

CARACTERIZACIÓN DE CURVAS DE PRESIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA POR MEDIO DE ANSYS

SANTIAGO ANDRÉS SÁNCHEZ BERMEO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2018

CARACTERIZACIÓN DE CURVAS DE PRESIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA POR MEDIO DE ANSYS

SANTIAGO ANDRÉS SÁNCHEZ BERMEO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director
ALEXANDER GARCIA MARIACA
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ
2018

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a mis padres y mi hermana porque fueron y son los que han creído en mí, por su apoyo incondicional frente a cualquier adversidad que se presentaba. Gracias a ellos soy lo que soy hoy en día, por su compañía durante todo este proceso de formación, por los consejos, por la ayuda en los momentos más difíciles. Por esto y muchas cosas más. ¡Mil gracias por siempre estar ahí! Por acompañarme hasta aquí donde veo una meta cumplida.

NOTA DE ACEPTACIÓN:

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
2.	PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	14
2.1	DEFINICION DEL PROBLEMA.....	14
2.2	JUSTIFICACIÓN	15
3.	OBJETIVOS	16
3.1	OBJETIVO GENERAL	16
3.2	Específicos:.....	16
4.	MARCO TEÓRICO.....	17
4.1	Motores diésel	17
4.1.1	CICLO DIESEL	17
4.1.2	Componentes motores de ciclo Diésel.....	18
4.2	Cámaras de combustión.....	19
4.2.1	Generalidades.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3	Relación de compresión.....	19
4.4	Geometría de pistones	20
5.	METODOLOGÍA.....	22
6.	SIMULACIÓN	23
6.1.	Selección de componente en ANSYS.....	23
6.2	Geometrías utilizadas	26
6.2.1	Cámara de combustión 1	27
6.2.2	Cámara de combustión 2	28
6.2.3	Cámara de combustión 3	29
6.2.4	Cámara de combustión 1.1.....	31
6.2.5	Cámara de combustión 2.1.....	31
6.2.6	Cámara de combustión 3.1.....	32
6.2.7	Cámara de combustión 1.2.....	34
6.2.8	Cámara de combustión 2.2.....	34
6.2.9	Cámara de combustión 3.2.....	35
6.2.10	Cámara de combustión 1.3.....	36

6.2.11	Cámara de combustión 2.3.....	37
6.2.12	Cámara de combustión 3.3.....	38
6.2.13	Cámara de combustión 1.4.....	39
6.2.14	Cámara de combustión 2.4.....	40
6.3	Mallado	42
6.4	Puesta a Punto.....	47
6.4.1	General.....	48
6.4.2	Modelos.....	48
6.4.3	Materiales	49
6.4.4	Condición de operación.....	50
6.4.5	Mallado dinámico.....	51
6.4.6	calculo	52
6.4.7	condiciones de frontera	53
6.4.8	Zona de mallado dinámico	55
6.4.9	Inicialización	55
7.	RESULTADOS.....	57
7.1	Cámara de combustión 1 (anexo 1)	57
7.2	Cámara de combustión 1.1 (anexo 2).....	57
7.3	Cámara de combustión 1.2 (anexo 3).....	58
7.4	Cámara de combustión 1.3 (anexo 4).....	59
7.5	Cámara de combustión 1.4 (anexo 5).....	59
7.6	Cámara de combustión 2 (anexo 6)	60
7.7	Cámara de combustión 2.1 (anexo 7).....	61
7.8	Cámara de combustión 2.2 (anexo 8).....	61
7.9	Cámara de combustión 2.3 (anexo 9).....	62
7.10	Cámara de combustión 2.4 (anexo 10).....	63
7.11	Cámara de combustión 3 (anexo 11)	63
7.12	Cámara de combustión 3.1 (anexo 12).....	64
7.13	Cámara de combustión 3.2 (anexo 13).....	65
7.14	Cámara de combustión 3.3 (anexo 14).....	65
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
8.1	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	69

9. CONCLUSIONES.....	72
10. RECOMENDACIONES.....	73
11. REFERENCIAS	74
12. ANEXOS	1
Anexo 1. Cámara de combustión interna 1	1
Anexo 2. Cámara de combustión interna 1.1.....	1
Anexo 3. Cámara de combustión interna 1.2.....	2
Anexo 4. Cámara de combustión interna 1.3.....	3
Anexo 5. Cámara de combustión interna 1.4.....	4
Anexo 6. Cámara de combustión interna 2	5
Anexo 7. Cámara de combustión interna 2.1.....	6
Anexo 8. Cámara de combustión interna 2.2.....	7
Anexo 9. Cámara de combustión interna 2.3.....	8
Anexo 10. Cámara de combustión interna 2.4	9
Anexo 11. Cámara de combustión interna 3.....	10
Anexo 12. Cámara de combustión interna 3.1	11
Anexo 13. Cámara de combustión interna 3.2	12
Anexo 14. Cámara de combustión interna 3.3	13

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo diésel [8]	18
Figura 2. Geometría del motor [14].....	19
Figura 3. Geometría de pistones [15].....	20
Figura 4. Uso complemento Fluent de ANSYS [autor]	23
Figura 5. Ítems complemento Fluent [autor]	23
Figura 6. Ítem geometría [autor].....	24
Figura 7. Propiedades de geometría [autor]	24
Figura 8. Modelado-Unidades [autor].....	25
Figura 9. Croquis. [autor].....	25
Figura 10. Dimensiones [autor]	25
Figura 13.1-Pistón plano [autor].....	26
Figura 14. 2-Pistón prismático [autor]	26
Figura 15.3-Pistón cóncavo con inserto [autor]	26
Figura 14. Sección de estudio. [Autor]	26
Figura 15. Cámara 1- 2D. [Autor].....	27
Figura 16. Volumen cilindrado 1. [Autor].....	27
Figura 17. Área superficial [autor].....	28
Figura 18. Cámara 2-2D. [Autor].....	28
Figura 21. Volumen cilindrado 2. [Autor]	28
Figura 20. Cámara 3-2D. [Autor].....	29
Figura 21. Volumen cilindrado 3. [Autor]	29
Figura 22. Cámara 1.1-2D. [Autor]	31
Figura 23. Volumen cilindrado 1.1. [Autor]	31
Figura 24. Cámara 2.1-2D. [Autor].....	32
Figura 25. Volumen cilindrado 2.1. [Autor]	32
Figura 26. Cámara 3.1-2D. [Autor]	32
Figura 27. Volumen cilindrado 3.1. [Autor]	33
Figura 28. Cámara 3.1-2D. [Autor]	34
Figura 29. Volumen cilindrado 1.2. [Autor]	34
Figura 30. Cámara 2.2-2D. [Autor]	34
Figura 31. Volumen cilindrado 2.2. [Autor]	35
Figura 32. Cámara 3.2-2D. [Autor]	35
Figura 33. Volumen cilindrado 3.2. [Autor]	35
Figura 34. Cámara 1.3-2D. [Autor]	37
Figura 35. Volumen cilindrado 1.3. [Autor]	37
Figura 36. Cámara 2.3-2D. [Autor]	37
Figura 37. Volumen cilindrado 2.3. [Autor]	38
Figura 38. Cámara 3.3-2D. [Autor]	38
Figura 39. Volumen cilindrado 3.3. [Autor]	38
Figura 40. Cámara 1.4-2D. [Autor]	39

Figura 41. Volumen cilindrado 3.3. [Autor]	40
Figura 42. Cámara 2.4-2D. [Autor]	40
Figura 43. Volumen cilindrado 2.4. [Autor]	40
Figura 44. Superficie de croquis [autor]	41
Figura 45. Seccionar la geometría [autor]	41
Figura 46. Ítem Mesh [autor].....	42
Figura 47. Mallado [autor]	42
Figura 48. Malla [autor].....	43
Figura 49. Método [autor]	43
Figura 50. cuadriláteros [autor]	43
Figura 51. Mallado por cara [autor].....	44
Figura 52. Generar malla [autor]	44
Figura 53. Aspecto métrico de la malla [autor]	45
Figura 54. Aspecto métrico de la malla 2 [autor]	45
Figura 55. vertice [autor]	46
Figura 56. Crear nombre [autor].....	46
Figura 57. Selección de nombre [autor].....	47
Figura 58. Cargar mallado. [Autor]	47
Figura 59. Ventana puesta a punto [autor].....	47
Figura 60. General [autor]	48
Figura 61. Modelo de energía [autor]	48
Figura 62. Modelo viscoso [autor].....	49
Figura 63. Crear material [autor]	49
Figura 64. Cell zone/condiciones de operación. [Autor].....	50
Figura 65. Mallado dinámico [autor]	51
Figura 66. En cilindro- cámara 1 [autor].....	52
Figura 67. Calculo [autor]	52
Figura 68. Archivo profile [autor]	53
Figura 72. y_motion 1. [autor].....	53
Figura 73. y_motion 1.1 [autor]	53
Figura 74. y_motion1.2 [autor].....	53
Figura 75. y_motion 1.3 [autor]	54
Figura 76. y_motion 1.4[autor].....	54
Figura 77. y_motion 2 [autor].....	54
Figura 78. y_motion 2.1 [autor]	54
Figura 79. y_motion 2.2 [autor]	54
Figura 80. y_motion 2.3 [autor]	54
Figura 81. y_motion 2.4 [autor]	54
Figura 82. y_motion 3 [autor].....	54
Figura 83. y_motion 3.1 [autor]	54
Figura 84. y_motion 3.2 [autor]	54
Figura 85. y_motion 3.3 [autor]	54

Figura 83. Movimiento de pared 1 [autor].....	55
Figura 84. Movimiento de pared 2 [autor].....	55
Figura 85. Cálculo de actividades [autor].....	56
Figura 86. Presiones y temperatura cámara 1 [autor]	57
Figura 87. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y supercuadrado. [autor].....	57
Figura 88. Presiones y temperatura cámara 1.1 [autor].....	57
Figura 92. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y supercuadrado. [autor].....	58
Figura 90. Presiones y temperatura cámara 1.2 [autor].....	58
Figura 91. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata hemisférica y supercuadrado. [autor].....	58
Figura 92. Presión y temperatura cámara 1.3 [autor].....	59
Figura 93. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata en forma de cuña y supercuadrado. [autor]	59
Figura 94. Presión y temperatura cámara 1.4	59
Figura 95. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y cuadrado.	60
Figura 96. Presión y temperatura cámara 2.....	60
Figura 97. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata plana y supercuadrado. [autor].....	60
Figura 98. Presión y temperatura cámara 2.1	61
Figura 99. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata plana y supercuadrado. [autor].....	61
Figura 100. Presión y temperatura cámara 2.2 [autor].....	61
Figura 101. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata hemisférica y supercuadrado. [Autor].....	62
Figura 102. Presión y temperatura cámara 2.3 [autor].....	62
Figura 103. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata en forma de cuña y supercuadrado. [Autor]	62
Figura 104. Presión y temperatura cámara 2.4 [autor].....	63
Figura 108. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata hemisférica y motor cuadrado. [autor]	63
Figura 106. Presión y temperatura cámara 4.....	63
Figura 107. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata plana y supercuadrado. [Autor]	64
Figura 108. Presión y temperatura cámara 3.1 [autor].....	64
Figura 109. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata plana y supercuadrado. [Autor]	64
Figura 110. Presión y temperatura cámara 3.2 [autor].....	65
Figura 111. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata hemisférica y supercuadrado. [Autor].....	65

Figura 112. presión y temperatura cámara 3.3 [autor]	65
Figura 113. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata con forma de cuña y supercuadrado. [Autor]	66
Figura 114. Perfiles de pistón en culata plana.....	67
Figura 115. Perfiles de pistón en culata plana con mayor cilindrada.....	67
Figura 116. Perfiles de pistón en culata hemisférica	68
Figura 117. Perfiles de pistón en culata forma de cuña [autor].....	68
Figura 118. Comparación de cámaras de combustión cilíndrica y hemisférica	69

RESUMEN

La caracterización de curvas de presión de aire en cámaras de combustión interna diésel se realizan mediante el software CAE-ANSYS, estas simulaciones permiten obtener los valores de presión de acuerdo con la posición del ángulo del cigüeñal, también se consulta previamente las diferentes geometrías que hacen parte de un motor a combustión interna y su función dentro de este conjunto de elementos.

Se procede a explicar cada uno de los pasos a seguir para la obtención de una simulación que den como resultado las presiones dentro de las cámaras de combustión, comenzando por las geometrías utilizadas y como se verían en 3D. Por ahorro de recursos computacionales las simulaciones se llevan a cabo en dos dimensiones, al cual se le realiza un mallado estructurado con el objetivo de obtener los mejores resultados; en la introducción de parámetros se explica por qué se coloca cada uno de estos, para luego poder calcular la solución de presiones y temperaturas dentro de cada una de las geometrías de las cámaras. Por último, se muestra gráficamente la obtención de valores y se realiza un análisis detallado de estas comparando los resultados con los obtenidos teóricamente de un proceso de compresión adiabático, además de la explicación de la variación de datos, ya sea por la geometría utilizada o por la simulación en general.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se busca caracterizar las curvas de presión generadas dentro de una cámara de combustión interna por compresión variando la geometría que tiene como frontera la cámara de combustión, es decir, variar la culata, la cilindrada, el perfil de la cabeza del pistón entre otras.

Calcular presiones y volúmenes en geometrías tan variables y poco simétricas suele llevar tiempo, complicaciones y puede que se produzcan datos erróneos, por lo que se utiliza un software CAE para la obtención de la presión generada dentro de una cámara de combustión con respecto a la geometría de los componentes antes descritos.

Para llevar a cabo este proyecto se debe realizar una consulta de varios conceptos como son la relación de compresión, ciclo Diésel, componentes del motor e implicaciones de las geometrías dentro del motor. Para la obtención acertada de volúmenes se realizarán las geometrías con sus debidos planos en un programa CAD, es decir, el proyecto se centra en obtener las curvas de presión de aire en cámaras de combustión con diferentes geometrías por medio del software ANSYS. En el documento no solo se obtendrán los resultados de la caracterización de las curvas de presión, sino que explica a detalle el paso a paso a seguir para llevar acabo la simulación de una compresión dentro de una cámara de combustión interna.

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

En el contexto académico de la Fundación Universitaria los Libertadores, el programa ANSYS que se utiliza en distintos espacios académicos de diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos; permite que la comunidad educativa de la facultad de ingeniería ejecute análisis de piezas o partes usadas en ingeniería sometidas a variedad de fenómenos físicos.

Uno de los estudios que más abarca en la parte automotriz es el diseño la cámara de combustión de los motores de combustión interna [1], ya que de ella parte el funcionamiento de un motor y en si el desempeño de la máquina. Por ejemplo, en los motores de ciclo diésel, el encendido de la mezcla aire combustible se realiza por compresión generado por la carrera de compresión, este proceso eleva la temperatura y la presión de la mezcla conduciendo así al proceso de combustión [2, 3].

La compresión en una cámara de combustión interna es un factor esencial a la hora de estudiar la aplicación de un motor ya que define la eficiencia, y según la mezcla aire- combustible la generación de gases [5]. La compresión está dada por la presión ejercida por el pistón sobre el fluido en la cámara, la velocidad a la que gire el cigüeñal y el grado de posición en el que se encuentre [8]; pero el hallar esta presión se requiere distintos cálculos que dificultan el conocimiento de este dato; por otra parte, ANSYS puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibraciones y aplicaciones específicas a partir de una simulación CAD.

La identificación de los diversos factores que intervienen en la obtención de las curvas de presión de motores de combustión interna cuando estos operan con aire son de vital importancia para el desarrollo de investigaciones y la obtención de mejoras en el rendimiento de los motores, es por esta razón que es necesario vincular lo estudiado con la investigación para generar conocimientos e información válida.

2.2 JUSTIFICACIÓN

Para la caracterización de las curvas de presión en un motor diésel es necesario información válida sobre la geometría de la cámara de combustión y las partes más cercanas como biela, cigüeñal entre otras, el funcionamiento de las anteriores piezas dentro del motor para así llevarlas a un software aplicado de ingeniería y hacer más didáctico su comprensión, cálculo y evaluación de fenómenos ocurridos en un motor.

La relación de compresión es una variable en los motores de combustión interna que afecta directamente la eficiencia térmica del motor [6]. Es por lo que existen diferentes geometrías para lograr altas relaciones de compresión, no obstante, estos cambios requieren de una mayor robustez en el diseño mecánico [4]. Este estudio no contemplará la reacción química generada por la combustión y se enfocará en determinar la presión del aire generada en la cámara de combustión respecto al ángulo de posición del cigüeñal, para diferentes configuraciones geométricas de cámaras de combustión.

De acuerdo con lo mencionado previamente en este trabajo será necesario variar aspectos involucrados tales como la carrera del pistón, el ángulo del cigüeñal entre otras variables con el objetivo de observar las curvas de presión del motor en motoring (compresión de aire). Esto se realizará por medio de simulaciones en ANSYS y así obtener la información que permita identificar aspectos relacionados a una mejor eficiencia dentro de una cámara de combustión interna por compresión.

Por medio del programa ANSYS la comunidad educativa de la facultad de ingeniería podrá generar numerosos proyectos que permitan evaluar distintos factores y fenómenos que ocurren dentro de una cámara de combustión interna, diseño de elementos del motor de combustión interna y diferentes aplicaciones del estudio automotriz; por lo anterior junto a la realización de este proyecto tiene como fin incentivar a la investigación y la obtención de factores que afecten el funcionamiento de una cámara de combustión.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar curvas de presión de aire en cámaras de combustión interna por medio del programa ANSYS.

3.2 Específicos:

- Desarrollar un procedimiento en ANSYS para la obtención de presiones y temperaturas en cámaras de combustión.
- Identificar qué factores afectan la presión generada dentro de la cámara de un motor a compresión.
- Observar qué perfil de pistón es más eficiente para cada una de las geometrías de cámaras de combustión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Motores de encendido por compresión

Un motor encendido por compresión es aquel que requiere incrementar la presión y la temperatura de la mezcla aire combustible para que esta haga autoignición, esto se logra mediante un proceso de compresión casi adiabático [2,3]. La mezcla de combustible y aire debería quemarse en forma uniforme y progresiva, puesto que una detonación violenta de la mezcla provoca un estado de marcha desigual, el llamado “picado Diésel”, es por esto que la mezcla aire combustible debe ser lo más homogénea posible para lograr la combustión correcta. En los motores de inyección directa de encendido por compresión, se obtiene una mezcla más eficaz creando una turbulencia en el aire del interior del cilindro a medida que se comprime. Esto suele hacerse perfilando la cabeza del embolo de forma que obligue al movimiento del aire durante su compresión [9]. Los motores que funcionan bajo este principio operan termodinámicamente bajo el principio del ciclo Diésel.

4.1.1 CICLO DIÉSEL

Primer tiempo: admisión

Todo inicia cuando el émbolo (pistón) efectúa su primera carrera o desplazamiento desde el PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior), aspirando aire de la atmósfera hacia el interior del cilindro. Durante este tiempo la muñequilla del cigüeñal gira 180° [2]. Con esto se origina en el interior del cilindro un proceso isobárico y mostrado en la figura 1 como el punto A. [12].

Segundo tiempo: compresión

Partiendo del punto muerto inferior (PMI), el pistón se mueve hacia arriba impulsado por el cigüeñal, el árbol de levas cierra las válvulas (admisión y escape) dejando atrapado al aire dentro del cilindro [4]. La carrera de compresión isoentrópica y adiabática ocurre cuando el pistón realiza el desplazamiento vertical hacia arriba generando una presión y una temperatura mayor para que cuando se inyecte el combustible, el aire comprimido se mezcle de forma ideal con el combustible y genere la auto ignición, como lo muestra la figura 1 en el punto B [12].

Tercer tiempo: Combustión

Proceso isobárico mostrado en el punto c de la figura 1 donde se genera la inflamación del combustible a causa de la alta presión y temperatura generada en la compresión, la fuerza generada por la combustión repercute en que el pistón se desplace del PMS al PMI, la válvula de escape se abre antes que el pistón llegue al PMI [2,12].

Cuarto tiempo: escape

Luego del desplazamiento realizado por el pistón al PMI, la válvula de escape abierta permite que el pistón se desplace hacia el PMS retirando los residuos de combustión hacia el entorno y así comience el ciclo nuevamente [2,12].

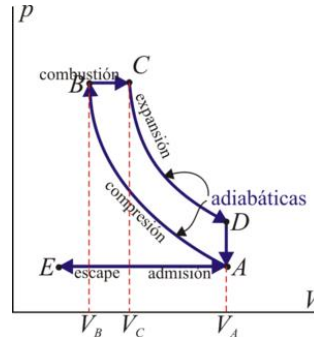


Figura 1. Ciclo diésel [8]

4.1.2 ciclo Diésel de aire- estándar

El ciclo Diésel de aire-estándar es un ciclo ideal que supone que la absorción de calor ocurre durante un proceso a presión constante que empieza cuando el pistón está en el punto muerto superior. El ciclo Diésel, que se muestra en los diagramas p-V de la figura anterior, consta de cuatro procesos internamente reversibles en serie.

El rendimiento térmico del ciclo Diésel aumenta, como en el ciclo Otto, cuando crece la relación de compresión. Evaluar el rendimiento térmico con la ecuación, exige conocer los valores de energía interna del punto A y B, entalpía del punto B y C, la temperatura en cada uno de los estados principales del ciclo. Para determinar estas temperaturas y presiones se utiliza las ecuaciones para el proceso adiabático suponiendo la relación de calores específicos (k) constante, Con la temperatura, la presión inicial y la relación de compresión (R_c) conocidas [4]:

$$T_2 = T_1 * R_c^{(k-1)}(1)$$

$$P_2 = P_1 * R_c^{(k)}(2)$$

4.1.3 Componentes motores

Es una máquina térmica, de encendido por compresión, y de combustión interna, que convierte la energía térmica de un combustible en energía mecánica [4]. Los componentes mecánicos principales para llevar a cabo el proceso de combustión son: el bloque del motor, culata, cilindro, biela, cigüeñal, válvulas y el volante de inercia. El bloque del motor es el elemento estructural donde se alojan y se fijan los componentes antes descritos que tiene como frontera la cámara de combustión además es el que proporciona el espacio cilíndrico, la culata contiene las válvulas de admisión y de escape además del inyector [2]. El pistón es el componente dentro del sistema de combustión destinada a moverse por efectos de la

explosión y es el cual a pesar de tener movilidad debe mantener hermético el interior de la cámara junto a los anillos de pistón [1].

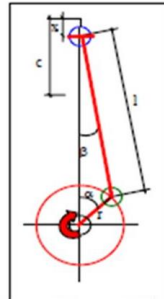


Figura 2. Geometría del motor [14]

De acuerdo con la Figura 2, las ecuaciones 1 y 2 que se muestran a continuación describen la posición del pistón de acuerdo con el ángulo del cigüeñal. Donde X es la posición del pistón referida al punto muerto inferior, r es el radio del cigüeñal, L la longitud de la biela, α es el ángulo girado por el cigüeñal contando desde el punto muerto superior.

$$X = r * (1 - \cos \alpha) + l * (1 - \cos \beta) \quad (3)$$

$$r * \sin \alpha = l * \sin \beta \rightarrow \sin \beta = \frac{r \sin \alpha}{l} \quad (4)$$

4.2 Cámaras de combustión.

La cámara de combustión es fundamental en el funcionamiento del motor. El inyector introduce en ella el combustible pulverizado, el cual se mezcla con el aire; de ahí que la forma de la cámara de combustión deba facilitar esta mezcla del combustible con el aire. Tanto la mezcla como la combustión deben realizarse en un tiempo mínimo lo más cercano posible al punto muerto superior [9].

Clasificación de las cámaras.

Según el tipo de cámara de combustión los motores Diésel pueden clasificarse como sigue:

- a) Con cámara de inyección directa.
- b) Con cámara arremolinada.
- c) Con cámara de combustión con depósito de aire [9].

4.3 Relación de compresión.

En el motor Diésel la relación de compresión es mucho más elevada que en el motor de gasolina, pues se comprime el aire, de modo que se elimina el peligro de autoencendido, al no comprimirse el combustible. La presión de compresión puede estimarse a partir de la relación, donde p_m es la presión del múltiple de admisión y r_a es la relación de compresión real. La presión de compresión real se puede determinar con un manómetro de presión de compresión que atrapa los gases por medio de una válvula de retención, lo que indica la

presión máxima en condiciones de encendido [5]. La ecuación de relación de compresión está dada por:

$$R_c = \frac{V_c + v}{V_c} \quad (5)$$

Dónde: R_c es la Relación de compresión, V_c es el Volumen libre de la cámara de combustión y V es Volumen de desplazamiento. Los motores de encendido por compresión utilizan combustibles líquidos de baja volatilidad que varían desde fuelóleo y destilados hasta petróleo crudo, tienen relaciones de compresión entre 11.5: 1 hasta 22: 1 y presiones de compresión de 400 a 700 lb / in 2 (2.760 a 4.830 kPa), y operar en el Diésel o ciclo mixto. En general, no se utilizan dispositivos de ignición, aunque algunos motores de baja relación de compresión y cámaras múltiples pueden requerir auxiliares de arranque. La carga y la velocidad se controlan variando la cantidad de combustible inyectado [12].

Las ventajas son un bajo consumo de combustible específico, alta eficiencia térmica a cargas parciales, posiblemente menor costo de combustible, sin pre-ignición, bajo CO y emisión moderada de hidrocarburos a cargas bajas y moderadas sin tratamiento de escape, idoneidad para operación de dos tiempos y excelente durabilidad (por diseño) Los motores de menor compresión tienen una construcción más simple (generalmente ciclo sin válvulas de dos tiempos), son más livianos y tienen un primer costo más bajo, un menor gasto operativo y una mayor eficiencia mecánica que los motores de mayor compresión [12].

4.4 Geometría de pistones

Como se mencionó anteriormente el pistón es el elemento móvil que permite comprimir y donde el perfil de la cabeza del pistón tiene la forma de acuerdo a las características de compresión y aerodinámica que se requiera, a los costados toma la forma con respecto al cilindro dentro del bloque del motor, junto a la culata.



Figura 3. Geometría de pistones [15]

La geometría del pistón no solo tiene la función de hermetizar la cámara, además es el encargado de generar la compresión del aire, eleve la temperatura del gas y asegure que el combustible se consuma en su totalidad durante la combustión. Por lo anterior el pistón debe comprimir o reducir el volumen que ocupa el aire dentro de la cámara de manera

uniforme y rápida; de allí surge la necesidad de modificar el perfil de la cabeza del pistón, es decir, cambiar el área superior del pistón para buscar una mayor relación de compresión. [15]

Existen variedad de pistones, pero en si se podrían clasificar en tres grandes ramas: aquellos que son de perfil plano, los que son cóncavos y los que tienen una saliente. Los pistones de perfil plano son todos aquellos que la parte superior es plana y/o tenga apenas una cavidad mínima donde se alcanza a tocar con las válvulas de admisión y de escape (figura 3-A). En los perfiles cóncavos lo que se busca es generar mayor volumen de aire dentro de la cámara y comprimir aún más, pero para esto se necesita ciertos insertos dentro de la cavidad que garanticen causar un flujo turbulento y así la combustión sea más rápida y uniforme (figura 3-C, 3-D).

Para todos aquellos que tengan una saliente se les dice prismáticos ya que su forma siempre va en punta, y estos tienen la función de generar relaciones de compresión muy altas ya que por su forma generan una reducción alta de volumen (figura B).

5. METODOLOGÍA

El primer paso para el desarrollo del presente proyecto es la consulta y adquisición de información acerca de cada uno de los aspectos relacionados al funcionamiento y clasificación de las cámaras de combustión interna por compresión. La documentación se enfocará a la relación de compresión, perfiles de pistón y geometría de culatas sin importar si es Diésel o a gasolina ya que se busca identificar en qué afecta la geometría a la presión dentro de las cámaras. Debido a la necesidad de la simulación CAD para la obtención de volúmenes se utiliza el software SolidWorks y será necesaria para la aplicación de parámetros físicos en el software ANSYS que permitan la caracterización de las curvas de presión en una cámara de combustión interna.

Luego de esto se escogerá 14 cámaras de combustión diésel para así simularla con ciertas similitudes geométricas y dimensionales. Ya obteniendo la simulación de la cámara de combustión en el software CAD se exportará al software CAE donde se parametrizarán aspectos consultados en el paso anterior para simular la compresión que realizan dichas cámaras y así obtener la gráfica característica de presión sin combustión. Por efectos de sencillez solo se evaluará la compresión del aire dentro de la cámara y no todos los componentes del ciclo.

Como último paso a realizar será la redacción del documento final de la caracterización realizada mediante la simulación, los resultados mostrarán claramente cómo afecta la geometría en la presión y dará explicaciones sencillas de los pasos a seguir dentro del programa ANSYS para realizar la simulación.

Adicionalmente se adquirirá nuevos conocimientos de este programa y del estudio de la geometría de las cámaras de combustión interna para incentivar la realización de simulaciones variando factores en una cámara de combustión interna por compresión para generar nuevos conocimientos que mejoren la eficiencia de los motores.

6. SIMULACIÓN

6.1. Selección de componente en ANSYS

Para la caracterización de las líneas de presión que genera los distintos perfiles de la cabeza superior de los pistones se realizó la simulación por medio del programa CAE-ANSYS versión 18.1. De acuerdo con la imagen siguiente ANSYS permite distintos sistemas de análisis, y para este caso el complemento Fluid Flow (Fluent) será de ayuda para la caracterización de las líneas de presión dentro de la cámara de combustión. Fluent permite analizar con fluidos, flujos de fluido, transferencias de calor y reacciones químicas por lo que se adapta a los fenómenos ocurridos en una cámara de combustión o por lo menos a los que se van a estudiar.

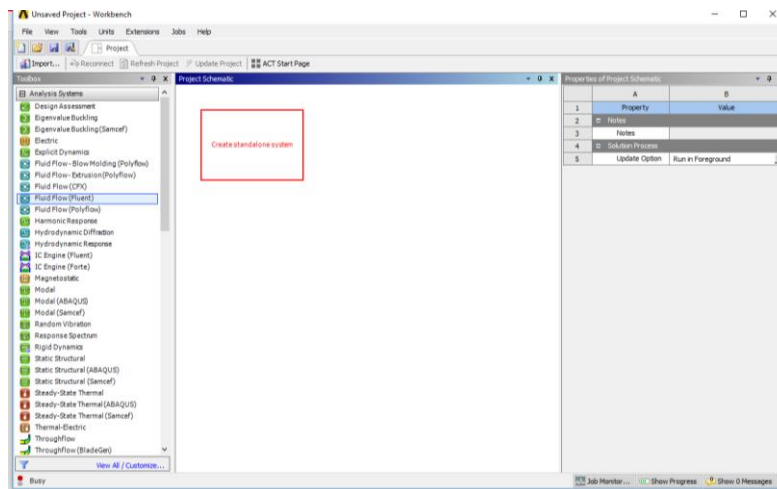


Figura 4. Uso complemento Fluent de ANSYS [autor]

Una vez seleccionado el complemento aparecerán 6 ítems a modificar (figura 8.) para realizar la simulación de las cámaras de combustión y obtener el resultado de las presiones generadas dentro de estas.

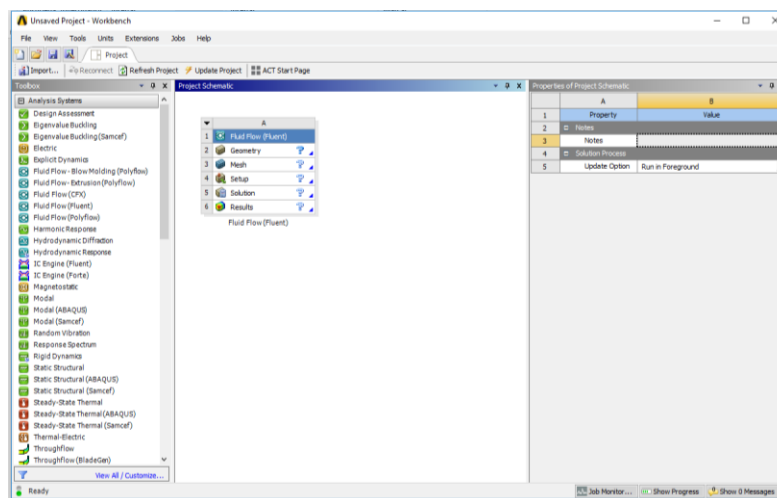


Figura 5. Ítems complemento Fluent [autor]

El primer ítem tiene unas propiedades ya establecidas y es donde se puede dar un nombre distinto al análisis de fluido si se desea. Para el segundo ítem llamado **Geometry** se dará clic derecho para abrir una nueva pestaña llamada **DesignModeler**, y allí se podrá realizar el diseño, exportar un CAD o modificar la geometría con que trabajará la simulación.

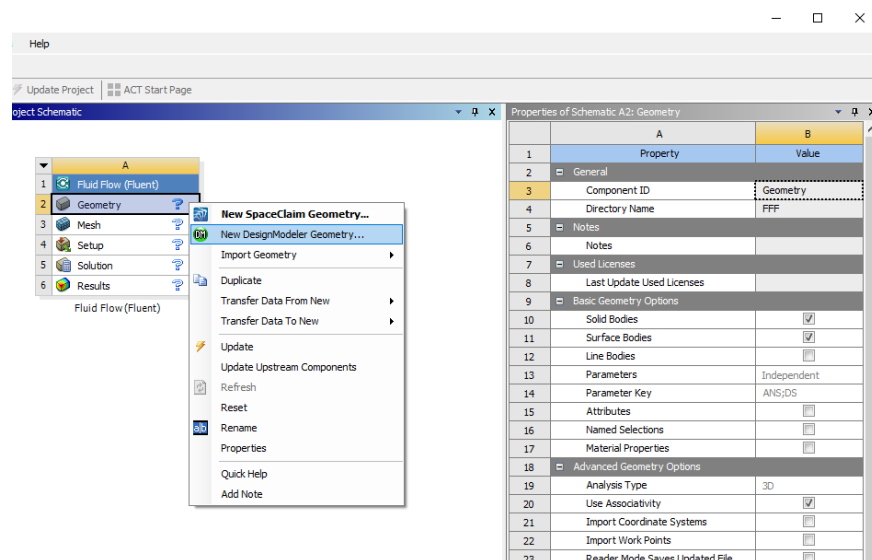


Figura 6. Ítem geometría [autor]

Antes de realizar la geometría al costado derecho se desplegará las propiedades de esquema: geometría, donde se modificará la propiedad 19 (Analysis Type) y en vez de 3D se colocará 2D por efectos de optimización de recursos computacionales y de tiempo para el usuario.

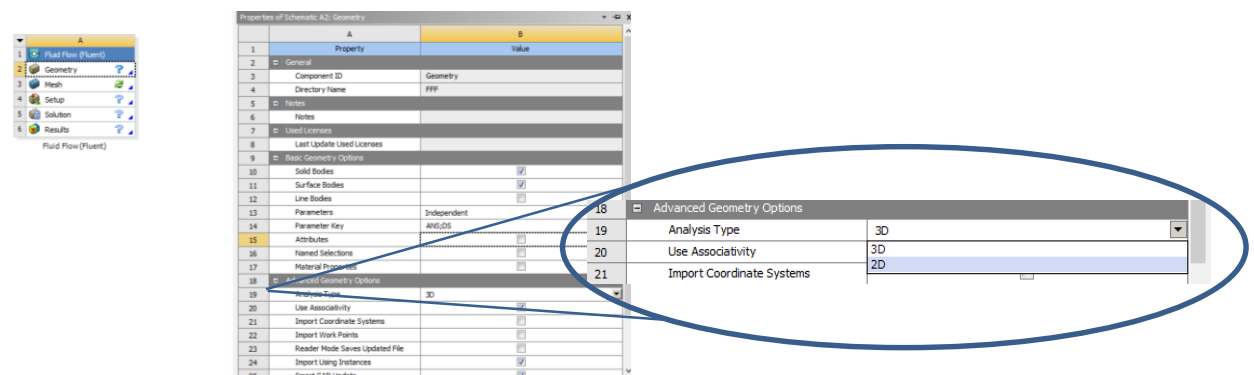


Figura 7. Propiedades de geometría [autor]

En la ventana **DesignModeler** se realizará una sencilla geometría en 2D, pero antes se modificará las unidades de metros a milímetros como se muestra en la figura 10, ya que los planos ingenieriles se manejan en milímetros.

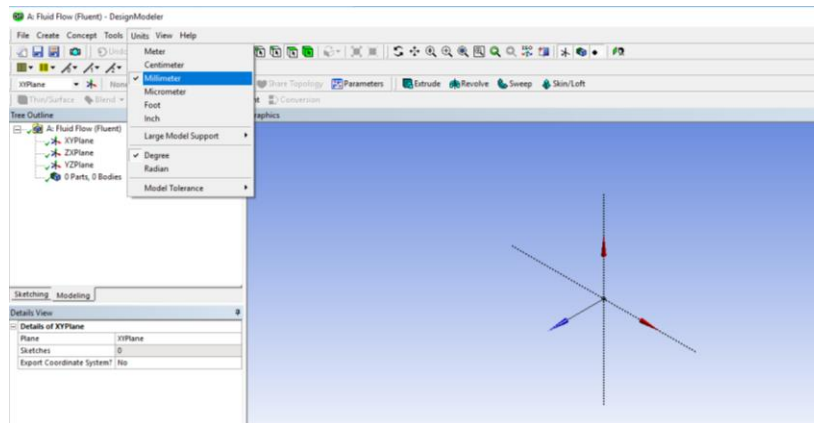


Figura 8. Modelado-Unidades [autor]

Se selecciona el plano XY para realizar la geometría de un rectángulo donde la base tendrá como medida el diámetro de la cabeza de pistón y la altura será la carrera de este, para esto vamos al croquis y se realizará la geometría en 2D. Figura 11.

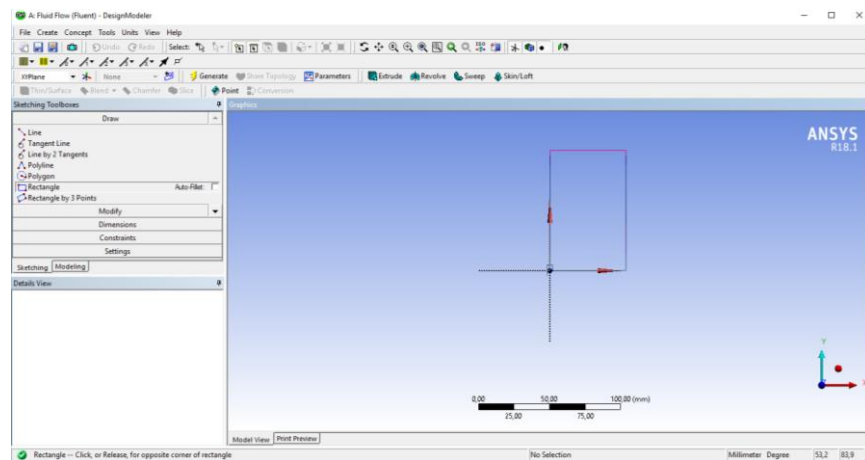


Figura 9. Croquis. [autor]

Para darle las medidas simplemente iremos a **dimensiones**, clic en general y luego nombrar las líneas del croquis para así modificar y dar las dimensiones que se necesita. Figura 12.

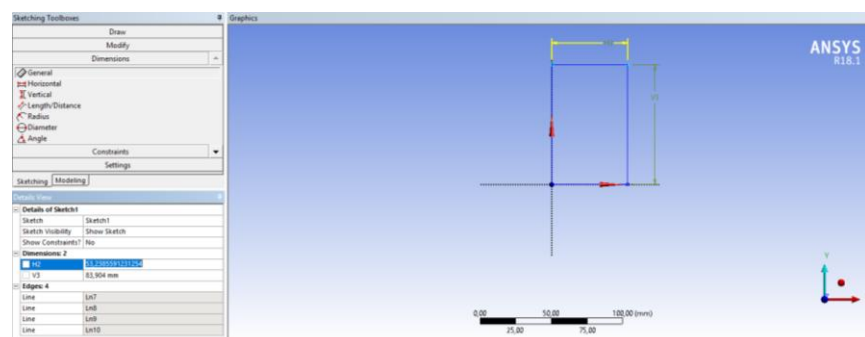


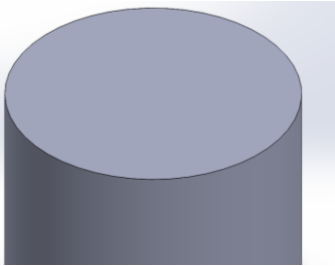
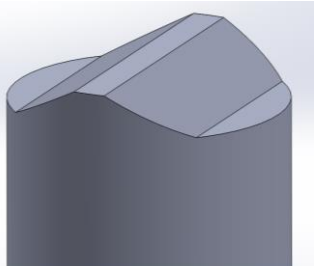
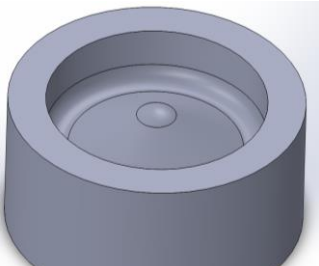
Figura 10. Dimensiones [autor]

6.2 Geometrías utilizadas

Para efectos de estudio de las cámaras de combustión, la geometría que se modela es el interior del cilindro junto a la culata y el perfil del pistón, en la parte inferior el perfil del pistón, a los costados las paredes del cilindro y en la parte superior la forma de la culata al interior de la cámara.

Para comparar las curvas de presión se debe tener una constante que permita establecer que perfil es más útil, para este caso será una misma relación de compresión, ya que una vez obtenido los cálculos de presión se obtendrá la geometría que genera una mayor presión. Por lo anterior en esta sección se calculará la relación de compresión con cada una de las geometrías. Se selecciona una culata plana para comparar tres distintos perfiles de pistón:

Tabla 1. perfiles de pistón

		
Figura 11.1-Pistón plano [autor]	Figura 12. 2-Pistón prismático [autor]	Figura 13.3-Pistón cóncavo con inserto [autor]

Ya conociendo la frontera de la parte superior (la culata) y la parte inferior con los tres perfiles de cabezas de pistón solo queda por definir el radio del pistón. Para todos los cilindros el radio será de 60 mm. Ahora bien, sabiendo las dimensiones de frontera hay que pensar que el estudio es en 2D; por lo que el programa reconoce una sección media del cilindro, es decir, hacer un corte vertical por la mitad del cilindro y verlo de manera frontal como se muestra en la figura 16.

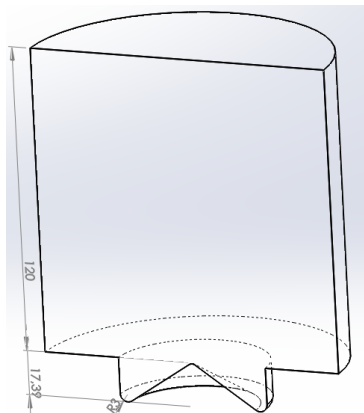


Figura 14. Sección de estudio. [Autor]

6.2.1 Cámara de combustión 1

La primera a evaluar, es una cámara con culata plata y cilindro con cabeza plana; para realizar el diseño se debe realizar un croquis como se observa en la Figura 15.

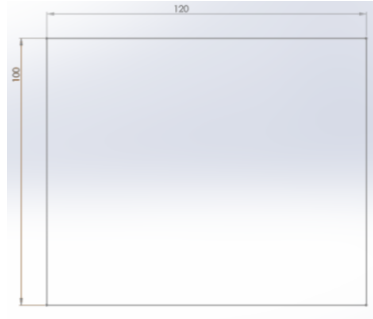


Figura 15. Cámara 1- 2D. [Autor]

Por cuestiones de cálculo se realiza tridimensionalmente y observar el volumen, pero siempre manteniendo las mismas dimensiones como se observa en el plano anterior.

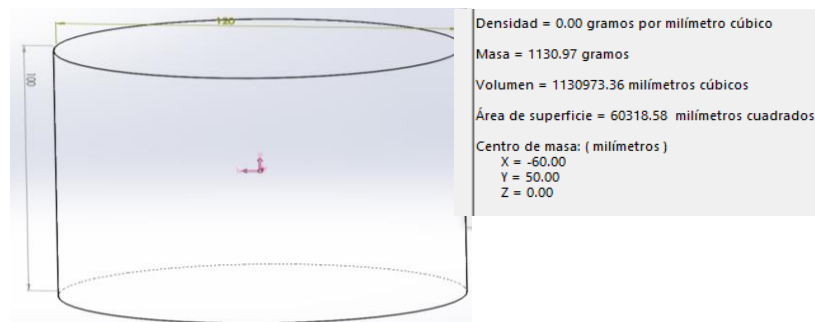


Figura 16. Volumen cilindrado 1. [Autor]

Se hace uso del programa CAD SolidWorks para obtener los volúmenes de cada uno de los perfiles antes descritos y siguientes a realizar. Debido a que el programa ANSYS toma el perfil dibujado en el estudio 2D como si fuera una revolución, es decir, hace girar 360° el perfil para obtener un sólido, el pistón prismático ya que no es simétrico para hacerle una revolución, se cambia la geometría a alguna simétrica buscando una misma área superficial.

Sabiendo que ANSYS hace girar 360° el perfil para saber que es un sólido, esto implica que las superficies inferior y superior tienden a ser circulares. Por lo anterior se busca una circunferencia que tenga la misma área superficial superior del pistón prismático.

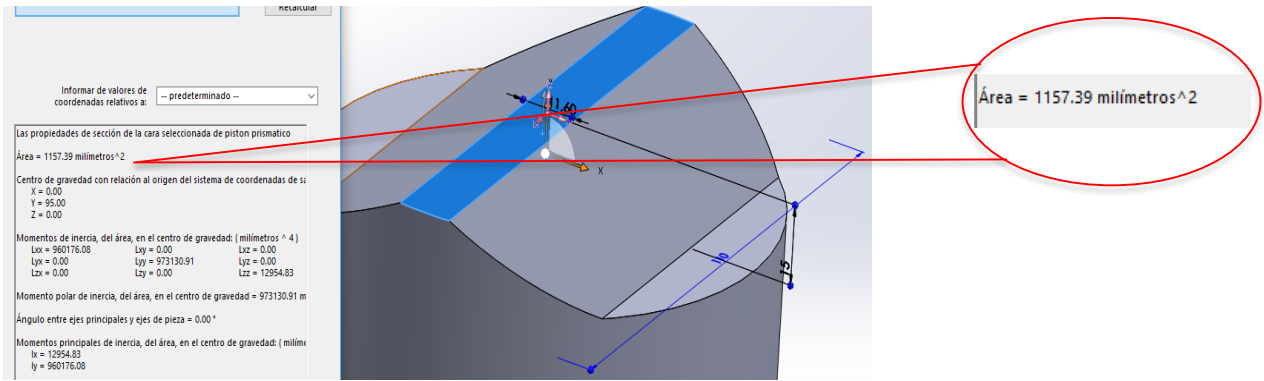


Figura 17. Área superficial [autor]

$$A = \pi r^2 \quad r = \sqrt[2]{A/\pi} \quad (4)$$

$$r = \sqrt[2]{\frac{1157.39}{\pi}} = 19.19 \approx 20 \text{ mm}$$

6.2.2 Cámara de combustión 2

Se piensa en una culata plana y un pistón prismático que siempre será la línea inferior; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se ven la Figura 18, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

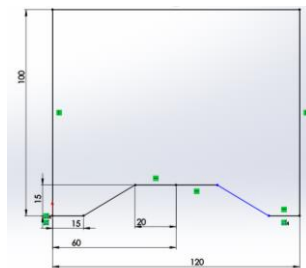


Figura 18. Cámara 2-2D. [Autor]

Por cuestiones de cálculo se realiza tridimensionalmente y obtener un volumen visible para su entendimiento, pero siempre manteniendo las mismas dimensiones del plano anterior.

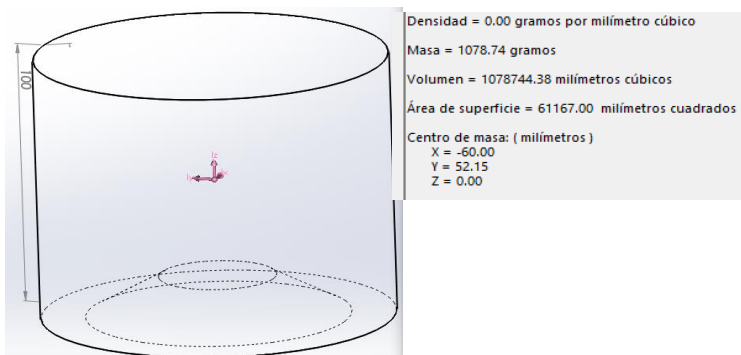


Figura 19. Volumen cilindrado 2. [Autor]

6.2.3 Cámara de combustión 3

Se piensa en una culata plana y un pistón cóncavo con un inserto piramidal en el medio; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se observa en la Figura 20, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

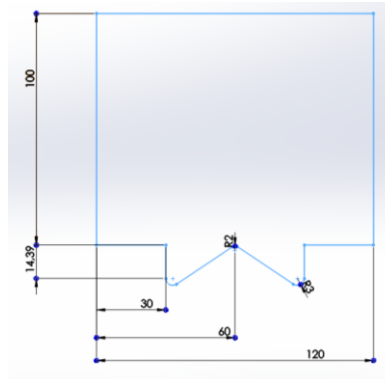


Figura 20. Cámara 3-2D. [Autor]

En la figura 23 se puede observar cómo es la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

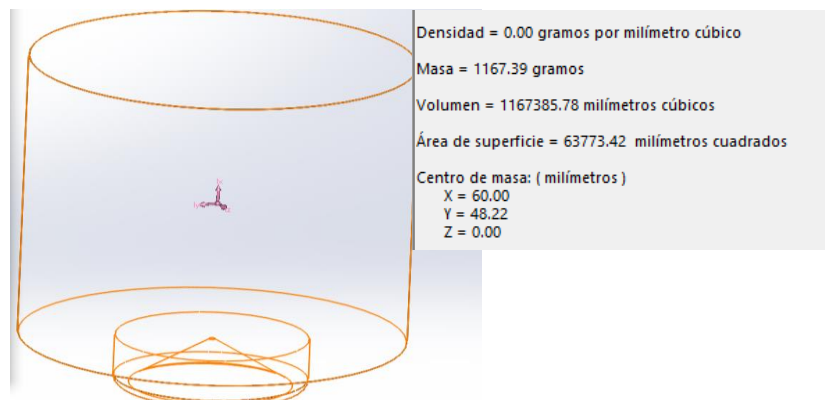


Figura 21. Volumen cilindrado 3. [Autor]

Ya obtenidos los planos y volúmenes de cada una de las cámaras de combustión interna se puede proceder a realizar los cálculos de relación de compresión, suponiendo cada uno de los ángulos de giro del cigüeñal. Donde 0° es el punto muerto inferior y 180° es el punto muerto superior. Adicional para las 14 cámaras de combustión simuladas, la biela siempre tendrá una longitud de 150 mm y el radio del cilindro que para la simulación es el mismo del pistón porque se idealiza que es totalmente hermético tiene un valor de 60 mm.

En los tres perfiles de pistón con la misma geometría de culata y altura de cilindro se debe garantizar una misma relación de compresión para así poder comprarlas al final cuando se tenga los resultados de presión, por lo antes mencionado lo que debe variar es la carrera del pistón para obtener una misma Rc.

Sabiendo que cuando el pistón se encuentre en el punto superior, es decir, en el Angulo 180° de giro del cigüeñal, el ángulo β entre el pistón y la biela es 0, y el ángulo α entre el cigüeñal y la biela es 180, procederemos a calcular la posición del pistón y por ende el volumen final o llamado volumen libre de la cámara de combustión. A simple vista se puede observar que el pistón prismático no puede tener una carrera mayor o igual a 85 ya que significaría que se estrella contra la culata por lo que se toma una carrera entre 83 mm y 84 mm.

Radio= 60 mm

Pistón prismático – cámara 2

Supuse una carrera de 83,46 mm

Utilizando la ecuación 3:

$$X_{prisma} = r * (1 - \cos 180^\circ) + l * (1 - \cos 0^\circ) = r * 2 = \left(\frac{carrera}{2}\right) * 2 = carrera = 83mm$$

L= 150 mm para todas

La anterior ecuación demuestra que la carrera es dos veces el radio del cigüeñal y que de acuerdo con el ángulo de giro del cigüeñal la posición del pistón varía. Ya obteniendo la posición del punto muerto superior podremos obtener el volumen de la cámara de combustión.

Utilizando la ecuación (5) de relación de compresión:

$$\begin{aligned} V_c + V &= 1078744,359 \text{ mm}^3 \\ V_c &= 1078744,359 \text{ mm}^3 - V \\ V_c &= 1078744,359 \text{ mm}^3 - (\pi * r^2 * carrera) \\ V_c &= 1078744,359 \text{ mm}^3 - (\pi * (60mm)^2 * 83,46 \text{ mm}) \\ V_c &= 1078744,359 \text{ mm}^3 - 943910,36 \text{ mm}^3 \\ V_c &= 134834,01 \text{ mm}^3 \\ R_c &= \frac{V_c + v}{V_c} = \frac{1078744.359 \text{ mm}^3}{134834.01 \text{ mm}^3} = 8 \end{aligned}$$

De acuerdo con los cálculos anteriores obtuvimos la relación de compresión que deben tener las otras dos cámaras con pistón de perfil plano y cóncava con inserto, ahora solo se debe hallar la carrera de cada una de estas.

Tabla 2. Carrera en cámaras de culata plana. [autor]

Perfil del pistón con culata plana	$V_c + V \text{ (mm}^3\text{)}$	Relación de compresión	Resultado Carrera pistón (mm)
Pistón plano – cámara 1	1130973,336	8	87,5
Pistón prismático – cámara 2	1078744,359	8	83,46 (dato supuesto)
Pistón cóncavo con inserto- cámara 3	1167385, 759	8	90,31

De lo anterior se puede observar que por las geometrías estas cámaras hacen referencia a un motor súper-cuadrado puesto que la carrera es menor al diámetro del cilindro. Pero como se pudo evidenciar la relación de compresión que permite una culata plana para un pistón prismático es muy baja, por consiguiente, se aumentara la altura del cilindro para intentar obtener una mejor relación de compresión. En las siguientes cámaras la altura del cilindro será de 120 mm para que se aproxime a ser un motor cuadrado.

6.2.4 Cámara de combustión 1.1

Para esta cámara se escogió una culata plana y un pistón plano con la diferencia que el cilindro tiene mayor altura para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe realizar un croquis de la forma que se ve en la Figura 22, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

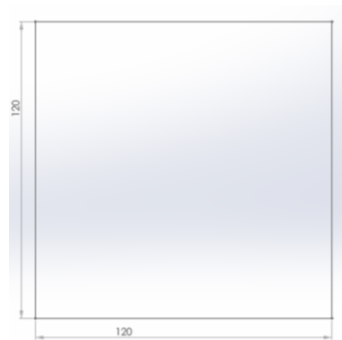


Figura 22. Cámara 1.1-2D. [Autor]

En la figura 25 se puede observar cómo es la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

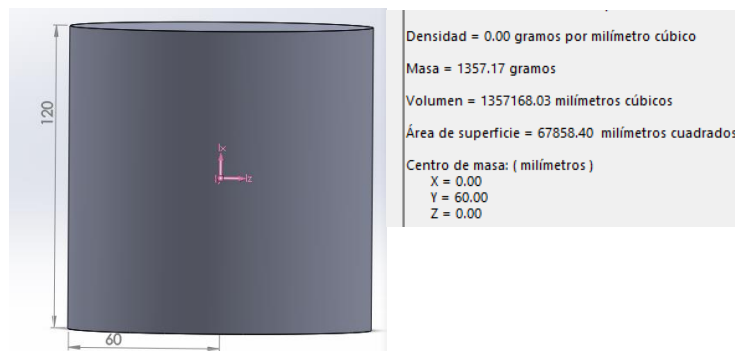


Figura 23. Volumen cilindrado 1.1. [Autor]

6.2.5 Cámara de combustión 2.1

Para esta cámara se escogió una culata plana, un pistón prismático y el cilindro tiene mayor altura para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe Dibujar la forma que se observa en la Figura 24, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

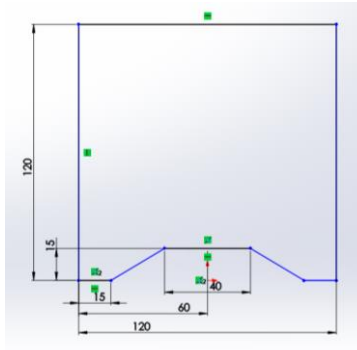


Figura 24. Cámara 2.1-2D. [Autor]

En la figura 27 se puede observar cómo es la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

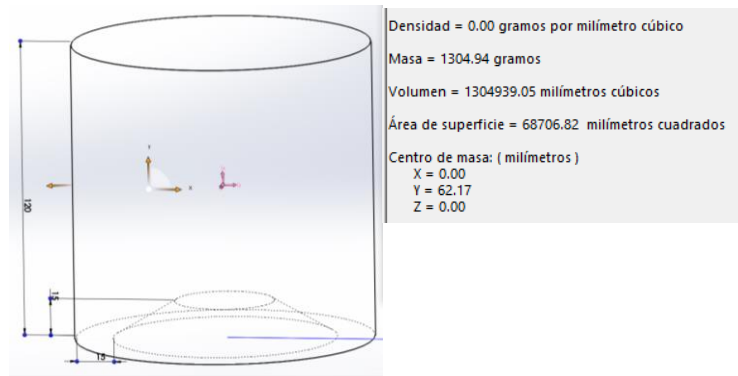


Figura 25. Volumen cilindrado 2.1. [Autor]

6.2.6 Cámara de combustión 3.1

Para esta cámara se escogió una culata plana, un pistón cóncavo con un inserto piramidal en el medio de la cavidad y el cilindro tiene mayor altura para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se ven la Figura 26, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

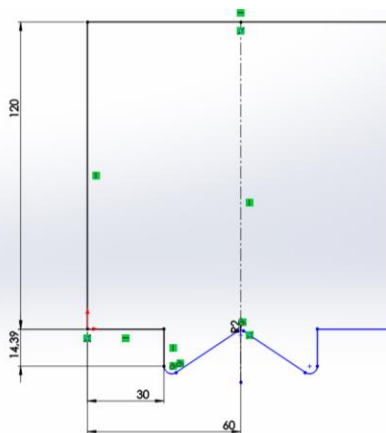


Figura 26. Cámara 3.1-2D. [Autor]

En la figura 29 se puede observar cómo es la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

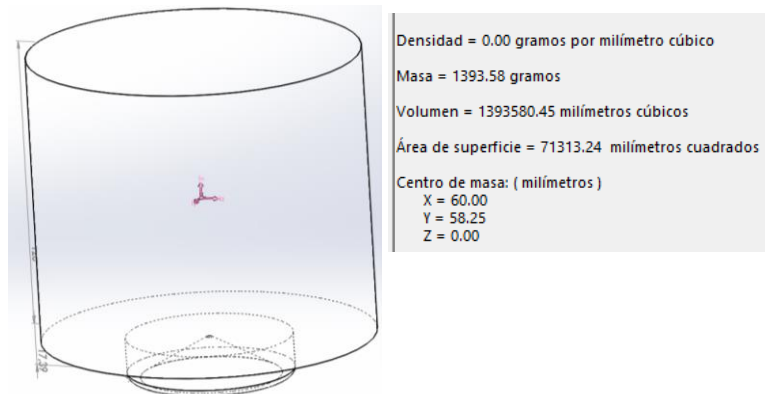


Figura 27. Volumen cilindrado 3.1. [Autor]

Una vez más obtenidos los planos y geometrías de las cámaras 1.1, 2.1, 3.1 se observa que el pistón prismático genera una limitante a la hora de tener una buena relación de compresión y por ende la comparación, aunque acertada puede que no nos favorezca mucho.

A simple vista se puede observar que el pistón prismático no puede tener una carrera mayor o igual a 105 ya que significaría que se estrella contra la culata por lo que se toma una carrera entre 100 mm y 102 mm; acabe aclarar que se toma una carrera no tan aproximada a 105 mm debido a que el volumen de aire es mayor.

Radio= 60mm

Suponemos la carrera para el pistón prismático que es de 101 mm, para hallar la relación de compresión y las carreras.

Tabla 3. Relación de corte y carreras para culata plana y mayor altura del cilindro. [autor]

Perfil del pistón con culata plana y mayor altura de cilindro	$V_c + V \text{ (mm}^3\text{)}$	Relación de compresión	Resultado Carrera pistón (mm)
Pistón plano – cámara 1.1	1357168,003	8	105
Pistón prismático – cámara 2.1	1304939,026	8	101 (dato supuesto)
Pistón cóncavo con inserto- cámara 3.1	1393580,426	8	107,8

Por lo anterior antes de simular se observó que el aumentar la altura del cilindro no genera una mejor relación de compresión, sino que se mantiene constante, por esta razón el siguiente factor a modificar es la forma de la culata.

Ahora bien, para seleccionar la siguiente geometría de la culata se debe tener en cuenta que la cabeza del pistón prismático va en punta por lo que la culata necesita una cavidad hacia arriba y así el pistón pueda tener una mayor carrera. La forma que más se adapta a los requerimientos es la hemisférica.

6.2.7 Cámara de combustión 1.2

Para esta cámara se escogió una culata hemisférica y un pistón plano; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se observa en la Figura 28, como si la cámara estuviera frente a nosotros.

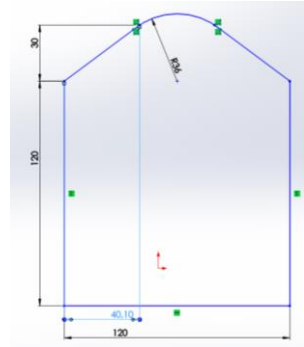


Figura 28. Cámara 3.1-2D. [Autor]

En la figura 31 se puede observar cómo es la cámara en 3 dimensiones y el volumen que posee, siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

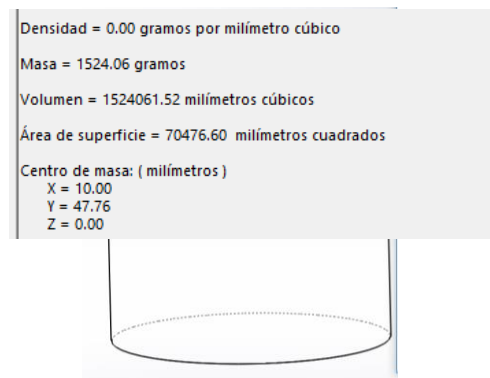


Figura 29. Volumen cilindrado 1.2. [Autor]

6.2.8 Cámara de combustión 2.2

Para esta cámara se escogió una culata hemisférica y un pistón con perfil prismático buscando una relación de compresión mayor; para realizar se procede a dibujar el croquis como se observa en la Figura 30.

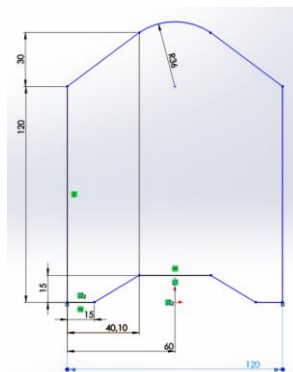


Figura 30. Cámara 2.2-2D. [Autor]

En la figura 33 se puede observar cómo es la cámara 2.2 en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

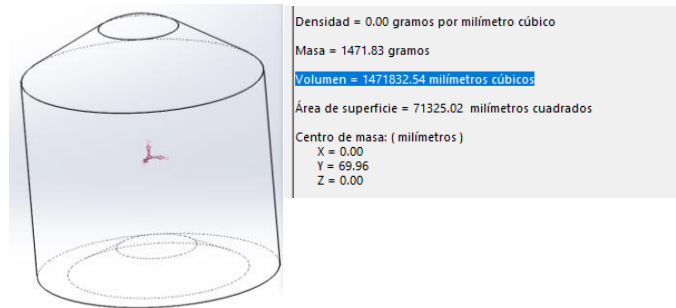


Figura 31. Volumen cilindrado 2.2. [Autor]

6.2.9 Cámara de combustión 3.2

Para esta cámara se escogió una culata hemisférica, un pistón cóncavo con un inserto piramidal en el medio de la cavidad y el cilindro tiene mayor altura para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se dibuja la forma tal y como se ve en la Figura 32.

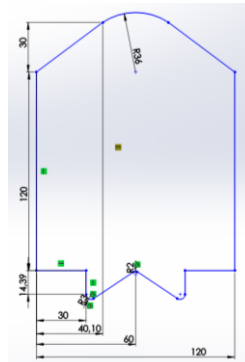


Figura 32. Cámara 3.2-2D. [Autor]

En la figura 35 se puede observar cómo es y que volumen ocupa la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

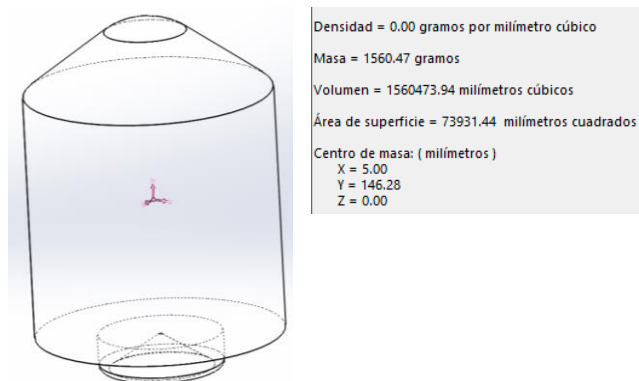


Figura 33. Volumen cilindrado 3.2. [Autor]

En el estudio de la geometría de la culata hemisférica se puede observar que el pistón prismático le permite una mayor relación de compresión puesto que en esta cámara a pesar de que con los tres perfiles se puede obtener una misma carrera, al final de ella el volumen es menor y por otra parte la cámara que tiene mayor volumen sin comprimir al final de la carrera es el del pistón cóncavo con inserto.

Por lo anterior en esta ocasión quien definirá la relación de compresión será la cámara con perfil cóncavo con inserto, según las geometrías en las tres cámaras se podrían conseguir un motor cuadrado, pero sin saber cómo responda la simulación a los distintos parámetros se escogerá una carrera inferior a 120 mm.

Radio cilindro= 60 mm

La carrera será de 118,3 mm para el perfil cóncavo con inserto.

Ya con la relación de compresión podemos hallar la carrera de las otras dos cámaras con perfil plano y prismático.

Tabla 4. Relación de compresión y carrera para cámaras hemisféricas. [autor]

Perfil del pistón con culata hemisférica	$V_c + V \text{ (mm}^3\text{)}$	Relación de compresión	Resultado Carrera pistón (mm)
Pistón plano – cámara 1.2	1524061	7	115,5
Pistón prismático – cámara 2.2	1471832,54	7	111,54
Pistón cóncavo con inserto- cámara 3.2	1560473	7	118,3 (dato supuesto)

Para el caso de la culata hemisferica el mejor perfil que se adapta es el primatico puesto a que tiene una relacion de compresion igual a los otros dos perfiles pero con menos carrera.

Una vez obtenida la mejor culata para el piston plano y el piston prismatico se buscara un cambio de la geometria que se adapte mejor al piston concavo con inserto. En esta ocasión se manejara una culata en forma de cuña al interior de la camara, pero al no ser simetrica no se puede decir que el cilindro se forma por revolucion, ANSYS permite generar la geometria por lo que se hace una suposicion de que si no encuentra simetria genera un cilindro con culata plana y en los bordes superiores hace un corte para generar la camara deseada.

6.2.10 Cámara de combustión 1.3

Para esta cámara se escogió una culata en forma de cuña, un pistón plano y el cilindro tiene una altura de 120 mm para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se ve en la Figura 34.

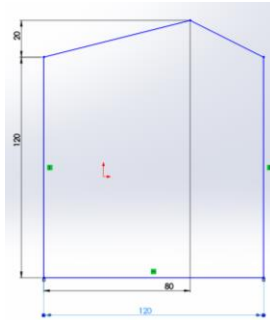


Figura 34. Cámara 1.3-2D. [Autor]

En la figura 37 se puede observar la cámara en 3 dimensiones, para obtener el volumen total que tiene, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.

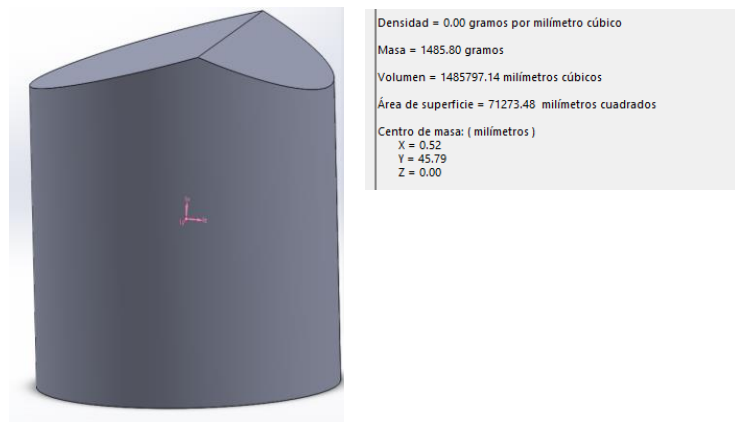


Figura 35. Volumen cilindrado 1.3. [Autor]

6.2.11 Cámara de combustión 2.3

Para esta cámara se escogió una culata en forma de cuña, un pistón prismático y el cilindro tiene una altura de 120 mm para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se ve en la Figura 36.

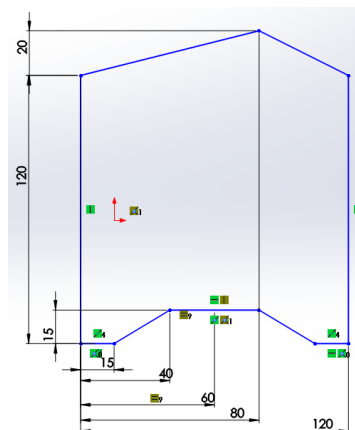
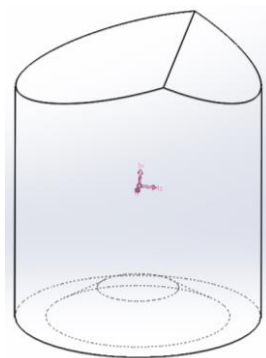


Figura 36. Cámara 2.3-2D. [Autor]

En la figura 39 se puede observar el volumen que tiene la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.



Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico
Masa = 1433.57 gramos
Volumen = 1433568.16 milímetros cúbicos
Área de superficie = 72121.89 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros)
X = 0.54
Y = 67.98
Z = 0.00

Figura 37. Volumen cilindrado 2.3. [Autor]

6.2.12 Cámara de combustión 3.3

Para esta cámara se escogió una culata en forma de cuña, un pistón plano y el cilindro tiene una altura de 120 mm para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se observa en la Figura 38. como si la cámara estuviera frente a nosotros.

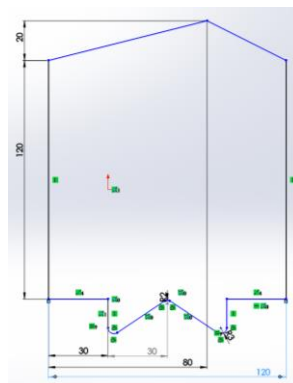
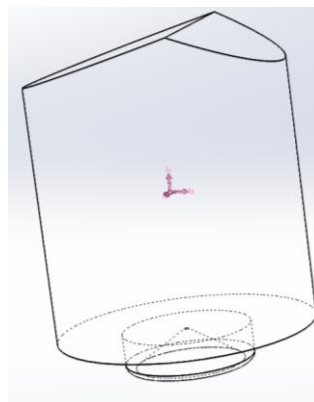


Figura 38. Cámara 3.3-2D. [Autor]

En la figura 41 se puede observar cual es volumen de la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.



Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico
Masa = 1522.21 gramos
Volumen = 1522205.75 milímetros cúbicos
Área de superficie = 74728.19 milímetros cuadrados
Centro de masa: (milímetros)
X = 5.51
Y = 144.31
Z = 0.00

Figura 39. Volumen cilindrado 3.3. [Autor]

Ya teniendo el volumen de las cámaras 1.3, 2.3, 3.3 calculamos la carrera que debe tener cada cámara si suponemos la carrera en cualquiera de los 3 casos

Radio cilindro= 60 mm

La carrera será de 114 mm para el perfil cóncavo con inserto. Ya con la relación de compresión podemos hallar la carrera de las otras dos cámaras con perfil plano y prismático.

Tabla 5. Relación de compresión y carrera en culata en forma de cuña [autor]

Perfil del pistón con culata en forma de cuña	$V_c + V$ (mm ³)	Relación de compresión	Resultado Carrera pistón (mm)
Pistón plano – cámara 1.3	145806,353	6,5	111,16
Pistón prismático – cámara 2.3	1433576,216	6,5	83,46 mm
Pistón cóncavo con inserto- cámara 3.3	1522545,936	6,5	114 (dato supuesto)

De lo anterior se puede demostrar que toda culata cóncava debe ir acompañado de un perfil prismático o en punta. Ya obtenidas las mejores geometrías del interior de la culata con respecto a los perfiles del pistón se procede a realizar las geometrías que puedan generar mayor presión debido a su alta relación de compresión.

En esta ocasión se realizará la geometría de una culata plana acompañada de un perfil de pistón plano y una culata en forma hemisférica acompañada de un pistón prismático que fueron los que mejor posibilidad tienen de comprimirse.

6.2.13 Cámara de combustión 1.4

Para esta cámara se escogió una culata en forma plana, un pistón plano y el cilindro tiene una altura de 130 mm para permitir una carrera de pistón mayor, se escogió ya que la forma de la culata y el pistón es similar por lo que pueden comprimir aún más; para realizar el diseño se debe dibujar la forma que se ve en la Figura 40. como si la cámara estuviera frente a nosotros.

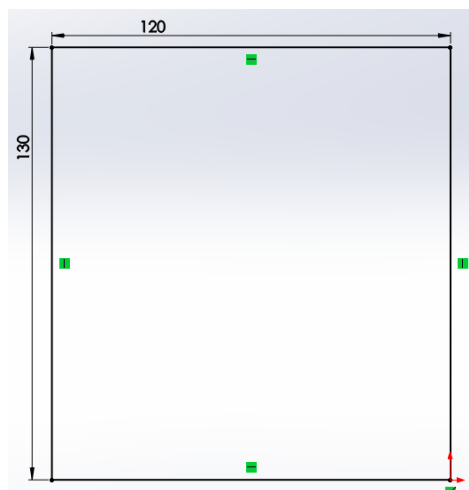


Figura 40. Cámara 1.4-2D. [Autor]

En la figura 41 se puede observar cómo es y que volumen ocupa la cámara en 3 dimensiones, pero siempre manteniendo las dimensiones mostradas en el plano anterior.



Figura 41. Volumen cilindrado 3.3. [Autor]

6.2.14 Cámara de combustión 2.4

Para esta cámara se escogió una culata hemisférica con menor radio para buscar una mayor relación de compresión, un pistón prismático y el cilindro tiene una altura de 120 mm para permitir una carrera de pistón mayor; para realizar el diseño se debe realizar un croquis como se observa en la Figura 42.

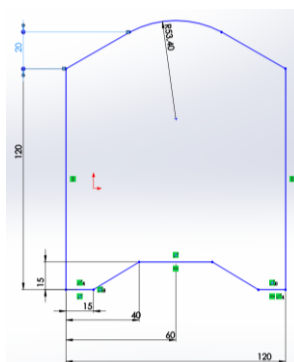


Figura 42. Cámara 2.4-2D. [Autor]

En la figura siguiente se puede observar cómo es y que volumen ocupa la cámara en 3 dimensiones de acuerdo con el plano anterior.

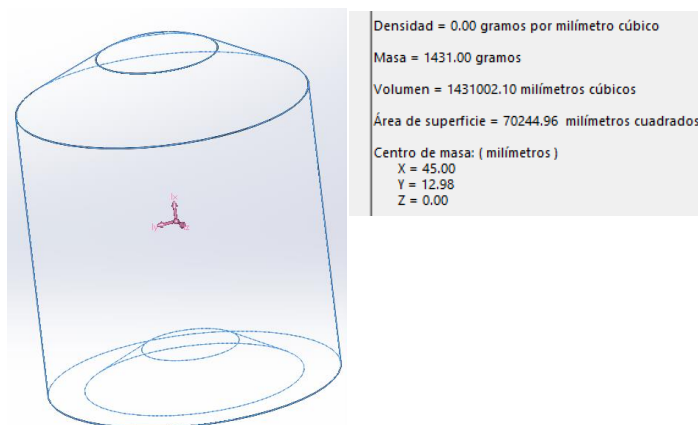


Figura 43. Volumen cilindrado 2.4. [Autor]

Ya con estas dos geometrías se podrá dar una idea más real de la relación de compresión generada dentro de la cámara de combustión y posterior a esto obtener un resultado acertado de la presión generada dentro de las distintas cámaras.

Aplicando la ecuación 3 y suponiendo carreras muy cercanas por encima o por debajo de 120 mm hallamos la relación de compresión que más se adapte a la documentación.

Tabla 6. Aumento de relación de compresión [autor]

Perfil del pistón con culata adecuada	$V_c + V$ (mm ³)	Carrera pistón (mm)	Relación de compresión
Pistón plano – con culata plana- cámara 1.4	1470265,337	121	14,45
Pistón prismático – con culata hemisférica- cámara 2.4	1431002,1	118	14,83

Una vez realizados los cálculos anteriores retomamos la simulación ya que estos nos permitirán generar un resultado acorde a la realidad

Adición de datos a ANSYS

Pero para poder realizar el análisis no se puede trabajar con un croquis por lo que hay que hacer una superficie que reconozca el programa. Para esto en la barra superior en **Concept** permite crear una superficie de acuerdo con el croquis indicado (**Surfaces From Sketches**) y por último generar la superficie como se muestra en la ilustración 9.

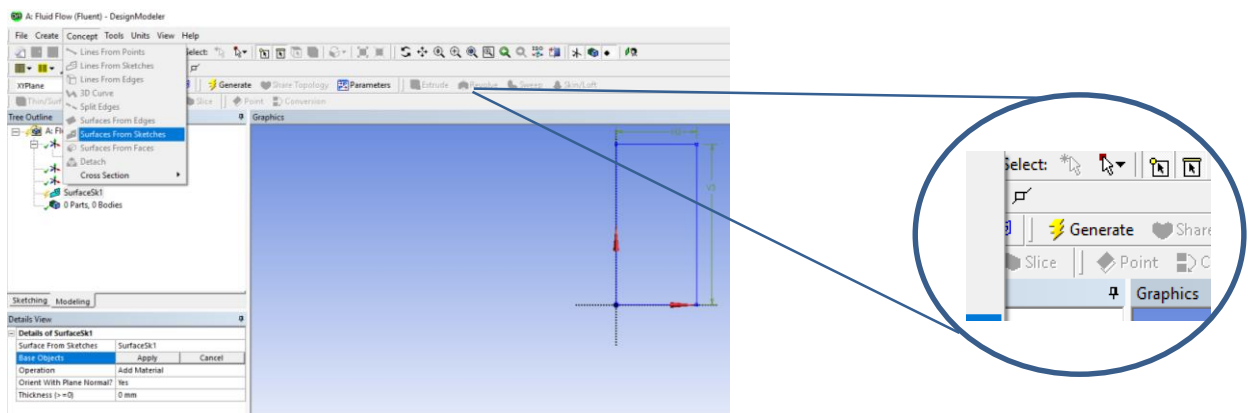


Figura 44. Superficie de croquis [autor]

En las geometrías no rectangulares se recomienda seccionar o separarlas por partes rectangulares para que el aspecto geométrico de cada elemento en el mayado sea mejor

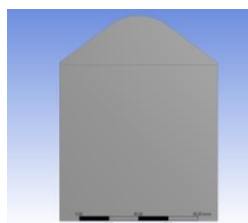


Figura 45. Seccionar la geometría [autor]

Una vez obtenida la geometría volvemos a la ventana inicial Workbench y se mostrara chuleado el ítem **Geometry**, lo que indica que reconoce la geometría. Para así pasar al siguiente ítem y generar la simulación.

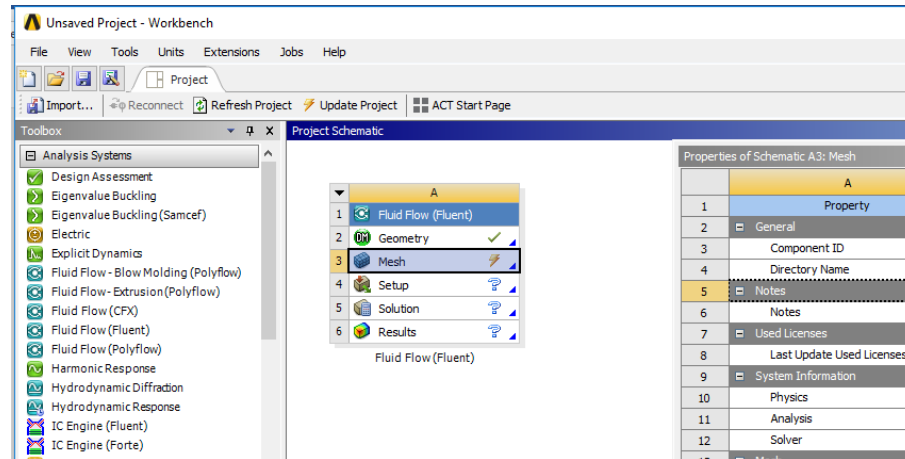


Figura 46. Ítem Mesh [autor]

6.3 Mallado

Una vez seleccionado el ítem **Mesh** se desplegará la ventana **Meshing** que sirve para definir la o las superficies que van a ser objeto de estudio bajo un fenómeno físico. [15]

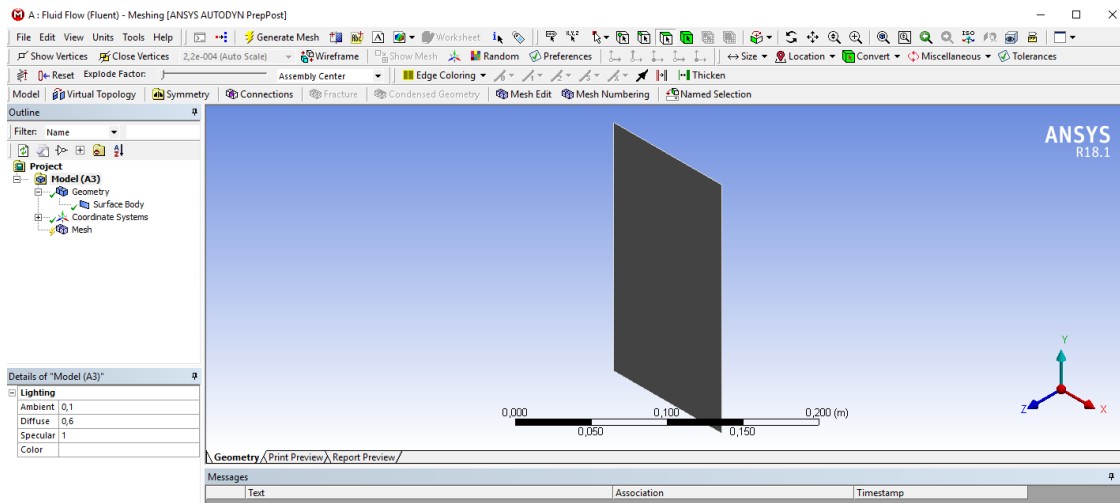


Figura 47. Mallado [autor]

Para comenzar nos colocaremos en mallado y verificamos que los elementos se ordenen en forma lineal, que el tamaño de cada elemento se uniforme y como último que en defaults la relevancia sea de 100 para que sea más fino el mallado.

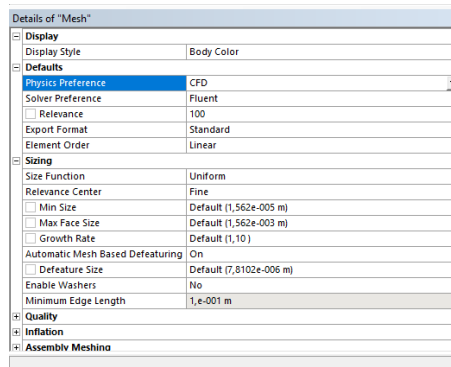


Figura 48. Malla [autor]

Para darle un buen mallado a las geometrías se selecciona un método según la forma de la superficie, primero se selecciona la cara al cual se le aplicara el método y luego se procede a modificar los parámetros.

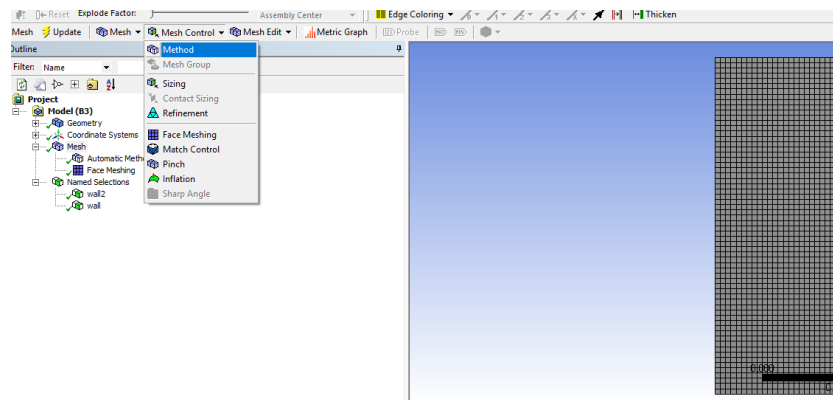


Figura 49. Método [autor]

Aquí se podrá variar si entre los elementos métricos se quieren todos rectangulares, triangulares o mixtos.

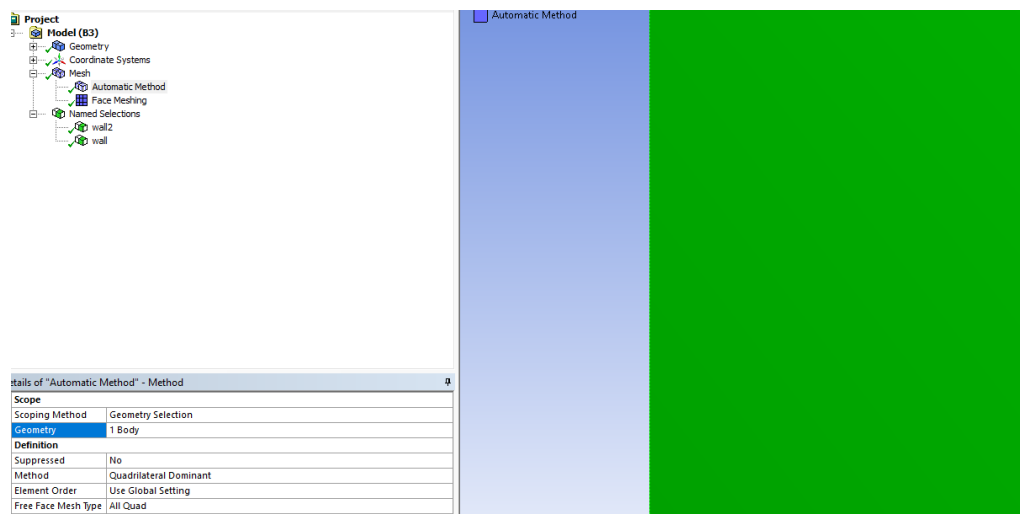


Figura 50. cuadriláteros [autor]

Este método escogido en la ilustración anterior tiene como función buscar que todos los elementos que componen el mayado sean cuadriláteros y el estudio sea más exacto en cada punto, pero no por eso me garantiza un orden.

Para que el mayado tome una forma ordena y los elementos métricos del mayado sean simétricos entre si volvemos a control de mallado y al desplegar abra una función llamada cara-malla como lo indica en la siguiente ilustración. En cara-malla seleccionamos la cara o superficie a modificar y habilitaremos la función **Mapped mesh** o mapeado.

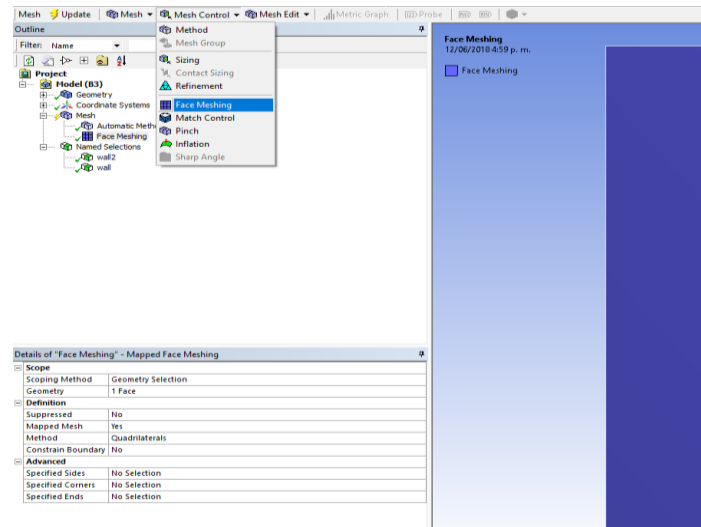


Figura 51. Mallado por cara [autor]

Si la geometría esta seccionada se puede generar distintas secciones de mallado para colocar los parámetros acordes a cada geometría y buscar que el mayado sea uniforme.

Ya dados los parámetros a cada una de las geometrías seleccionadas se genera el mallado como lo indica la ilustración, a esto se le llama mallado estructural uniforme.

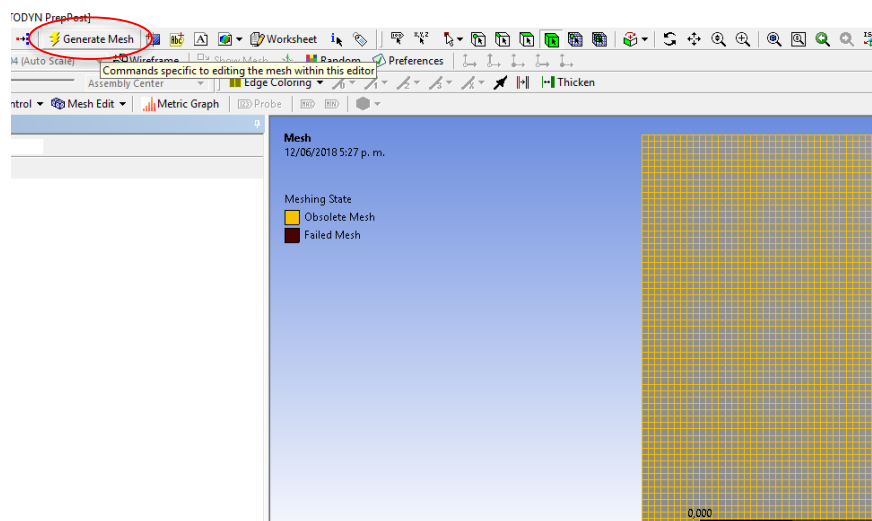


Figura 52. Generar malla [autor]

Una vez generada la malla se podrá revisar el aspecto métrico de cada uno de los elementos y entre más cercano sea a 1 mejor será el mallado y mejor aspecto visual dará.

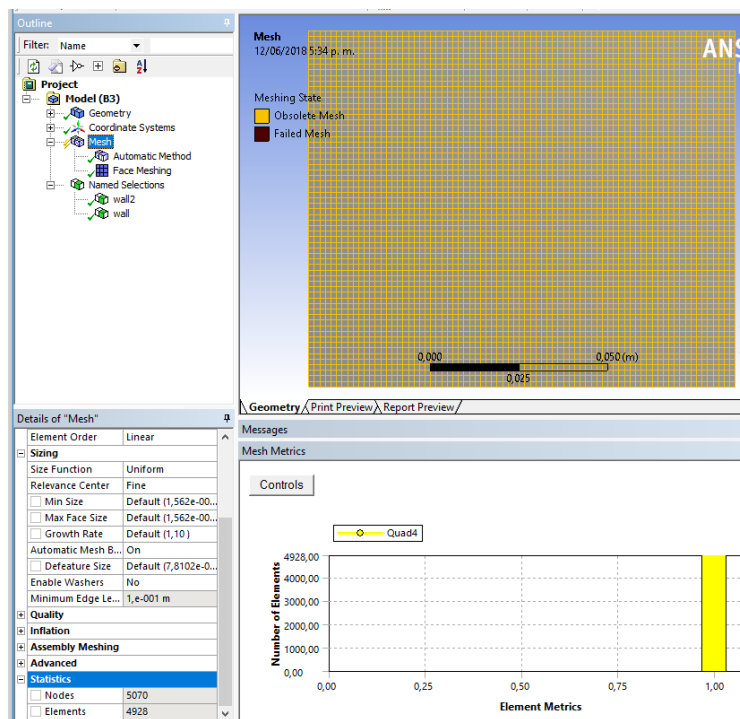


Figura 53. Aspecto métrico de la malla [autor]

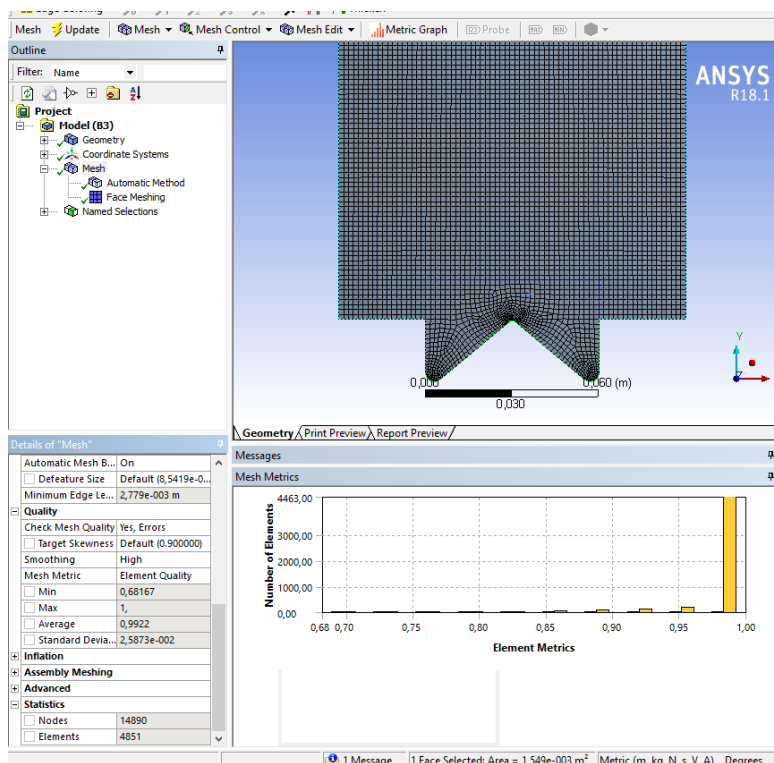


Figura 54. Aspecto métrico de la malla 2 [autor]

Como se observa en la imagen anterior de 4928 elementos en el mallado, todos tienen un aspecto métrico de 1 y es lo que se busca en las geometrías para que el estudio arroje datos exactos.

Ya revisado el mallado, lo siguiente a realizar es pulsar (control+E) para poder seleccionar los vértices del mallado geométrico en este caso la frontera del sistema a estudiar y así sobre estos vértices dar clic derecho para crear un nombre a estos; de manera que luego sea más sencillo el darle parámetros.

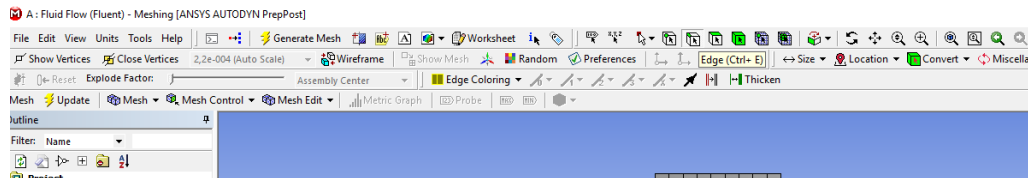


Figura 55. vertice [autor]

Debido a que estamos trabajando en 2D se seleccionan los vértices de la superficie

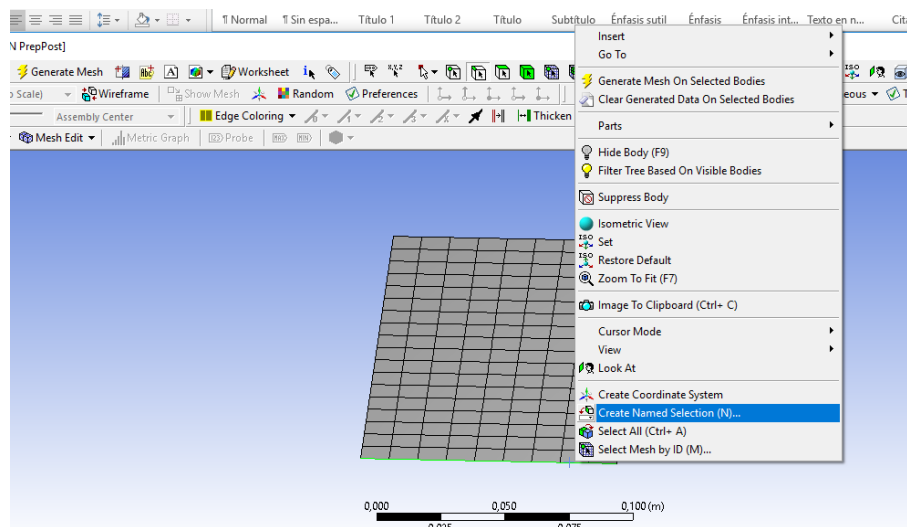


Figura 56. Crear nombre [autor]

En el paso anterior la base de la superficie se le dará el nombre de Wall1 que sería la cabeza del pistón, a los vértices laterales se seleccionaran juntos para darles el nombre de Wall2 que serían las paredes del cilindro por donde viaja el pistón y estarán sometidas a los mismos fenómenos físicos.

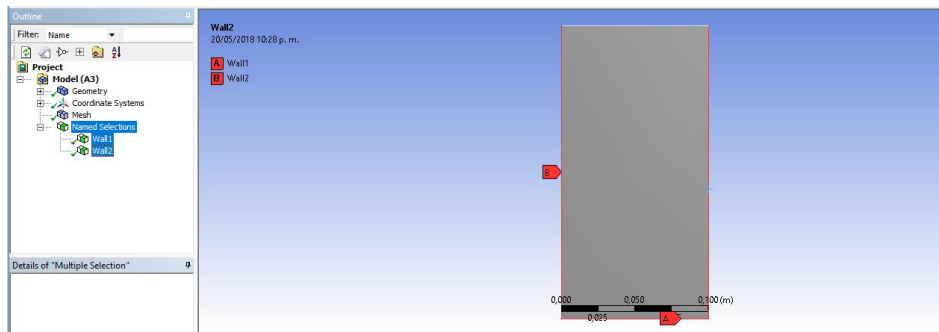


Figura 57. Selección de nombre [autor]

Nuevamente volvemos a la ventana **Workbench** y sobre el ítem **Mallado** le daremos clic derecho y seleccionaremos (Update) para que la simulación cargue los cambios realizados de manera que el ítem Mallado también aparezca chuleado.

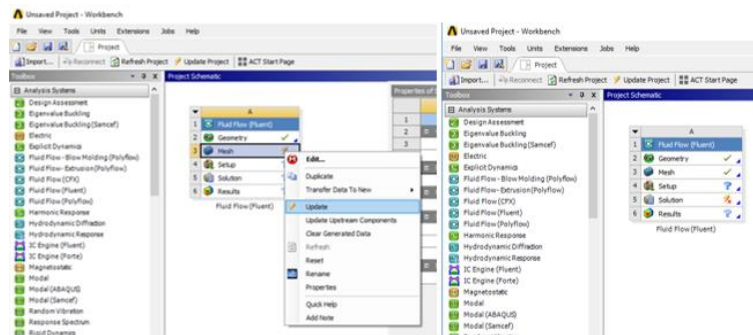


Figura 58. Cargar mallado. [Autor]

6.4 Puesta a Punto

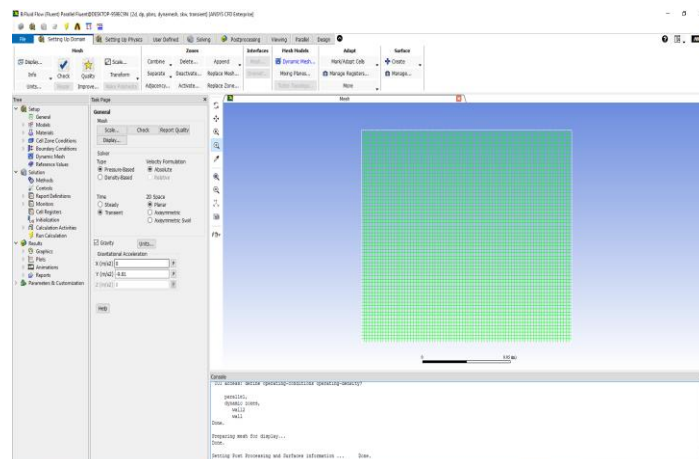


Figura 59. Ventana puesta a punto [autor]

En este paso es donde se dará las condiciones con las que trabajara cada una de las cámaras, la mayoría de los parámetros serán iguales para todas las cámaras y para las

secciones que no, se mostraran los 17 distintos parámetros ingresados para que el estudio de la presión en las cámaras de combustión sea acorde a una realidad.

6.4.1 General

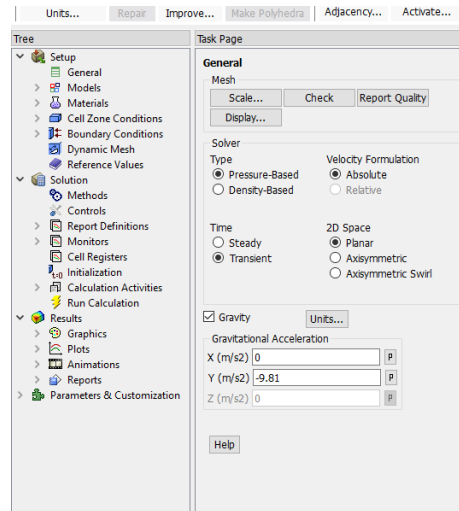


Figura 60. General [autor]

En este paso los parámetros son iguales para todas las cámaras a simular

- En solver type: Seleccionar Pressure-Based que es el tipo de solución que buscamos
- Velocity formulation: Absolute
- Time: Será trascendente debido a que lo que se busca es dar un movimiento a medida que el tiempo transcurra.
- Se activará la aceleración gravitacional y en el eje coordenado y se le dará el valor de -9.81

6.4.2 Modelos

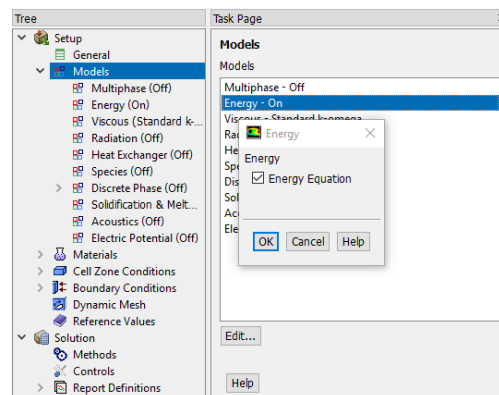


Figura 61. Modelo de energía [autor]

- Se activa el modelo de energía ya que dentro de las cámaras de combustión habrá un cambio de energía en las partículas, las cuales serán nuestro objeto de estudio.
- Lo siguiente es escoger un modelo turbulento que es el que permite estudiar el comportamiento de un fluido sometido a una presión.

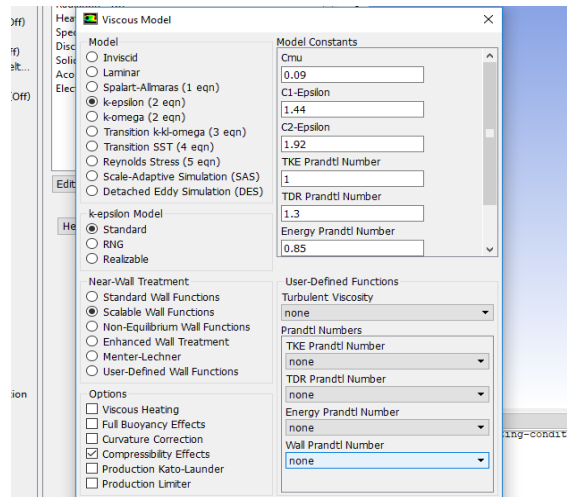


Figura 62. Modelo viscoso [autor]

- Se escoge K-epsilon como modelo viscoso debido a que sirve para estudiarla turbulencia de un fluido y la energía cinética que se encuentra dentro de la frontera, adicional no cuenta con un factor de corrección que tiene K-omega, por lo que nos generara valores de presiones altas que es lo que se busca.
- En Near- Wall seleccionamos la función de muro escalable ya que la simulación tendrá un movimiento y se necesita un estudio de acuerdo con el movimiento, es decir, no estacionario; por último, aplicamos ok.

6.4.3 Materiales

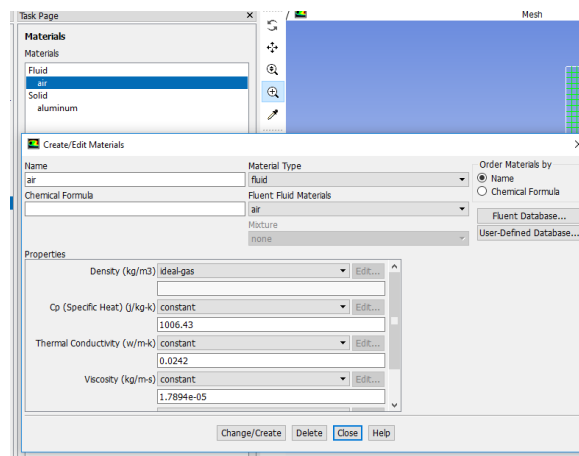


Figura 63. Crear material [autor]

- Escoger aire como fluido de trabajo y en propiedades seleccionarlo como ideal-gas.
- Por último, aplicamos o creamos este fluido de trabajo dentro de nuestra frontera.

6.4.4 Condición de operación

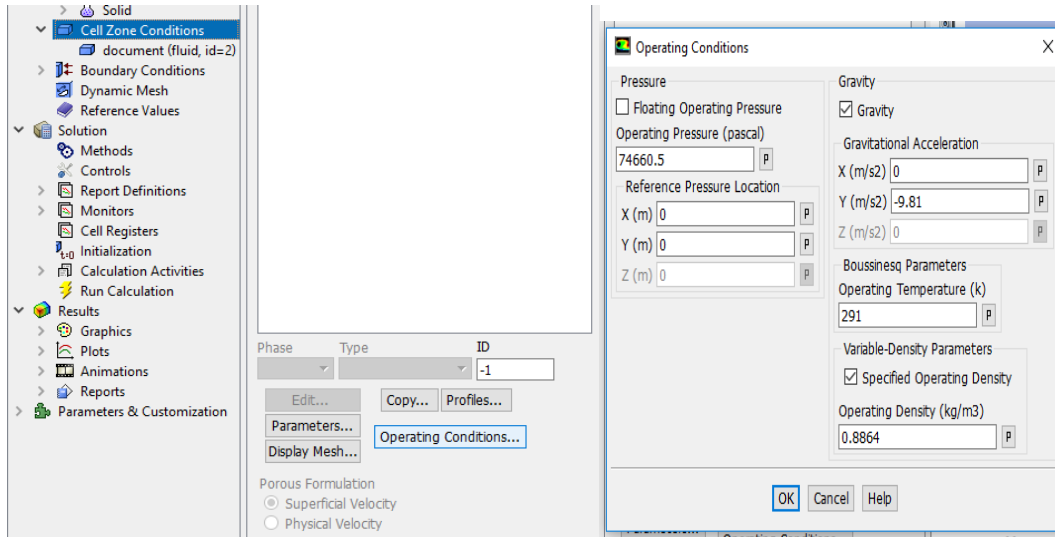


Figura 64. Cell zone/condiciones de operación. [Autor]

- Luego de seleccionar cell zone procederemos a ingresar las propiedades del aire a nivel de Bogotá.
- La temperatura en Bogotá es de 18°C aproximadamente y 77% de humedad relativa [16].

Tabla 7. Presiones atmosféricas- capitales de Colombia [17]

Componentes	Altura sobre el nivel del mar (m)	Presión atmosférica	
		mmHg	inHg
Arauca	119	749	29.50
Armenia[4]	1551	640	24.81
Barranquilla	30	757	29.81
Bogotá D.C.[5]	2640	560	21.67

$$\rho = \frac{(0,34848 * p) - (0,009 * (h_r^{0,061*18}))}{273.15 + t} \quad (6)$$

Donde, ρ = densidad del aire en kg/m³

P= presión barométrica en hPa

h_r = humedad relativa de aire en %

t = temperatura del aire en °C

- Aplicamos la Formula CIPM.

Temperatura: 18 °C = 291°K

Presión barométrica: 560 mmHg = 746,6 hPa=74660,5 Pa

Humedad relativa: 77%

Densidad del aire

$$\rho = \frac{(0,34848 * 746,6) - (0,009 * (77^{0,061*18}))}{273,15 + 18} = 0,88641 \text{kg/m}^3$$

- Luego de calcular la densidad del aire procedemos a ingresar los datos de temperatura en K, presión en Pa y habilitamos para ingresar la densidad a la cual va a estar el aire.
- Damos clic en ok.

6.4.5 Mallado dinámico

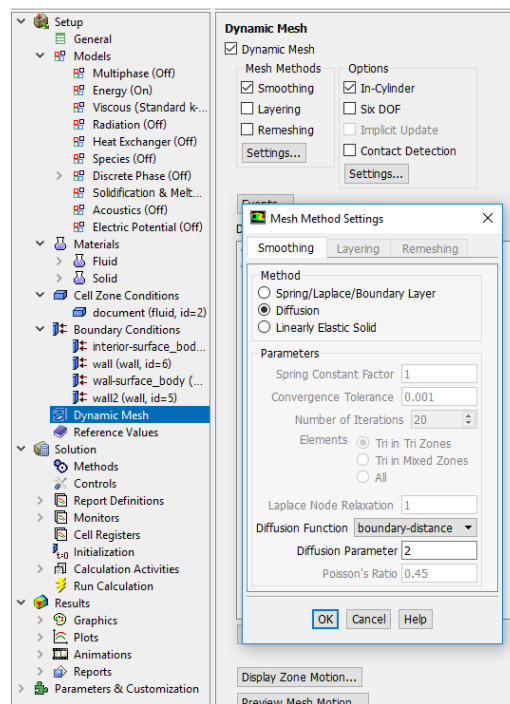


Figura 65. Mallado dinámico [autor]

- Se activará el mallado con el método suavizado por difusión, donde la se escogerá la función de distancia en la frontera bajo dos parámetros que permitirán dar el movimiento a las paredes, oprimimos “ok”.
- Para el siguiente paso cada cámara tiene sus valores respectivos con la excepción de que siempre el cigüeñal girara a 1000 rpm, el periodo del cigüeñal es de 720°, el ángulo de inicio de giro es 0°, la biela es de 150 mm, offset de 0 y el tamaño de cada paso es de 10°, esto quiere decir que el estudio o valores arrojados serán cada 10° de giro del cigüeñal.

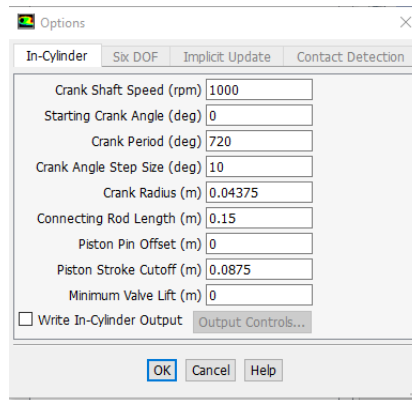


Figura 66. En cilindro- cámara 1 [autor]

6.4.6 calculo

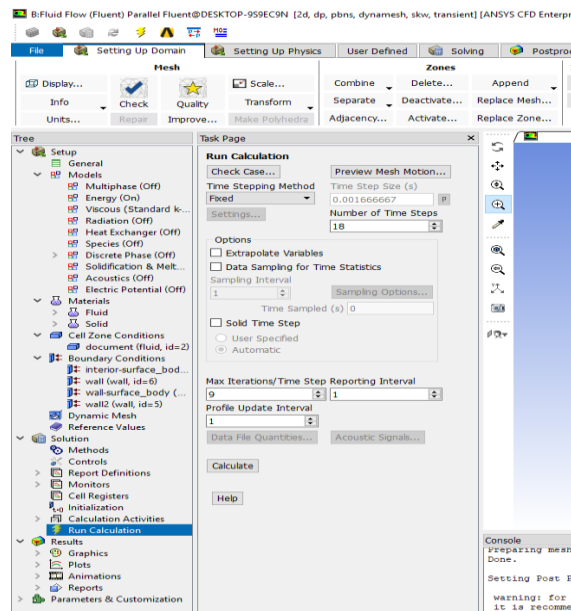


Figura 67. Calculo [autor]

- En la calculación le daremos el número de pasos, ya que el paso es de 10 en 10 según lo escogido en la malla dinámica en el cilindro, con esto aseguramos que el pistón llegue al punto muerto superior que es cuando llegue a 180°, es decir, colocamos 18 pasos y 9 iteraciones por cada paso para obtener resultados muy cercanos a la vida real.
- El tiempo por cada paso debido a que el cigüeñal gira a 1000 rpm entonces es una constante de 0,001666667 s

$$1000 \text{ rpm} * \frac{1}{60 \text{ s}} = 16,66667 \text{ vueltas por segundo (7)}$$

Entonces:

$$\frac{1 \text{ vuelta}}{16,66667 \text{ vueltas por segundo}} = 0,06 \text{ segundos por vuelta}$$

$$0,06 \text{ segundos por vuelta} \rightarrow 360^\circ$$

$$x \rightarrow 10^\circ$$

$$x = 0,00166667 \text{ s (34)}$$

- El avance del pistón está definido por:

$$y = x * n^\circ \text{ de pasos} = 0,00166667 * 18 = 0,03 \text{ m}$$

De lo anterior podemos ver que el avance del pistón no es suficiente para tener una relación de compresión aceptable, aparte que no va de acuerdo con las medidas de radio del cigüeñal y longitud de biela antes ingresada.

6.4.7 condiciones de frontera

- Para corregir esto nos dirigimos a las condiciones de frontera y adicionaremos un archivo que de las condiciones de frontera

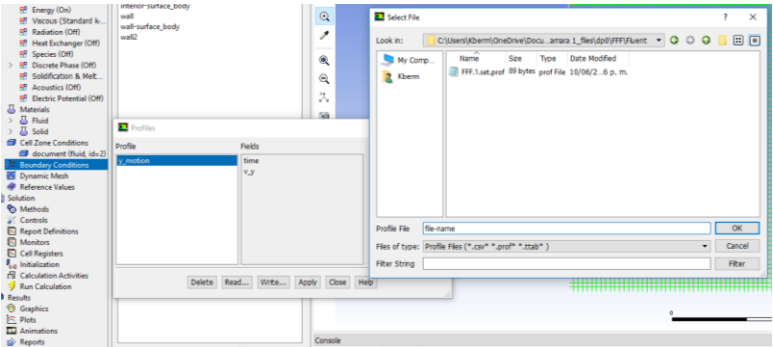
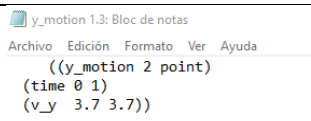
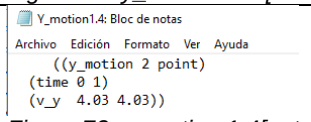
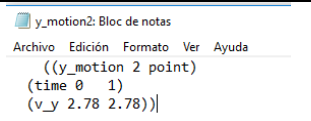
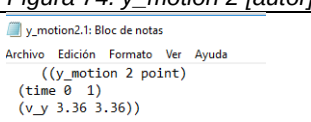
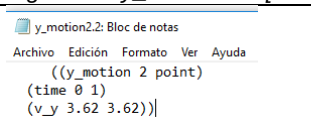
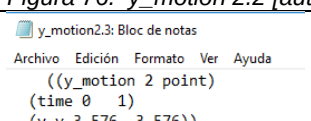
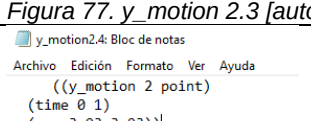
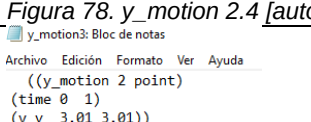
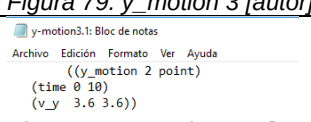
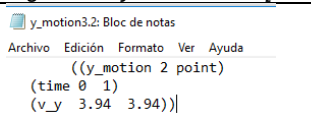
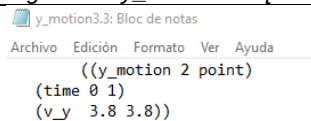


Figura 68. Archivo profile [autor]

Para cargar el archivo se debe realizar un block de notas donde se designarán dos parámetros, el tiempo y el desplazamiento en el eje Y. El tiempo se colocará de 0 a 1 indicando que parte de 0 y el tiempo transcurrirá de uno en uno, el desplazamiento v_y se coloca doble vez para indicar que es un desplazamiento constante a partir del primer instante. El archivo antes de subirse se debe cambiar de “.txt” a “.prof” para que lo reconozca.

Tabla 8. Archivo prof de cada geometría [autor]

Cámara 1 Carrera: 87,5 mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 87,5mm$ $M = 87,5mm / 30mm = 2,916$	y_motion1: Bloc de notas ArchivoEdiciónFormatoVerAyuda ((y_motion 2 point) (time 0 1) (v_y 2.916 2.916)) Figura 69. y_motion 1. [autor]
Cámara 1.1 Carrera: 105mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 105mm$ $M = 105mm / 30mm = 3,5$	y_motion1.1: Bloc de notas ArchivoEdiciónFormatoVerAyuda ((y_motion 2 point) (time 0 1) (v_y 3.5 3.5)) Figura 70. y_motion 1.1 [autor]
Cámara 1.2 Carrera: 115,5mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 115,5mm$ $M = 115,5mm / 30mm = 3,85$	1.2: Bloc de notas ArchivoEdiciónFormatoVerAyuda ((y_motion 2 point) (time 0 1) (v_y 3.85 3.85)) Figura 71. y_motion1.2 [autor]

Cámara 1.3 Carrera: 111,2mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 111,2mm$ $M = 111,2mm / 30mm = 3,7$	 <i>Figura 72. y_motion 1.3 [autor]</i>
Cámara 1.4 Carrera: 121mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 121mm$ $M = 121mm / 30mm = 4,03$	 <i>Figura 73. y_motion 1.4[autor]</i>
Cámara 2 Carrera: 83,46mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 83,46mm$ $M = 83,46mm / 30mm = 2,78$	 <i>Figura 74. y_motion 2 [autor]</i>
Cámara 2.1 Carrera: 101mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 101mm$ $M = 101mm / 30mm = 3,36$	 <i>Figura 75. y_motion 2.1 [autor]</i>
Cámara 2.2 Carrera: 108,6 mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 108,6 mm$ $M = 108,6 mm / 30mm = 3,62$	 <i>Figura 76. y_motion 2.2 [autor]</i>
Cámara 2.3 Carrera: 107,3mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 107,3mm$ $M = 107,3mm / 30mm = 3,576$	 <i>Figura 77. y_motion 2.3 [autor]</i>
Cámara 2.4 Carrera: 118 mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 118 mm$ $M = 118 mm / 30mm = 3,93$	 <i>Figura 78. y_motion 2.4 [autor]</i>
Cámara 3 Carrera: 90,32mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 90,32mm$ $M = 90,32mm / 30mm = 3,01$	 <i>Figura 79. y_motion 3 [autor]</i>
Cámara 3.1 Carrera: 108 mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 108 mm$ $M = 108 mm / 30mm = 3,6$	 <i>Figura 80. y_motion 3.1 [autor]</i>
Cámara 3.2 Carrera: 118,28 mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 118,28mm$ $M = 118,28mm / 30mm = 3,94$	 <i>Figura 81. y_motion 3.2 [autor]</i>
Cámara 3.3 Carrera: 114mm	Desplazamiento del pistón (M) $M * 0,03mm = 114mm$ $M = 114 mm / 30mm = 3,8$	 <i>Figura 82. y_motion 3.3 [autor]</i>

6.4.8 Zona de mallado dinámico

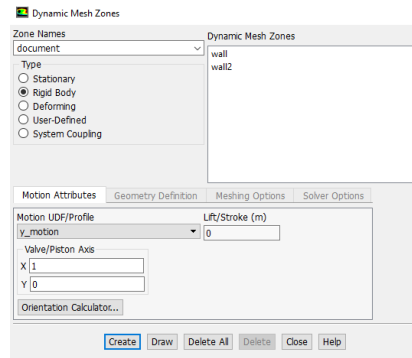


Figura 83. Movimiento de pared 1 [autor]

- En esta sección se debe aplicar el archivo a Wall 1 para que la pared se mueva en el sentido positivo de y, adicionalmente se debe definir como un cuerpo rígido.

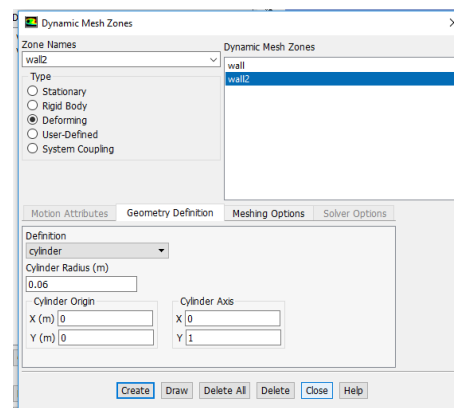


Figura 84. Movimiento de pared 2 [autor]

- Para el Wall 2 es una pared que se deforma y se definirá como un cilindro para todos de radio 60 mm, el eje de cilindro en y es 1 para saber el sentido en que se deforma.

6.4.9 Inicialización

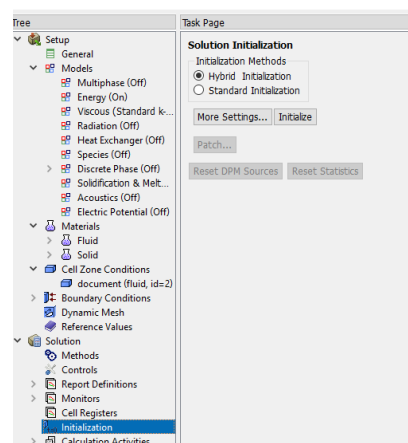


Figura 87. Inicialización [autor]

- El método de solución es híbrido debido a que tanto el tiempo como la geometría varían, por lo que la solución es variable con respecto al tiempo.

6.4.10 Cálculos de actividades

- En auto- guardado se escoge la opción de guardar los datos y resultados por cada uno de los pasos y se guardaran en un file tipo CFD- post compatible

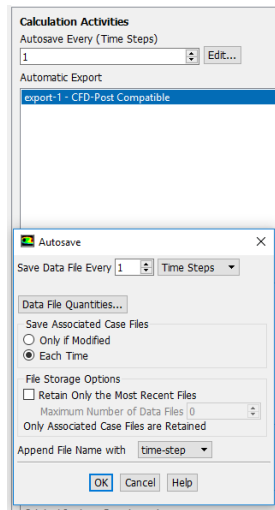


Figura 85. Cálculación de actividades [autor]

Al finalizar el procedimiento anterior se aplica calcular para que ANSYS realice la simulación y genere los resultados, una vez iterado todo sin arrojar errores se sabrá que los parámetros adicionados son acertados.

Ya iterado y calculadas las soluciones podremos ir a **Results** para ver los resultados.

7. RESULTADOS

7.1 Cámara de combustión 1 (anexo 1)

Carrera= 87,5 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

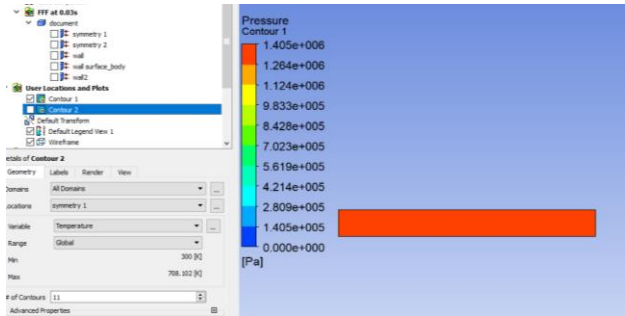


Figura 86. Presiones y temperatura cámara 1 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 1 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

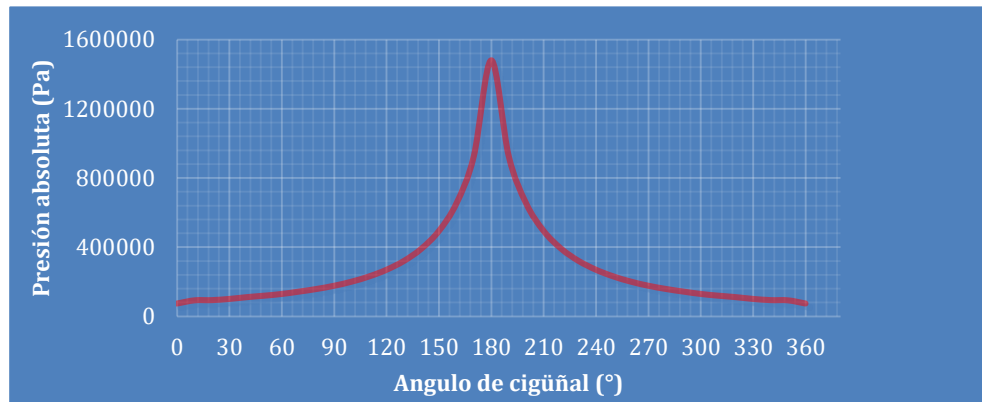


Figura 87. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y supercuadrado. [autor]

7.2 Cámara de combustión 1.1 (anexo 2)

Carrera = 105 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

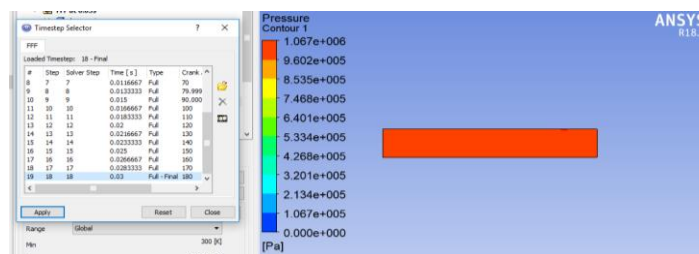


Figura 88. Presiones y temperatura cámara 1.1 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 2 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

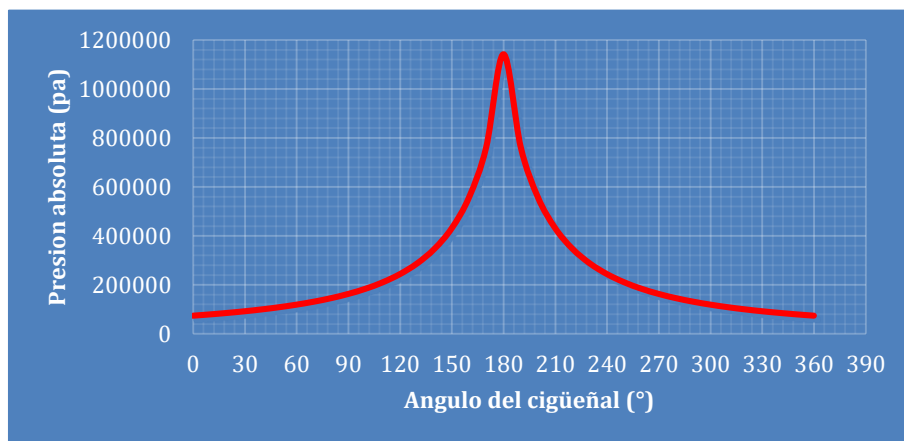


Figura 89. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y supercuadrado. [autor]

7.3 Cámara de combustión 1.2 (anexo 3)

Carrera de 115,5 mm y relación de compresión de 7

En la siguiente figura se observa la simulación obtenida con la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

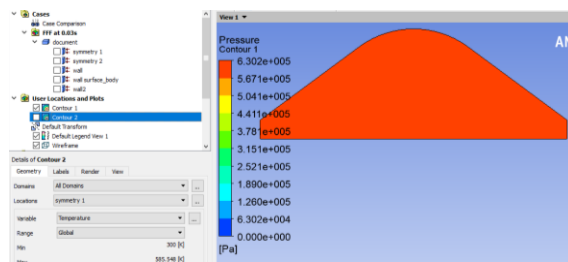


Figura 90. Presiones y temperatura cámara 1.2 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 3 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

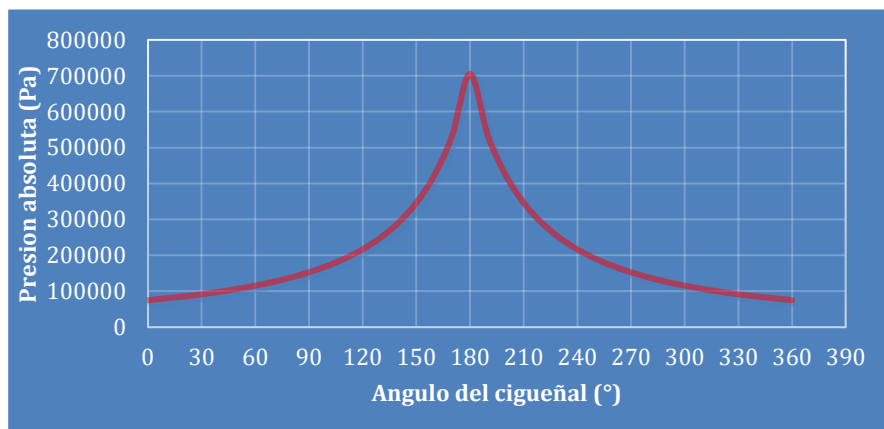


Figura 91. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata hemisférica y supercuadrado. [autor]

7.4 Cámara de combustión 1.3 (anexo 4)

Carrera de 111,2 mm y relación de compresión de 6,5

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

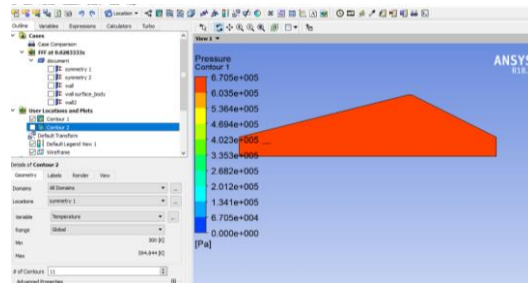


Figura 92. Presión y temperatura cámara 1.3 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 2 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

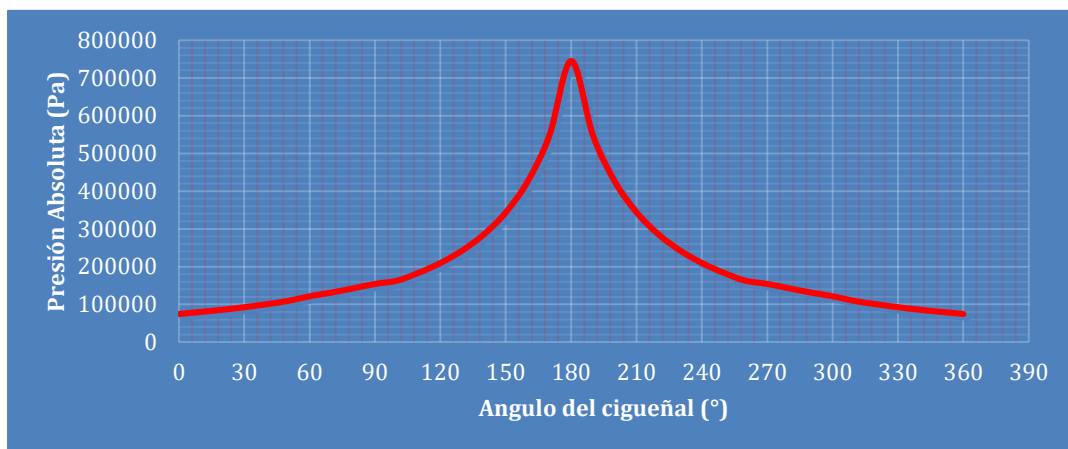


Figura 93. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata en forma de cuña y supercuadrado. [autor]

7.5 Cámara de combustión 1.4 (anexo 5)

Carrera de 121 mm y relación de compresión de 14,4

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

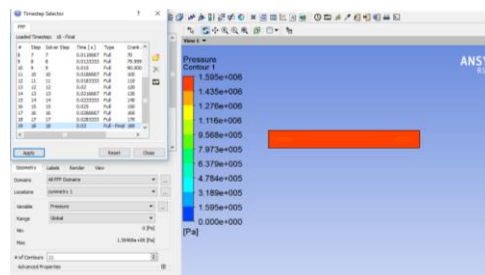


Figura 94. Presión y temperatura cámara 1.4

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 5 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

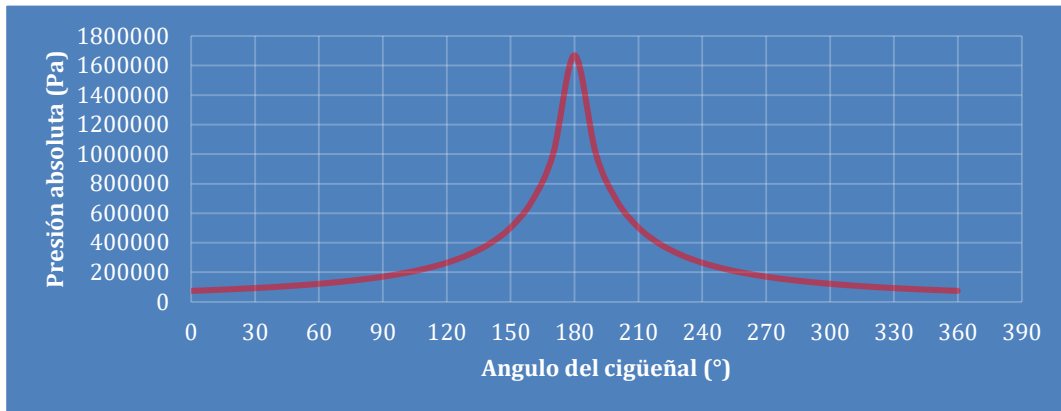


Figura 95. Caracterización curva de presión pistón de perfil plano, culata plana y cuadrado.

7.6 Cámara de combustión 2 (anexo 6)

Carrera de 83,46 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

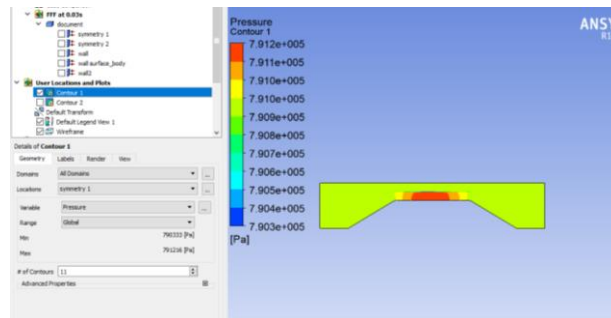


Figura 96. Presión y temperatura cámara 2

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 6 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

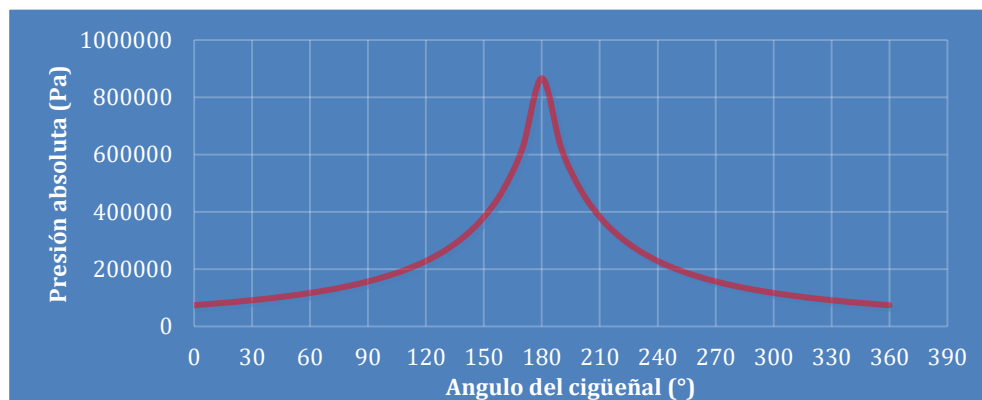


Figura 97. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata plana y supercuadrado. [autor]

7.7 Cámara de combustión 2.1 (anexo 7)

Carrera de 101 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

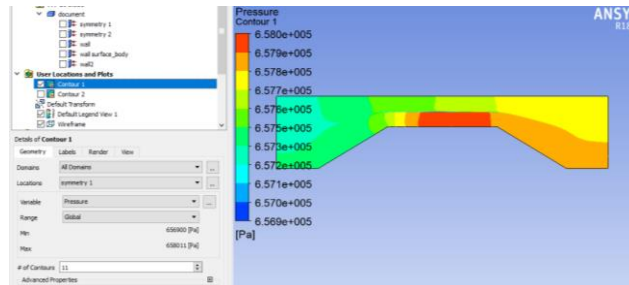


Figura 98. Presión y temperatura cámara 2.1

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 7 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

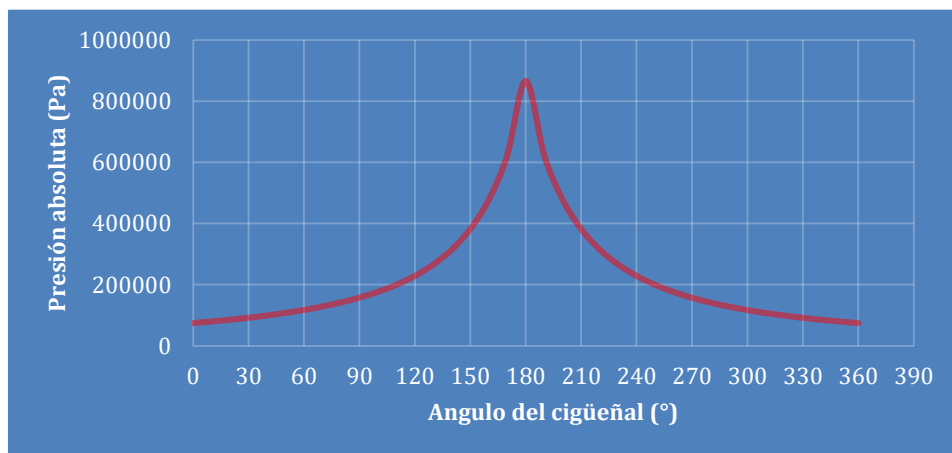


Figura 99. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata plana y supercuadrado. [autor]

7.8 Cámara de combustión 2.2 (anexo 8)

Carrera de 108,6 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

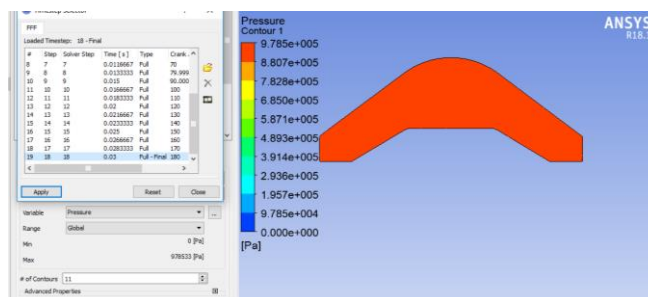


Figura 100. Presión y temperatura cámara 2.2 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 8 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

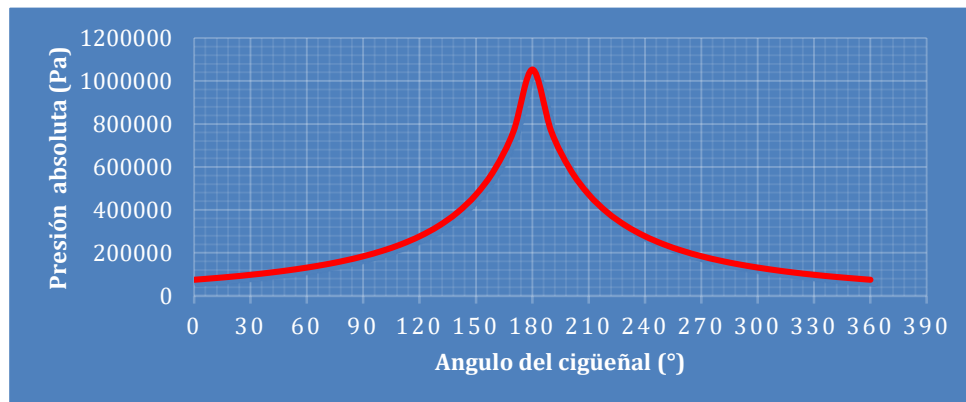


Figura 101. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata hemisférica y supercuadrado. [Autor]

7.9 Cámara de combustión 2.3 (anexo 9)

Carrera de 107,3 y relación de compresión de 6,5

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

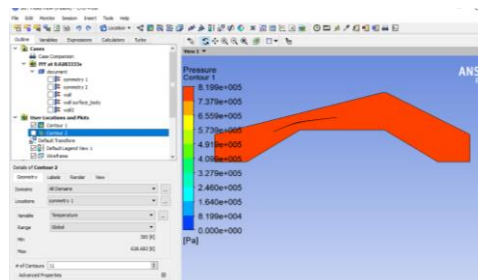


Figura 102. Presión y temperatura cámara 2.3 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 9 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

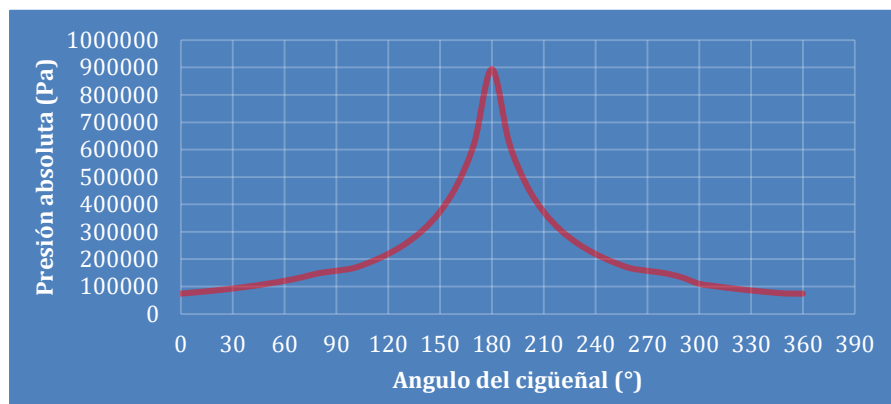


Figura 103. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata en forma de cuña y supercuadrado. [Autor]

7.10 Cámara de combustión 2.4 (anexo 10)

Carrera de 118 mm y relación de compresión de 14,84

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

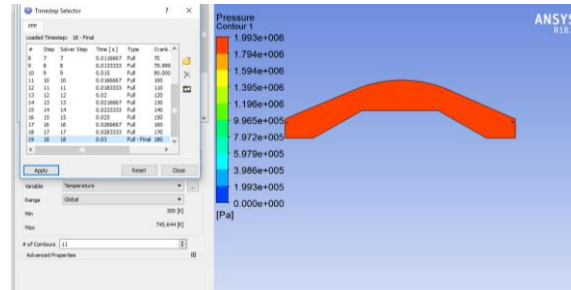


Figura 104. Presion y temperatura camara 2.4 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 10 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

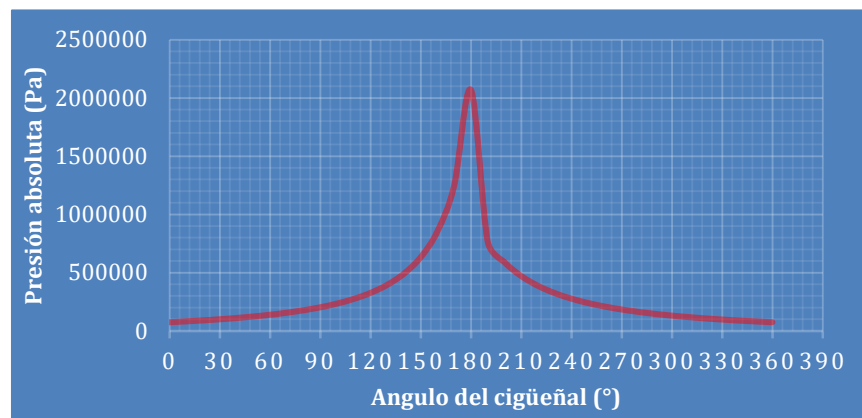


Figura 105. Caracterización curva de presión pistón de perfil prismático, culata hemisférica y motor cuadrado. [autor]

7.11 Cámara de combustión 3 (anexo 11)

Carrera de 90,32 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

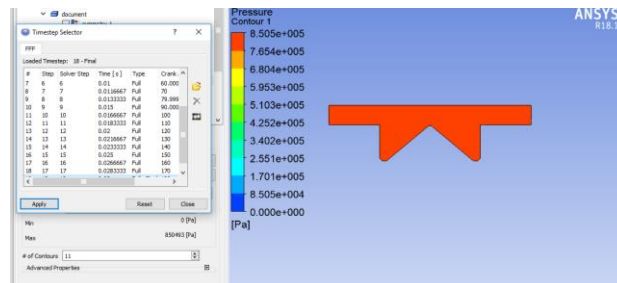


Figura 106. Presión y temperatura cámara 4

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 11 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

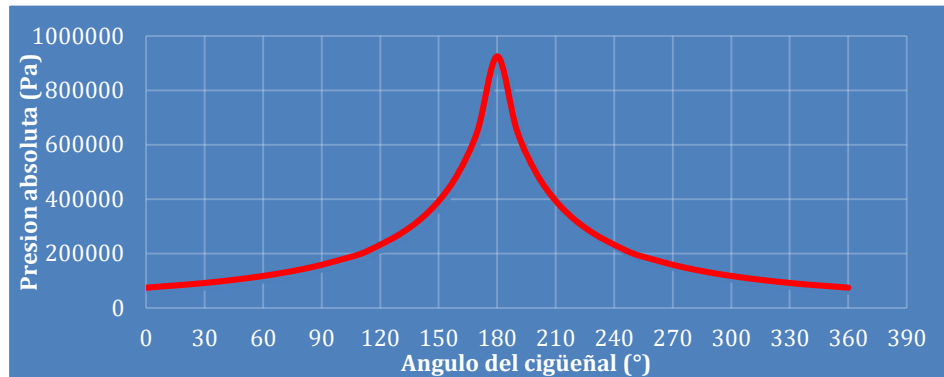


Figura 107. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata plana y supercuadrado. [Autor]

7.12 Cámara de combustión 3.1 (anexo 12)

Carrera de 108 mm y relación de compresión de 8

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

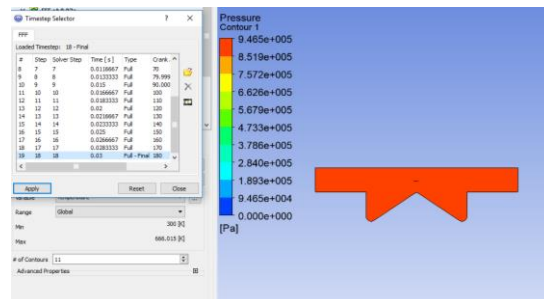


Figura 108. Presión y temperatura cámara 3.1 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 12 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

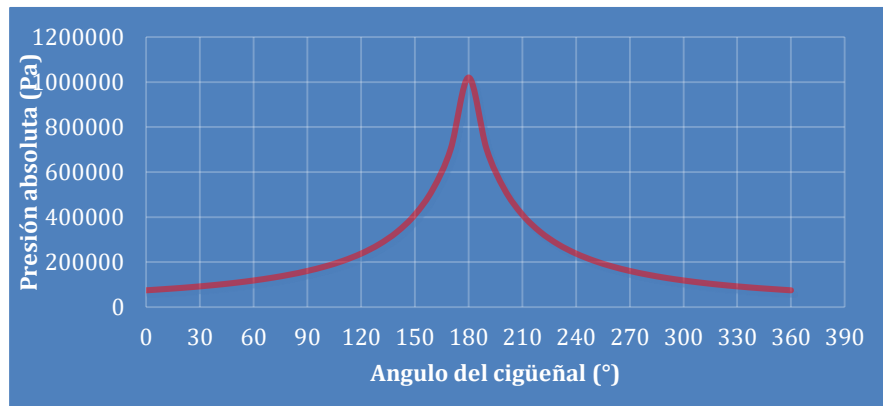


Figura 109. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata plana y supercuadrado. [Autor]

7.13 Cámara de combustión 3.2 (anexo 13)

Carrera de 118,28 mm y relación de compresión de 7

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

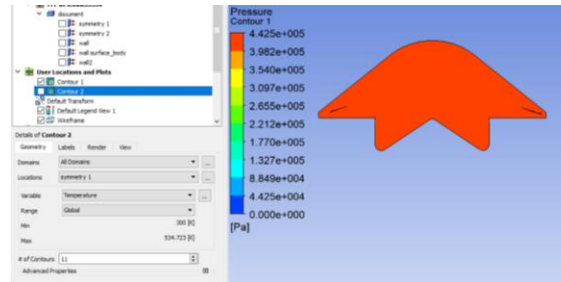


Figura 110. Presión y temperatura cámara 3.2 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 13 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

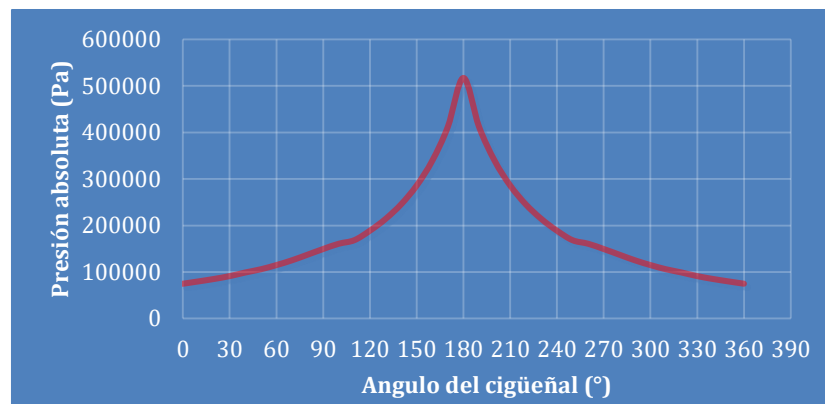


Figura 111. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata hemisférica y supercuadrado. [Autor]

7.14 Cámara de combustión 3.3 (anexo 14)

Carrera de 114 mm y relación de compresión de 6,5

En la siguiente figura se observa la temperatura final y presión final que alcanza la cámara de combustión.

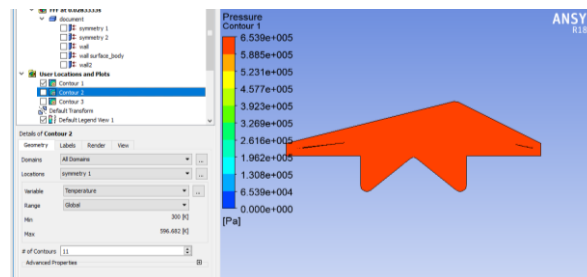


Figura 112. presión y temperatura cámara 3.3 [autor]

Según la simulación de esta cámara y los datos obtenidos que se encuentran en el anexo 14 el siguiente grafico muestra la presión absoluta vs el ángulo de giro del cigüeñal.

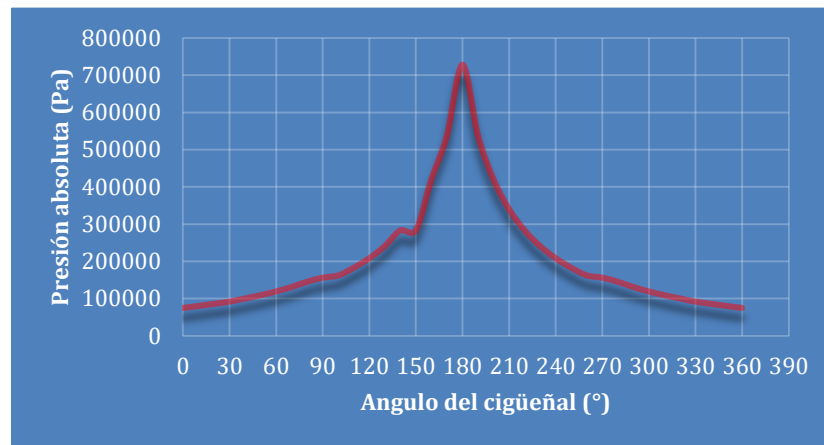


Figura 113. Caracterización curva de presión pistón de perfil cóncavo con inserto, culata con forma de cuña y supercuadrado. [Autor]

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En lo descrito al inicio del procedimiento se hizo referencia a que las tres cámaras con los distintos perfiles y misma culata debían tener una relación de compresión similar para poder evaluar el comportamiento de la geometría y así determinar cual tiene una mayor eficiencia.

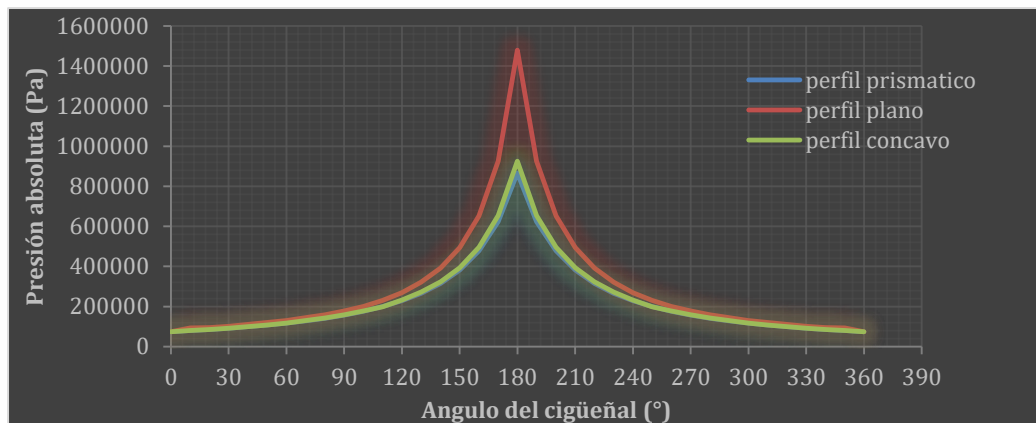


Figura 114. Perfiles de pistón en culata plana

En la gráfica anterior se utilizó una culata plana y una relación de compresión de 8 y se muestra que la presión ejercida por el pistón de perfil plano es mayor que la de los otros dos perfiles que son muy similares entre sí, esto se debe a que la culata es plana y al finalizar tenemos una cámara de combustión cilíndrica y al tener similitud de geometría hace que la compresión sea más uniforme.

Por otra parte, se ve que el pistón de perfil plano podría comprimir aún más el volumen, pero la limitante para esta relación de compresión es que el perfil prismático tiene una carrera corta y el volumen final es muy grande, aunque el perfil cóncavo genera un poco más de presión a medida que realiza su carrera al final su cavidad hace que no genere grandes presiones sino más bien flujos turbulentos por la diferencia de presiones en los distintos puntos.

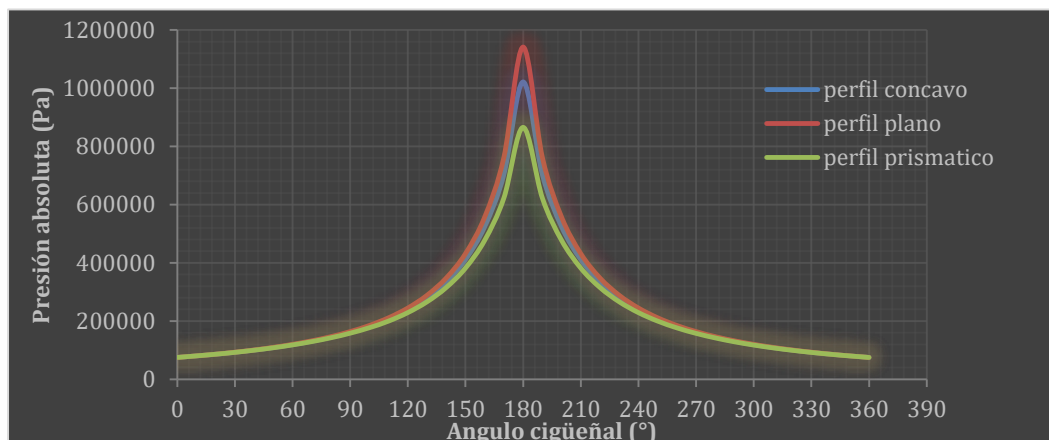


Figura 115. Perfiles de pistón en culata plana con mayor cilindrada

En esta grafica a diferencia de la anterior el perfil cóncavo genera una presión aun mayor que la de perfil prismático y el perfil plano sigue generando la mayor presión de los tres, por lo que se puede decir que el aumentar la altura del cilindro no ayuda a la compresión del perfil prismático, sino que por el contrario favorece a los otros dos perfiles, por esta razón la forma de mejorar la compresión es cambiando la forma de la culata y ver el comportamiento del pistón prismático.

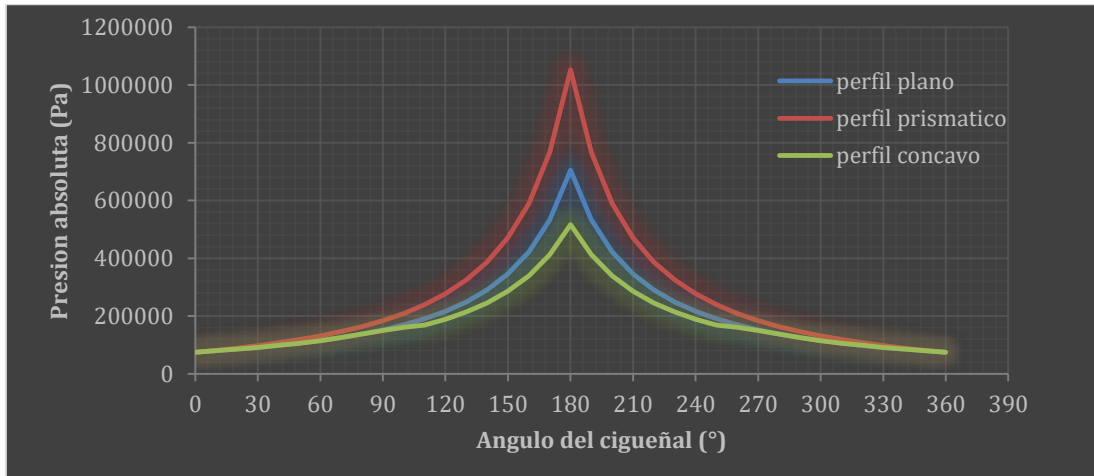


Figura 116. Perfiles de pistón en culata hemisférica

Como era de esperarse la culata hemisférica le permite una mayor carrera al pistón prismático, con esto aunque con una misma relación de compresión genera mayor presión puesto a que sus geometrías son similares y la compresión se hace de manera más uniforme, por el contrario esta vez la geometría hemisférica no ayuda al pistón cóncavo porque tienen geometrías contrarias y por más que suba el pistón cóncavo siempre tendrá mayor volumen al final, en esta ocasión la limitante es para el pistón de perfil plano porque así la carrera sea la misma altura del cilindro, esa forma hemisférica no la lograra comprimir más allá de eso. Esta vez los afectados por la culata hemisférica son el pistón con perfil plano y el cóncavo por lo que se intentara una nueva geometría de culata y obtener resultados alternos.

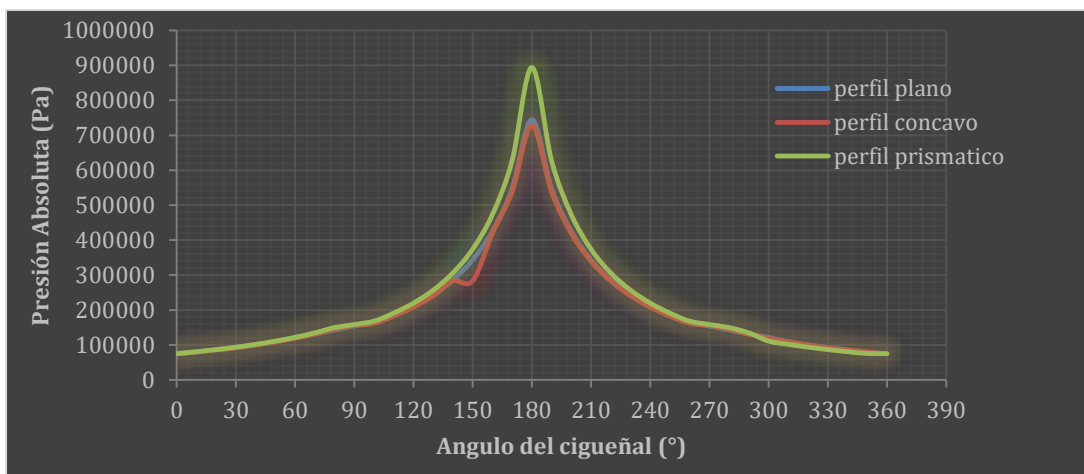


Figura 117. Perfiles de pistón en culata forma de cuña [autor]

Se dice que el perfil cóncavo se utiliza en cámaras turbulentas, que tienen geometría similar en la culata a la de la geometría de cuña, pero los resultados muestran otra cosa, el pistón prismático genera una mayor presión porque su carrera es mayor y este está diseñado para aumentar la relación de compresión.

Aunque se puede observar que el perfil plano y el cóncavo generan presiones similares, pero como en la comparación número dos, si la carrera aumenta de seguro el pistón de perfil plano generaría una mayor presión y por el contrario la cóncava generaría un vacío en medio de la cámara por la diferencia de presiones. Para ver la funcionalidad del perfil cóncavo se debe manejar un estudio de turbulencia que por efectos de este proyecto no se realizaran.

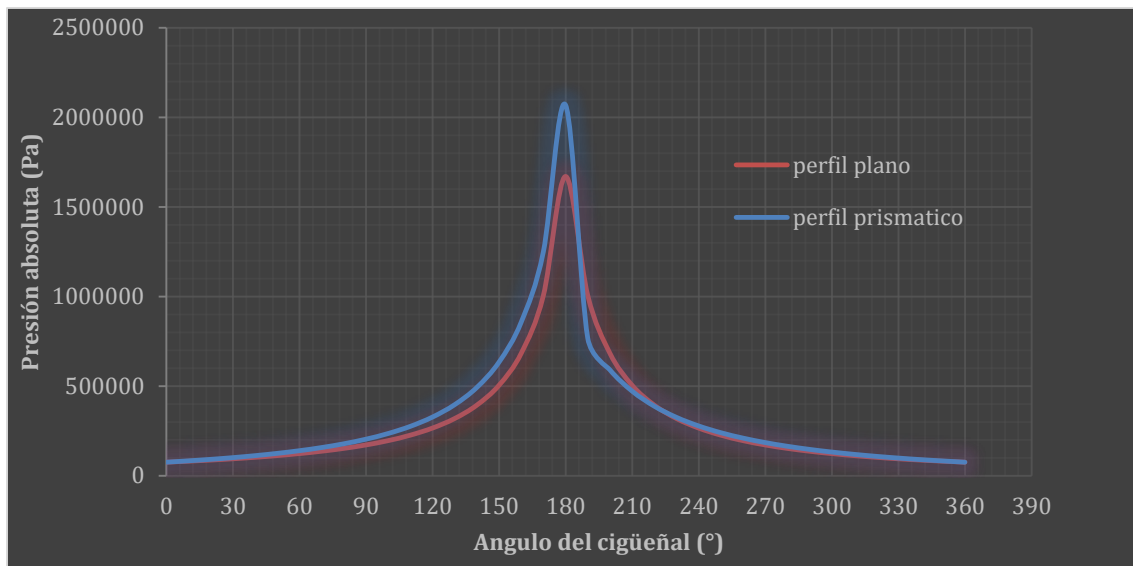


Figura 118. Comparación de cámaras de combustión cilíndrica y hemisférica

Al final se escogieron estas dos geometrías puesto que el pistón prismático genera presiones adecuadas para generar la ignición del diésel dentro de la cámara hemisférica y lo mismo para el caso del pistón de perfil plano con la culata plana. Pero en la gráfica se puede observar que, aunque tengan relaciones de compresión similares el pistón prismático genera mayor presión, esto se debe a que esta cámara por su forma permita una mayor cantidad de fluido dentro y la forma prismática genere puntos de presión altos y por ende una mayor compresión.

8.1 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para la validación de resultados es necesario comparar las presiones y temperaturas obtenidas mediante la simulación y los valores obtenidos mediante el cálculo teórico. El cálculo teórico se realiza en el tiempo de compresión cuando las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, por medio de las ecuaciones 1 y 2. Las tablas 9 a 13 muestran el error relativo porcentual de las temperaturas con respecto a la simulación,

recordando que para la condición inicial de temperatura en el inicio de la compresión es de 291 K.

Tabla 9. comparación calculo teórico de temperatura y simulación para cámaras con culata plana

	Rc	Calculo teórico temperatura (K)	Temperatura experimental (K)	error (%)
CÁMARA 1	8	668,8870521	708	-5,85
CÁMARA 2	8	668,8870521	622,9	6,88
CÁMARA 3	8	668,8870521	644,7	3,62

Tabla 10. Comparación calculo teórico de temperatura y simulación para cámaras con culata plana y mayor cilindrada

	Rc	Calculo teórico temperatura (K)	Temperatura experimental (K)	error (%)
CÁMARA 1.1	8	668,8870521	676	-1,06
CÁMARA 2.1	8	668,8870521	622,9	6,88
CÁMARA 3,1	8	668,8870521	666	0,43

Tabla 11. Comparación calculo teórico de temperatura y para cámaras con culata hemisférica

	Rc	Calculo teórico temperatura (K)	Temperatura experimental (K)	error (%)
CÁMARA 1.2	7	634,0974555	585,5	7,66
CÁMARA 2.2	7	634,0974555	636	-0,30
CÁMARA 3,2	7	634,0974555	534,7	15,68

Tabla 12. Comparación calculo teórico de temperatura y simulación para cámaras con culata en forma de cuña

	Rc	Calculo teórico temperatura (K)	Temperatura experimental (K)	error (%)
CÁMARA 1.3	6,5	615,5766489	594,8	3,38
CÁMARA 2.3	6,5	615,5766489	628,7	-2,13
CÁMARA 3,3	6,5	615,5766489	596,7	3,07

Tabla 13. Comparación calculo teórico de temperatura y simulación para cámaras seleccionadas como eficientes

	Rc	Calculo teórico temperatura (K)	Temperatura experimental (K)	error (%)
CÁMARA 1.4	14,4	846,1781198	762,4	9,90
CÁMARA 2.4	14,8	855,5028892	745,6	12,85

Se puede observar que entre las temperaturas halladas teóricamente y la simulación el error relativo porcentual no supera del 15.68 % para la cámara de combustión 3.2, lo que indica que la simulación presenta valores bastante cercanos a los cálculos teóricos, esta diferencia puede obedecer a que en la simulación los calores específicos varían con la temperatura mientras que en el modelo de gas ideal los calores específicos permanecen constantes.

Tabla 14. Comparación calculo teórico de presión y simulación para cámaras con culata plana

	Rc	Calculo teórico presión (Pa)	Presión experimental (Pa)	error (%)
CÁMARA 1	8	1372198,297	1479350,5	-7,81
CÁMARA 2	8	1372198,297	865876,5	36,90
CÁMARA 3	8	1372198,297	925153,5	32,58

Tabla 15. Comparación calculo teórico de presión y simulación para cámaras con culata plana y mayor culata de cilindro

	Rc	Calculo teórico presión (Pa)	Presión experimental (Pa)	error (%)
CÁMARA 1.1	8	1372198,297	1141550,5	16,81
CÁMARA 2.1	8	1372198,297	865876,5	36,90
CÁMARA 3,1	8	1372198,297	1021201,5	25,58

Tabla 16. Comparación calculo teórico de presión y simulación para cámaras con culata hemisférica

	Rc	Calculo teórico presión (Pa)	Presión experimental (Pa)	error (%)
CÁMARA 1.2	7	1138225,078	704825,5	38,08
CÁMARA 2.2	7	1138225,078	1053193,5	7,47
CÁMARA 3,2	7	1138225,078	517126,5	54,57

Tabla 17. Comparación calculo teórico de presión y simulación para cámaras con culata en forma de cuña

	Rc	Calculo teórico presión (Pa)	Presión experimental (Pa)	error (%)
CÁMARA 1.3	6,5	1026052,525	745196,5	27,37
CÁMARA 2.3	6,5	1026052,525	894533,5	12,82
CÁMARA 3,3	6,5	1026052,525	728547,5	29,00

Tabla 18. Comparación calculo teórico de presión y simulación para cámaras seleccionadas más adecuadas

	Rc	Calculo teórico presión (Pa)	Presión experimental (Pa)	error (%)
CÁMARA 1.4	14,4	3124628,452	1669320,5	46,58
CÁMARA 2.4	14,8	3246813,145	2067590,5	36,32

Las tablas 14 a 18 muestran la comparación de las presiones obtenidas mediante la simulación y el cálculo teórico se puede observar que el error relativo porcentual es mayor que en las temperaturas también afectado por los calores específicos mencionado previamente, por lo que se evidencia que la configuración geométrica sí influye en la presión generada dentro del cilindro, principalmente por los diferentes volúmenes libres que de cada configuración. Por esta razón, la simulación desarrolla en este trabajo solo es satisfactoria para la configuración de culata plana y cilindro con cabeza plana.

9. CONCLUSIONES

El caracterizar las líneas de presión por medio del programa ANSYS es muy útil ya que calcular la presión ejercida o los distintos volúmenes generados dentro son de difícil cálculo, y ya con un mejor manejo de esta herramienta se pueden lograr estudios más detallados en la parte automotriz.

El desarrollo de un paso a paso en la simulación no significa que sea el único procedimiento para poder obtener un resultado adecuado, pero si se compara el resultado del proyecto a la vida real es evidente que no es óptimo el resultado final debido a que no se usó geometrías de un pistón Diésel, sino que se buscó variar la geometría para observar la variación de la presión

El factor que más influye en la variación de la presión según lo observado en la simulación es la geometría del pistón y la forma de la culata, adicional a las condiciones con que trabaja el sistema escogido (cámaras de combustión interna), en este caso las condiciones del aire en Bogotá. La geometría que genera menor presión es la cóncava con inserto esto se debe a que por su cavidad hay una mayor cantidad de aire no comprimido, pero su uso es distinto, el objetivo de este perfil es generar turbulencia y hacer que la combustión se realice lo más rápido posible.

No todas las geometrías de pistón son útiles para las distintas formas de la culata, así que se debe escoger el mejor emparejamiento, en cuanto a la carrera si es aún mayor que el diámetro del cilindro es mejor en cuanto se pueda reducir el volumen dentro del cilindro.

Se puede concluir que la mejor geometría para buscar una buena relación de compresión y por ende una mejor eficiencia es para la cámara de combustión hemisférica junto al pistón prismático, esto se debe a que su geometría es similar y pueden comprimir aún más de forma uniforme, en la cámara cilíndrica también se puede realizar una compresión uniforme pero no la misma cantidad que en la cámara hemisférica.

10. RECOMENDACIONES

Estas simulaciones no son para obtener un resultado real de presión en las cámaras a combustión interna Diésel, sino que se busca obtener las curvas de presión generadas dentro de la cámara según las variaciones de la geometría en el pistón y culata.

Haber utilizado cualquier herramienta, componente o tener conocimiento del porque se usa la herramienta o software CAE ANSYS. Para realizar una simulación adecuada es necesario tener conocimientos posteriores en cuanto a realizar mallados para geometrías no simétricas.

Identificar el papel que desempeña cada una de las geometrías que permiten el funcionamiento de la compresión en un motor de combustión interna diésel.

Si se quiere obtener una simulación aproximada a la realidad se debe modificar factores como valores de calores específicos variables, aplicarle cada uno de los procesos (4 tiempos) del ciclo Diésel.

11. REFERENCIAS

- [1] André V. Bueno, José A. Velásquez and Luiz F. Milanez. *Applied Measurement Systems*. rijeka, croacia: intech. (2012).
- [2] ROWLAND S. BENSON, N. D. WHITEHOUSE. *internal combustion engines* (Vol. 1). inglaterra: British Library Cataloguing in Publication Data. (1979).
- [3] STONE Richard. *Internal Combustion Engines (third edition)*. Department of Engineering Science University of Oxford Inglaterra: MACMILLAN PRESS LTD.(1999)
- [4] Willard W. Pulkrabek. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. University of Wisconsin- Platteville: Prentice Hall.
- [5] Gomez José Luis. “Camaras de Combustion Diesel”. Universidad Politécnica Salesiana: ingeniería mecánica automotriz. (2008)
- [6] Edgar J. Kates, William E. Luck. *Motores diesel y de gas de alta compresión*. Barcelona: editorial reverté. (2003). Disponible online: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642016000500014&script=sci_arttext&lng=pt. Consultado: [29 de abril- 2018].
- [7] Milton O. García, Carlos G. Ordóñez, Antonio J. Torregrosa. “Análisis de Ruido en el Diseño y Construcción de una Cámara Semianecoica para Diagnóstico de Motores de Combustión Interna”. Inf. tecnol. vol.27 no.5 La Serena (2016).
- [8] R.L. Graciela. (28 de junio de 2015) sistemas de combustion interna diesel. Slideshare [online]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/rosagro13/expo-sistemadecombustioninternaauto-guardado>
- [9] Aguilar, Manuel Alfredo. Godoy, Alfredo Sebastián. Gómez, Néstor Fabián. “*Cámaras de combustión y sistemas de distribución de la carga*”. Universidad Nacional del Nordeste Cátedra: máquinas térmicas. Facultad de Ingeniería. (2001).
- [10] F. Payri, J. M. Desantes. “motores de combustión interna alternativos”. Universidad politecnica valencia. Barcelona: Editorial reverté. (2011)
- [11] Payri, F.; Olmeda, P.; Guardiola, C. & Martín, J. (2011) *Pressure in Diesel Engines Combustion Analysis. Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2869-2876. Londres. (2011)
- [12] E. Ralbovsky (1999) motores Diésel. *Generalidades de los motores Diésel capítulo 1,2*. Mostales-madrid (1999).
- [13] Disponible online: <https://es.slideshare.net/rosagro13/expo-sistemadecombustioninternaauto-guardado>. Consultado: [29 de mayo- 2018].

e[14] Calculo del motor- diseño de motores. disponible en: <https://jasf1961.wordpress.com/category/calculo-del-motor-engine-design/> [18 de junio-2018]

[15] Senati. Monoblock función y estructura. 2013. Disponible en: <https://es.slideshare.net/roylizarbeespino/componentes-del-monoblock-24886885> [2 junio 2018]

[16] Worldmeteo-2018. Meteorología en tiempo real. Disponible online en: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/bogota/tiempo-101322/> [2 de junio-2018]

[17] Efraín A. Puerto. Presión atmosférica. Febrero 2018. Disponible online: <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/> [2 de junio- 2018]

12. ANEXOS

Anexo 1. Cámara de combustión interna 1

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión Absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1130973,336	1,130973336	1
10	316,8	18367,1	93027,6	2,903122879	0,857171053	1121278,96	1,12127896	1,00864582
20	322,9	19562,8	94223,3	5,725111714	3,386656077	1092671,16	1,092671159	1,035053709
30	328,6	26541,7	101202,2	8,385537054	7,465011844	1046546,04	1,046546043	1,080672316
40	336,1	36883,8	111544,3	10,80573802	12,89528318	985131,12	0,985131122	1,148043454
50	344,3	45218,9	119879,4	12,91054988	19,42003086	911337,97	0,911337965	1,241003206
60	353	55225,9	129886,4	14,63087024	26,73901642	828562,19	0,82856219	1,364983039
70	362,6	68938	143598,5	15,9070163	34,53045458	740443,10	0,740443102	1,527427743
80	372,9	84034,4	158694,9	16,69252639	42,47389553	650604,90	0,650604903	1,738341244
90	384,1	102508	177168,5	16,9577633	50,27199507	562410,48	0,562410476	2,010939311
100	397,9	126290	200950,5	16,69252837	57,6681123	478762,36	0,478762362	2,362285394
110	414,2	156292	230952,5	15,90702018	64,45721942	401979,37	0,401979371	2,813510884
120	432,9	194954	269614,5	14,63087588	70,48901947	333761,32	0,333761321	3,388569211
130	455,1	246199	320859,5	12,91055709	75,66395012	275234,24	0,275234235	4,109130303
140	481,9	316764	391424,5	10,80574653	79,92417529	227052,22	0,227052224	4,981115419
150	515,5	418995	493655,5	8,385546615	83,24223754	189525,83	0,189525825	5,967383788
160	559,2	577631	652291,5	5,725122029	85,60976247	162749,75	0,162749749	6,949155618
170	618	850720	925380,5	2,903133649	87,02785051	146711,55	0,146711552	7,708822664
180	708,1	1404690	1479350,5	1,09223E-05	87,5	141371,67	0,141371667	8
190	618	850720	925380,5	-2,903112109	87,02784847	146711,55	0,146711552	7,708822664
200	559,2	577631	652291,5	-5,725101399	85,60975868	162749,75	0,162749749	6,949155618
210	515,5	418995	493655,5	-8,385527492	83,24223259	189525,83	0,189525825	5,967383788
220	481,9	316764	391424,5	-10,8057295	79,92416995	227052,22	0,227052224	4,981115419
230	455,1	246199	320859,5	-12,91054268	75,66394529	275234,24	0,275234235	4,109130303
240	432,9	194954	269614,5	-14,63086459	70,48901607	333761,32	0,333761321	3,388569211
250	414,2	156292	230952,5	-15,90701241	64,45721825	401979,37	0,401979371	2,813510884
260	397,9	126290	200950,5	-16,69252441	57,66811394	478762,36	0,478762362	2,362285394
270	384,1	102508	177168,5	-16,9577633	50,27199976	562410,48	0,562410476	2,010939311
280	372,9	84034,4	158694,9	-16,69253035	42,47390312	650604,90	0,650604903	1,738341244
290	362,6	68938	143598,5	-15,90702406	34,53046456	740443,10	0,740443102	1,527427743
300	353	55225,9	129886,4	-14,63088152	26,73902794	828562,19	0,82856219	1,364983039
310	344,3	45218,9	119879,4	-12,91056429	19,42004288	911337,97	0,911337965	1,241003206
320	336,1	36883,8	111544,3	-10,80575505	12,89529455	985131,12	0,985131122	1,148043454
330	328,6	26541,7	101202,2	-8,385556176	7,465021489	1046546,04	1,046546043	1,080672316
340	322,9	19562,8	94223,3	-5,725132345	3,386663069	1092671,16	1,092671159	1,035053709
350	316,8	18367,1	93027,6	-2,90314442	0,857174723	1121278,96	1,12127896	1,00864582
360	300	0	74660,5	-2,18446E-05	1,11605E-11	1130973,336	1,130973336	1

Anexo 2. Cámara de combustión interna 1.1

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1357168,003	1,357168003	1
10	306,1	5380,34	80040,84	3,484404358	1,074886145	1345011,33	1,345011328	1,009038344
20	312,5	11273	85933,5	6,875194541	4,244748181	1309161,03	1,309161033	1,036670027
30	319,5	18039,3	92699,8	10,07865619	9,348400101	1251440,09	1,251440091	1,084484997
40	327,1	25776,6	100437,1	13,0014448	16,1280074	1174764,54	1,17476454	1,155268105
50	335,4	34689,3	109349,8	15,55215969	24,24563402	1082956,35	1,082956347	1,253206564
60	344,4	45017,9	119678,4	17,6444241	33,30660799	980479,15	0,980479148	1,384188543
70	354,3	57122,3	131782,8	19,20156167	42,88883024	872106,77	0,872106769	1,556194782
80	365,3	71482,3	146142,8	20,16242755	52,57558093	762552,20	0,762552202	1,779770618
90	377,7	88771,2	163431,7	20,48731511	61,98754331	656105,42	0,656105417	2,06852126
100	391,5	109918	184578,5	20,16242998	70,80864146	556341,15	0,556341149	2,439452854
110	407,3	136254	210914,5	19,20156642	78,80094879	465950,28	0,465950284	2,912688435
120	425,6	169776	244436,5	17,64443098	85,80661263	386718,09	0,386718094	3,509450488
130	447	213613	288273,5	15,55216844	91,73833822	319631,86	0,319631859	4,24603482
140	472,6	272924	347584,5	13,0014551	96,562679	265069,85	0,265069851	5,120039102
150	504	356781	431441,5	10,07866772	100,2810718	223015,82	0,22301582	6,085523465
160	543,9	482579	557239,5	6,875206947	102,9124765	193255,33	0,193255335	7,022667739
170	597,8	687853	762513,5	3,484417289	104,4797018	175530,43	0,175530434	7,731810222
180	676,5	1066890	1141550,5	1,31068E-05	105	169646,00	0,169646	8,00
190	597,8	687853	762513,5	-3,484391426	104,4796987	175530,43	0,175530434	7,731810222
200	543,9	482579	557239,5	-6,875182136	102,9124707	193255,33	0,193255335	7,022667739
210	504	356781	431441,5	-10,07864466	100,2810641	223015,82	0,22301582	6,085523465
220	472,6	272924	347584,5	-13,00143449	96,56267047	265069,85	0,265069851	5,120039102
230	447	213613	288273,5	-15,55215095	91,73833025	319631,86	0,319631859	4,24603482
240	425,6	169776	244436,5	-17,64441723	85,80660659	386718,09	0,386718094	3,509450488
250	407,3	136254	210914,5	-19,20155693	78,8009459	465950,28	0,465950284	2,912688435
260	391,5	109918	184578,5	-20,16242513	70,80864263	556341,15	0,556341149	2,439452854
270	377,7	88771,2	163431,7	-20,48731511	61,98754894	656105,42	0,656105417	2,06852126
280	365,3	71482,3	146142,8	-20,1624324	52,57559084	762552,20	0,762552202	1,779770618
290	354,3	57122,3	131782,8	-19,20157117	42,8888437	872106,77	0,872106769	1,556194782
300	344,4	45017,9	119678,4	-17,64443786	33,30662377	980479,15	0,980479148	1,384188543
310	335,4	34689,3	109349,8	-15,55217718	24,24565061	1082956,35	1,082956347	1,253206564
320	327,1	25776,6	100437,1	-13,00146541	16,12802316	1174764,54	1,17476454	1,155268105
330	319,5	18039,3	92699,8	-10,07867924	9,348413479	1251440,09	1,251440091	1,084484997
340	312,5	11273	85933,5	-6,875219353	4,244757881	1309161,03	1,309161033	1,036670027
350	306,1	5380,34	80040,84	-3,484430221	1,074891237	1345011,33	1,345011328	1,009038344
360	300	0	74660,5	-2,62136E-05	1,60072E-11	1357168,003	1,357168003	1

Anexo 3. Cámara de combustión interna 1.2

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1524061,52	1,52406152	1
10	305,9	5174,26	79834,76	3,833341839	1,212942285	1510343,47	1,510343466	1,009082738
20	311,6	10459,9	85120,4	7,566552619	4,788864249	1469900,74	1,469900742	1,036846554
30	318,1	16621,8	91282,3	11,0987153	10,5424855	1404828,82	1,40482882	1,084873472
40	325	23569,5	98230	14,32803863	18,17672146	1318487,65	1,318487647	1,155916419
50	332,4	31483	106143,5	17,15316396	27,30104954	1215293,93	1,215293929	1,254068241
60	340,6	40562,8	115223,3	19,47647168	37,45822557	1100418,98	1,100418977	1,38498295
70	349,4	51063,6	125724,1	21,20965213	48,15890502	979397,15	0,979397145	1,556122077
80	359,1	63322,6	137983,1	22,28110142	58,92159169	857674,03	0,857674029	1,776970584
90	369,9	77787,1	152447,6	22,64374026	69,31251217	740155,49	0,740155489	2,059109934
100	381,8	95064,1	169724,6	22,28110413	78,97795856	630841,87	0,630841867	2,415916886
110	392,2	115991	190651,5	21,20965742	87,66223594	532625,01	0,532625006	2,861415636
120	410,5	141722	216382,5	19,47647933	95,20823136	447281,81	0,44728181	3,407385427
130	427,9	174176	248836,5	17,15317366	101,5430249	375636,98	0,375636984	4,057272275
140	448,2	215907	290567,5	14,32805003	106,6548609	317823,48	0,317823481	4,795308115
150	472,2	271282	345942,5	11,09872802	110,568425	273562,12	0,273562115	5,571171724
160	501,3	347622	422282,5	7,566566286	113,3233658	242404,47	0,242404469	6,287266595
170	537,7	458275	532935,5	3,833356069	114,9582398	223914,48	0,223914481	6,806444655
180	585,5	630165	704825,5	1,44175E-05	115,5	217787,32	0,217787317	7,00
190	537,7	458275	532935,5	-3,833327609	114,9582359	223914,52	0,223914525	6,806443312
200	501,3	347622	422282,5	-7,566538952	113,3233585	242404,55	0,242404552	6,287264452
210	472,2	271282	345942,5	-11,09870258	110,5684153	273562,23	0,273562225	5,571169483
220	448,2	215907	290567,5	-14,32802723	106,6548501	317823,60	0,317823604	4,795306274
230	427,9	174176	248836,5	-17,15315426	101,5430147	375637,10	0,3756371	4,057271025
240	410,5	141722	216382,5	-19,47646403	95,20822337	447281,90	0,4472819	3,407384738
250	392,2	115991	190651,5	-21,20964684	87,66223173	532625,05	0,532625053	2,861415381
260	381,8	95064,1	169724,6	-22,28109872	78,97795928	630841,86	0,630841859	2,415916918
270	369,9	77787,1	152447,6	-22,64374026	69,31251836	740155,42	0,740155419	2,059110129
280	359,1	63322,6	137983,1	-22,28110683	58,92160316	857673,90	0,857673899	1,776970853
290	349,4	51063,6	125724,1	-21,20966271	48,15892086	979396,97	0,979396966	1,556122362
300	340,6	40562,8	115223,3	-19,47648697	37,45824428	1100418,77	1,100418765	1,384983216
310	332,4	31483	106143,5	-17,15318336	27,30106926	1215293,71	1,215293706	1,254068471
320	325	23569,5	98230	-14,32806143	18,1767402	1318487,43	1,318487435	1,155916605
330	318,1	16621,8	91282,3	-11,09874075	10,54250142	1404828,64	1,40482864	1,084873611
340	311,6	10459,9	85120,4	-7,566579953	4,788875789	1469900,61	1,469900612	1,036846647
350	305,9	5174,26	79834,76	-3,8333703	1,212948341	1510343,40	1,510343398	1,009082784
360	300	0	74660,5	-2,88349E-05	1,93349E-11	1524061,52	1,52406152	1

Anexo 4. Cámara de combustión interna 1.3

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón(°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1485806,353	1,485806353	1
10	306,2	5407,45	80067,95	3,690427154	1,155730955	1472735,34	1,472735344	1,008875328
20	312,5	11255,6	85916,1	7,283296847	4,563373687	1434195,81	1,434195814	1,0359857
30	319,5	17996,8	92657,3	10,68056503	10,04762938	1372170,34	1,372170344	1,082814797
40	327	25694,8	100355,3	13,78386095	17,32771368	1289834,53	1,289834532	1,151935629
50	335,2	34549,7	109210,2	16,49592179	26,03501584	1191357,27	1,191357266	1,247154313
60	344,2	47052,6	121713,1	18,72381732	35,73846086	1081613,89	1,08161389	1,373693854
70	354,1	56788	131448,5	20,38414694	45,97691872	965819,66	0,965819662	1,53838901
80	367,3	68020,3	142680,8	21,40976058	56,29611307	849112,33	0,849112325	1,749834868
90	378,8	79621,3	154281,8	21,75673821	66,28510304	736139,51	0,736139512	2,01837604
100	386,617	88142,3	162802,8	21,40976317	75,60579257	630725,00	0,630724999	2,355711849
110	391,1	109053	183713,5	20,384152	84,00956266	535680,60	0,5356806	2,773679602
120	406,8	135050	209710,5	18,72382465	91,33846615	452792,66	0,452792655	3,28142768
130	425	168072	242732,5	16,4959311	97,51300394	382960,28	0,38296028	3,879792325
140	446,3	211148	285808,5	13,7838719	102,5118615	326424,53	0,326424533	4,551760675
150	471,7	269247	343907,5	10,68057727	106,3496592	283020,06	0,283020064	5,249826919
160	502,9	351050	425710,5	7,283309997	109,0571967	252398,54	0,252398538	5,886747075
170	542,4	473065	547725,5	3,690440853	110,6663549	234199,39	0,234199387	6,344194034
180	594,8	670536	745196,5	1,38807E-05	111,2	228164,00	0,228164004	6,51
190	542,4	473065	547725,5	-3,690413456	110,6663514	234199,43	0,234199427	6,344192936
200	502,9	351050	425710,5	-7,283283697	109,05719	252398,61	0,252398613	5,88674531
210	471,7	269247	343907,5	-10,6805528	106,3496503	283020,17	0,283020165	5,249825054
220	446,3	211148	285808,5	-13,78385	102,5118517	326424,64	0,326424644	4,551759125
230	425	168072	242732,5	-16,49591249	97,51299467	382960,38	0,382960384	3,879791263
240	406,8	135050	209710,5	-18,72380999	91,338459	452792,74	0,452792736	3,281427094
250	391,1	109053	183713,5	-20,38414188	84,00955902	535680,64	0,535680641	2,773679389
260	386,617	88142,3	162802,8	-21,40975799	75,60579349	630724,99	0,630724988	2,355711888
270	378,8	79621,3	154281,8	-21,75673821	66,285109	736139,44	0,736139445	2,018376225
280	367,3	68020,3	142680,8	-21,40976576	56,29612388	849112,20	0,849112203	1,74983512
290	354,1	56788	131448,5	-20,38415707	45,97693356	965819,49	0,965819494	1,538389277
300	344,2	47052,6	121713,1	-18,72383197	35,73847833	1081613,69	1,081613693	1,373694105
310	335,2	34549,7	109210,2	-16,4959404	26,03503424	1191357,06	1,191357058	1,247154531
320	327	25694,8	100355,3	-13,78388285	17,32773117	1289834,33	1,289834334	1,151935806
330	319,5	17996,8	92657,3	-10,6805895	10,04764423	1372170,18	1,372170176	1,08281493
340	312,5	11255,6	85916,1	-7,283323146	4,563384454	1434195,69	1,434195692	1,035985787
350	306,2	5407,45	80067,95	-3,690454551	1,155736607	1472735,28	1,47273528	1,008875372
360	300	0	74660,5	-2,77614E-05	1,79236E-11	1485806,35	1,485806353	1

Anexo 5. Cámara de combustión interna 1.4

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión Absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1470265,337	1,470265337	1
10	306,4	5628,52	80289,02	4,016174634	1,287483167	1455704,25	1,455704245	1,010002781
20	313,1	11817,8	86478,3	7,929128809	5,082677375	1412781,61	1,412781611	1,040688331
30	320	18949	93609,5	11,63443588	11,18732956	1343739,62	1,343739623	1,094159398
40	328,5	27168	101828,5	15,02601677	19,28308016	1252178,84	1,252178842	1,174165613
50	337,3	36718,6	111379,1	17,99724187	28,95064006	1142841,32	1,142841317	1,286499985
60	346,9	47893,4	122553,9	20,44431451	39,698182	1021289,48	1,021289484	1,439616642
70	357,6	61099,8	135760,3	22,27233128	50,9988517	893481,92	0,893481922	1,645545701
80	369,5	76941,9	151602,4	23,40361369	62,3348471	765274,84	0,765274837	1,921225246
90	382,9	96259,2	170919,7	23,78672732	73,24202915	641917,52	0,641917516	2,290427195
100	398,2	120247	194907,5	23,40361655	83,34627922	527641,14	0,527641142	2,78648729
110	415,8	150672	225332,5	22,27233686	92,3832939	425434,92	0,425434916	3,455911309
120	436,4	190278	264938,5	20,44432257	100,1981884	337050,54	0,337050542	4,362150929
130	461	243549	318209,5	17,99725208	106,727948	263200,70	0,263200703	5,58609958
140	491,1	318280	392940,5	15,02602875	111,9744648	203864,00	0,203863997	7,211991113
150	529	429188	503848,5	11,63444924	115,9764094	158603,07	0,158603071	9,27009377
160	579,4	607388	682048,5	7,929143139	118,7854888	126833,13	0,126833131	11,59212361
170	652	930252	1004912,5	4,016189545	120,4492235	108016,74	0,108016735	13,61145873
180	762,8	1594660	1669320,5	1,5104E-05	121	101787,60	0,1017876	14,44444444
190	652	930252	1004912,5	-4,016159722	120,4492192	108016,74	0,108016735	13,61145873
200	579,4	607388	682048,5	-7,929114479	118,7854807	126833,13	0,126833131	11,59212361
210	529	429188	503848,5	-11,63442253	115,9763985	158603,07	0,158603071	9,27009377
220	491,1	318280	392940,5	-15,02600479	111,9744527	203864,00	0,203863997	7,211991113
230	461	243549	318209,5	-17,99723166	106,7279364	263200,70	0,263200703	5,58609958
240	436,4	190278	264938,5	-20,44430645	100,1981793	337050,54	0,337050542	4,362150929
250	415,8	150672	225332,5	-22,27232569	92,38328892	425434,92	0,425434916	3,455911309
260	398,2	120247	194907,5	-23,40361083	83,34627966	527641,14	0,527641142	2,78648729
270	382,9	96259,2	170919,7	-23,78672732	73,24203563	641917,52	0,641917516	2,290427195
280	369,5	76941,9	151602,4	-23,40361941	62,33485943	765274,84	0,765274837	1,921225246
290	357,6	61099,8	135760,3	-22,27234244	50,99886887	893481,92	0,893481922	1,645545701
300	346,9	47893,4	122553,9	-20,44433063	39,69820236	1021289,48	1,021289484	1,439616642
310	337,3	36718,6	111379,1	-17,99726229	28,95066154	1142841,32	1,142841317	1,286499985
320	328,5	27168	101828,5	-15,02604073	19,28310059	1252178,84	1,252178842	1,174165613
330	320	18949	93609,5	-11,63446259	11,1873469	1343739,62	1,343739623	1,094159398
340	313,1	11817,8	86478,3	-7,929157469	5,082689943	1412781,61	1,412781611	1,040688331
350	306,4	5628,52	80289,02	-4,016204456	1,287489761	1455704,25	1,455704245	1,010002781
360	300	0	74660,5	-3,0208E-05	2,11993E-11	1470265,337	1,470265337	1

Anexo 6. Cámara de combustión interna 2

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1078744,359	1,078744359	1
10	305,9	5156,43	79816,93	2,768974562	0,80910601	1069593,59	1,069593586	1,008555374
20	312	10814,8	85475,3	5,459952418	3,197184661	1042585,05	1,042585053	1,034682356
30	318,7	17255,7	91916,2	7,995768965	7,049008162	999021,96	0,999021956	1,079800451
40	326	24572,2	99232,7	10,30123847	12,18078906	940982,88	0,940982882	1,146401682
50	333,8	32926,2	107586,7	12,30487584	18,35235614	871184,10	0,871184104	1,238250736
60	342,466	42558,8	117219,3	13,94133213	25,28355927	792794,05	0,792794045	1,360686758
70	351,6	53780,2	128440,7	15,15448281	32,6738265	709212,09	0,709212093	1,521046199
80	362	66989,5	141650	15,90085098	40,2230743	623832,11	0,623832114	1,72922223
90	373,3	82720,8	157381,3	16,15280442	47,65152319	539818,34	0,539818337	1,998347007
100	386	101710	176370,5	15,90085286	54,71575231	459923,79	0,45992379	2,34548502
110	400,5	125000	199660,5	15,1544865	61,21882972	386375,72	0,386375718	2,791956917
120	417,1	154122	228782,5	13,94133749	67,01356201	320838,84	0,320838841	3,362262361
130	436,3	191386	266046,5	12,3048827	71,9994131	264450,19	0,264450195	4,079196693
140	458,9	240429	315089,5	10,30124658	76,11486128	217905,57	0,217905573	4,950512941
150	486,2	307322	381982,5	7,995778076	79,32749093	181571,59	0,181571588	5,941151748
160	520	402876	477536,5	5,459962253	81,62393265	155599,44	0,155599445	6,932829101
170	563,1	548341	623001,5	2,768984833	83,00116203	140023,35	0,140023348	7,704032054
180	622,9	791216	865876,5	1,0418E-05	83,46	134834,01	0,134834013	8
190	563,1	548341	623001,5	-2,76896429	83,00116021	140023,37	0,140023368	7,704030921
200	520	402876	477536,5	-5,459942584	81,62392928	155599,48	0,155599483	6,932827403
210	486,2	307322	381982,5	-7,995759855	79,32748653	181571,64	0,181571638	5,94115012
220	458,9	240429	315089,5	-10,30123036	76,11485656	217905,63	0,217905626	4,950511728
230	436,3	191386	266046,5	-12,30486899	71,99940888	264450,24	0,264450242	4,079195956
240	417,1	154122	228782,5	-13,94132676	67,01355911	320838,87	0,320838874	3,362262017
250	400,5	125000	199660,5	-15,15447912	61,21882887	386375,73	0,386375728	2,791956848
260	386	101710	176370,5	-15,9008491	54,71575402	459923,77	0,45992377	2,345485119
270	373,3	82720,8	157381,3	-16,15280442	47,65152766	539818,29	0,539818287	1,998347194
280	362	66989,5	141650	-15,90085474	40,2230814	623832,03	0,623832033	1,729222453
290	351,6	53780,2	128440,7	-15,15449019	32,67383575	709211,99	0,709211989	1,521046424
300	342,466	42558,8	117219,3	-13,94134286	25,28356991	792793,92	0,792793925	1,360686964
310	333,8	32926,2	107586,7	-12,30488955	18,35236721	871183,98	0,871183979	1,238250914
320	326	24572,2	99232,7	-10,30125469	12,18079953	940982,76	0,940982764	1,146401826
330	318,7	17255,7	91916,2	-7,995787187	7,049017034	999021,86	0,999021856	1,07980056
340	312	10814,8	85475,3	-5,459972087	3,197191091	1042584,98	1,04258498	1,034682428
350	305,9	5156,43	79816,93	-2,768995105	0,809109385	1069593,55	1,069593547	1,00855541
360	300	0	74660,5	-2,0836E-05	1,01663E-11	1078744,36	1,078744359	1

Anexo 7. Cámara de combustión interna 2.1

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1304939,026	1,304939026	1
10	306,1	5359,58	80020,08	3,351510527	1,023759217	1293360,58	1,293360582	1,008952216
20	312,3	11032,6	85693,1	6,61208993	4,043248908	1259210,96	1,259210959	1,036314858
30	319	17469	92129,5	9,69092781	8,90619652	1204212,32	1,204212318	1,083645306
40	326,2	24846,7	99507,2	12,49797593	15,36920722	1131117,39	1,13111739	1,153672499
50	334,1	33308,4	107968,9	14,94558627	23,11354634	1043530,98	1,04353098	1,250503388
60	342,7	43076,1	117736,6	16,95148482	31,76720219	945660,44	0,94566044	1,37992346
70	352,2	54448,3	129108,8	18,44312573	40,93225777	842006,10	0,842006105	1,549797583
80	362,4	67636,7	142297,2	19,36299821	50,21521977	737018,28	0,73701828	1,770565346
90	373,8	83371,3	158031,8	19,67391899	59,25641443	634764,78	0,634764779	2,055783606
100	386,4	102114	176774,5	19,36300053	67,75368743	538662,89	0,538662887	2,422552319
110	400,5	125004	199664,5	18,44313027	75,47629544	451322,25	0,45132225	2,8913687
120	417,1	154122	228782,5	16,95149141	82,26720643	374518,86	0,374518857	3,484307937
130	436,3	191386	266046,5	14,94559465	88,03509966	309285,52	0,309285522	4,21920501
140	458,9	240429	315089,5	12,49798582	92,73970062	256077,74	0,25607774	5,095870595
150	486,2	307322	381982,5	9,690938886	96,37476628	214966,12	0,214966117	6,070440523
160	520	402876	477536,5	6,612101857	98,95220648	185815,96	0,185815955	7,02275014
170	563,1	548341	623001,5	3,351522964	100,4893438	168431,34	0,168431343	7,747602114
180	622,9	791216	865876,5	1,26075E-05	101	162655,96	0,162655957	8,0
190	563,1	548341	623001,5	-3,351498089	100,4893409	168431,38	0,168431375	7,747600623
200	520	402876	477536,5	-6,612078004	98,95220114	185816,02	0,185816016	7,022747857
210	486,2	307322	381982,5	-9,690916733	96,37475922	214966,20	0,214966197	6,070438269
220	458,9	240429	315089,5	-12,49796604	92,73969289	256077,83	0,256077828	5,095868855
230	436,3	191386	266046,5	-14,94557788	88,03509248	309285,60	0,309285604	4,219203902
240	417,1	154122	228782,5	-16,95147823	82,26720106	374518,92	0,374518918	3,484307372
250	400,5	125000	199660,5	-18,44312118	75,476293	451322,28	0,451322277	2,891368523
260	386	101710	176370,5	-19,36299589	67,75368873	538662,87	0,538662872	2,422552385
270	373,3	82720,8	157381,3	-19,67391899	59,25641984	634764,72	0,634764718	2,055783804
280	362	66989,5	141650	-19,36300285	50,21522913	737018,17	0,737018174	1,770565601
290	351,6	53780,2	128440,7	-18,44313482	40,93227038	842005,96	0,842005962	1,549797845
300	342,466	42558,8	117219,3	-16,951498	31,76721693	945660,27	0,945660273	1,379923703
310	333,8	32926,2	107586,7	-14,94560304	23,11356182	1043530,80	1,043530805	1,250503598
320	326	24572,2	99232,7	-12,49799571	15,36922191	1131117,22	1,131117224	1,153672668
330	318,7	17255,7	91916,2	-9,690949963	8,906208989	1204212,18	1,204212177	1,083645433
340	312	10814,8	85475,3	-6,612113783	4,04325795	1259210,86	1,259210857	1,036314942
350	305,9	5156,43	79816,93	-3,351535401	1,023763964	1293360,53	1,293360529	1,008952258
360	300	0	74660,5	-2,52149E-05	1,48133E-11	1304939,03	1,304939026	1

Anexo 8. Cámara de combustión interna 2.2

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1471832,54	1,47183254	1
10	305,8	6921,78	81582,28	3,717014165	1,166304112	1458641,95	1,458641951	1,009043061
20	311,9	14448	89108,5	7,335981835	4,605045545	1419750,70	1,419750703	1,03668379
30	318,5	23053	97713,5	10,75831617	10,13907989	1357162,25	1,35716225	1,084492691
40	325,6	32797,6	107458,1	13,88500579	17,48461327	1274086,23	1,274086226	1,155206382
50	333,3	43902,2	118562,7	16,61802766	26,26899739	1174737,18	1,174737184	1,252903679
60	341,6	56665,8	131326,3	18,8635882	36,05634599	1064044,88	1,064044881	1,383242912
70	350,8	71483,1	146143,6	20,53738921	46,38035203	947283,13	0,947283125	1,553740904
80	360,8	88868,5	163529	21,57147064	56,78174968	829646,09	0,829646091	1,774048664
90	372	109502	184162,5	21,92134006	66,84540784	715828,80	0,715828801	2,056123668
100	384,5	134319	208979,5	21,57147325	76,23034776	609687,63	0,609687633	2,414076423
110	398,6	164607	239267,5	20,53739432	84,68661215	514049,54	0,514049537	2,863211486
120	414,6	202264	276924,5	18,86359559	92,05635137	430699,75	0,430699752	3,417305289
130	433,1	250107	324767,5	16,61803704	98,26121567	360524,39	0,360524391	4,082477015
140	454,6	312520	387180,5	13,88501682	103,2815968	303745,22	0,30374522	4,845615485
150	480,1	396696	471356,5	10,7583285	107,1339301	260176,36	0,260176356	5,657057238
160	511,2	515262	589922,5	7,335995081	109,8506227	227761,85	0,22776185	6,462155712
170	551,2	692160	766820,5	3,717027963	111,4647743	211195,70	0,2111957	6,969045961
180	636	978533	1053193,5	1,39806E-05	112	210261,80	0,2102618	7,00
190	551,2	692160	766820,5	-3,717000368	111,4647707	211195,70	0,211195705	6,969045812
200	511,2	515262	589922,5	-7,335968589	109,8506159	229451,36	0,229451365	6,414573047
210	480,1	396696	471356,5	-10,75830385	107,1339211	260176,46	0,260176459	5,657055014
220	454,6	312520	387180,5	-13,88499476	103,2815868	303745,33	0,303745333	4,84561368
230	433,1	250107	324767,5	-16,61801828	98,26120623	360524,50	0,360524498	4,082475805
240	414,6	202264	276924,5	-18,86358081	92,05634406	430699,83	0,430699835	3,417304633
250	398,6	164607	239267,5	-20,5373841	84,68660841	514049,58	0,51404958	2,863211251
260	384,5	134319	208979,5	-21,57146803	76,23034865	609687,62	0,609687623	2,414076463
270	372	109502	184162,5	-21,92134006	66,84541384	715828,73	0,715828733	2,056123863
280	360,8	88868,5	163529	-21,57147586	56,78176062	829645,97	0,829645968	1,774048928
290	350,8	71483,1	146143,6	-20,53739942	46,38036705	947282,96	0,947282955	1,553741183
300	341,6	56665,8	131326,3	-18,86360297	36,05636369	1064044,68	1,064044681	1,383243173
310	333,3	43902,2	118562,7	-16,61804642	26,26901603	1174736,97	1,174736973	1,252903904
320	325,6	32797,6	107458,1	-13,88502786	17,48463099	1274086,03	1,274086026	1,155206564
330	318,5	23053	97713,5	-10,75834082	10,13909493	1357162,08	1,35716208	1,084492827
340	311,9	14448	89108,5	-7,336008327	4,605056453	1419750,58	1,419750579	1,03668388
350	305,8	6921,78	81582,28	-3,71704176	1,166309838	1458641,89	1,458641887	1,009043106
360	300	0	74660,5	-2,79611E-05	1,81923E-11	1471832,54	1,47183254	1

Anexo 9. Cámara de combustión interna 2.3

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1433576,216	1,433576216	1
10	306,3	5557,72	80218,22	3,560826764	1,104650239	1421082,92	1,421082916	1,008791394
20	312,9	11619,1	86279,6	7,026545322	4,362053349	1384242,56	1,384242556	1,035639462
30	320,1	18616,1	93276,6	10,30181019	9,605828502	1324936,86	1,324936857	1,081995877
40	328	26643	101303,5	13,29139999	16,56970629	1246177,26	1,246177256	1,150379057
50	336,5	35914,8	110575,3	15,90174568	24,90449961	1151912,97	1,151912966	1,244517822
60	345,9	46569,9	121230,4	18,04406739	34,20221439	1046758,29	1,046758291	1,369538917
70	356,3	59469,1	134129,6	19,63924128	44,02649527	935648,29	0,935648294	1,532174243
80	367,8	74713,4	149373,9	20,6239495	53,94691593	823450,98	0,823450981	1,740936921
90	373,822	83247,8	157908,3	20,95696701	63,57259998	714587,06	0,714587061	2,006160332
100	380	93208	167868,5	20,62395198	72,57936737	612722,92	0,612722924	2,339681055
110	395,2	116025	190685,5	19,63924614	80,72526033	520595,05	0,520595046	2,753726195
120	411,8	144751	219411,5	18,04407443	87,85221927	439991,04	0,439991041	3,258194105
130	432,1	181800	256460,5	15,90175463	93,87561557	371868,03	0,371868035	3,855067071
140	454	231057	305717,5	13,29141053	98,76628036	316555,92	0,31655592	4,528666578
150	481,8	299128	373788,5	10,30182197	102,5303589	273985,20	0,273985196	5,23231269
160	516,9	398112	472772,5	7,026558003	105,1910749	243893,21	0,243893208	5,877884959
170	563,2	552514	627174,5	3,56083998	106,7745238	225984,82	0,225984822	6,343683639
180	628,7	819873	894533,5	1,33939E-05	107,3	220041,83	0,220041826	6,52
190	563,2	552514	627174,5	-3,560813548	106,7745205	225984,86	0,225984859	6,343682591
200	516,9	398112	472772,5	-7,026532641	105,1910687	243893,28	0,243893277	5,877883281
210	481,8	299128	373788,5	-10,3017984	102,5303507	273985,29	0,273985288	5,232310926
220	454	231057	305717,5	-13,29138945	98,76627136	316556,02	0,316556022	4,528665123
230	432,1	181800	256460,5	-15,90173673	93,87560713	371868,13	0,37186813	3,855066082
240	411,8	144751	219411,5	-18,04406034	87,85221283	439991,11	0,439991114	3,258193565
250	395,2	116025	190685,5	-19,63923641	80,72525718	520595,08	0,520595082	2,753726007
260	380	93208	167868,5	-20,62394701	72,57936845	612722,91	0,612722911	2,339681101
270	373,822	83247,8	157908,3	-20,95696701	63,57260573	714587,00	0,714586996	2,006160515
280	367,8	74713,4	149373,9	-20,62395447	53,94692618	823450,87	0,823450865	1,740937166
290	356,3	59469,1	134129,6	-19,63925101	44,02650924	935648,14	0,935648136	1,532174502
300	345,9	35914,8	110575,3	-18,04408147	34,20223079	1046758,11	1,046758105	1,36953916
310	336,5	26643	101303,5	-15,90176358	24,90451686	1151912,77	1,151912771	1,244518033
320	328	18616,1	93276,6	-13,29142108	16,56972268	1246177,07	1,246177071	1,150379228
330	320,1	11619,1	86279,6	-10,30183376	9,605842417	1324936,70	1,3249367	1,081996005
340	312,9	5557,72	80218,22	-7,026570685	4,362063439	1384242,44	1,384242442	1,035639548
350	306,3	465,9	75126,4	-3,560853196	1,104655535	1421082,86	1,421082856	1,008791436
360	300	0	74660,5	-2,67878E-05	1,66966E-11	1433576,22	1,433576216	1

Anexo 10. Cámara de combustión interna 2.4

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1431002,1	1,4310021	1
10	306,3	7577,11	82237,61	3,916442696	1,246634713	1416902,99	1,416902994	1,00995065
20	313	15879,3	90539,8	7,731321308	4,921664192	1375339,39	1,37533939	1,040471981
30	320,3	25465,6	100126,1	11,34209992	10,8339384	1308473,15	1,308473145	1,093642697
40	328,2	36477,3	111137,8	14,64502558	18,67675959	1219772,93	1,219772929	1,173170896
50	336,8	49217,7	123878,2	17,53634793	28,04663105	1113802,18	1,113802181	1,284790176
60	346,3	64078,9	138739,4	19,91566489	38,47074417	995908,24	0,995908241	1,436881472
70	356,8	81638,6	156299,1	21,69171477	49,4429057	871816,02	0,87181602	1,641403768
80	368,5	102678	177338,5	22,79018714	60,46532975	747155,34	0,747155343	1,915267171
90	381,7	128266	202926,5	23,1620688	71,09060747	626986,29	0,626986285	2,282349924
100	384,5	159924	234584,5	22,79018992	80,95581719	515413,39	0,515413394	2,776416208
110	413,7	199905	274565,5	21,69172019	89,8012872	415373,49	0,415373486	3,445097357
120	433,6	251675	326335,5	19,91567273	97,47075024	328633,90	0,328633904	4,354395822
130	457,4	320846	395506,5	17,53635786	103,8955757	255970,84	0,255970841	5,590488723
140	486,2	417062	491722,5	14,64503724	109,0700105	197449,36	0,197449364	7,247438384
150	522,3	558208	632868,5	11,34211293	113,0249417	152720,15	0,152720146	9,370093818
160	569,5	781181	855841,5	7,731335276	115,8053975	121273,93	0,121273932	11,79975014
170	638,9	1174690	1249350,5	3,916457236	117,4539517	102629,22	0,102629224	13,94341727
180	745,6	1992930	2067590,5	1,47295E-05	118	96453,56	0,096453564	14,84
190	551,2	692160	766820,5	-3,916428157	117,4539476	102629,27	0,102629271	13,94341097
200	511,2	515262	589922,5	-7,73130734	115,8053898	121274,02	0,121274019	11,79974169
210	480,1	396696	471356,5	-11,34208691	113,0249315	152720,26	0,152720262	9,370086716
220	454,6	312520	387180,5	-14,64501392	109,0699991	197449,49	0,197449493	7,247433662
230	433,1	250107	324767,5	-17,536338	103,8955649	255970,96	0,255970963	5,59048605
240	414,6	202264	276924,5	-19,91565706	97,47074175	328634,00	0,328634	4,354394549
250	398,6	164607	239267,5	-21,69170935	89,80128265	415373,54	0,415373538	3,44509693
260	384,5	134319	208979,5	-22,79018437	80,95581779	515413,39	0,515413387	2,776416245
270	372	109502	184162,5	-23,1620688	71,09061379	626986,21	0,626986214	2,282350184
280	360,8	88868,5	163529	-22,79019269	60,46534161	747155,21	0,747155209	1,915267515
290	350,8	71483,1	146143,6	-21,69172562	49,44292213	871815,83	0,871815834	1,641404118
300	341,6	56665,8	131326,3	-19,91568056	38,47076362	995908,02	0,995908021	1,43688179
310	333,3	43902,2	118562,7	-17,53636778	28,04665156	1113801,95	1,113801949	1,284790443
320	325,6	32797,6	107458,1	-14,6450489	18,67677909	1219772,71	1,219772708	1,173171108
330	318,5	23053	97713,5	-11,34212594	10,83395496	1308472,96	1,308472958	1,093642854
340	311,9	14448	89108,5	-7,731349244	4,921676194	1375339,25	1,375339255	1,040472084
350	305,8	6921,78	81582,28	-3,916471776	1,246641011	1416902,92	1,416902923	1,009950701
360	300	0	74660,5	-2,9459E-05	2,01748E-11	1431002,10	1,4310021	1

Anexo 11. Cámara de combustión interna 3

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (°)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1167385,759	1,167385759	1
10	306	5567,21	80227,71	2,996770457	0,891209372	1157306,42	1,157306419	1,00870931
20	312,2	10934	85594,5	5,910270748	3,520824919	1127566,17	1,127566168	1,035314638
30	318,9	17378,4	92038,9	8,657833615	7,759551755	1079627,30	1,079627298	1,081285886
40	326,2	24795,4	99455,9	11,15838942	13,40103885	1015823,58	1,015823583	1,149201277
50	334,1	33290,7	107951,2	13,33418956	20,17549727	939206,26	0,939206265	1,242949289
60	342,8	43097,3	117757,8	15,11346221	27,76828971	853333,81	0,853333807	1,368029428
70	352,3	54536,5	129197	16,43396556	35,8424046	762017,72	0,76201772	1,531966683
80	362,8	68027,5	142688	17,24707214	44,0627825	669047,44	0,669047438	1,744847514
90	374,5	84137,2	158797,7	17,52168086	52,11953435	577927,72	0,577927723	2,019951134
100	387,6	103647	178307,5	17,24707419	59,74668723	491666,66	0,491666657	2,374343962
110	402,5	124367	199027,5	16,43396958	66,73366641	412645,79	0,412645786	2,829026247
120	419,6	157840	232500,5	15,11346805	72,92829299	342586,21	0,342586211	3,407567852
130	439,6	196648	271308,5	13,33419701	78,23207785	282601,82	0,282601819	4,130850132
140	463,3	248058	322718,5	11,15839822	82,59017655	233312,88	0,233312884	5,003520327
150	492,3	318814	393474,5	8,657843491	85,97896931	194986,54	0,194986542	5,987006841
160	528,7	421123	495783,5	5,910281399	88,39386466	167674,72	0,167674719	6,962204942
170	576,8	579475	654135,5	2,996781576	89,83904677	151330,09	0,151330095	7,714167893
180	644,7	850493	925153,5	1,12743E-05	90,32	145890,64	0,145890642	8,00
190	576,8	579475	654135,5	-2,996759339	89,83904457	151330,12	0,15133012	7,714166623
200	528,7	421123	495783,5	-5,910260097	88,39386057	167674,77	0,167674766	6,962203023
210	492,3	318814	393474,5	-8,657823738	85,97896395	194986,60	0,194986602	5,987004978
220	463,3	248058	322718,5	-11,15838061	82,59017074	233312,95	0,23331295	5,003518918
230	439,6	196648	271308,5	-13,33418211	78,23207257	282601,88	0,282601878	4,130849258
240	419,6	157840	232500,5	-15,11345637	72,92828921	342586,25	0,342586254	3,407567427
250	402,5	124367	199027,5	-16,43396154	66,73366501	412645,80	0,412645802	2,829026138
260	387,6	103647	178307,5	-17,24707009	59,74668882	491666,64	0,49166664	2,374344048
270	374,5	84137,2	158797,7	-17,52168086	52,11953919	577927,67	0,577927668	2,019951325
280	362,8	68027,5	142688	-17,24707624	44,06279045	669047,35	0,669047348	1,744847749
290	352,3	54536,5	129197	-16,4339736	35,8424151	762017,60	0,762017601	1,531966922
300	342,8	43097,3	117757,8	-15,11347389	27,76830187	853333,67	0,853333669	1,368029648
310	334,1	33290,7	107951,2	-13,33420446	20,17550997	939206,12	0,939206121	1,242949479
320	326,2	24795,4	99455,9	-11,15840702	13,40105088	1015823,45	1,015823447	1,149201431
330	318,9	17378,4	92038,9	-8,657853368	7,759561959	1079627,18	1,079627182	1,081286001
340	312,2	10934	85594,5	-5,91029205	3,520832317	1127566,08	1,127566084	1,035314715
350	306	5567,21	80227,71	-2,996792694	0,891213256	1157306,37	1,157306375	1,008709348
360	300	0	74660,5	-2,25487E-05	1,18848E-11	1167385,76	1,167385759	1

Anexo 12. Cámara de combustión interna 3.1

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1393580,426	1,393580426	1
10	306	5307,52	79968,02	3,577441165	1,111156076	1381013,55	1,381013547	1,009099751
20	312,3	10967,1	85627,6	7,05945415	4,387694033	1343956,78	1,343956777	1,036923546
30	319,1	17539,7	92200,2	10,35034272	9,662097269	1284304,68	1,284304683	1,085085529
40	326,5	25073,6	99734,1	13,35447935	16,66625025	1205089,58	1,20508958	1,156412311
50	334,6	33745	108405,5	15,97782262	25,04849987	1110288,57	1,110288572	1,255151554
60	343,5	43793,8	118454,3	18,13106592	34,39792756	1004549,04	1,004549038	1,387269684
70	353,2	55556,9	130217,4	19,73454611	44,27504427	892841,48	0,892841481	1,560837456
80	364	69476,8	144137,3	20,72446458	54,2464092	780068,00	0,780068003	1,786485821
90	376	86159,6	160820,1	21,05925939	63,9186066	670678,03	0,670678029	2,077868017
100	389,5	106449	181109,5	20,72446708	72,96568475	568357,99	0,568357987	2,451941307
110	404,9	131558	206218,5	19,734551	81,14481944	475854,16	0,475854155	2,928587282
120	422,7	163300	237960,5	18,13107299	88,29793249	394954,35	0,394954354	3,528459462
130	443,5	204461	279121,5	15,97783162	94,34100969	326608,76	0,326608762	4,266818864
140	468,5	259547	334207,5	13,35448995	99,24584659	271136,36	0,271136364	5,139776915
150	499,1	336277	410937,5	10,35035456	103,0196404	228455,76	0,228455763	6,100001203
160	538,1	449185	523845,5	7,059466892	105,6865619	198293,59	0,198293592	7,027864159
170	590,5	628709	703369,5	3,577454443	107,2734336	180346,50	0,180346496	7,727238714
180	666	946541	1021201,5	1,34563E-05	107,8	174391,17	0,17439117	7,99
190	590,5	628709	703369,5	-3,577427888	107,2734302	180346,53	0,180346534	7,727237098
200	538,1	449185	523845,5	-7,059441409	105,6865557	198293,66	0,198293662	7,027861665
210	499,1	336277	410937,5	-10,35033087	103,0196322	228455,86	0,228455856	6,09999871
220	468,5	259547	334207,5	-13,35446876	99,24583749	271136,47	0,271136467	5,139774964
230	443,5	204461	279121,5	-15,97781363	94,34100115	326608,86	0,326608858	4,266817602
240	422,7	163300	237960,5	-18,13105884	88,29792596	394954,43	0,394954428	3,528458802
250	404,9	131558	206218,5	-19,73454122	81,14481622	475854,19	0,475854191	2,928587058
260	389,5	106449	181109,5	-20,72446208	72,96568581	568357,98	0,568357975	2,451941358
270	376	86159,6	160820,1	-21,05925939	63,91861237	670677,96	0,670677964	2,07786822
280	364	69476,8	144137,3	-20,72446958	54,24641952	780067,89	0,780067886	1,786486089
290	353,2	55556,9	130217,4	-19,73455589	44,27505834	892841,32	0,892841322	1,560837735
300	343,5	43793,8	118454,3	-18,13108007	34,3979441	1004548,85	1,004548851	1,387269943
310	334,6	33745	108405,5	-15,97784062	25,04851726	1110288,38	1,110288375	1,255151776
320	326,5	25073,6	99734,1	-13,35450054	16,66626677	1205089,39	1,205089393	1,156412491
330	319,1	17539,7	92200,2	-10,35036641	9,662111301	1284304,52	1,284304524	1,085085663
340	312,3	10967,1	85627,6	-7,059479633	4,387704208	1343956,66	1,343956662	1,036923635
350	306	5307,52	79968,02	-3,577467721	1,111161417	1381013,49	1,381013487	1,009099795
360	300	0	74660,5	-2,69126E-05	1,68646E-11	1393580,43	1,393580426	1

Anexo 13. Cámara de combustión interna 3.2

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1560473,926	1,560473926	1
10	305,7	4968,4	79628,9	3,925750503	1,25042796	1546331,92	1,54633192	1,009145518
20	311,5	10290,9	84951,4	7,749779382	4,936615746	1504642,12	1,504642119	1,03710637
30	317,9	16381,2	91041,7	11,36937184	10,86675305	1437573,85	1,437573847	1,085491316
40	324,7	24134,8	98795,3	14,68055648	18,73305941	1348608,02	1,348608019	1,157099694
50	332,1	31100	105760,5	17,57931465	28,13057443	1242324,63	1,24232463	1,256091917
60	340,2	40067,7	114728,2	19,96493003	38,58473019	1124090,92	1,124090916	1,388209711
70	348,9	50418,9	125079,4	21,74580566	49,58742565	999653,36	0,999653364	1,56101503
80	358,5	62480,8	137141,3	22,8473224	60,63902862	874662,68	0,874662681	1,784086551
90	365,1	74687,2	149347,7	23,22024579	71,29058597	754196,41	0,754196408	2,069055103
100	372	85975,6	160636,1	22,84732518	81,17813756	642370,84	0,642370836	2,429241552
110	380,9	93623	168283,5	21,7458111	90,04157281	542127,75	0,542127747	2,878424756
120	394,1	114089	188749,5	19,96493789	97,72473629	455233,22	0,455233216	3,427856032
130	409,1	139232	213892,5	17,57932461	104,1594997	382457,76	0,382457758	4,080120991
140	426,2	170738	245398,5	14,68056817	109,3408028	323858,60	0,323858602	4,818380361
150	446,2	211143	285803,5	11,36938488	113,3002435	279078,38	0,279078383	5,591525612
160	469,9	264483	339143,5	7,749793384	116,083463	247600,91	0,247600912	6,30237552
170	498,7	337525	412185,5	3,925765077	117,7334911	228939,53	0,228939534	6,816096357
180	534,7	442466	517126,5	1,47645E-05	118,28	222758,66	0,222758665	7,01
190	498,7	337525	412185,5	-3,925735928	117,733487	228939,58	0,228939581	6,816094968
200	469,9	264483	339143,5	-7,74976538	116,0834553	247601,00	0,247600999	6,302373298
210	446,2	211143	285803,5	-11,36935879	113,3002332	279078,50	0,279078499	5,59152328
220	426,2	170738	245398,5	-14,68054479	109,3407913	323858,73	0,323858731	4,818378436
230	409,1	139232	213892,5	-17,5793047	104,1594888	382457,88	0,382457881	4,080119677
240	394,1	114089	188749,5	-19,96492218	97,72472774	455233,31	0,455233313	3,427855304
250	380,9	93623	168283,5	-21,74580023	90,04156822	542127,80	0,542127798	2,87842448
260	372	85975,6	160636,1	-22,84731962	81,17813814	642370,83	0,642370829	2,429241577
270	365,1	74687,2	149347,7	-23,22024579	71,2905923	754196,34	0,754196336	2,069055299
280	358,5	62480,8	137141,3	-22,84732797	60,63904052	874662,55	0,874662547	1,784086825
290	348,9	50418,9	125079,4	-21,74581654	49,58744215	999653,18	0,999653178	1,561015321
300	340,2	40067,7	114728,2	-19,96494574	38,58474972	1124090,70	1,124090695	1,388209984
310	332,1	31100	105760,5	-17,57933456	28,13059503	1242324,40	1,242324397	1,256092152
320	324,7	24134,8	98795,3	-14,68057987	18,733079	1348607,80	1,348607798	1,157099884
330	317,9	16381,2	91041,7	-11,36939792	10,86676968	1437573,66	1,437573659	1,085491458
340	311,5	10290,9	84951,4	-7,749807386	4,9366278	1504641,98	1,504641982	1,037106464
350	305,7	4968,4	79628,9	-3,925779652	1,250434286	1546331,85	1,546331848	1,009145565
360	300	0	74660,5	-2,95289E-05	2,02588E-11	1560473,93	1,560473926	1

Anexo 14. Cámara de combustión interna 3.3

Biela=150 mm

Posición cigüeñal (°)	Temperatura (K)	Presión manométrica (Pa)	Presión absoluta (Pa)	Angulo biela- pistón (°)	Posición del pistón (mm)	Volumen final (mm^3)	Volumen final (Litros)	Relación de compresión
0	300	0	74660,5	0	0	1522545,936	1,522545936	1
10	306,1	5336,56	79997,06	3,783485212	1,192878619	1509054,80	1,509054797	1,008940125
20	312,4	11118,3	85778,8	7,467721698	4,709784813	1469279,53	1,469279526	1,036253422
30	319,3	17027,3	91687,8	10,95278211	10,36893705	1405276,02	1,405276023	1,083449736
40	326,9	25427,7	100088,2	14,13806191	17,87897118	1320339,54	1,32033954	1,153147271
50	335	34206	108866,5	16,92363389	26,8570667	1218799,67	1,218799673	1,249217546
60	343,9	44383,8	119044,3	19,21352797	36,85519444	1105723,51	1,105723514	1,376968036
70	353,8	56301,5	130962	20,92117075	47,39396096	986532,88	0,986532875	1,543330157
80	364,7	70424	145084,5	21,97654027	58,00147827	866564,68	0,866564683	1,756990524
90	374,9	81324	155984,5	22,33368266	68,25202514	750633,73	0,750633731	2,028347347
100	380,8	87378	162038,5	21,97654293	77,7973728	642678,39	0,642678394	2,369063517
110	390,5	108048	182708,5	20,92117596	86,38426154	545562,97	0,545562972	2,79077946
120	406,2	133700	208360,5	19,21353551	93,85520005	461068,65	0,461068649	3,302210936
130	424,2	166221	240881,5	16,92364345	100,1348605	390047,36	0,390047365	3,903489869
140	445,5	208546	283206,5	14,13807315	105,2080438	332671,01	0,332671014	4,576731586
150	471	265459	283206,5	10,95279466	109,0958383	288701,09	0,288701094	5,273779579
160	502,4	345261	419921,5	7,467735184	111,8347474	257724,76	0,257724763	5,907643163
170	542,5	463687	538347,5	3,783499257	113,4609644	239332,68	0,239332682	6,361629858
180	596,7	653887	728547,5	1,42302E-05	114	233236,33	0,233236333	6,53
190	542,5	463687	538347,5	-3,783471167	113,4609606	239332,72	0,239332725	6,361628719
200	502,4	345261	419921,5	-7,467708211	111,8347403	257724,84	0,257724844	5,907641325
210	471	265459	340119,5	-10,95276955	109,0958289	288701,20	0,288701201	5,27377763
220	445,5	208546	283206,5	-14,13805067	105,2080333	332671,13	0,332671132	4,57672996
230	424,2	166221	240881,5	-16,92362432	100,1348506	390047,48	0,390047477	3,90348875
240	406,2	133700	208360,5	-19,21352044	93,85519235	461068,74	0,461068736	3,302210313
250	390,5	108048	182708,5	-20,92116554	86,38425754	545563,02	0,545563017	2,790779229
260	380,8	87378	162038,5	-21,9765376	77,79737359	642678,38	0,642678385	2,36906355
270	374,9	81324	155984,5	-22,33368266	68,25203124	750633,66	0,750633662	2,028347534
280	364,7	70424	145084,5	-21,9765456	58,0014895	866564,56	0,866564556	1,756990782
290	353,8	56301,5	130962	-20,92118117	47,39397645	986532,70	0,9865327	1,54333043
300	343,9	44383,8	119044,3	-19,21354304	36,85521271	1105723,31	1,105723308	1,376968294
310	335	34206	108866,5	-16,92365301	26,85708595	1218799,46	1,218799455	1,249217769
320	326,9	25427,7	100088,2	-14,13808439	17,87898948	1320339,33	1,320339333	1,153147451
330	319,3	17027,3	91687,8	-10,95280721	10,36895259	1405275,85	1,405275847	1,083449872
340	312,4	11118,3	85778,8	-7,467748671	4,70979608	1469279,40	1,469279399	1,036253512
350	306,1	5336,56	79997,06	-3,783513301	1,192884532	1509054,73	1,50905473	1,00894017
360	300	0	74660,5	-2,84604E-05	1,88309E-11	1522545,94	1,522545936	1