM (condiciones normales)
HIDRÓGENO	36144	4000
GASOLINA	49693	4000

Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.2 Fuerza y RPM aplicadas en el análisis de la biela.

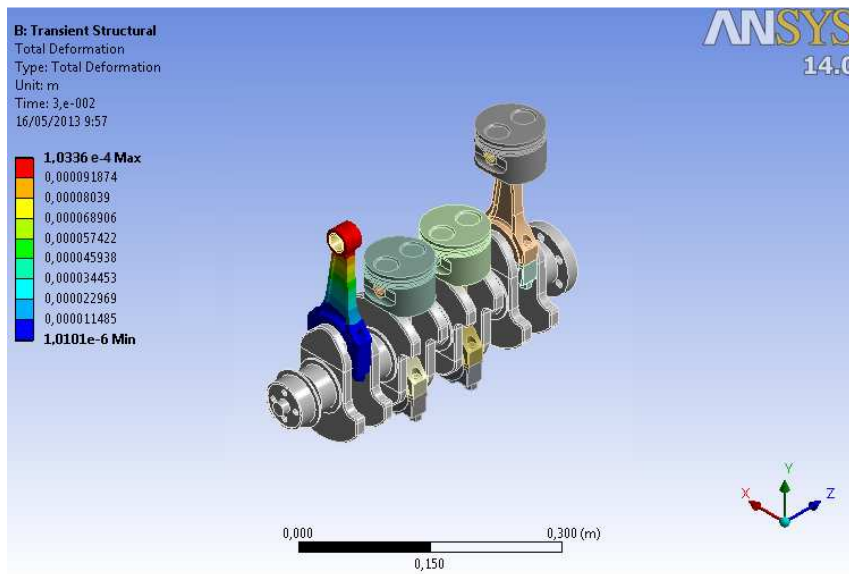
5.2.1 DEFORMACIÓN TOTAL

Las diferencias de deformación que producen el hidrógeno y la gasolina en la biela del tren alternativo se expresan en la tabla 5.3:

Resultados Combustible	Deformación total Máxima (m).	Deformación total Mínima (m).
HIDRÓGENO	$1,0336 \times 10^{-4}$	$1,0101 \times 10^{-6}$
GASOLINA	$1,0335 \times 10^{-4}$	$1,5186 \times 10^{-7}$

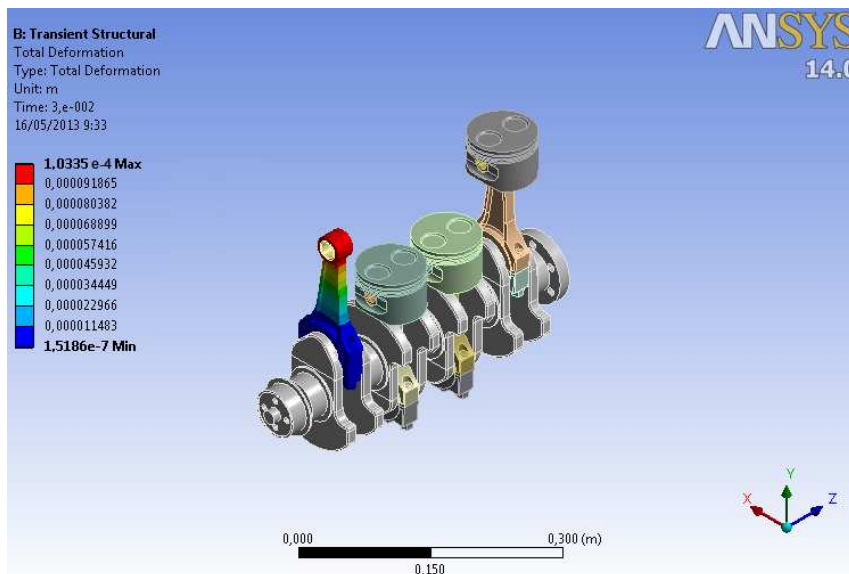
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.3 Resultados de la deformación total máxima y mínima en la biela.



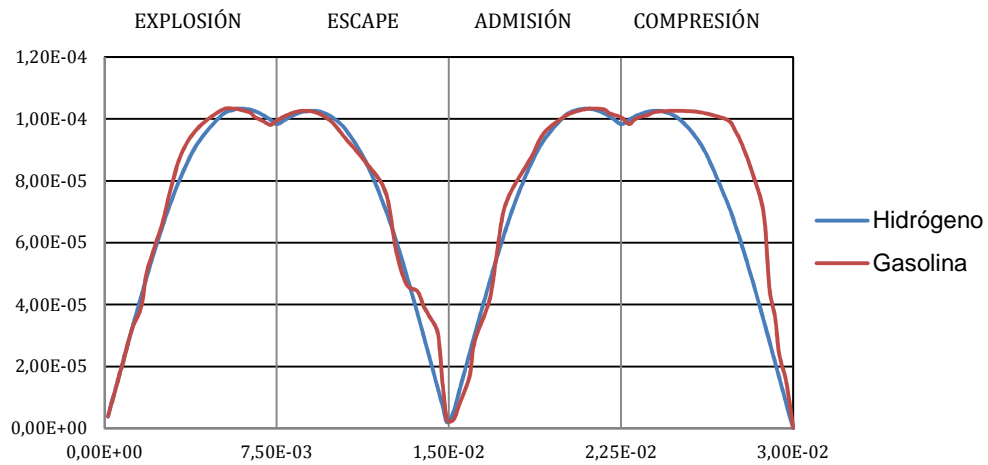
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.1 Deformación total en la biela, hidrógeno



Fuente: Grupo investigado

Figura 5.2. Deformación total en la biela, gasolina.



Fuente: Grupo investigador

Gráfica 5.1. Deformación total en la biela Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.1 se observa la deformación total máxima y mínima en la biela utilizando hidrógeno y gasolina, la diferencia es que al utilizar gasolina (línea roja) la deformación se mantiene más tiempo en el ciclo, que al utilizar hidrógeno (línea azul), esto quiere decir, que el hidrógeno deforma menos tiempo la biela durante el ciclo.

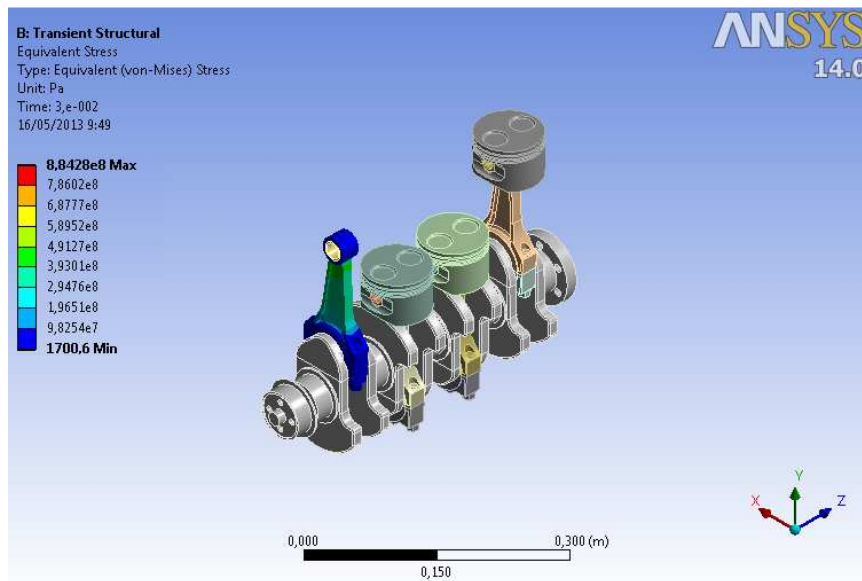
5.2.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA Y MÁXIMA.

Las diferencias de la tensión equivalente máxima y mínima, que producen el hidrógeno y la gasolina en la biela se expresan en la tabla 5.4:

Resultados Combustible	Tensión Equivalente Máxima (Pa).	Tensión Equivalente Mínima (Pa).
HIDRÓGENO	$8,8428 \times 10^8$	1700,6
GASOLINA	$2,1624 \times 10^9$	2229,0

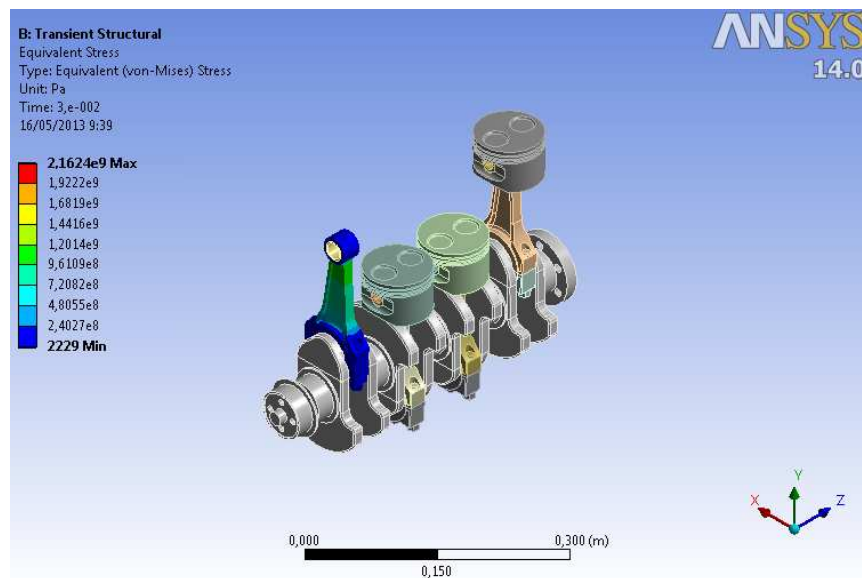
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.4 Resultados de la tensión equivalente máximo y mínimo en la biela.



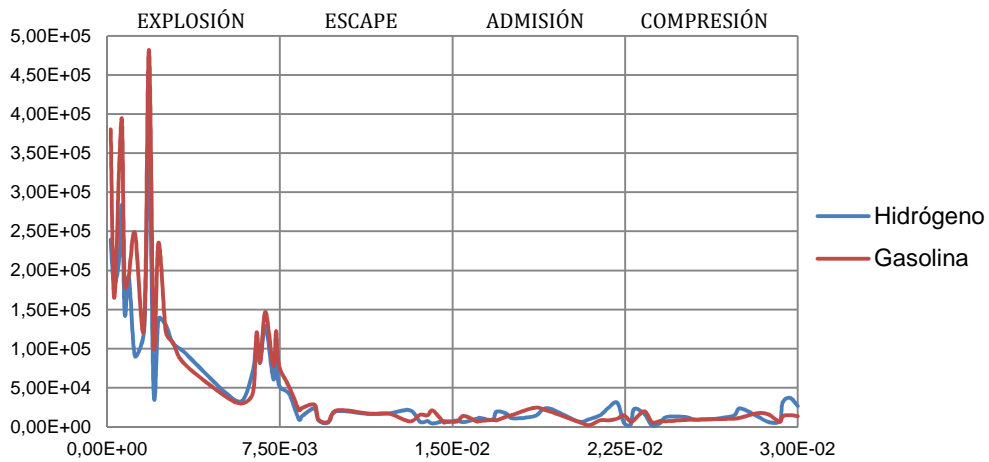
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.3 Tensión equivalente en la biela, hidrógeno



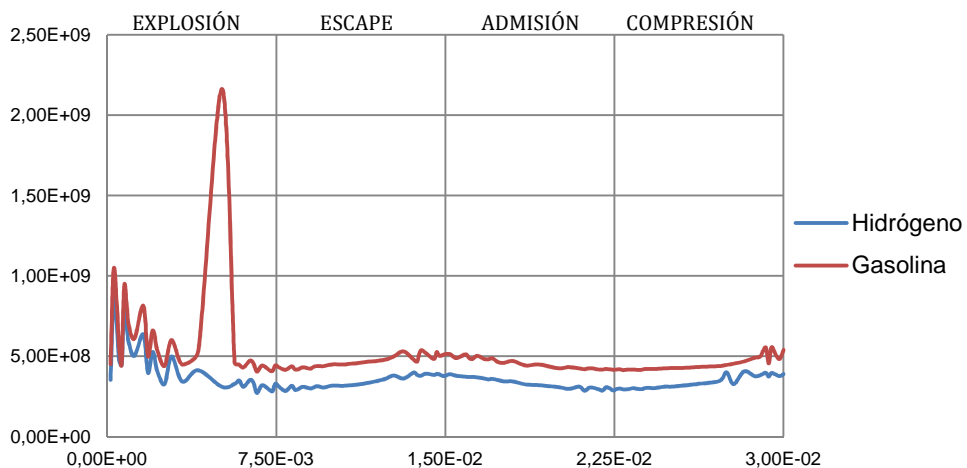
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.4 Tensión equivalente en la biela, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.2 Tensión equivalente mínima en la biela Hidrógeno vs. Gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.3 Tensión equivalente máxima en la biela Hidrógeno vs. Gasolina.

En las gráficas 5.2 y 5.3 se observa la tensión equivalente máxima y mínima en la biela al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, la diferencia es que al utilizar gasolina (línea roja), se observa que existen picos de tensión altos en el ciclo, y al utilizar hidrógeno (línea azul), se observa una tensión más constante durante todo el ciclo, es decir, el hidrógeno mantiene estable la tensión que se produce en la biela del tren alternativo.

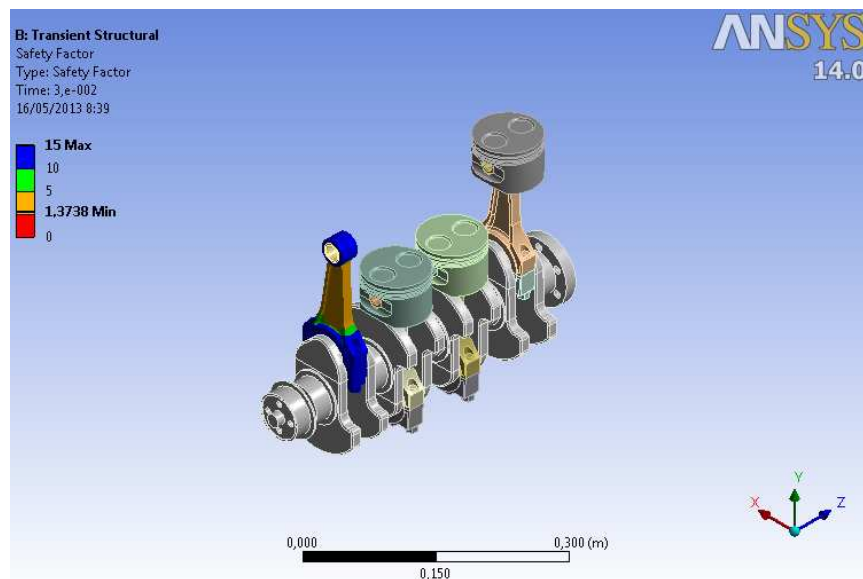
5.2.3 FACTOR DE SEGURIDAD

Las diferencias del factor de seguridad en la biela, al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, se expresan en la tabla 5.5:

Combustible \ Resultados	Factor de Seguridad Máximo	Factor de seguridad Mínimo
HIDRÓGENO	15	1,3738
GASOLINA	15	1,0075

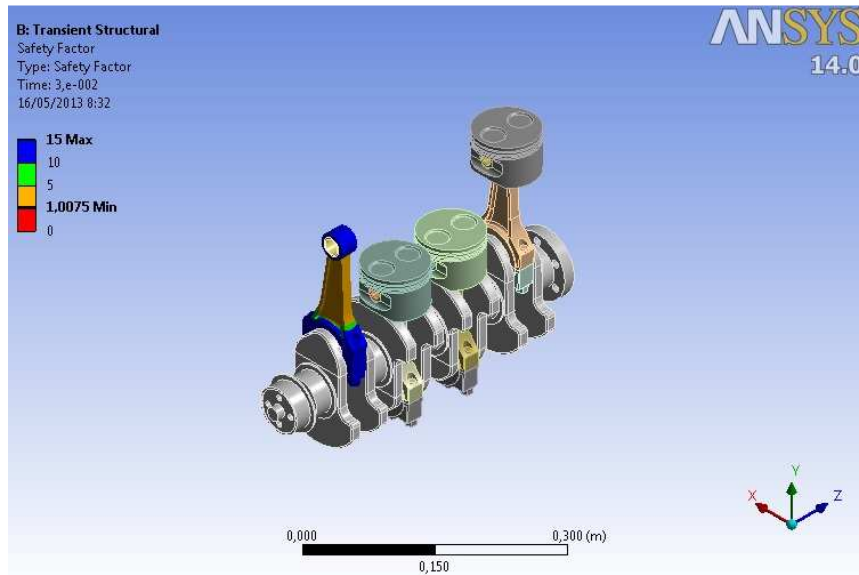
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.5 Resultados Factor de seguridad máximo y mínimo en la biela.



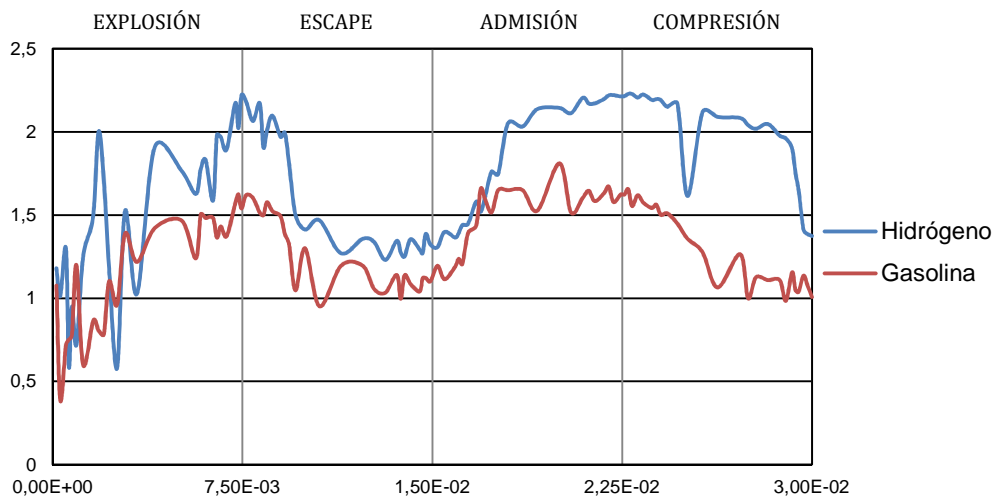
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.5 Factor de seguridad en la biela, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.6 Factor de seguridad en la biela, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.4 Factor de seguridad máximo y mínimo en la biela Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.4 se observa el factor de seguridad a tensión máximo y mínimo en la biela al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, la diferencia es que al utilizar gasolina (línea roja) se observa un menor factor de

seguridad durante todo el ciclo en relación al utilizar hidrógeno (línea azul), es decir, que el hidrógeno tiene un factor de seguridad más elevado por lo que la durabilidad de la biela será mayor.

5.3 ANÁLISIS PISTÓN.

Condiciones iniciales aplicadas al análisis del pistón del tren alternativo del motor.

Condiciones Combustible.	FUERZA (N)	RPM (condiciones normales)	Temperatura (°C)
HIDRÓGENO	36144	4000	2006,8
GASOLINA	49693	4000	3366

Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.6 Fuerza, Temperatura y RPM aplicadas en el análisis del pistón

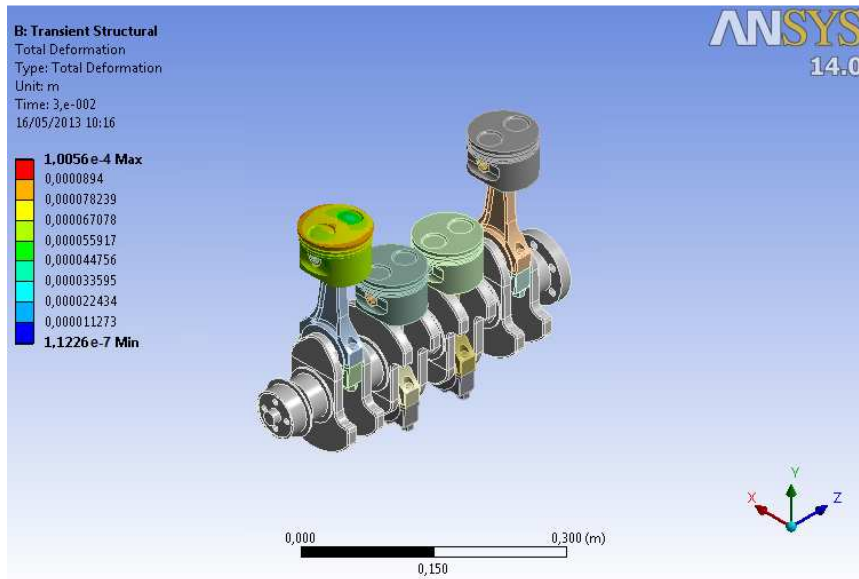
5.3.1 DEFORMACIÓN TOTAL.

Las diferencias de deformación que produce el hidrógeno y la gasolina en el pistón del tren alternativo se expresan en la tabla 5.7:

Resultados Combustible	Deformación total Máxima (m).	Deformación total Mínima (m).
HIDRÓGENO	$1,0056 \times 10^{-4}$	$1,1226 \times 10^{-7}$
GASOLINA	$1,0236 \times 10^{-4}$	$2,2101 \times 10^{-7}$

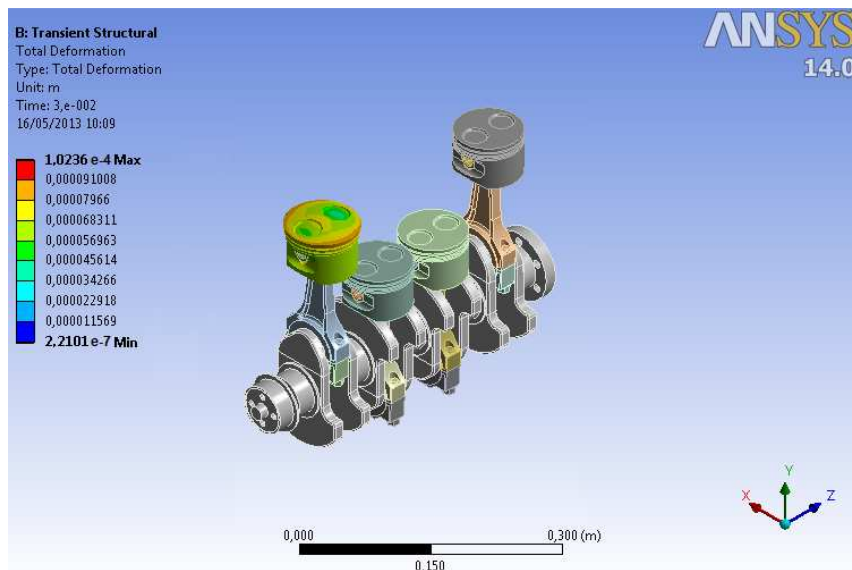
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.7 Resultados de la deformación total máxima y mínima en el pistón.



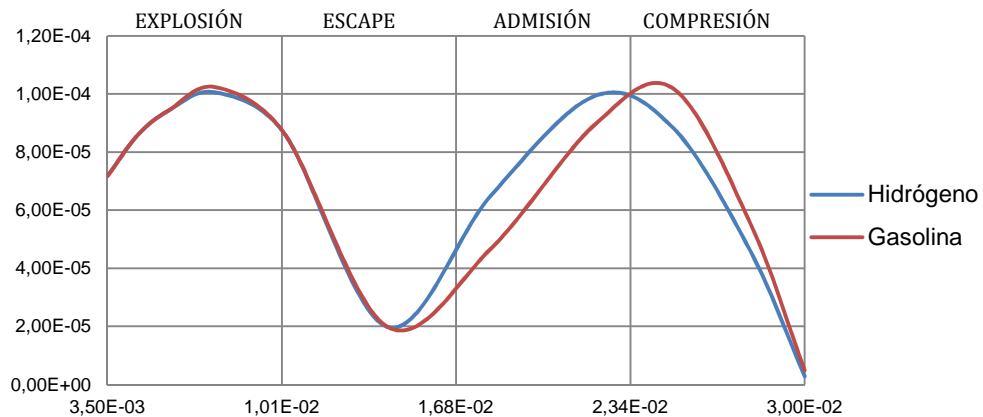
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.7 Deformación total en el pistón, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.8 Deformación total en el pistón, gasolina.



Fuente: Grupo investigador

Gráfica 5.5 Deformación total en el pistón Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.5 se observa la deformación total máxima y mínima en el pistón al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, la diferencia es que si se utiliza gasolina (línea roja) se observa que la deformación se mantiene más tiempo y es mayor en el ciclo, que al utilizar hidrógeno (línea azul), es decir, que el hidrógeno deforma menos el pistón en el tren alternativo.

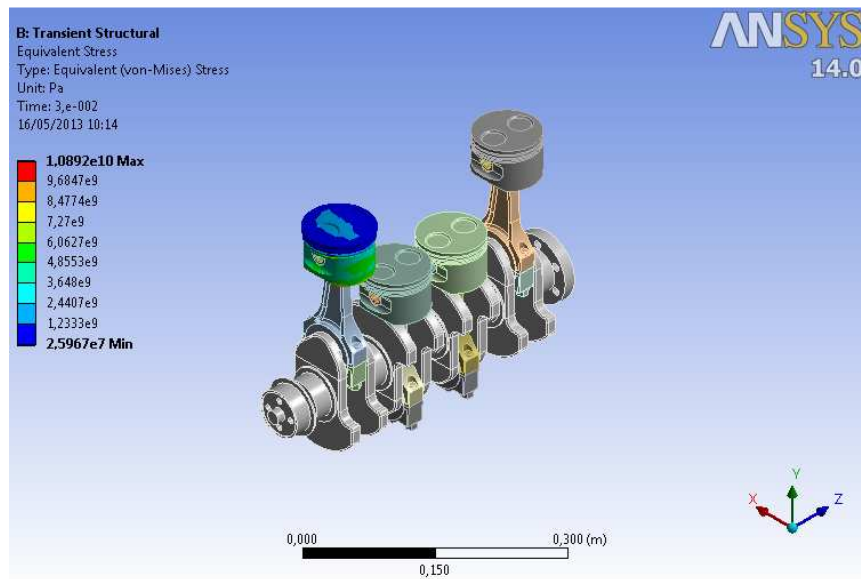
5.3.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÍNIMA Y MÁXIMA.

Las diferencias de tensión equivalente máximas y mínimas que producen el hidrógeno y la gasolina en el pistón del tren alternativo se expresan en la tabla 5.8:

Resultados Combustible	Tensión Equivalente Máxima (Pa).	Tensión Equivalente Mínima (Pa).
HIDRÓGENO	$1,0892 \times 10^{10}$	$2,5967 \times 10^7$
GASOLINA	$1,8689 \times 10^{10}$	$5,0916 \times 10^7$

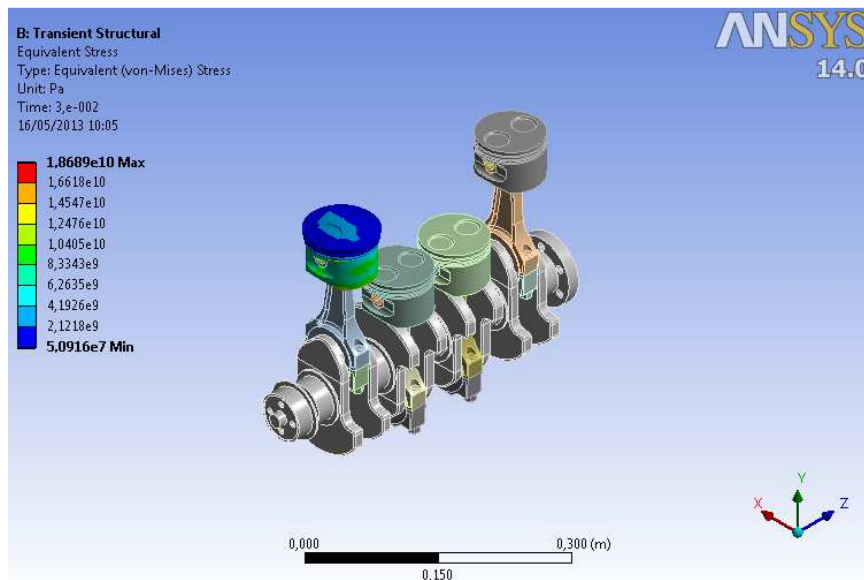
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.8 Resultados de la tensión equivalente máxima y mínima en el pistón del motor a hidrógeno y a gasolina.



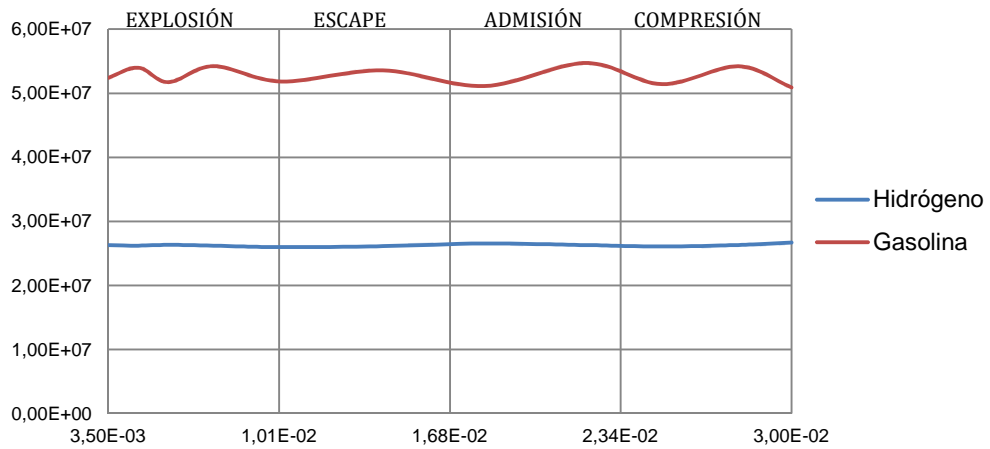
Fuente: Grupo investigador

Figura 5.9 Tensión equivalente en el pistón, hidrógeno.



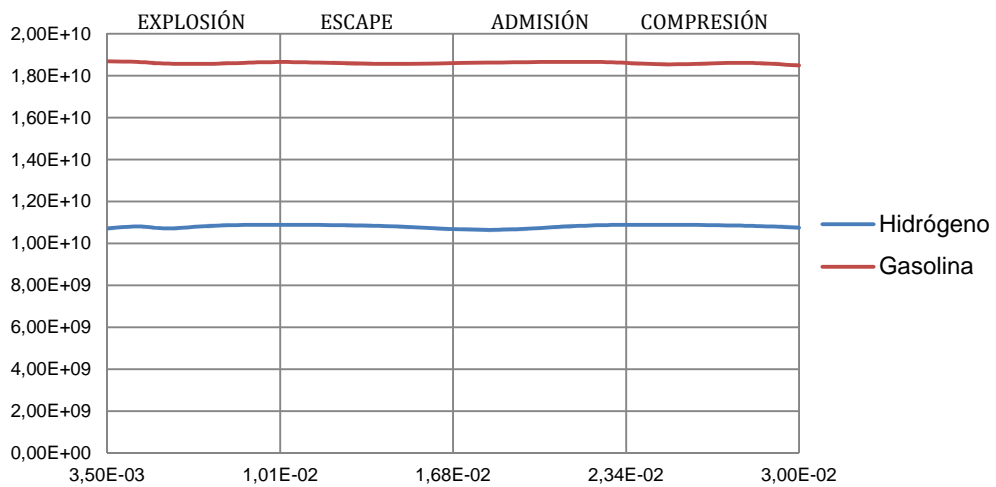
Fuente: Grupo investigador

Figura 5.10 Tensión equivalente en el pistón, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.6 Tensión equivalente mínima en el pistón Hidrógeno vs. Gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.7 Tensión equivalente máxima en el pistón Hidrógeno vs. Gasolina.

En las gráficas 5.6 y 5.7 al utilizar tanto hidrógeno como gasolina la tensión equivalente máxima y mínima va a ser constante en el ciclo, la diferencia va a ser que al utilizar hidrógeno los valores de tensión van a ser menores en el pistón.

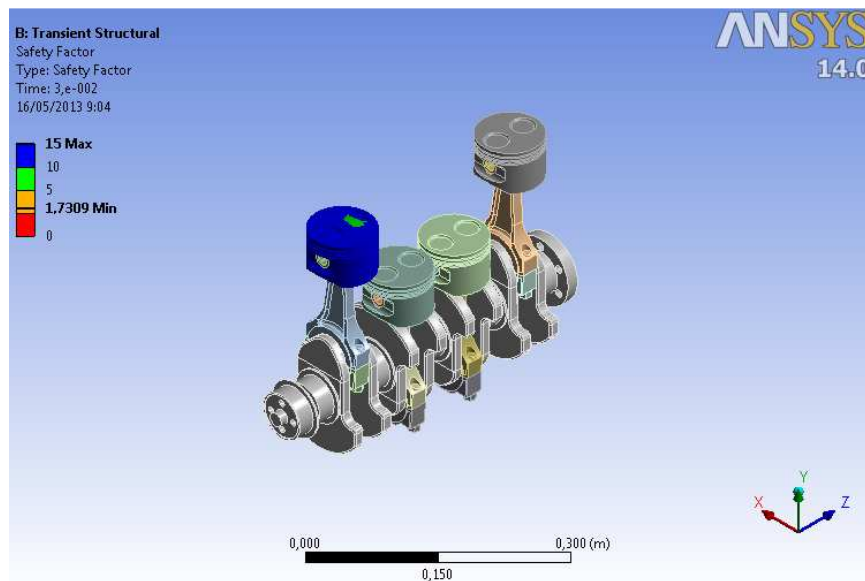
5.3.3 FACTOR DE SEGURIDAD.

Las diferencias del factor de seguridad en el pistón, al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, se expresan en la tabla 5.9:

Combustible \ Resultados	Factor de Seguridad Máximo	Factor de seguridad Mínimo
HIDRÓGENO	15	1,7309
GASOLINA	15	1,2132

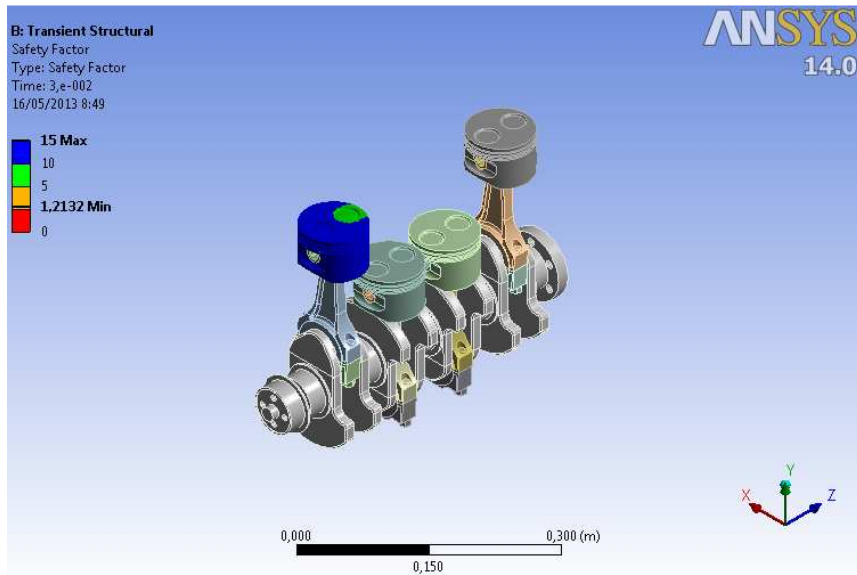
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.9 Resultados del factor de seguridad máximo y mínimo del pistón.



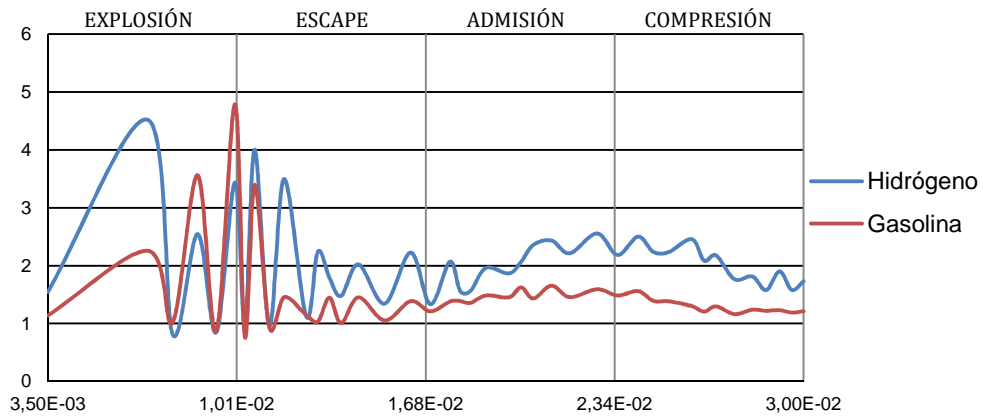
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.11 Factor de seguridad en el pistón, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.12 Factor de seguridad en el pistón, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.8 Factor de seguridad máximo y mínimo en el pistón Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.8 se observa el factor de seguridad a tensión máxima y mínima en el pistón al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, la diferencia es que si se utiliza gasolina (línea roja), se observa un menor factor de seguridad durante todo el ciclo en relación al utilizar hidrógeno (línea

azul), es decir, que el hidrógeno provoca un factor de seguridad más elevado.

5.4 ANÁLISIS CIGÜEÑAL.

Condiciones iniciales aplicadas al análisis del cigüeñal del tren alternativo del motor.

Condiciones. Combustible.	FUERZA (N)	RPM (condiciones normales)
HIDRÓGENO	36144	4000
GASOLINA	49693	4000

Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.10 Fuerza y RPM aplicadas en el cigüeñal

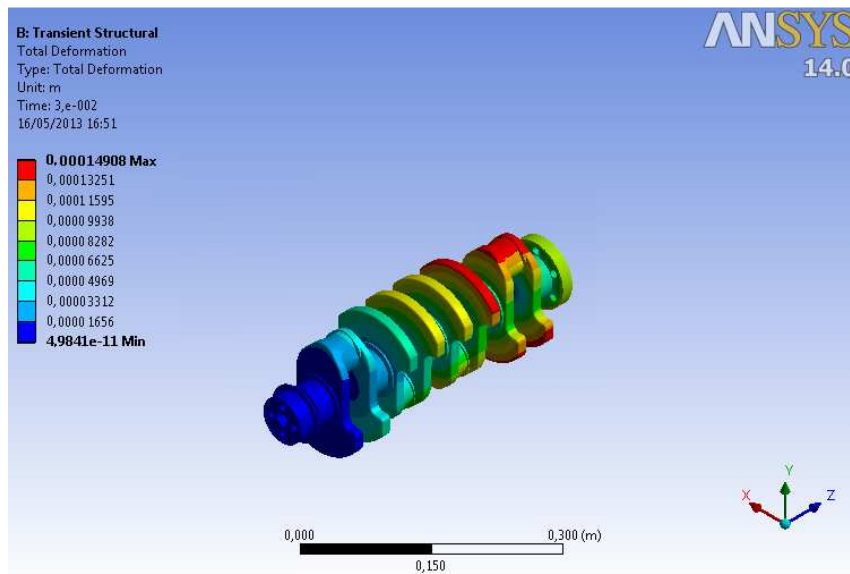
5.4.1 DEFORMACIÓN TOTAL.

Las diferencias de deformación que produce el hidrógeno y la gasolina en el cigüeñal del tren alternativo se expresan en la tabla 5.11:

Resultados Combustible	Deformación total Máxima (m).	Deformación total Mínima (m).
HIDRÓGENO	$1,4908 \times 10^{-4}$	$4,9841 \times 10^{-11}$
GASOLINA	$1,4908 \times 10^{-4}$	$1,0851 \times 10^{-10}$

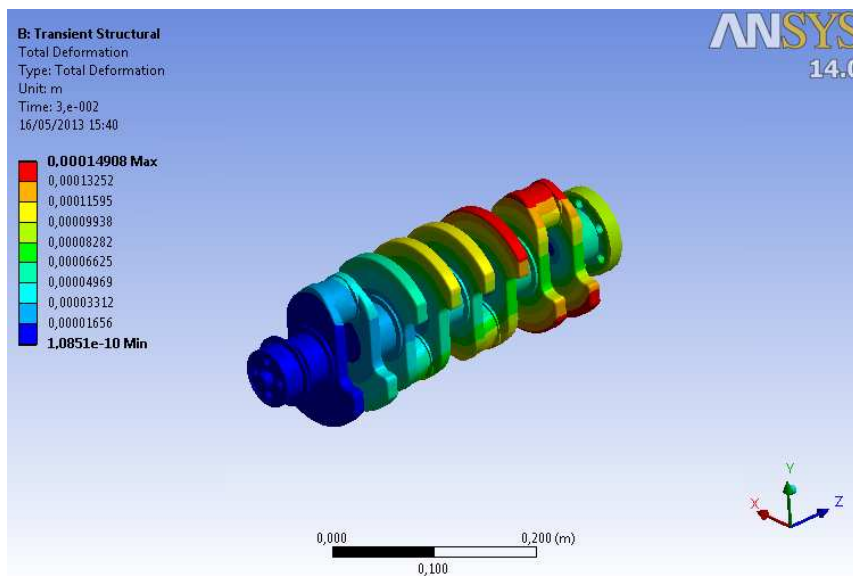
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.11 Resultados de la deformación total máxima y mínima en el cigüeñal.



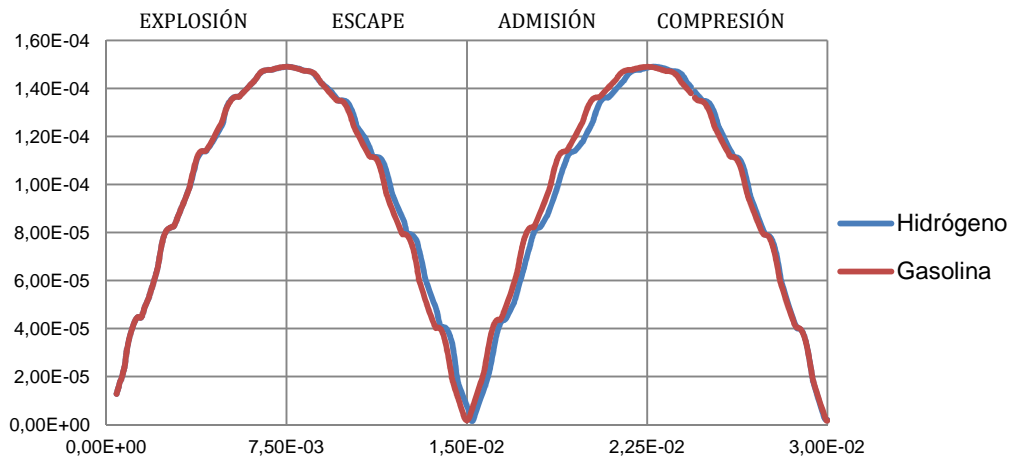
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.13 Deformación total en el cigüeñal, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.14 Deformación total en el cigüeñal, gasolina.



Fuente: Grupo investigador

Gráfica 5.9 Deformación total en el cigüeñal Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.9 se observa la deformación total máxima y mínima en el cigüeñal al utilizar hidrógeno y gasolina, la diferencia es que si se utiliza gasolina (línea roja) se observa que la deformación se mantiene más tiempo en el ciclo, que al utilizar hidrógeno (línea azul), esto quiere decir, que el hidrógeno deforma menos tiempo durante el ciclo el cigüeñal.

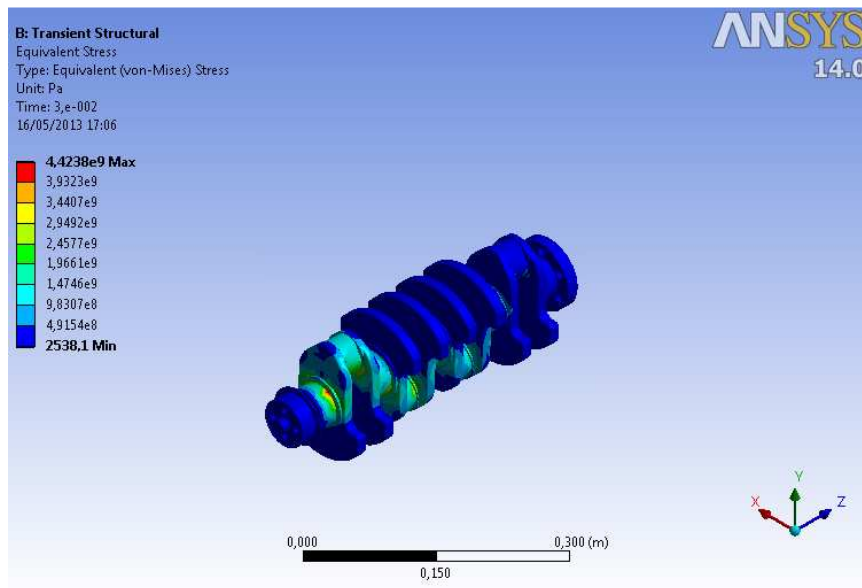
5.4.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.

Las diferencias de la tensión equivalente máxima y mínima que producen el hidrógeno y la gasolina en el cigüeñal del tren alternativo se expresan en la tabla 5.12:

Combustible \ Resultados	Tensión Equivalente Máxima (Pa).	Tensión Equivalente Mínima (Pa).
HIDRÓGENO	$4,4238 \times 10^9$	2538,1
GASOLINA	$4,4646 \times 10^9$	2517,2

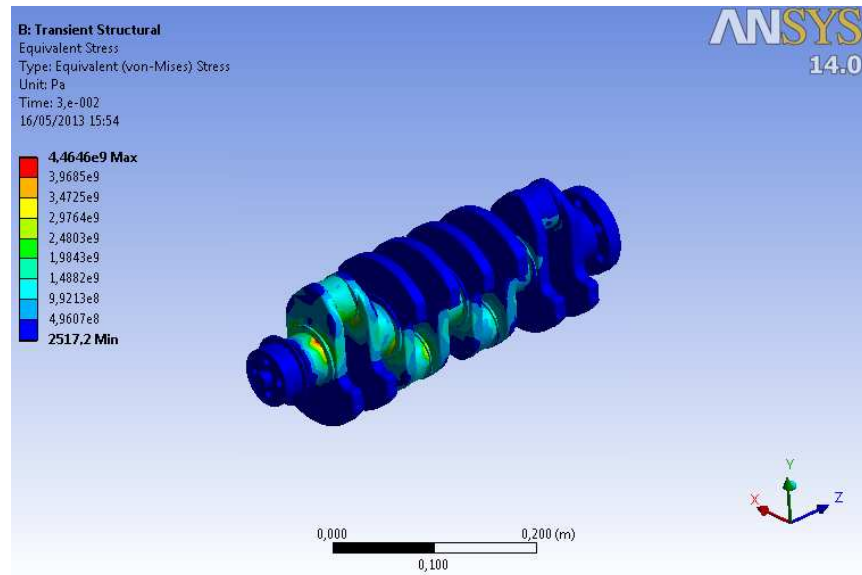
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.12 Resultados de la tensión equivalente máxima y mínima en el cigüeñal.



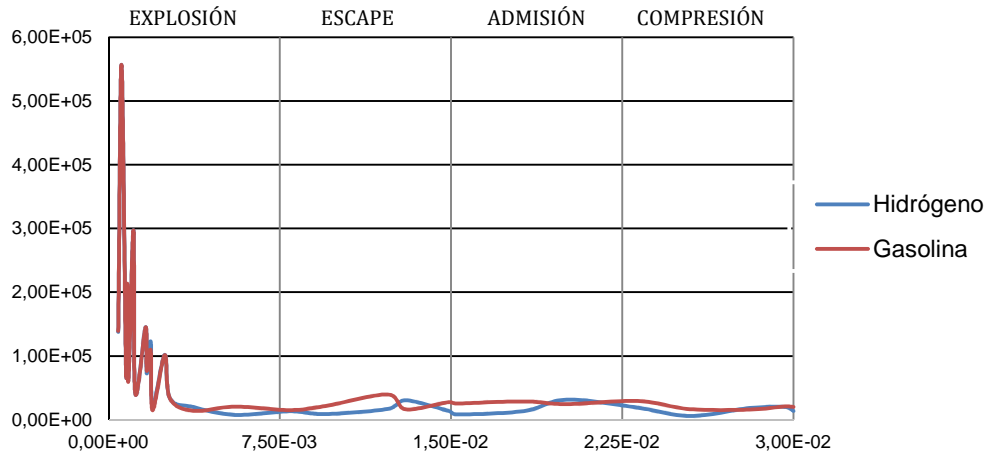
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.15 Tensión Equivalente en el cigüeñal, hidrógeno.



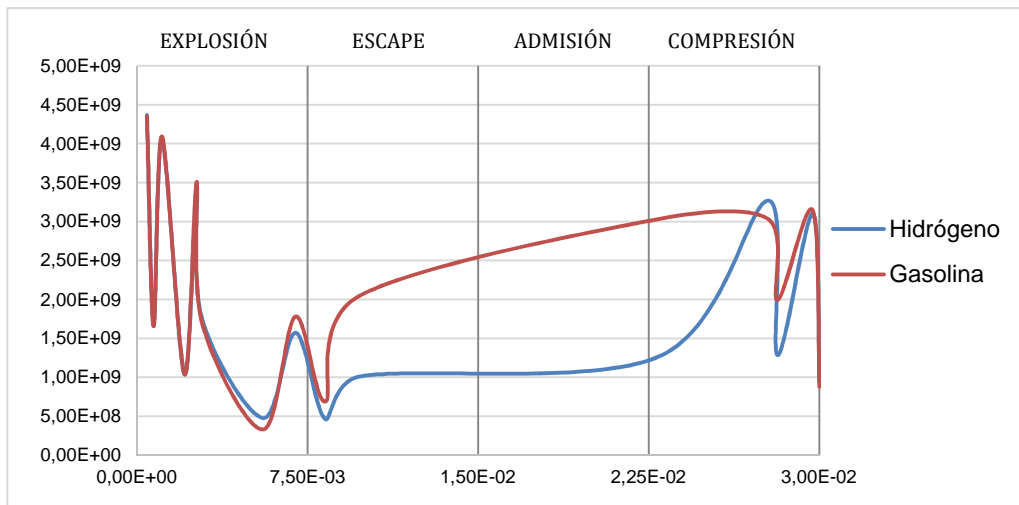
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.16 Tensión Equivalente en el cigüeñal, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.10 Tensión equivalente mínima en el cigüeñal Hidrógeno vs. Gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.11 Tensión equivalente máxima en el cigüeñal Hidrógeno vs. Gasolina.

En las gráficas 5.10 y 5.11 se observa que al utilizar tanto hidrógeno como gasolina la tensión equivalente máxima y mínima es constante, la diferencia va a ser que si se utiliza hidrógeno los valores de tensión van a ser menores en el cigüeñal.

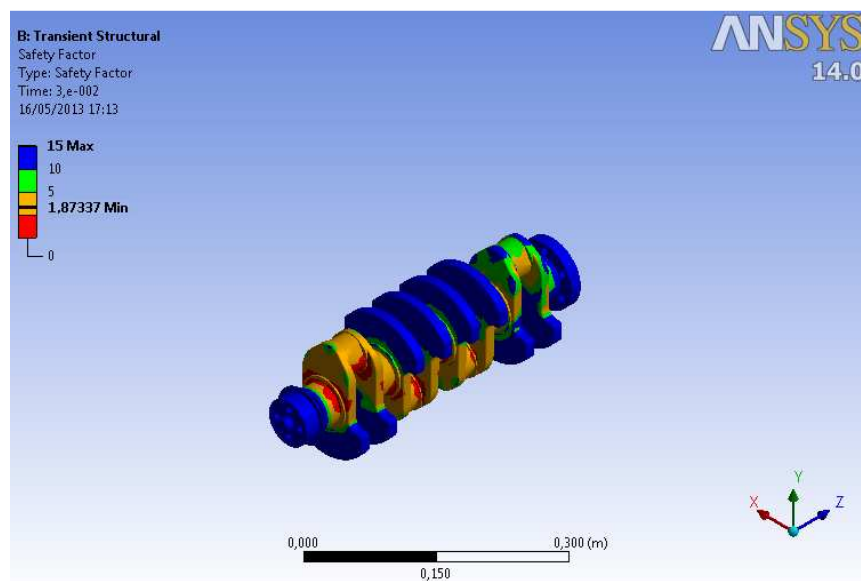
5.4.3 FACTOR DE SEGURIDAD

Las diferencias del factor de seguridad en el cigüeñal, al utilizar tanto hidrógeno como gasolina, se expresan en la tabla 5.13:

Combustible \ Resultados	Factor de Seguridad Máximo	Factor de seguridad Mínimo
HIDRÓGENO	15	1,8733
GASOLINA	15	1,3563

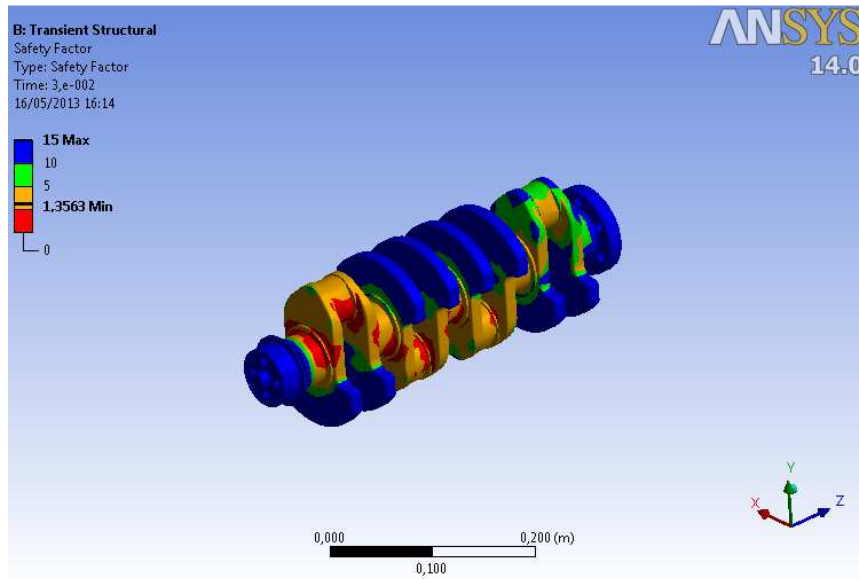
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.13 Resultados del Factor de seguridad máximo y mínimo en el cigüeñal.



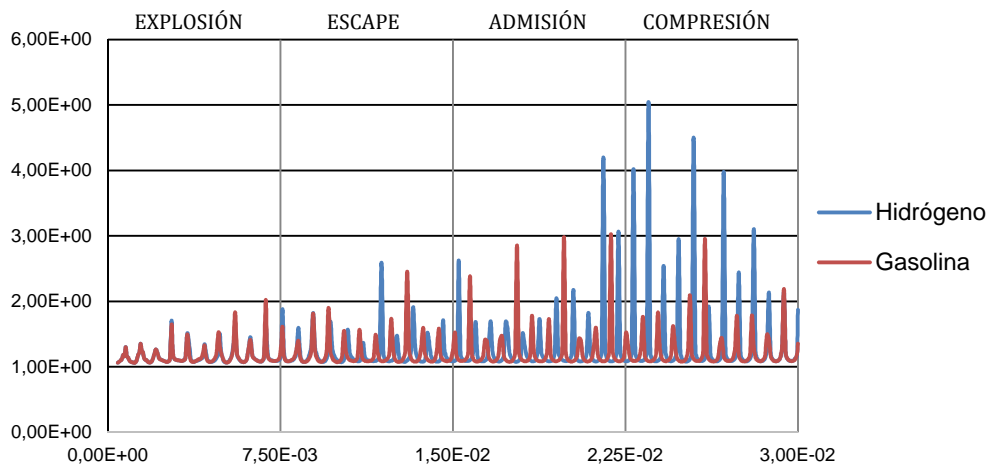
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.17 Factor de seguridad en el cigüeñal, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.18 Factor de seguridad en el cigüeñal, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.12 Factor de seguridad máximo y mínimo en el cigüeñal Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.12 se observa el factor de seguridad a tensión máxima y mínima en el cigüeñal utilizando tanto hidrógeno como gasolina, la diferencia es que utilizando gasolina (línea roja) se puede observar que existen picos más bajos en relación a utilizar hidrógeno (línea azul), esto quiere decir, que el hidrógeno tiene un factor de seguridad más elevado.

5.5 ANÁLISIS ESTÁTICO BLOQUE-CABEZOTE

Condiciones iniciales aplicadas al análisis estático bloque-cabezote del motor.

Condiciones Combustible.	Presión (Pa)	RPM (condiciones normales)
HIDRÓGENO	$6,7 \times 10^6$	4000
GASOLINA	$9,2 \times 10^6$	4000

Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.14 Presión y RPM aplicadas en el análisis estático del bloque-cabezote.

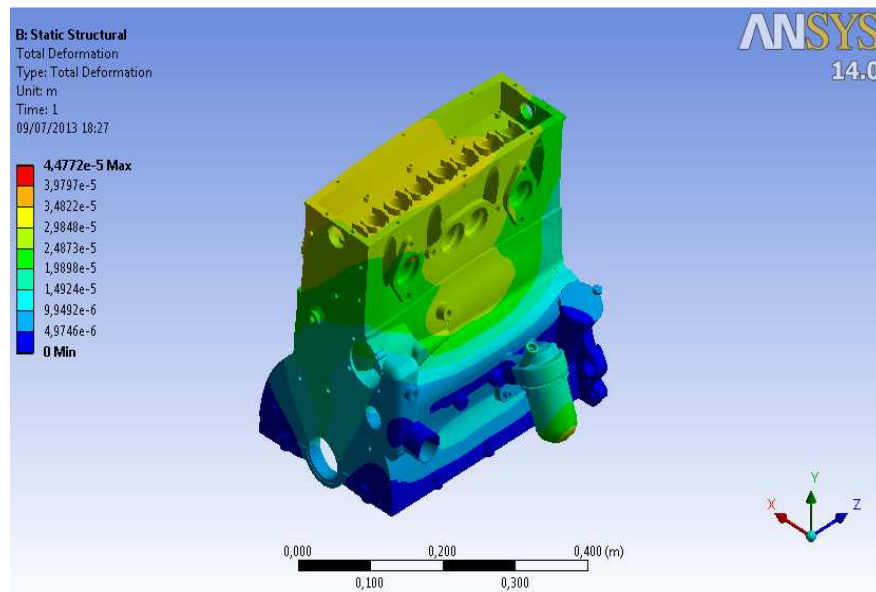
5.5.1 DEFORMACIÓN TOTAL.

Las diferencias de deformación que producen el hidrógeno y la gasolina en el análisis estático bloque-cabezote del tren alternativo se expresan en la tabla 5.15:

Resultados Combustible	Deformación total Máxima (m).	Deformación total Mínima (m).
HIDRÓGENO	$4,4772 \times 10^{-5}$	0
GASOLINA	$1,0299 \times 10^{-4}$	0

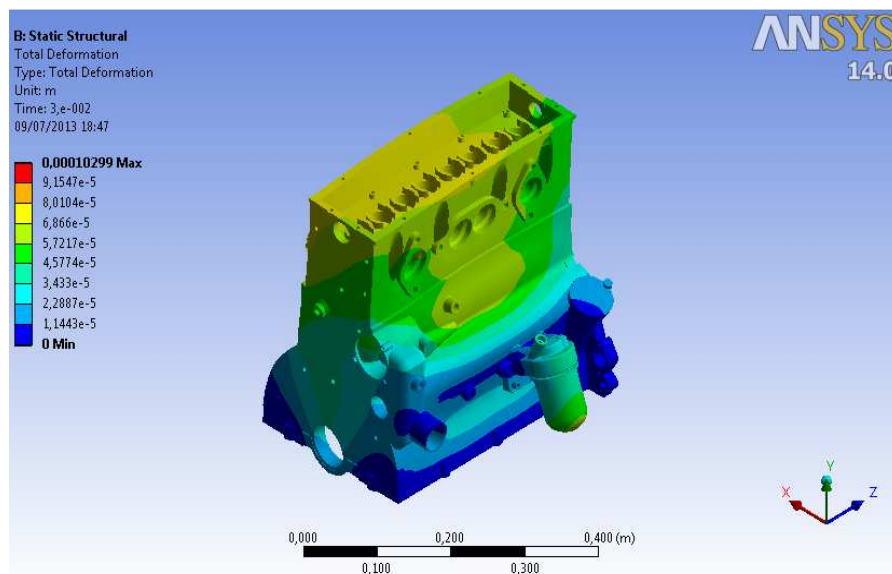
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.15 Resultados de la deformación total máxima y mínima en el análisis estático bloque-cabezote.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.19 Deformación total en el bloque-cabezote, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.20 Deformación total en el bloque-cabezote utilizando gasolina.

Por ser un análisis estático del bloque-cabezote la deformación mínima es cero y la máxima varía en relación al combustible que proporciona la energía de funcionamiento del motor, para esto se utiliza la presión máxima en el tiempo de explosión del ciclo, (ver la tabla 5.8), y como se puede observar en la tabla 5.15, la deformación es mayor al utilizar la gasolina.

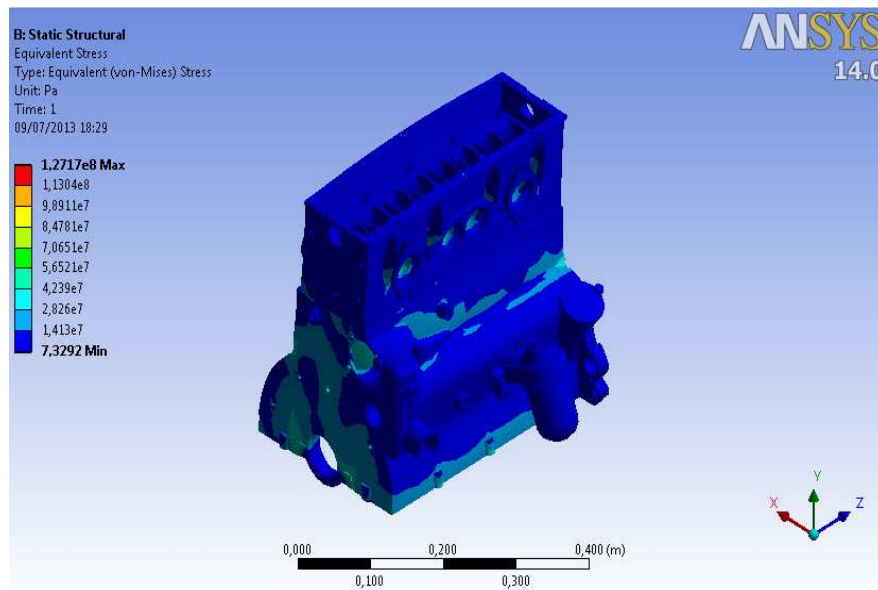
5.5.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.

Las diferencias de la tensión equivalente que producen el hidrógeno y la gasolina en el análisis estático bloque-cabezote en el motor se expresan en la tabla 5.16:

Resultados Combustible	Tensión Equivalente Máxima (Pa).	Tensión Equivalente Mínima (Pa).
HIDRÓGENO	$1,2717 \times 10^8$	7,3292
GASOLINA	$1,7492 \times 10^8$	9,5982

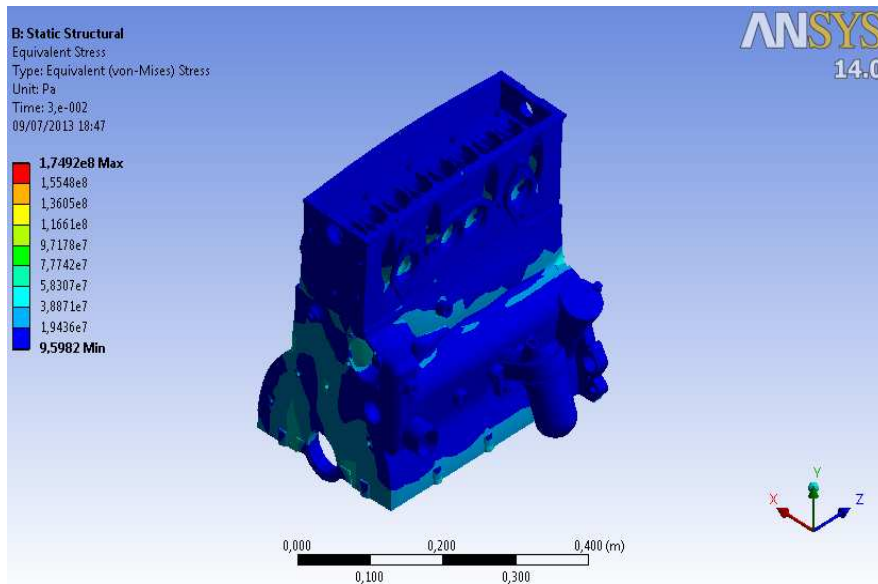
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.16 Resultados de la tensión equivalente máxima y mínima en el análisis estático del bloque-cabezote.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.21 Tensión Equivalente en el bloque-cabezote, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.22 Tensión Equivalente en el bloque-cabezote, gasolina.

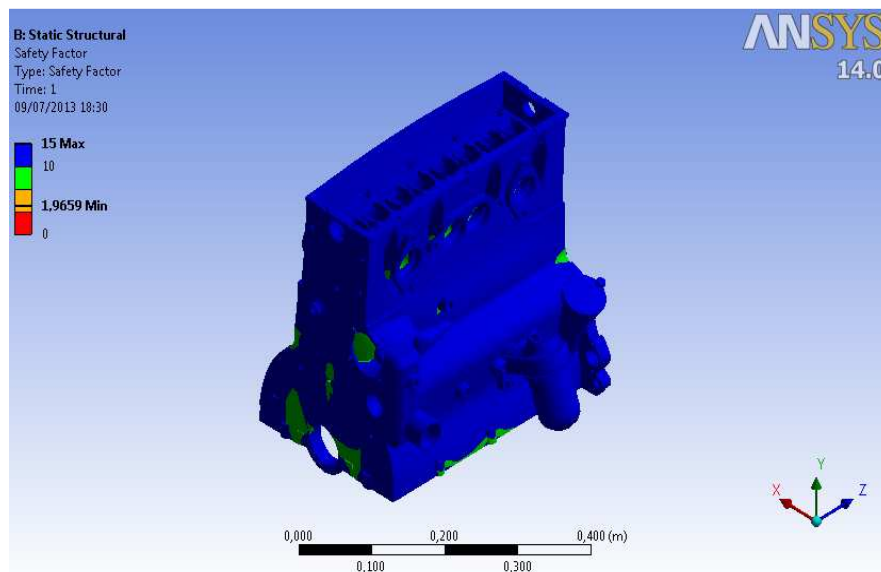
5.5.3 FACTOR DE SEGURIDAD.

Las diferencias del factor de seguridad en el análisis estático bloque-cabezote, utilizando tanto hidrógeno como gasolina, se expresan en la tabla 5.17:

Combustible \ Resultados	Factor de Seguridad Máximo	Factor de seguridad Mínimo
HIDRÓGENO	15	1,9659
GASOLINA	15	1,5721

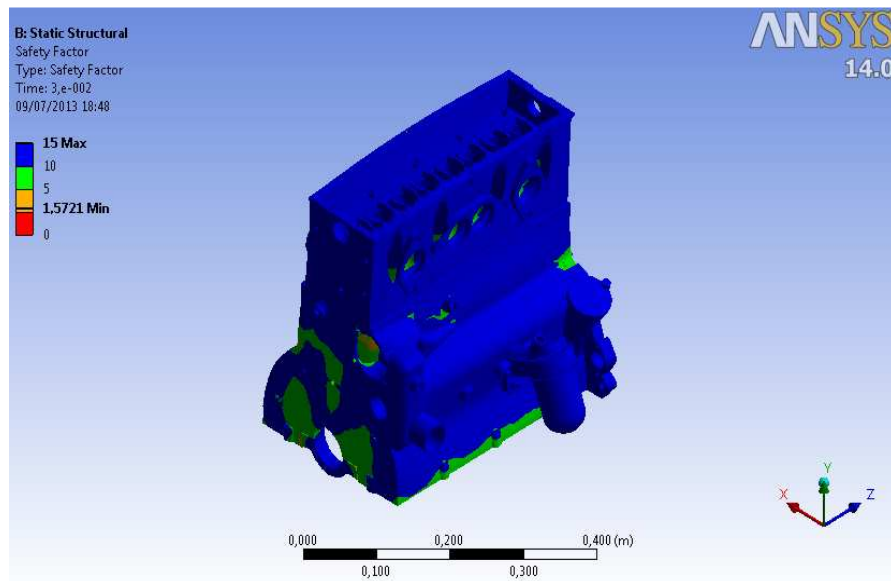
Fuente: Grupo investigador

Tabla 5.17 Resultados del Factor de seguridad máximo y mínimo en el análisis estático del bloque-cabezote.



Fuente: Grupo investigador

Figura 5.23 Factor de seguridad en el análisis estático bloque-cabezote, hidrógeno



Fuente: Grupo investigador

Figura 5.24 Factor de seguridad análisis bloque-cabezote, gasolina.

En la figuras 5.23 y 5.24 se determina que el factor de seguridad a tensión en el análisis del bloque-cabezote al utilizar gasolina es menor que al utilizar hidrógeno. En conclusión el hidrógeno garantiza una mayor durabilidad del bloque y cabezote y por ende un mayor tiempo de uso.

5.6 ANÁLISIS TÉRMICO.

Condiciones iniciales aplicadas al análisis térmico del tren alternativo del motor.

Condiciones. Combustible.	FUERZA (N)	RPM (condiciones normales)	Temperatura (°C)
HIDRÓGENO	36144	4000	2006,8
GASOLINA	49693	4000	3366,0

Fuente: Grupo Investigador

Tabla 5.18 Fuerza, Temperatura y RPM aplicadas en análisis térmico del tren alternativo del motor.

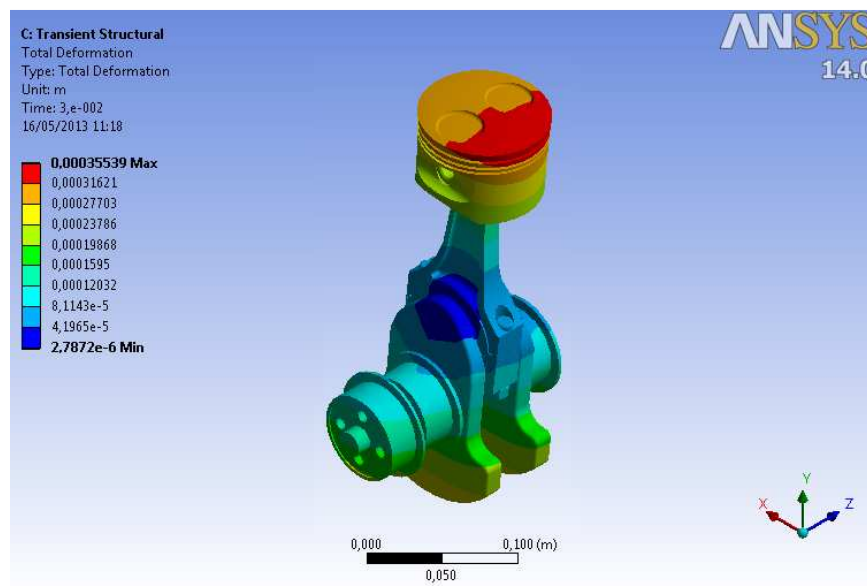
5.6.1 DEFORMACIÓN TOTAL.

Las diferencias de deformación que producen el hidrógeno y la gasolina en el análisis térmico del tren alternativo se expresan en la tabla 5.19:

Combustible \ Resultados	Deformación total Máxima (m).	Deformación total Mínima (m).
HIDRÓGENO	$3,5539 \times 10^{-4}$	$2,7877 \times 10^{-6}$
GASOLINA	$6,0756 \times 10^{-4}$	$4,8028 \times 10^{-6}$

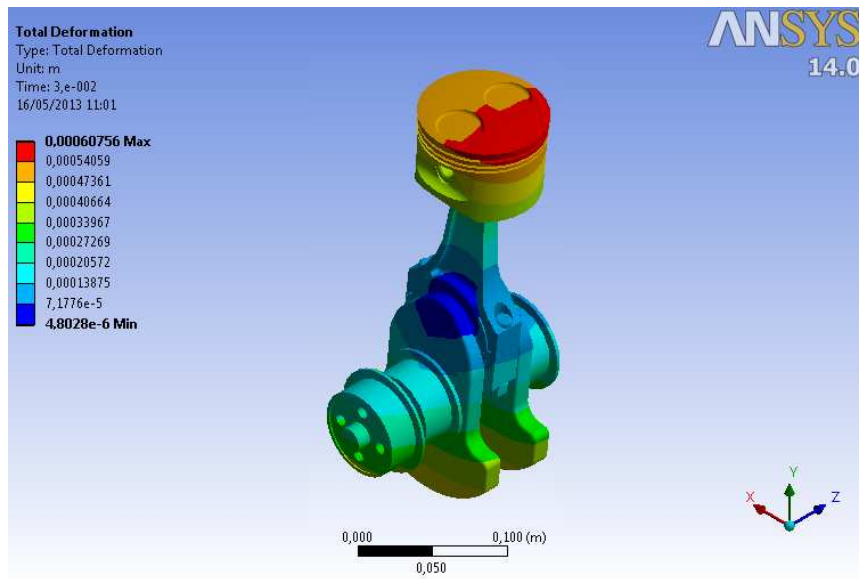
Fuente: Grupo Investigador

Tabla 5.19 Resultados de la deformación total máxima y mínima en el análisis térmico del tren alternativo del motor.



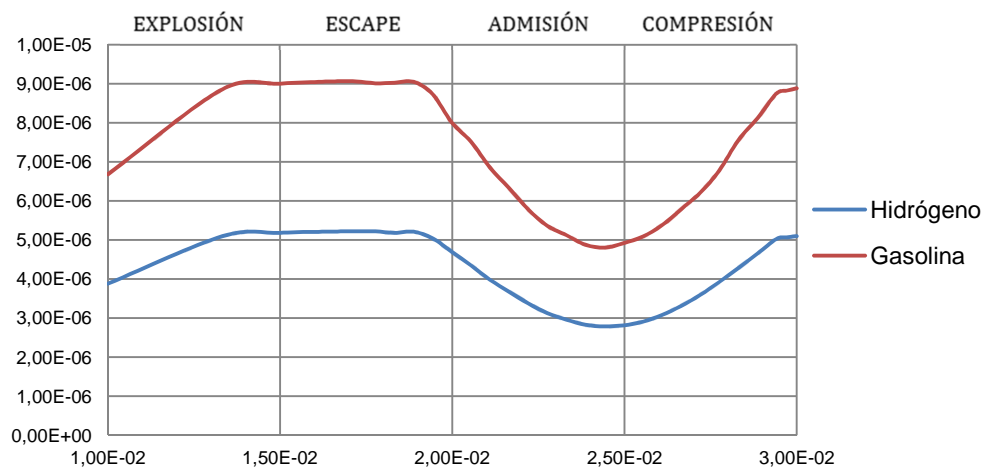
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.25 Deformación total en el análisis térmico, hidrógeno.



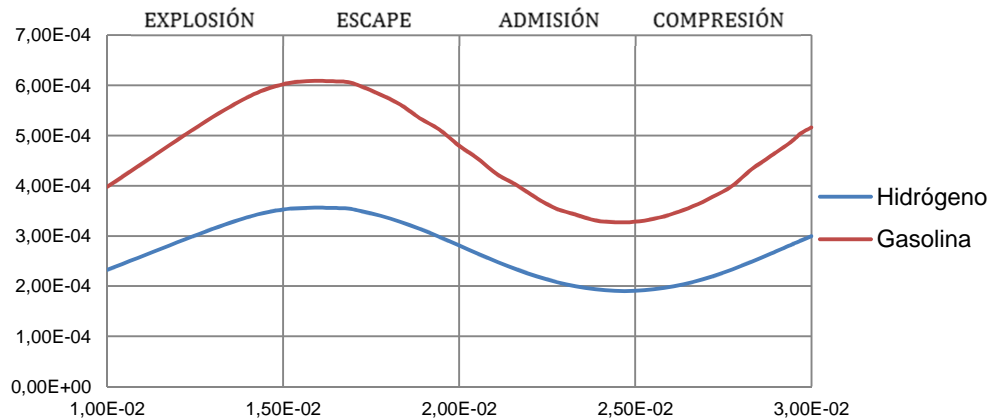
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.26 Deformación total en el análisis térmico, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.13 Deformación total mínima en el análisis térmico del tren alternativo Hidrógeno vs. Gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.14 Deformación total máxima en el análisis térmico del tren alternativo Hidrógeno vs. Gasolina.

La deformación total máxima y mínima del análisis térmico del tren alternativo según las condiciones iniciales, da como resultado que al utilizar hidrógeno como combustible se va a obtener valores menores de deformación en relación al utilizar gasolina.

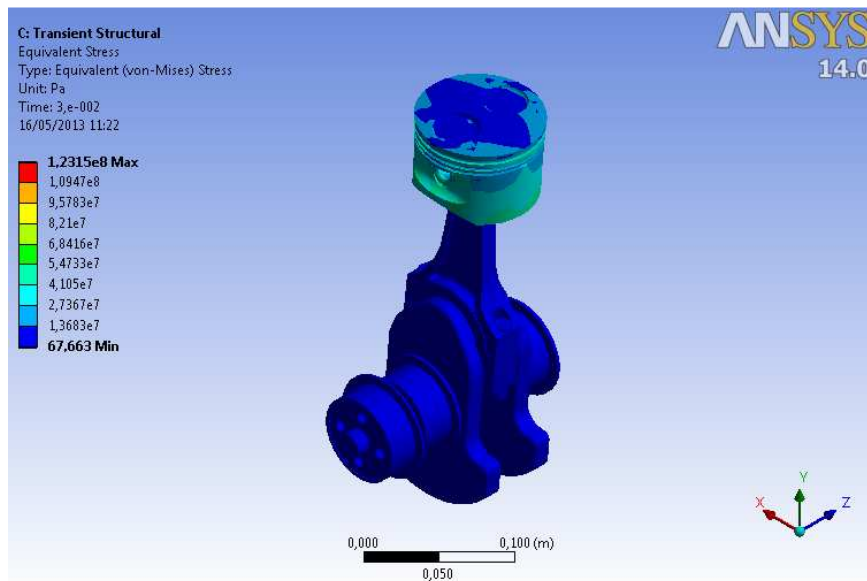
5.6.2 TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA Y MÍNIMA.

Las diferencias de la tensión equivalente que producen el hidrógeno y la gasolina en el análisis térmico del tren alternativo se expresan en la tabla 5.20:

Combustible	Tensión Equivalente Máxima (Pa).	Tensión Equivalente Mínima (Pa).
HIDRÓGENO	$1,2315 \times 10^8$	67,663
GASOLINA	$1,9775 \times 10^8$	125,96

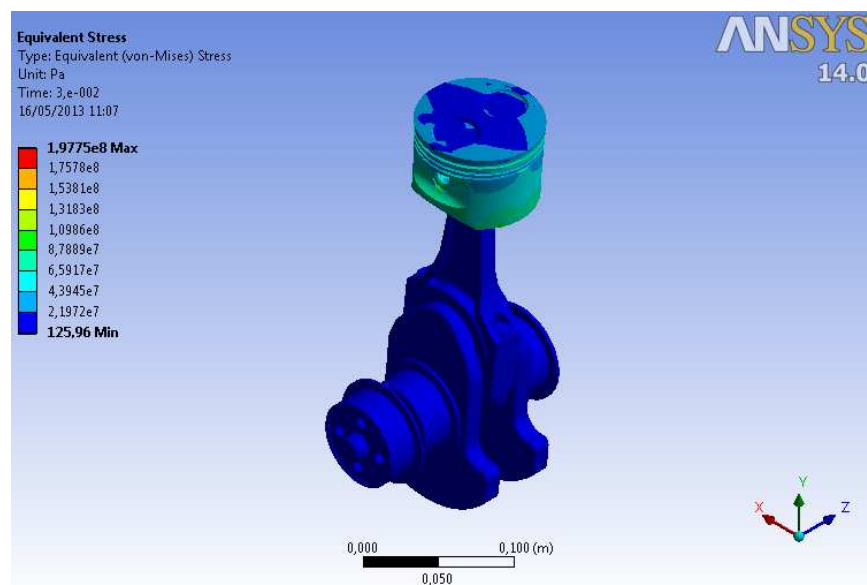
Fuente: Grupo Investigador

Tabla 5.20 Resultados de la tensión equivalente máxima y mínima en el análisis térmico del motor



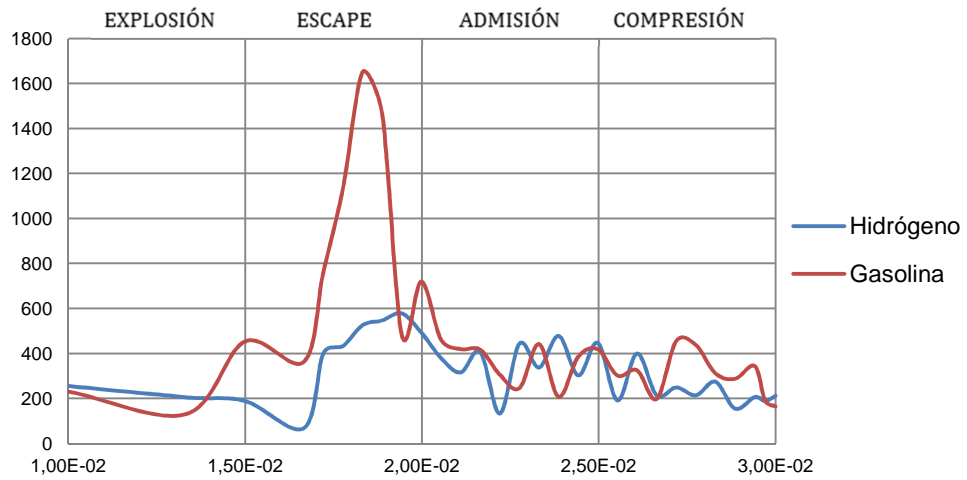
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.27 Tensión Equivalente en el análisis térmico, hidrógeno.



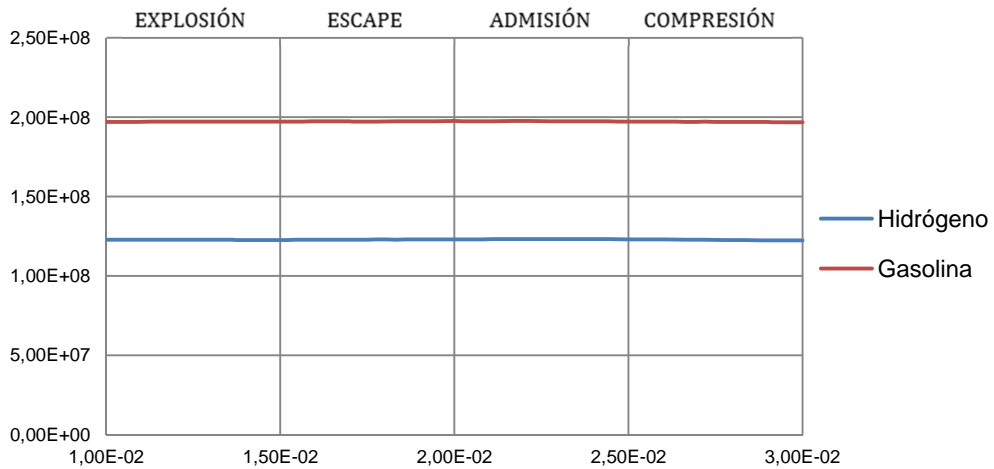
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.28 Tensión Equivalente en el análisis térmico, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.15 Tensión equivalente mínima en el análisis térmico del tren alternativo Hidrógeno vs. Gasolina



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.16 Tensión equivalente máxima en el análisis térmico del tren alternativo Hidrógeno vs. Gasolina.

La tensión equivalente máxima y mínima del análisis térmico del tren alternativo según las condiciones iniciales, da como resultado que al utilizar hidrogeno como combustible se va a obtener valores menores de deformación en relación al utilizar gasolina.

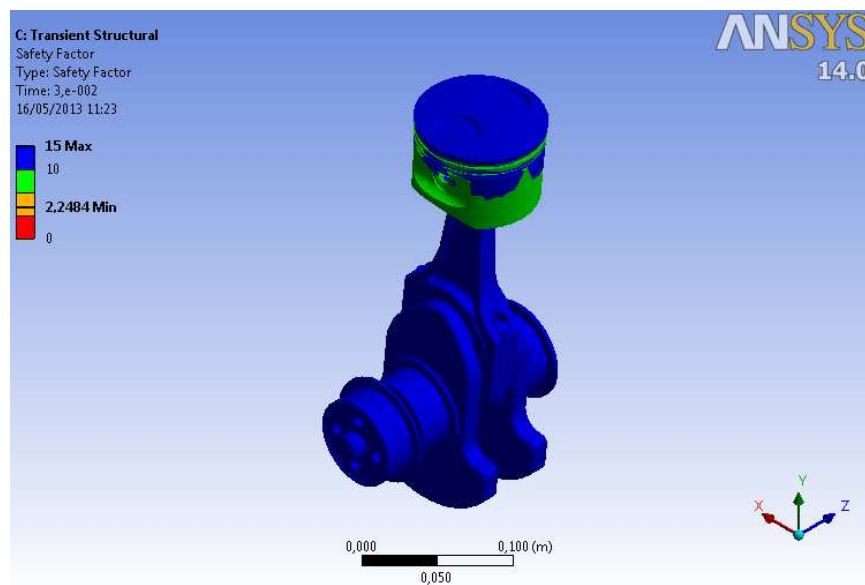
5.6.3 FACTOR DE SEGURIDAD.

Las diferencias del factor de seguridad en el análisis térmico del tren alternativo, utilizando tanto hidrógeno como gasolina, se expresan en la tabla 5.21:

Combustible \ Resultados	Factor de Seguridad Máximo	Factor de seguridad Mínimo
HIDRÓGENO	15	2,2484
GASOLINA	15	1,3971

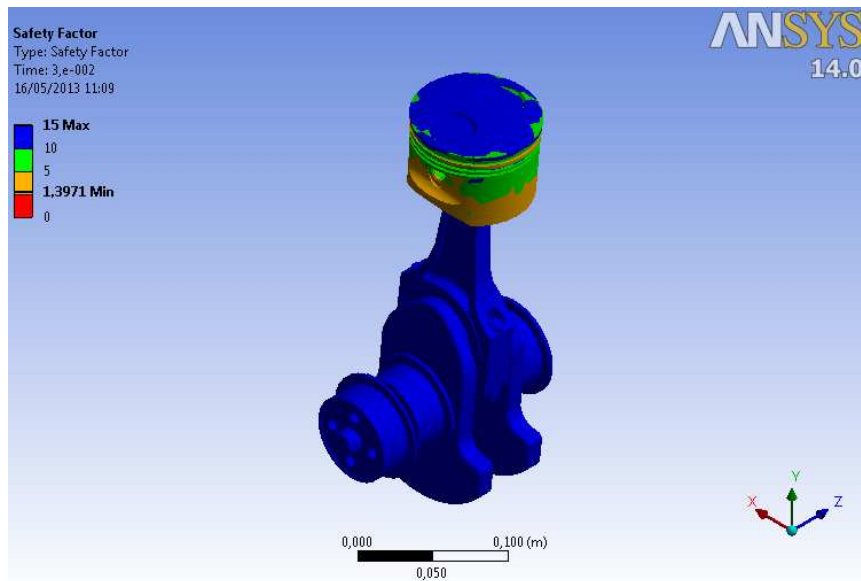
Fuente: Grupo Investigador

Tabla 5.21 Resultados del Factor de seguridad máximo y mínimo en el análisis térmico del motor.



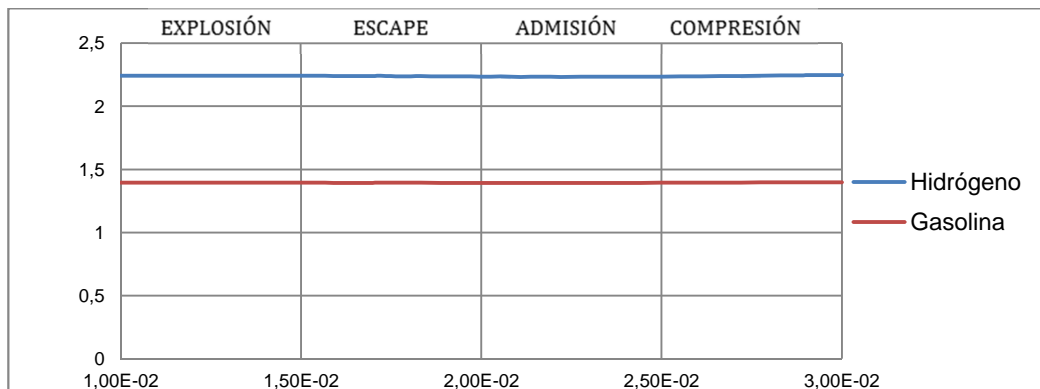
Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.29 Factor de seguridad en el análisis térmico, hidrógeno.



Fuente: Grupo Investigador

Figura 5.30 Factor de seguridad en el análisis térmico, gasolina.



Fuente: Grupo Investigador

Gráfica 5.17 Factor de seguridad máximo y mínimo en el análisis térmico Hidrógeno vs. Gasolina.

En la gráfica 5.17 se observa que el factor de seguridad a tensión máxima y mínima en el análisis térmico utilizando tanto hidrógeno como gasolina, se diferencian ya que en el motor propulsado por gasolina (línea roja) se puede observar que existen picos más bajos en relación a el motor propulsado por hidrógeno (línea azul), esto quiere decir, que el hidrógeno tiene un factor de seguridad más elevado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- El hidrógeno tiene un amplio rango de inflamabilidad (4-74% versus 1.4-7.6% de la gasolina). Esto primero conduce a preocupaciones obvias sobre el manejo seguro del hidrógeno. Pero, también implica una amplia gama de mezclas de combustible y aire, incluyendo mezclas pobres de combustible. Una mezcla pobre en un motor de combustión interna permite una mayor economía de combustible debido a una combustión más completa del mismo, permite además una menor temperatura de combustión, reduciendo las emisiones de agentes contaminantes tales como óxidos de nitrógeno (NOx).

- La eficiencia térmica, en las condiciones de trabajo estudiadas, al utilizar hidrógeno fue del 45%, mientras que al usar gasolina fue del 49%, ya que la densidad de energía, así como la densidad másica de la gasolina es mayor en comparación con el hidrógeno.

- En el análisis de la deformación total máxima en el tren alternativo y en el bloque – cabezote utilizando hidrógeno y gasolina se observa que, en la biela se mantiene la deformación máxima más tiempo durante el ciclo al utilizar gasolina. En el pistón la deformación máxima es mayor en 1.75% utilizando gasolina. En el cigüeñal las deformaciones máximas son similares. En el análisis estático bloque – cabezote la deformación máxima es de 56.52% mayor al utilizar gasolina. En el análisis térmico la deformación máxima es de 40.8% mayor al utilizar gasolina. Por lo tanto al

utilizar hidrógeno como combustible la deformación en el tren alternativo será menor.

- En el análisis de la tensión equivalente máxima en el tren alternativo y en el bloque – cabezote utilizando hidrógeno y gasolina se observa que, en la biela la tensión equivalente máxima es de 59.2% mayor al utilizar gasolina. En el pistón la tensión equivalente máxima al usar gasolina es mayor en 41.41% que al utilizar hidrógeno. En el cigüeñal la tensión equivalente máxima es similar al utilizar ambos combustibles. En el análisis estático bloque – cabezote la tensión equivalente máxima utilizando gasolina es mayor en 27.29% que al utilizar hidrógeno. En el análisis térmico la tensión equivalente máxima es de 37.7% mayor al utilizar gasolina. Por lo tanto la tensión equivalente máxima en el tren alternativo es menor al utilizar hidrógeno.
- En el análisis del factor de seguridad a tensión mínimo en el tren alternativo y bloque cabezote al utilizar hidrógeno y gasolina se observa que, en la biela el factor de seguridad mínimo es de 26.6% mayor al utilizar hidrógeno. En el pistón el factor de seguridad mínimo es de 30% mayor al utilizar hidrógeno. En el cigüeñal el factor de seguridad mínimo es de 27.5% mayor al utilizar hidrógeno. En el análisis estático bloque – cabezote el factor de seguridad mínimo es de 20.03% mayor utilizando hidrógeno. En el análisis térmico el factor de seguridad mínimo es de 37.86% mayor al utilizar hidrógeno. Por lo tanto el factor de seguridad mínimo es mayor utilizando hidrógeno como combustible, lo que garantiza mayor durabilidad del motor.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Es necesario el estudio de nuevas fuentes energéticas que suplan a los recursos fósiles que están en camino de agotarse. Las nuevas tendencias apuntan al hidrógeno como el principal portador de energía, pero que en la actualidad no puede suplir la demanda mundial, debido a sus altos costos de producción, transporte y almacenamiento que este conlleva.
- El diseño mecánico de cada una de las piezas del tren alternativo, es obligatorio para su correcto funcionamiento y desempeño. Esto indica que el ingeniero conoce la función de cada pieza, que fuerzas transmite y soporta, en que direcciones transmite esas fuerzas, que tipo de esfuerzos hay en ella, qué importancia tiene su comportamiento térmico, cuales son los rangos de fuerzas o temperaturas admisibles.
- La falla más común en la biela es la rotura, su correcto diseño y el material que se utilice en su fabricación son de vital importancia dentro del motor ya que la rotura de la biela suele acarrear daños irreversibles en los cilindros, pistón y culata.
- Para el correcto diseño mecánico del cigüeñal se tiene en cuenta el número de cilindros, el tamaño de la bancada, la potencia, torque y tipo de motor, así como el tipo de transmisión. Todo esto determina la forma y el tamaño de este eje, lo que influye en su correcto desempeño.
- El material del que son construidos los bloques deben soportar los elevados esfuerzos de tracción de la culata durante la combustión. Su diseño permite alojar a las camisas de cilindros por donde se

deslizan los pistones. Así mismo van sujetas al bloque los asientos de bancada, que generan esfuerzos adicionales al mismo.

- Estudiar el comportamiento de nuevos materiales a ser utilizados en el tren alternativo para determinar como actúan al usar hidrógeno como combustible.
- Empezar en estudios comparativos similares al realizado, utilizando otros combustibles tales como diesel, biodiesel, etanol, etc, como fuentes a ser sustituidas por el uso del hidrógeno.

BIBLIOGRAFÍA

Corbo P., Migliardini F., Veneri O. (2011), "Celdas de combustible de Hidrógeno para autos", Springer London Limited 2011.

Ehsani M., Gao Y., Gay S., Emadi A.(2004), "Electricidad moderna, Electricidad Híbrida y Celdas de Combustible para vehículos, fundamentos, teoría y Diseño", Estados Unidos de Norteamérica, CRC Press, primera edición.

Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) (2009), "Motores de Combustión Interna a Hidrógeno", Estados Unidos de Norteamérica, SAE International.

Liu F.(2004), "Estudio de la formación de la mezcla y su combustión en un motor a hidrógeno", Alemania, Cuvillier Verlag, primera edición.

Hordeski Michael F., (2008), "Hidrógeno y Celdas de Combustible", Estados Unidos de Norteamérica, Fairmont Press, primera edición.

Stolten D., (2010), "Hidrógeno y Celdas de Combustible, Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones", Alemania, Wiley-VCH, primera edición.

Gerke U., (2007), "Análisis numérico de la formación de la mezcla y combustión en un motor a hidrógeno con inyección directa", Alemania, Cuvillier Verlag, primera edición.

Bases Digitales ESPE.

M.S. Jójvaj (1973). Motores del Automóvil. Editorial MIR. Moscú.

Yunus A. Cengel (2009). Termodinámica. Mc. Graw Hill. sexta edición.

Norton Robert L. (2006). Diseño de Maquinaria. Pearson, tercera edición.

NETGRAFÍA

<http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys.pdf>

<http://www.construccion.uniovi.es/area/ansys.pdf>

http://www.fe.doe.gov/coal_power/gasification/index.shtml

<http://www.bellona.no/imaker?id=11191%E2%8A%82=1>


[www.bellona.no.Energy.Hydrogen](http://www.bellona.no/Energy/Hydrogen)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Gasolina>

**ANEXO A: PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PIEZAS
DISEÑADAS**

General	Resumen	Proyecto	Estado	Personalizadas	Guardar	Propiedades físicas
Sólidos						
La pieza					Actualizar	
Material						Portapapeles
Aluminio 6061						
Densidad			Precisión solicitada			
2,710 g/cm ³			Baja			
Propiedades generales						
			Centro de gravedad			
Masa	0,336 kg (Error rela		X	11,248 mm (Error r		
Área	40918,912 mm ² (Y	0,000 mm (Error rel		
Volumen	123982,487 mm ³		Z	-0,000 mm (Error re		
Propiedades de inercia						
Principal		Global		Centro de gravedad		
Momentos principales						
I1	341,577 kg mm	I2	251,531 kg mm	I3	238,484 kg mm	
Rotación a principal						
Rx	-0,00 gr (Error i	Ry	0,00 gr (Error r	Rz	0,00 gr (Error r	

Fuente: Autodesk Inventor 2012
 Figura 1. Propiedades Físicas del Pistón

General	Resumen	Proyecto	Estado	Personalizadas	Guardar	Propiedades físicas
Sólidos						Actualizar
<input type="text" value="La pieza"/>						
Material						Portapapeles
<input type="text" value="Hierro, fundido"/>						
Densidad			Precisión solicitada			
<input type="text" value="7,250 g/cm^3"/>			<input type="text" value="Baja"/>			
Propiedades generales						
			Centro de gravedad			
Masa	<input type="text" value="576,139 g (Error re"/>		X	<input type="text" value="-0,003 mm (Error re"/>		
Área	<input type="text" value="24368,703 mm^2 ("/>		Y	<input type="text" value="58,169 mm (Error ri"/>		
Volumen	<input type="text" value="79467,454 mm^3 ("/>		Z	<input type="text" value="12,492 mm (Error ri"/>		
Propiedades de inercia						
<input checked="" type="button" value="Principal"/>		<input type="button" value="Global"/>		<input type="button" value="Centro de gravedad"/>		
Momentos principales						
I1	<input type="text" value="1348667,419 g"/>	I2	<input type="text" value="253069,495 g n"/>	I3	<input type="text" value="1560940,570 g"/>	
Rotación a principal						
Rx	<input type="text" value="0,01 gr (Error ri"/>	Ry	<input type="text" value="0,00 gr (Error ri"/>	Rz	<input type="text" value="0,00 gr (Error ri"/>	

Fuente: Autodesk Inventor 2012

Figura 2. Propiedades Físicas de la Biela

General	Resumen	Proyecto	Estado	Personalizadas	Guardar	Propiedades físicas
Sólidos						
La pieza					Actualizar	
Material						
Hierro, fundido					Portapapeles	
Densidad			Precisión solicitada			
7,250 g/cm ³			Baja			
Propiedades generales						
Masa			Centro de gravedad			
14,251 kg (Error re			X	-0,075 mm (Error re		
Área			Y	-0,046 mm (Error re		
269138,523 mm ²			Z	165,751 mm (Error		
Volumen						
1965659,552 mm ³						
Propiedades de inercia						
Principal		Global		Centro de gravedad		
Momentos principales						
I1	209251,078 kg	I2	198659,826 kg	I3	24859,765 kg m	
Rotación a principal						
Rx	-0,01 gr (Error i	Ry	-0,00 gr (Error i	Rz	-0,08 gr (Error i	

Fuente: Autodesk Inventor 2012

Figura 3. Propiedades Físicas del Cigüeñal

ANEXO B: DATOS DE VELOCIDADES, ACELERACIONES Y FUERZAS DEL MOTOR EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE GIRO DEL CIGÜEÑAL.

GASOLINA											
ANGULO α	P	S ϵ	V	F ϵ	N ϵ	k ϵ	T ϵ	Z ϵ	Ve	We	
0	1.00	0.00	61.32	541.06	0.00	541.06	0.00	541.06	0.00	75598.90	
10	0.99	0.10	66.98	537.27	32.88	538.28	125.67	523.40	124.92	73562.92	
20	0.99	0.41	83.64	533.49	64.65	537.39	243.21	479.20	243.48	67623.87	
30	0.98	0.91	110.42	529.70	94.63	538.08	346.80	411.42	349.66	58270.43	
40	0.97	1.56	145.93	525.91	122.06	539.89	431.55	324.41	438.25	46259.01	
50	0.97	2.35	188.37	522.12	146.08	542.17	493.87	223.71	505.17	32533.81	
60	0.96	3.22	235.69	518.34	165.76	544.20	531.77	115.61	547.92	18128.31	
70	0.95	4.15	285.73	514.55	180.19	545.19	545.15	6.66	565.83	4059.45	
80	0.94	5.08	336.41	510.76	188.59	544.47	535.75	-97.03	560.20	-8773.07	
90	0.94	6.00	385.79	506.97	190.49	541.58	506.97	-190.49	534.07	-19671.14	
100	0.93	6.86	432.24	503.19	185.80	536.39	463.28	-270.35	491.71	-28196.58	
110	0.92	7.64	474.49	499.40	174.89	529.14	409.47	-335.14	437.90	-34197.39	
120	0.92	8.32	511.63	495.61	158.50	520.34	349.96	-385.07	377.12	-37799.45	
130	0.91	8.90	543.11	491.28	137.45	510.15	287.99	-421.09	313.07	-39365.53	
140	0.90	9.38	568.69	487.50	113.14	500.45	226.68	-446.17	248.34	-39427.29	
150	0.89	9.74	588.37	483.71	86.41	491.37	167.02	-462.11	184.41	-38599.29	
160	0.89	10.00	602.24	479.92	58.16	483.43	109.49	-470.87	121.85	-37485.93	
170	0.88	10.15	610.47	476.13	29.13	477.02	53.99	-473.96	60.56	-36593.26	
180	0.87	10.20	613.20	472.35	0.00	472.35	0.00	-472.35	0.00	-36256.62	
190	1.97	10.15	610.47	1066.97	-65.29	1068.97	-120.98	-1062.10	-60.56	-36593.26	
200	3.07	10.00	602.24	1661.60	-201.35	1673.75	-379.10	-1630.26	-121.85	-37485.93	
210	4.17	9.74	588.37	2255.68	-402.97	2291.39	-778.86	-2154.96	-184.41	-38599.29	
220	5.27	9.38	568.69	2850.31	-661.54	2926.07	-1325.38	-2608.69	-248.34	-39427.29	
230	6.37	8.90	543.11	3444.93	-963.83	3577.23	-2019.43	-2952.70	-313.07	-39365.53	
240	7.47	8.32	511.63	4039.02	-1291.67	4240.53	-2852.06	-3138.13	-377.12	-37799.45	

250	8.56	7.64	474.49	4633.64	-1622.67	4909.55	-3799.22	-3109.61	-437.90	-34197.39
260	9.66	6.86	432.24	5228.27	-1930.48	5573.29	-4813.62	-2809.03	-491.71	-28196.58
270	10.76	6.00	385.79	5822.36	-2187.64	6219.78	-5822.36	-2187.64	-534.07	-19671.14
280	11.86	5.08	336.41	6416.98	-2369.40	6840.45	-6730.93	-1219.10	-560.20	-8773.07
290	12.96	4.15	285.73	7011.07	-2455.23	7428.54	-7427.98	90.77	-565.83	4059.45
300	14.06	3.22	235.69	7605.69	-2432.29	7985.15	-7802.87	1696.42	-547.92	18128.31
310	15.16	2.35	188.37	8200.32	-2294.31	8515.22	-7756.56	3513.52	-505.17	32533.81
320	16.25	1.56	145.93	8794.40	-2041.12	9028.16	-7216.52	5424.90	-438.25	46259.01
330	17.35	0.91	110.42	9389.03	-1677.31	9537.67	-6147.11	7292.48	-349.66	58270.43
340	18.45	0.41	83.64	9983.65	-1209.78	10056.69	-4551.43	8967.80	-243.48	67623.87
350	19.55	0.10	66.98	10577.74	-647.26	10597.52	-2474.23	10304.64	-124.92	73562.92
360	91.84	0.00	61.32	49692.65	0.00	49692.65	0.00	49692.65	0.00	75598.90
370	87.03	0.10	66.98	47090.69	2881.51	47178.76	11014.94	45874.90	124.92	73562.92
380	82.23	0.41	83.64	44488.72	5390.98	44814.16	20281.90	39961.90	243.48	67623.87
390	77.42	0.91	110.42	41886.76	7482.89	42549.91	27423.76	32533.55	349.66	58270.43
400	72.61	1.56	145.93	39285.34	9117.85	40329.56	32236.81	24233.48	438.25	46259.01
410	67.80	2.35	188.37	36683.38	10263.37	38092.09	34698.27	15717.42	505.17	32533.81
420	62.99	3.22	235.69	34081.42	10899.19	35781.78	34964.97	7601.74	547.92	18128.31
430	58.18	4.15	285.73	31479.46	11023.89	33353.90	33351.41	407.54	565.83	4059.45
440	53.37	5.08	336.41	28878.04	10662.89	30783.73	30290.91	-5486.28	560.20	-8773.07
450	48.56	6.00	385.79	26276.08	9872.76	28069.62	26276.08	-9872.76	534.07	-19671.14
460	43.76	6.86	432.24	23674.12	8741.40	25236.40	21796.52	-12719.57	491.71	-28196.58
470	38.95	7.64	474.49	21072.15	7379.32	22326.89	17277.47	-14141.40	437.90	-34197.39
480	34.14	8.32	511.63	18470.73	5906.91	19392.26	13042.67	-14350.90	377.12	-37799.45
490	29.33	8.90	543.11	15868.77	4439.81	16478.16	9302.33	-13601.34	313.07	-39365.53
500	24.52	9.38	568.69	13266.81	3079.13	13619.45	6168.99	-12142.19	248.34	-39427.29
510	19.71	9.74	588.37	10664.85	1905.23	10833.69	3682.45	-10188.65	184.41	-38599.29

520	14.90	10.00	602.24	8063.43	977.10	8122.41	1839.69	-7911.33	121.85	-37485.93
530	10.09	10.15	610.47	5461.47	334.19	5471.68	619.26	-5436.53	60.56	-36593.26
540	5.29	10.20	613.20	2859.51	0.00	2859.51	0.00	-2859.51	0.00	-36256.62
550	5.05	10.15	610.47	2730.73	-167.10	2735.84	-309.63	-2718.26	-60.56	-36593.26
560	4.81	10.00	602.24	2601.96	-315.30	2620.99	-593.64	-2552.88	-121.85	-37485.93
570	4.57	9.74	588.37	2473.19	-441.82	2512.34	-853.96	-2362.76	-184.41	-38599.29
580	4.33	9.38	568.69	2344.42	-544.12	2406.73	-1090.14	-2145.68	-248.34	-39427.29
590	4.10	8.90	543.11	2215.64	-619.90	2300.73	-1298.82	-1899.06	-313.07	-39365.53
600	3.86	8.32	511.63	2086.87	-667.38	2190.99	-1473.59	-1621.40	-377.12	-37799.45
610	3.62	7.64	474.49	1958.10	-685.71	2074.69	-1605.48	-1314.07	-437.90	-34197.39
620	3.38	6.86	432.24	1829.33	-675.46	1950.05	-1684.24	-982.86	-491.71	-28196.58
630	3.14	6.00	385.79	1700.01	-638.75	1816.05	-1700.01	-638.75	-534.07	-19671.14
640	2.90	5.08	336.41	1571.24	-580.16	1674.93	-1648.11	-298.51	-560.20	-8773.07
650	2.67	4.15	285.73	1442.47	-505.14	1528.36	-1528.25	18.67	-565.83	4059.45
660	2.43	3.22	235.69	1313.70	-420.12	1379.24	-1347.75	293.02	-547.92	18128.31
670	2.19	2.35	188.37	1184.92	-331.52	1230.43	-1120.80	507.69	-505.17	32533.81
680	1.95	1.56	145.93	1056.15	-245.13	1084.22	-866.66	651.50	-438.25	46259.01
690	1.71	0.91	110.42	927.38	-165.67	942.06	-607.17	720.30	-349.66	58270.43
700	1.48	0.41	83.64	798.61	-96.77	804.45	-364.08	717.35	-243.48	67623.87
710	1.24	0.10	66.98	669.83	-40.99	671.09	-156.68	652.54	-124.92	73562.92
720	1.00	0.00	61.32	541.06	0.00	541.06	0.00	541.06	0.00	75598.90

HIDRÓGENO										
ANGULO α	P	S ϵ	V	F ϵ	N ϵ	k ϵ	T ϵ	Z ϵ	Ve	We
0	1.00	0.00	61.32	541.06	0.00	541.06	0.00	541.06	0.00	75598.90
10	1.00	0.10	66.98	541.06	33.11	542.07	126.56	527.09	124.92	73562.92
20	1.00	0.41	83.64	540.52	65.50	544.47	246.42	485.52	243.48	67623.87
30	1.00	0.91	110.42	540.52	96.56	549.08	353.88	419.82	349.66	58270.43
40	1.00	1.56	145.93	539.98	125.33	554.33	443.10	333.09	438.25	46259.01
50	1.00	2.35	188.37	539.98	151.08	560.71	510.76	231.36	505.17	32533.81
60	1.00	3.22	235.69	539.44	172.51	566.35	553.42	120.32	547.92	18128.31
70	1.00	4.15	285.73	539.44	188.91	571.56	571.52	6.98	565.83	4059.45
80	1.00	5.08	336.41	538.90	198.98	574.46	565.26	-102.38	560.20	-8773.07
90	1.00	6.00	385.79	538.90	202.48	575.68	538.90	-202.48	534.07	-19671.14
100	1.00	6.86	432.24	538.36	198.78	573.88	495.66	-289.25	491.71	-28196.58
110	1.00	7.64	474.49	538.36	188.53	570.41	441.41	-361.29	437.90	-34197.39
120	0.99	8.32	511.63	537.81	171.99	564.65	379.76	-417.86	377.12	-37799.45
130	0.99	8.90	543.11	537.81	150.47	558.47	315.27	-460.97	313.07	-39365.53
140	0.99	9.38	568.69	537.27	124.70	551.55	249.83	-491.73	248.34	-39427.29
150	0.99	9.74	588.37	537.27	95.98	545.78	185.51	-513.28	184.41	-38599.29
160	0.99	10.00	602.24	536.73	65.04	540.66	122.46	-526.61	121.85	-37485.93
170	0.99	10.15	610.47	536.73	32.84	537.74	60.86	-534.28	60.56	-36593.26
180	0.99	10.20	613.20	536.19	0.00	536.19	0.00	-536.19	0.00	-36256.62
190	2.24	10.15	610.47	1210.89	-74.10	1213.16	-137.30	-1205.36	-60.56	-36593.26
200	3.49	10.00	602.24	1885.60	-228.49	1899.39	-430.20	-1850.03	-121.85	-37485.93
210	4.73	9.74	588.37	2560.30	-457.39	2600.83	-884.04	-2445.98	-184.41	-38599.29
220	5.98	9.38	568.69	3235.00	-750.82	3320.99	-1504.26	-2960.77	-248.34	-39427.29
230	7.23	8.90	543.11	3909.71	-1093.87	4059.85	-2291.88	-3351.06	-313.07	-39365.53
240	8.47	8.32	511.63	4584.41	-1466.09	4813.13	-3237.17	-3561.87	-377.12	-37799.45

250	9.72	7.64	474.49	5259.11	-1841.70	5572.26	-4312.05	-3529.36	-437.90	-34197.39
260	10.97	6.86	432.24	5933.81	-2190.99	6325.39	-5463.20	-3188.10	-491.71	-28196.58
270	12.21	6.00	385.79	6608.52	-2483.03	7059.60	-6608.52	-2483.03	-534.07	-19671.14
280	13.46	5.08	336.41	7283.22	-2689.25	7763.85	-7639.55	-1383.67	-560.20	-8773.07
290	14.71	4.15	285.73	7957.92	-2786.81	8431.78	-8431.15	103.03	-565.83	4059.45
300	15.96	3.22	235.69	8632.62	-2760.70	9063.32	-8856.42	1925.48	-547.92	18128.31
310	17.20	2.35	188.37	9307.33	-2604.03	9664.75	-8803.66	3987.83	-505.17	32533.81
320	18.45	1.56	145.93	9982.03	-2316.76	10247.36	-8191.07	6157.50	-438.25	46259.01
330	19.70	0.91	110.42	10656.73	-1903.78	10825.45	-6977.09	8277.11	-349.66	58270.43
340	20.94	0.41	83.64	11331.44	-1373.10	11414.33	-5165.87	10178.44	-243.48	67623.87
350	22.19	0.10	66.98	12006.14	-734.66	12028.60	-2808.35	11696.17	-124.92	73562.92
360	66.80	0.00	61.32	36144.48	0.00	36144.48	0.00	36144.48	0.00	75598.90
370	63.25	0.10	66.98	34222.10	2094.07	34286.10	8004.86	33338.55	124.92	73562.92
380	59.70	0.41	83.64	32299.71	3913.96	32535.98	14725.07	29013.14	243.48	67623.87
390	56.14	0.91	110.42	30377.32	5426.78	30858.25	19888.39	23594.14	349.66	58270.43
400	52.59	1.56	145.93	28454.93	6604.19	29211.27	23349.58	17552.65	438.25	46259.01
410	49.04	2.35	188.37	26532.54	7423.35	27551.44	25096.74	11368.18	505.17	32533.81
420	45.49	3.22	235.69	24610.15	7870.29	25837.98	25248.16	5489.20	547.92	18128.31
430	41.93	4.15	285.73	22687.76	7945.10	24038.70	24036.90	293.72	565.83	4059.45
440	38.38	5.08	336.41	20765.37	7667.38	22135.70	21781.33	-3945.03	560.20	-8773.07
450	34.83	6.00	385.79	18842.98	7079.91	20129.16	18842.98	-7079.91	534.07	-19671.14
460	31.27	6.86	432.24	16920.59	6247.74	18037.20	15578.62	-9091.05	491.71	-28196.58
470	27.72	7.64	474.49	14998.21	5252.27	15891.27	12297.32	-10065.21	437.90	-34197.39
480	24.17	8.32	511.63	13075.82	4181.63	13728.18	9233.18	-10159.30	377.12	-37799.45
490	20.61	8.90	543.11	11153.43	3120.54	11581.74	6538.18	-9559.75	313.07	-39365.53
500	17.06	9.38	568.69	9231.58	2142.58	9476.96	4292.63	-8449.03	248.34	-39427.29
510	13.51	9.74	588.37	7309.19	1305.76	7424.91	2523.78	-6982.82	184.41	-38599.29

520	9.96	10.00	602.24	5386.80	652.75	5426.21	1229.01	-5285.19	121.85	-37485.93
530	6.40	10.15	610.47	3464.41	211.99	3470.89	392.82	-3448.59	60.56	-36593.26
540	2.85	10.20	613.20	1542.02	0.00	1542.02	0.00	-1542.02	0.00	-36256.62
550	2.75	10.15	610.47	1486.29	-90.95	1489.07	-168.53	-1479.51	-60.56	-36593.26
560	2.64	10.00	602.24	1430.56	-173.35	1441.03	-326.39	-1403.58	-121.85	-37485.93
570	2.54	9.74	588.37	1374.84	-245.61	1396.60	-474.71	-1313.45	-184.41	-38599.29
580	2.44	9.38	568.69	1319.65	-306.28	1354.72	-613.63	-1207.78	-248.34	-39427.29
590	2.34	8.90	543.11	1263.92	-353.62	1312.45	-740.91	-1083.32	-313.07	-39365.53
600	2.23	8.32	511.63	1208.19	-386.38	1268.47	-853.13	-938.71	-377.12	-37799.45
610	2.13	7.64	474.49	1152.46	-403.58	1221.08	-944.92	-773.41	-437.90	-34197.39
620	2.03	6.86	432.24	1097.27	-405.16	1169.68	-1010.25	-589.54	-491.71	-28196.58
630	1.93	6.00	385.79	1041.54	-391.34	1112.64	-1041.54	-391.34	-534.07	-19671.14
640	1.82	5.08	336.41	985.81	-364.00	1050.87	-1034.04	-187.29	-560.20	-8773.07
650	1.72	4.15	285.73	930.08	-325.71	985.47	-985.39	12.04	-565.83	4059.45
660	1.62	3.22	235.69	874.90	-279.79	918.54	-897.58	195.14	-547.92	18128.31
670	1.51	2.35	188.37	819.17	-229.19	850.62	-774.84	350.98	-505.17	32533.81
680	1.41	1.56	145.93	763.44	-177.19	783.73	-626.46	470.93	-438.25	46259.01
690	1.31	0.91	110.42	707.71	-126.43	718.91	-463.34	549.68	-349.66	58270.43
700	1.21	0.41	83.64	652.52	-79.07	657.29	-297.48	586.12	-243.48	67623.87
710	1.10	0.10	66.98	596.79	-36.52	597.91	-139.59	581.38	-124.92	73562.92
720	1.00	0.00	61.32	541.06	0.00	541.06	0.00	541.06	0.00	75598.90

FUERZAS DE INERCIA		
Angulo α	Fx	Fy
0	822427.71	0.00
10	809635.00	138402.20
20	771681.53	272599.11
30	709824.05	398513.24
40	626100.73	512318.75
50	523250.11	610557.71
60	404604.35	690245.18
70	273963.09	748959.90
80	135454.44	784917.86
90	-6609.50	797026.48
100	-147876.25	784917.86
110	-284089.43	748959.90
120	-411213.86	690245.18
130	-525545.57	610557.71
140	-623805.28	512318.75
150	-703214.54	398513.24
160	-761555.18	272599.11
170	-797213.20	138402.20
180	-809208.71	0.00
190	-797213.20	-138402.20
200	-761555.18	-272599.11
210	-703214.54	-398513.24
220	-623805.28	-512318.75
230	-525545.57	-610557.71
240	-411213.86	-690245.18
250	-284089.43	-748959.90
260	-147876.25	-784917.86
270	-6609.50	-797026.48
280	135454.44	-784917.86
290	273963.09	-748959.90
300	404604.35	-690245.18
310	523250.11	-610557.71
320	626100.73	-512318.75
330	709824.05	-398513.24
340	771681.53	-272599.11
350	809635.00	-138402.20
360	822427.71	0.00
370	809635.00	138402.20
380	771681.53	272599.11
390	709824.05	398513.24
400	626100.73	512318.75

410	523250.11	610557.71
420	404604.35	690245.18
430	273963.09	748959.90
440	135454.44	784917.86
450	-6609.50	797026.48
460	-147876.25	784917.86
470	-284089.43	748959.90
480	-411213.86	690245.18
490	-525545.57	610557.71
500	-623805.28	512318.75
510	-703214.54	398513.24
520	-761555.18	272599.11
530	-797213.20	138402.20
540	-809208.71	0.00
550	-797213.20	-138402.20
560	-761555.18	-272599.11
570	-703214.54	-398513.24
580	-623805.28	-512318.75
590	-525545.57	-610557.71
600	-411213.86	-690245.18
610	-284089.43	-748959.90
620	-147876.25	-784917.86
630	-6609.50	-797026.48
640	135454.44	-784917.86
650	273963.09	-748959.90
660	404604.35	-690245.18
670	523250.11	-610557.71
680	626100.73	-512318.75
690	709824.05	-398513.24
700	771681.53	-272599.11
710	809635.00	-138402.20
720	822427.71	0.00

ANEXO C: ARTÍCULO DEL PROYECTO

ANÁLISIS DEL TREN ALTERNATIVO DEL MOTOR QUE FUNCIONA A HIDRÓGENO VERSUS EL MOTOR A GASOLINA

Wilmer Alejandro Barreto Granda
Juan José Jiménez Estévez

Ing. Félix Manjarrés
Ing. Ernesto Santillán

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Quijano de Ordóñez y Márquez de Maenza S/N
Latacunga, Ecuador

Email : jimenez_juan86@hotmail.com

Email: wabg_billy@hotmail.com

RESUMEN

Uno de los problemas más importantes de contaminación es la gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, atribuido a la quema de combustibles fósiles principalmente en los autos, considerado el causante del calentamiento global.

En estos días es imperante el desarrollo de estudios que permitan usar nuevas fuentes de energía que reemplacen al petróleo y sus respectivos derivados; como por ejemplo el hidrógeno. Esto se lo puede realizar con la difusión de nuevas tecnologías automotrices como son: vehículos eléctricos con baterías, vehículos con celdas de hidrógeno o vehículos con motores de combustión a hidrógeno.

El presente trabajo presenta una investigación sobre el motor de

combustión interna que funciona con hidrógeno, realizando simulaciones computarizadas se pretende comparar los resultados de funcionamiento de un motor que usa tanto gasolina como hidrógeno, que permitan observar la viabilidad de transformar un motor de gasolina a hidrógeno, o que permita el diseño de motores para trabajar de forma exclusiva con hidrógeno.

ABSTRACT

One of the major pollution problems is the large amount of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, attributed to the burning of fossil fuels mainly in cars, that produces global warming.

These days it is imperative to develop studies to use new energy sources to replace oil and their derivatives, such as hydrogen. It could be done with the spread of new automotive

technologies such as: battery electric vehicles, hydrogen fuel cell vehicles or vehicles with hydrogen combustion engines.

This thesis presents an investigation into the internal combustion engine that runs on hydrogen, performing computer simulations is to compare the results of operation of a motor that uses both gasoline and hydrogen, which allow us to observe the viability of a gasoline engine converted to hydrogen, or allows the design of engines to work exclusively with hydrogen.

I. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el índice de contaminación en el mundo causada por la quema de combustibles fósiles en motores para autos de carretera, diésel y gasolina, hace necesaria la adopción de nuevos combustibles que sean menos contaminantes; como es el caso del hidrógeno, ya que el uso de este en motores de combustión interna, así como en celdas de combustible, no produce contaminantes basados en el carbono como son HC, CO y CO₂.

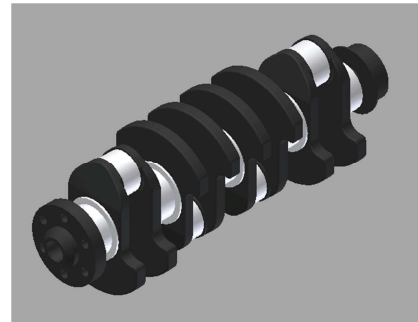
Además presenta una reducción de gases NO_x (óxidos de nitrógeno) de donde se derivan los gases de efecto invernadero; para el caso de su combustión y agua en el caso de residuos de las transformaciones químicas en las celdas de combustible.

Debido a que en el país no se ha logrado desarrollar información sobre la aplicación del hidrógeno en el campo automotriz el presente estudio puede servir como base a futuras investigaciones y aplicaciones conforme el avance de la tecnología en el Ecuador.

II. DISEÑO MOTOR 4L.

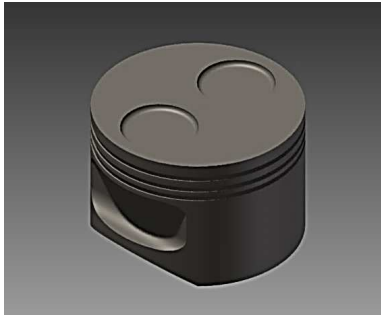
Con la ayuda de las herramientas de Autodesk Inventor se diseñó un motor de 4 cilindros con el fin de realizar las pruebas pertinentes utilizando hidrógeno y luego gasolina, como combustibles.

En la siguiente imagen se puede observar el diseño del cigüeñal, las medidas de todas las piezas se puede encontrar en anexos.



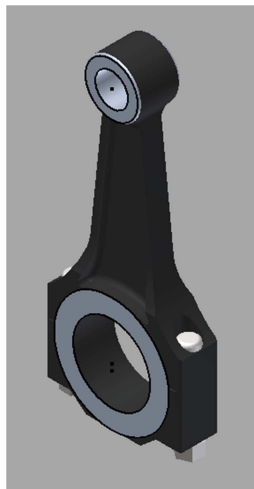
Fuente: Grupo Investigador
Figura 1. Cigüeñal

Se procedió al diseño del pistón, para lo cual se utilizó las operaciones de extrusión, fileteado, entre otras para obtener la siguiente pieza.



Fuente: Grupo Investigador
Figura 2. Pistón

El brazo de biela es una parte fundamental en un motor, esta pieza soporta una serie de esfuerzos que se producen debido a la quema del combustible. En este estudio se diseñó el siguiente brazo de biela con las medidas requeridas para el mismo.



Fuente: Grupo Investigador
Figura 3. Biela

El diseño del motor objeto de la investigación tiene las siguientes características.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Cilindrada total:	VH	2207.5	cc
Cilindrada unitaria:	Vh	551.8	cc
Volumen de la cámara	Vcc	61.3	cc
Volumen de la cámara de compresión	Va	613.2	cc
Área del pistón	A	54.1	cm ²
Radio de giro del cigüeñal	r	5.1	cm
Relación	λ	0.35	
Densidad del aire	δ	1.1	Kg/m ³

Fuente: Grupo Investigador
Tabla 1. Medidas motor

III. SIMULACIONES ANSYS

Con el fin de estudiar el comportamiento de un motor 4 en línea usando los dos tipos de combustible, gasolina e hidrógeno se realizaron las siguientes simulaciones:

Dinámicas, estáticas y térmicas.

1. Simulaciones dinámicas:

- Pistón
- Biela
- Cigüeñal

2. Simulaciones estáticas:

- Block
- Culata

3. Simulaciones Térmicas:

- Tren alternativo

CONDICIONES INICIALES

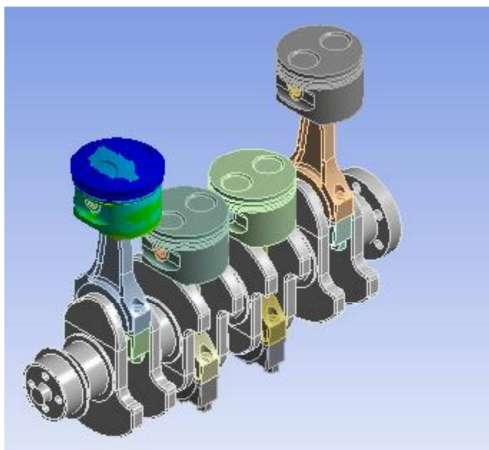
Para realizar las simulaciones se ingresaron los valores obtenidos en el análisis teórico de

funcionamiento del motor, las mismas fueron ingresadas en el programa Ansys.

Comb. / Condic.	Gasolina	Hidrógeno
Análisis Dinámico Fuerza	49693 N.	36144 N.
Análisis Estático Presión	$9,2 \times 10^6$ Pa.	$6,7 \times 10^6$ Pa.
Análisis Térmico Fuerza Temperatura	49693 N. 3366 °C	36144 N. 2006,8 °C

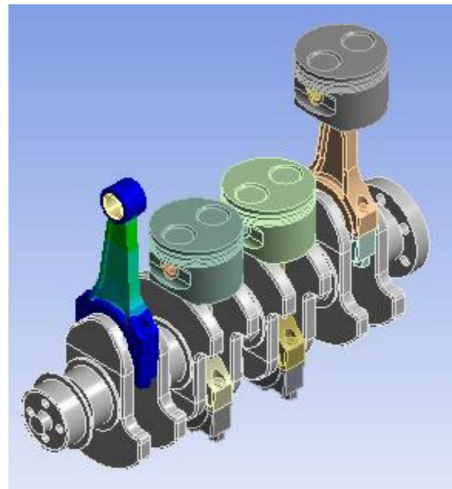
Fuente: Grupo Investigador
Tabla 2. Condiciones Iniciales

SIMULACIÓN PISTÓN



Fuente: Grupo Investigador
Figura 4. Análisis del pistón

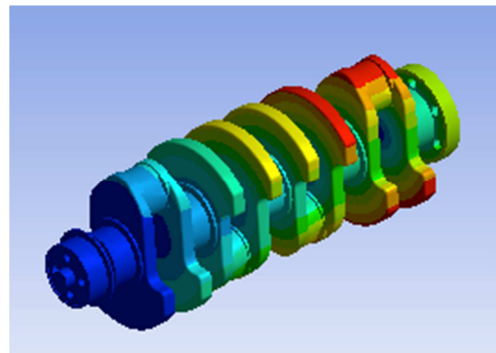
SIMULACIÓN BIELA



Fuente: Grupo Investigador
Figura 5. Análisis biela

SIMULACIÓN CIGÜEÑAL

Para realizar las simulaciones del cigüeñal se realiza el ensamblaje respectivo con soportes en los muñones que van sobre el block.



Fuente: Grupo Investigador
Figura 6. Análisis Cigüeñal

IV. RESULTADOS

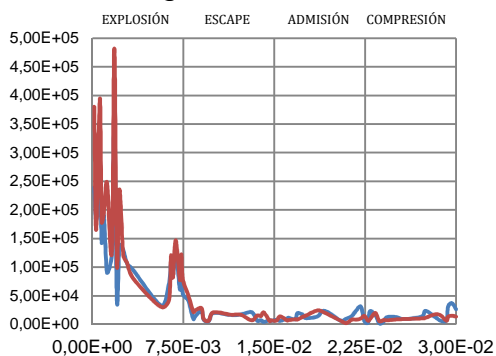
A partir de las simulaciones realizadas en el programa ANSYS, el mismo entrega resultados sobre deformaciones, tensión en las piezas mecánicas y factores de seguridad a tensión.

Mediante la tabulaciones de los datos, se procede a comparar los resultados.

RESULTADO ANÁLISIS BIELA

La siguiente gráfica muestra las tensiones equivalentes en la biela.

En la gráfica el color rojo pertenece a gasolina y el color azul a hidrógeno.

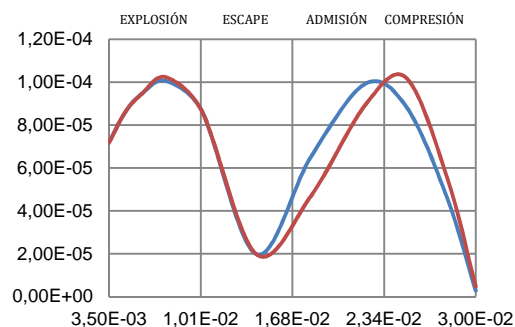


Fuente. Grupo Investigador
Gráfica 1. Tensión equivalente

RESULTADO ANÁLISIS PISTON

La gráfica siguiente muestra los resultados del análisis del pistón en relación a la deformación que sufre el mismo.

El color rojo se refiere a gasolina y el color azul al hidrógeno.

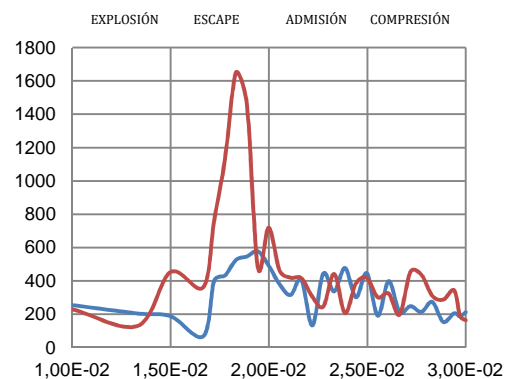


Fuente. Grupo Investigador
Gráfica 2. Deformación total

RESULTADO ANÁLISIS TÉRMICO

Los resultados en relación a los análisis térmicos en el tren alternativo se muestran en la gráfica siguiente.

El color rojo pertenece a gasolina y el azul a hidrógeno.



Fuente. Grupo Investigador
Gráfica 3. Tensión Equivalente

V. CONCLUSIONES

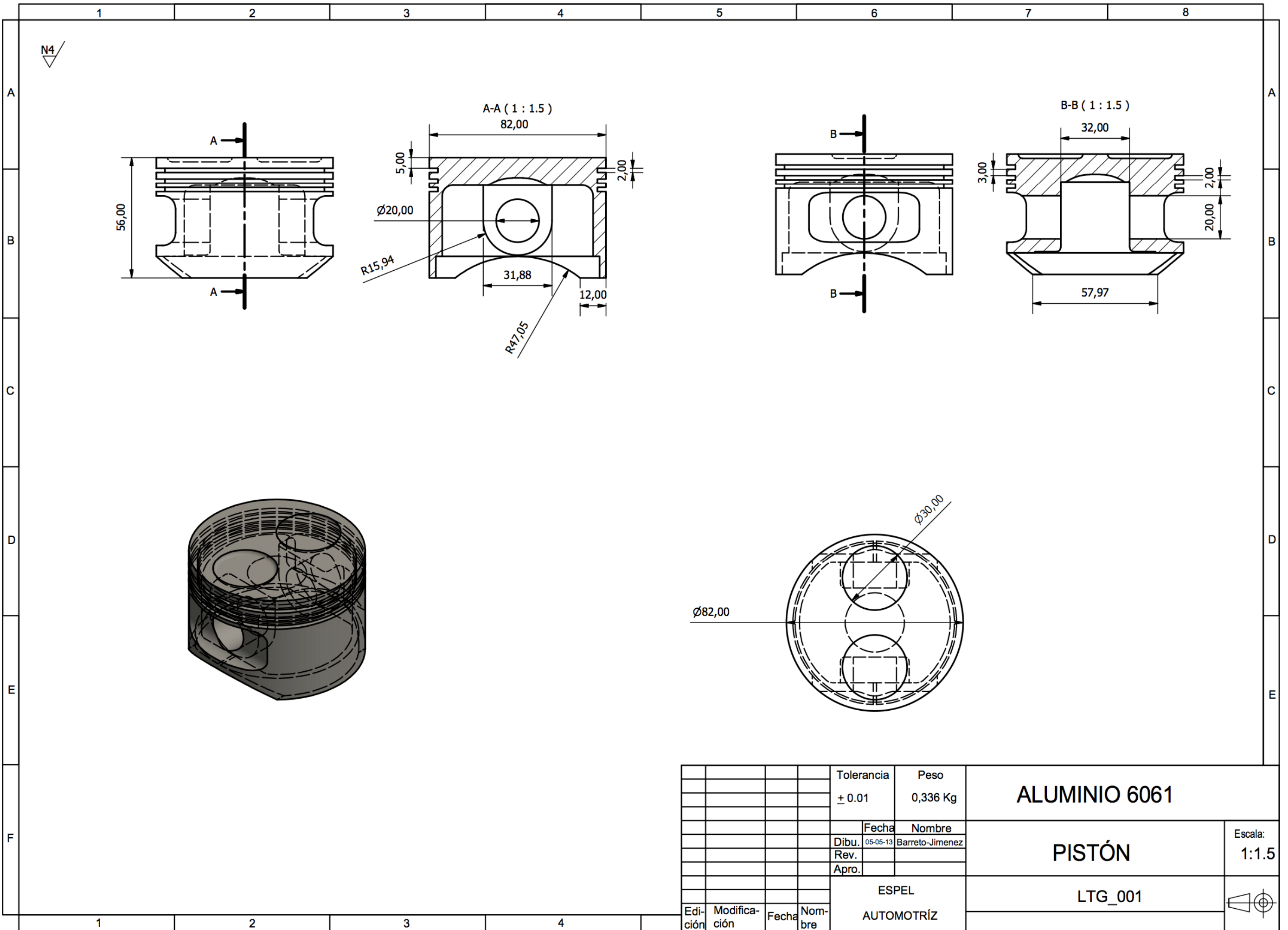
- La eficiencia térmica, en las condiciones de trabajo estudiadas, al utilizar hidrógeno fue del 45%, mientras que al usar gasolina fue del 49%, ya que la densidad de energía, así como la densidad másica de la gasolina es mayor en comparación con el hidrógeno.

- En el análisis de la deformación total máxima en el tren alternativo y en el bloque – cabezote utilizando hidrógeno y gasolina se observa que, en la biela se mantiene la deformación máxima más tiempo durante el ciclo al utilizar gasolina. En el pistón la deformación máxima es mayor en 1.75 % utilizando gasolina. En el cigüeñal las deformaciones máximas son similares. En el análisis estático bloque – cabezote la deformación máxima es de 56.52 % mayor al utilizar gasolina. En el análisis térmico la deformación máxima es de 40.8 % mayor al utilizar gasolina. Por lo tanto al utilizar hidrógeno como combustible la deformación en el tren alternativo será menor.
- En el análisis de la tensión equivalente máxima en el tren alternativo y en el bloque cabezote utilizando hidrógeno y gasolina se observa que, en la biela la tensión equivalente máxima es de 59.2 % mayor al utilizar gasolina. En el pistón la tensión equivalente máxima al usar gasolina es mayor en 41.41 % que al utilizar hidrógeno. En el cigüeñal la tensión equivalente máxima es similar al utilizar ambos combustibles. En el análisis estático bloque cabezote la tensión equivalente máxima utilizando gasolina es mayor en 27.29 % que al utilizar hidrógeno. En el análisis térmico la tensión equivalente máxima es de 37.7 % mayor al utilizar gasolina. Por lo tanto la tensión equivalente máxima en el tren alternativo es menor al utilizar hidrógeno.

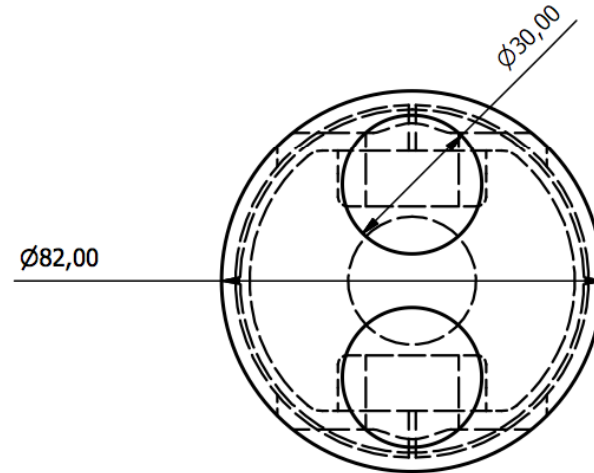
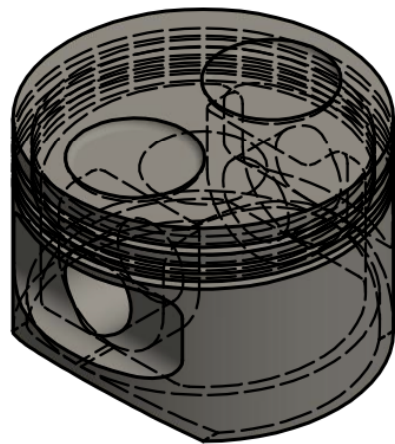
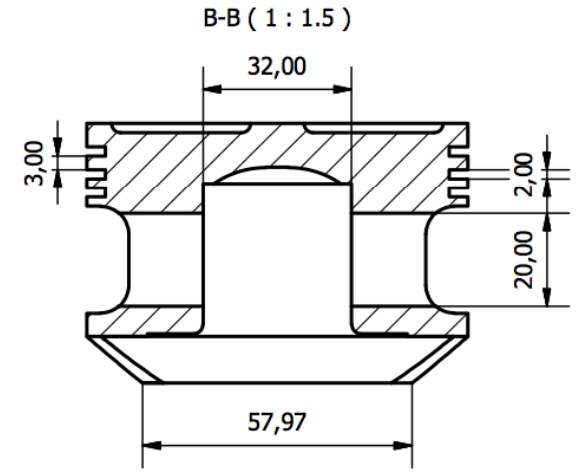
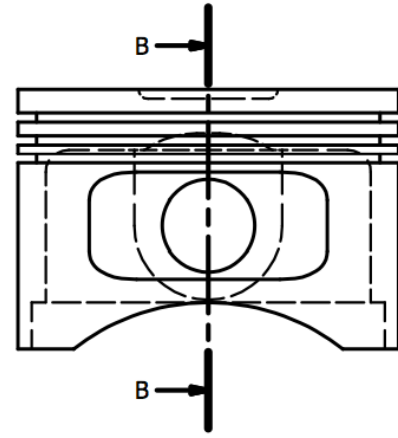
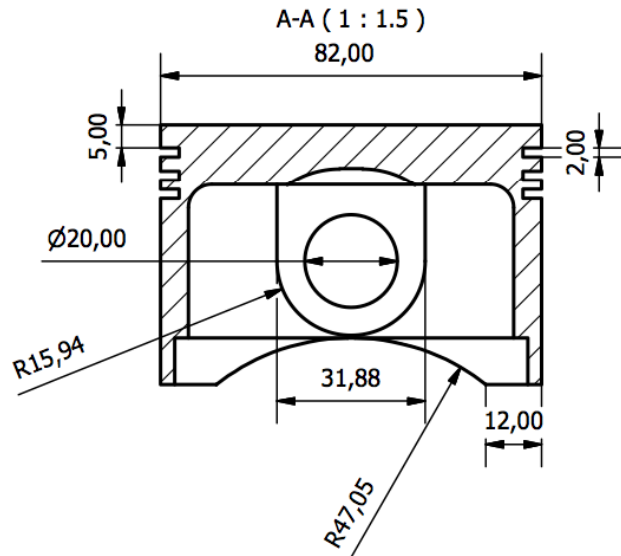
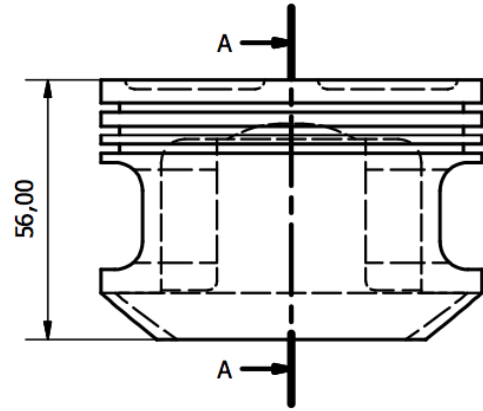
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) (2009), *“Motores de Combustión Interna a Hidrógeno”*, Estados Unidos de Norteamérica, SAE International.
2. V. Ganesan (2006), *“Motores de Combustión Interna”*, India, Nueva Deli, McGraw-Hill 2006.
3. Liu F.(2004), *”Estudio de la formación de la mezcla y su combustión en un motor a hidrógeno”*, Alemania, Cuvillier Verlag, primera edición.

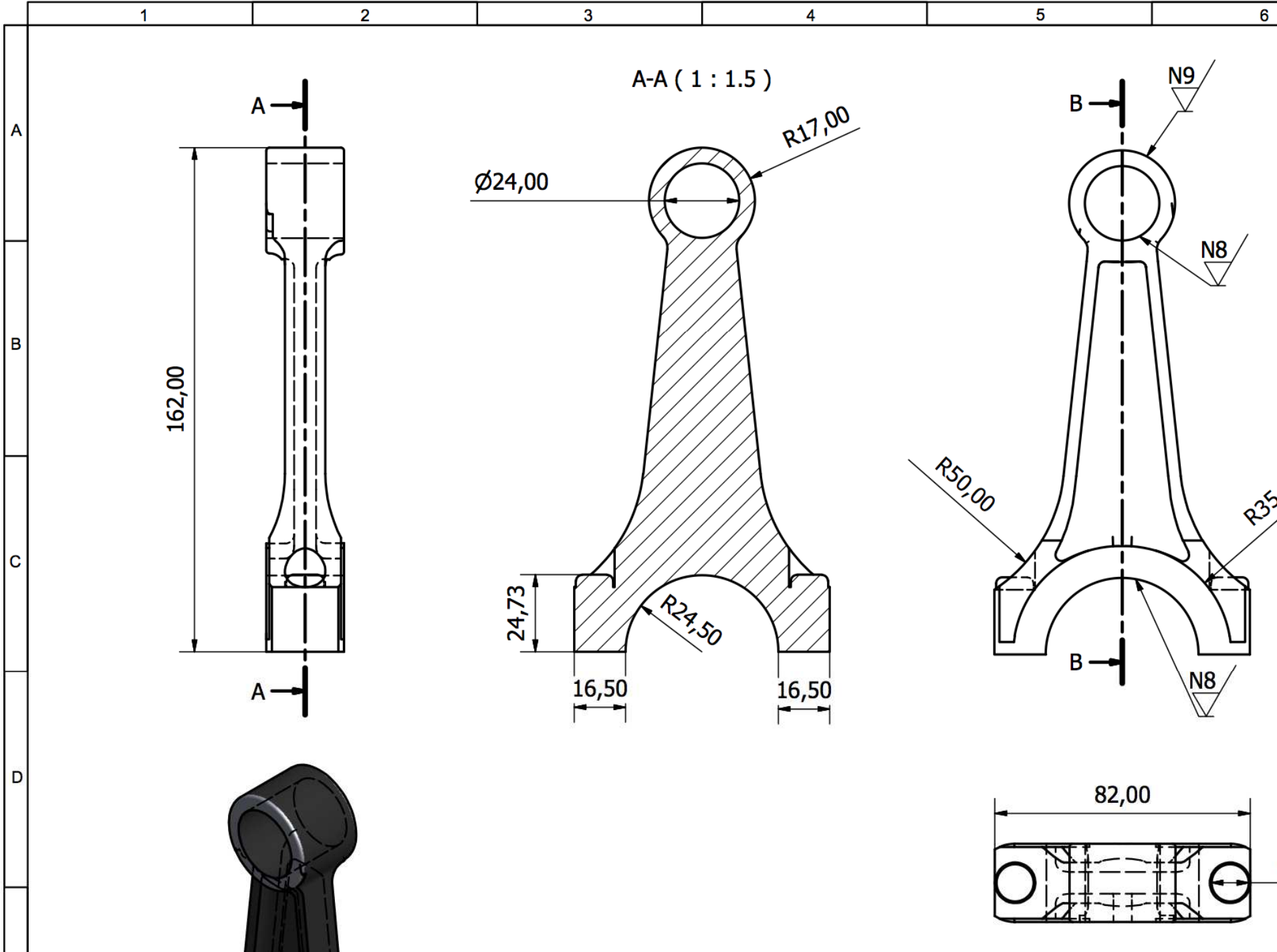
ANEXO D: PLANOS



N4

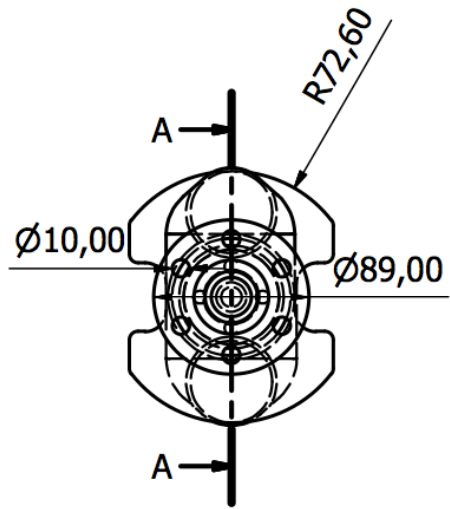


				Tolerancia	Peso	ALUMINIO 6061	
				± 0.01	0,336 Kg		
				Fecha	Nombre	PISTÓN	Escala: 1:1.5
				Dibu. 05-05-13	Barreto-Jimenez		
				Rev.			
				Apro.		LTG_001	
Edi- ción	Modifica- ción	Fecha	Nom- bre	ESPEL AUTOMOTRÍZ			

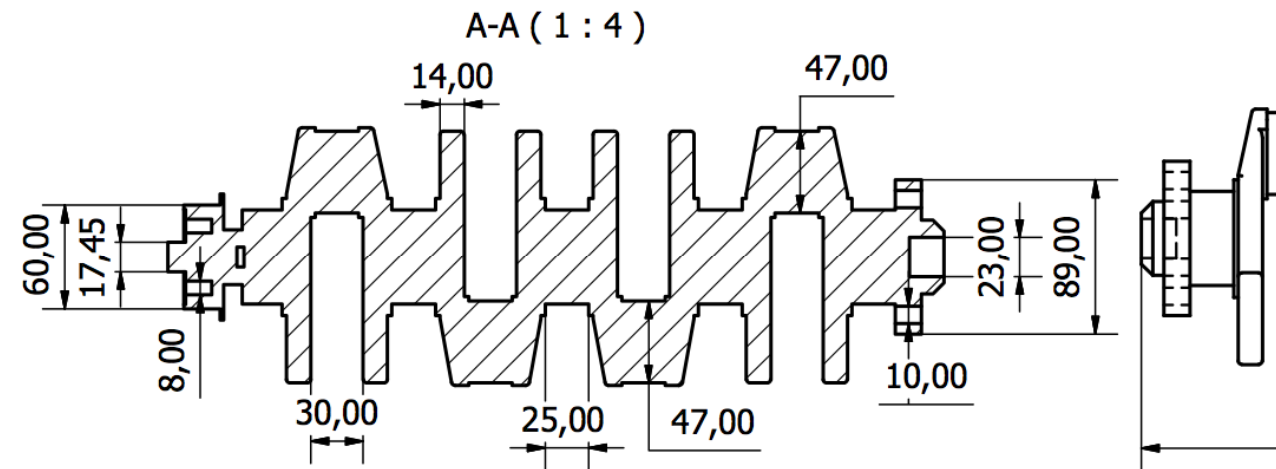


1 2 3 4 5 6

A

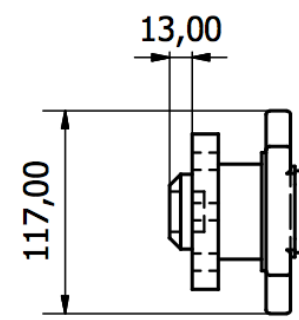
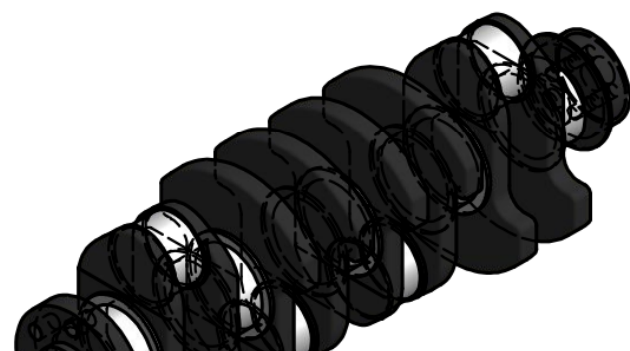


B



C

D



Latacunga, Agosto de 2013.

AUTORES:

BARRETO GRANDA WILMER ALEJANDRO

JIMÉNEZ ESTÉVEZ JUAN JOSE

Director de la Carrera de Ingeniería Automotriz:

Ing. Juan Castro

Unidad de Admisión y Registro:

Dr. Rodrigo Vaca Corrales