

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Diseño óptimo del sistema de admisión de un monoplaza de competición

Autor: Rafael Márquez López

Tutor: Miguel Torres García

**Dep. Ingeniería Energética**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Diseño óptimo del sistema de admisión de un monoplaza de competición**

Autor:  
Rafael Márquez López

Tutor:  
Miguel Torres García  
Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Grado: Diseño óptimo del sistema de admisión de un monoplaza de competición

Autor: Rafael Márquez López

Tutor: Miguel Torres García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*Al equipo ARUS, ejemplo de  
lucha, trabajo y compañerismo*



# Agradecimientos

---

Quiero agradecer toda la ayuda prestada a mis compañeros del equipo ARUS que me han ayudado con las simulaciones realizadas para este proyecto, ya sean de éste año o anteriores.

También quiero hacer mención al tutor de este proyecto, D. Miguel Torres, por permitirme hacerlo con él.



# Resumen

---

En nuestra escuela se encuentra un equipo de Formula Student, competición en la que participan universidades de todo el mundo. En ellas, se intenta ganar la máxima puntuación posible diseñando, fabricando y ensamblando un monoplaza. La mayoría de los componentes del equipo estudian en nuestra escuela y la defienden en los países que visitan para competir.

El sistema de admisión es crítico en el monoplaza debido a la exhaustiva normativa a la que debe someterse. Exige que los estudiantes de ingeniería se esfuercen al máximo para sacar el mayor partido al motor.

El objetivo de éste proyecto es mejorar el sistema de admisión actual, tanto en prestaciones como para contribuir al mejor funcionamiento del resto del vehículo.



# Abstract

---

In our school there is a Formula Student's team, a competition where participate universities from all the world. All of them try to get the highest punctuation designing, manufacturing and assembling a single-seating car. Most components of the team are studying in this school and defend it in all the countries that they visit during the competitions.

The air intake system is a critical part of the car due to the fact that it is abided by an exhaustive normative. This requires that the engineering's students strain to the maximum in order to get the highest performance of the engine.

The objective of this project is to improve the current air intake system, getting better performance of the engine as well as contribute to a better functioning of the resto of the vehicle.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Formula Student</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivo</b>	<b>9</b>
<b>3 Parámetros Geométricos</b>	<b>13</b>
3.1 <i>Volumen del Plenum</i>	13
3.2 <i>Diámetro de los runners</i>	14
3.3 <i>Longitud de los Runners</i>	15
3.4 <i>Ángulo del difusor</i>	17
<b>4 Parámetros Característicos</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Potencia</i>	11
4.2 <i>Par</i>	11
4.3 <i>Eficiencia Volumétrica</i>	12
<b>5 Simulación</b>	<b>15</b>
5.1 <i>Inputs básicos</i>	15
5.1.1 <i>Características del bloque del motor</i>	16
5.1.2 <i>Características de los cilindros</i>	16
5.1.3 <i>Cuerpos geométricos en 3D</i>	17
5.1.4 <i>Otros</i>	20
5.2 <i>Parámetros de la simulación</i>	21
5.2.1 <i>Régimen de simulación</i>	21
5.2.2 <i>Parámetros generales</i>	21
5.2.3 <i>Propiedades del fluido durante la simulación</i>	22
5.2.4 <i>Convergencia</i>	23
5.2.5 <i>Otros</i>	24
5.3 <i>Inputs avanzados</i>	24
5.3.1 <i>Modelo de combustión</i>	25
5.3.2 <i>Coeficientes de flujo por apertura de válvula</i>	25
5.3.3 <i>Alzada de válvula respecto a la rotación del cigüeñal</i>	27
5.4 <i>Simulación</i>	30
<b>6 Resultados</b>	<b>33</b>
<b>7 Análisis de Resultados</b>	<b>37</b>
<b>8 Elección de la Admisión</b>	<b>41</b>
<b>Anexos</b>	<b>45</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 4.- Algunos de los países en los que se realizan competiciones de Formula Student.	1
Ilustración 5.- Puntuación obtenida de las normas de la competición para la temporada 2017.	2
Ilustración 6.- Partes de una admisión.	2
Ilustración 7.- Normativa referente al sistema de admisión, del documento ‘2017-18 Formula SAE® Rules’.	3
Ilustración 8.- Normativa referente a la restricción de la entrada de aire al motor, cogida también del documento ‘2017-18 Formula SAE® Rules’.	5
Ilustración 9.- Monoplaza de Formula SAE con admisión lateral.	5
Ilustración 10.- Monoplaza de Formula SAE con admisión trasera.	6
Ilustración 1.- Admisión actual.	9
Ilustración 2.- Posición de la entrada de aire a la admisión en el ART-17.	10
Ilustración 3.- En la foto se observa el ART-16 durante un test. Se observa que la admisión tiene una posición muy perjudicial para el flujo que llega al alerón trasero.	10
Ilustración 11.- Parámetros que definen el volumen del Plenum. “De”: diámetro de entrada al plenum (conexión con el adaptador). “Df”: diámetro final del Plenum. “L”: longitud del Plenum.	14
Ilustración 12.- Límite a cumplir por la admisión. En el caso más desfavorable en el que la admisión se situa más alta y con la barra del Main del ART-17 (se supone que del ART-18 será más baja y se tendrá mayor límite) es $L_{\max} = 600 \text{ mm}$ .	14
Ilustración 13.- Ondas de presión producidas por la apertura y el cierre de válvulas.	15
Ilustración 14.- Diseño de admisión lateral sin ángulo en el difusor.	17
Ilustración 15.- Pantalla inicial de Ricardo Wave.	15
Ilustración 16.- Ventana “Engine General Panel”, en la que se configuran las características principales del motor.	16
Ilustración 17.- Ventana “Cylinder Panel”, donde se definen las características de los cilindros.	17
Ilustración 18.- A la izquierda, el exterior de la admisión actual. A la izquierda, el interior hecho sólido de la admisión actual.	18
Ilustración 19.- A la izquierda, admisión actual mallada con Wave Mesher. A la derecha lo mismo, con más detalle para comprobar que las conexiones están bien realizadas.	18
Ilustración 20.- A la izquierda esquema de la campana de entrada. A la derecha, el interior de dicha campana hecho sólido.	19
Ilustración 21.- Campana de entrada mallada y correctamente conectada.	19
Ilustración 22.- Colectores de escape mallados y correctamente conectados.	19
Ilustración 23.- Esquema del silencioso en el programa Wave Build3D.	20
Ilustración 24.- Modelo del motor Honda CBR 600 en Ricardo Wave.	21
Ilustración 25.- Ventana de elección de la simulación en estacionario.	21
Ilustración 26.- Ventana “Simulation Control” con los valores de los parámetros de la simulación.	22
Ilustración 27.- Pestaña en la que elegir las características de los fluidos.	22
Ilustración 28.- Copia de la ayuda de Ricardo Wave para la compresibilidad.	23

Ilustración 29.- Pestaña de Convergencia ( <i>Convergence</i> ).	24
Ilustración 30.- Ventana de propiedades de la combustión. Se incluyen los valores generalizados para un motor 4cyl4T.	25
Ilustración 31.- Esquema geométrico sobre la situación tanto de las <i>y-junctions</i> como de los últimos conductos que van a parar a las válvulas (a la izquierda los de admisión y a la derecha los del escape).	26
Ilustración 32.- Geometrías tanto de la junta que separa el conducto procedente del <i>runner</i> en los conductos que se dirigen a las válvulas (izquierda) como de este mismo conducto (derecha).	26
Ilustración 33.- Obtención experimental de la medida del alzado de válvulas.	27
Ilustración 34.- Datos sobre el alzado de válvulas obtenidos del manual del motor Honda CBR 600 RR 2003-2006.	28
Ilustración 35.- Ventanas que permiten acceder a la edición de los alzados de válvulas.	28
Ilustración 36.- Datos del alzado de las válvulas de la admisión con su correspondiente perfil en Ricardo Wave.	29
Ilustración 37.- Ventana donde introducir los diferentes regímenes.	30
Ilustración 38.- Valores de los vectores incluidos en <i>Constants</i> .	31
Ilustración 39.- Simulación del modelo realizado.	31
Ilustración 40.- Localización de <i>Wave Post</i> en el entorno de Ricardo.	33
Ilustración 41.- Selección de la gráfica de potencia en <i>Wave Post</i> .	33
Ilustración 42.- Exportación de una gráfica desde Ricardo a Excel.	34
Ilustración 43.- A la izquierda el modelo 1. A la derecha, el modelo 41 de las admisiones.	41
Ilustración 44.- ART17 completo con la admisión elegida.	42
Ilustración 45.- Parte trasera del coche sin la parte aerodinámica. Se observa que la admisión no chocaría con el chasis.	42
Ilustración 46.- Se observa que la admisión elegida cumple perfectamente la normativa.	43







seguidamente otras dos vueltas en el sentido contrario (Skid-Pad). Después se realiza otra prueba en la que se mide el tiempo que tarda el coche en dar la vuelta a un circuito más largo (Autocross). Esta prueba sirve también para clasificar el orden de salida de los monoplazas en la última prueba, en la que todos deben recorrer una distancia de 28 *km* haciendo sólo una parada para cambiar de piloto (recorren el mismo circuito que en el Autocross pero con muchas más vueltas). Durante la prueba se mide además el consumo de energía que haya tenido el monoplaza (Efficiency), obteniendo la mayor puntuación el vehículo que menos energía haya consumido.

La puntuación que se puede obtener de cada evento como máximo es la siguiente:

Static Events:	
Presentation	75
Engineering Design	150 (may be changed to 200 for 2018)
Cost Analysis	100
Dynamic Events	
Acceleration	100
Skid-Pad	75
Autocross	125
Efficiency	100
<u>Endurance</u>	<u>275 (may be changed to 225 for 2018)</u>
Total Points	1,000

Ilustración 2.- Puntuación obtenida de las normas de la competición para la temporada 2017.

Cabe destacar que antes de realizar cualquiera de las pruebas dinámicas, los jueces de la competición realizan una serie de inspecciones a cada vehículo. La primera consiste en una inspección mecánica, en la que tres jueces revisan que el vehículo cumple con la normativa exhaustivamente. Si por alguna razón el coche no la cumpliera, debe volver a la zona de 'Boxes', arreglar el problema y volver a pasar la inspección. Una vez que los jueces aprueban que el coche cumple la normativa, en la siguiente inspección se procede a volcar el coche a 60° con respecto al suelo, para comprobar que no cae ningún líquido del coche. Si efectivamente el coche no pierde ningún tipo de líquido, el equipo obtiene la autorización para arrancar el coche en una zona habilitada, pero aún no se puede competir en las pruebas dinámicas. Para poder participar, se debe pasar también una prueba de frenada y otra en la que se comprueba que el coche no produzca un ruido mayor de 100 dB.

Además, en las competiciones de Formula SAE suele haber dos categorías diferentes, una de coches eléctricos (monoplazas impulsados por motores eléctricos) y otra de coches de combustión (monoplazas impulsados por un motor de combustión interna alternativo).

El esquema de una admisión básicamente es el siguiente:

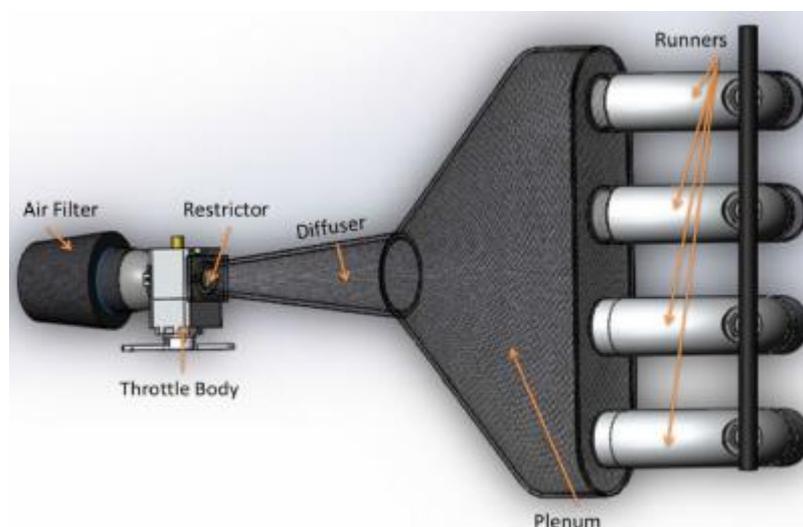


Ilustración 3.- Partes de una admisión.

1. Diffuser: también llamado difusor. Es el conducto tronco-cónico (parte divergente de una tobera) que conecta el cuerpo del acelerador con el plenum.
2. Plenum: es el depósito con mayor volumen de aire de todo el sistema de admisión. El propósito del plenum es distribuir el aire lo más equitativamente posible entre los cuatro cilindros.
3. Runners: son los conductos que conectan cada uno de los cilindros con el plenum. Normalmente, en los vehículos de combustión que compiten en la Formula Student, se incorporan también al final de cada runner el inyector correspondiente de combustible. Hay que intentar que el radio que tengan los runner sea lo más suave posible, para minimizar la pérdida de carga todo lo posible.

La normativa a cumplir por la admisión se encuentra en el apartado IC1.4 del artículo 1 de la parte IC (Internal Combustion Engine Vehicles) del documento 2017-18 Formula SAE® Rules:

#### IC1.4 Air Intake System

##### IC1.4.1 Air Intake System Location

All parts of the engine air and fuel control systems (including the throttle or carburetor, and the complete air intake system, including the air cleaner and any air boxes) must lie within the surface defined by the top of the roll bar and the outside edge of the four tires. (See Figure 13).

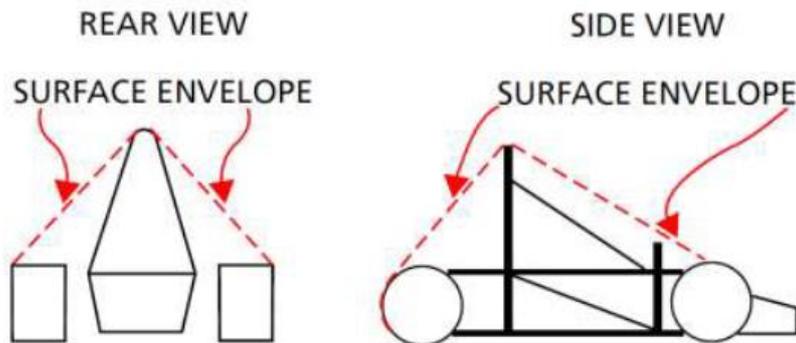


Figure 13

- IC1.4.2 Any portion of the air intake system that is less than 350 mm (13.8 inches) above the ground must be shielded from side or rear impact collisions by structure built to Rule T3.24 or T3.33 as applicable.
- IC1.4.3 Intake Manifold – The intake manifold must be securely attached to the engine block or cylinder head with brackets and mechanical fasteners. This precludes the use of hose clamps, plastic ties, or safety wires. The use of rubber bushings or hose is acceptable for creating and sealing air passages, but is not considered a structural attachment. The threaded fasteners used to secure the intake manifold are considered critical fasteners and must comply with ARTICLE 11.
- IC1.4.4 Intake systems with significant mass or cantilever from the cylinder head must be supported to prevent stress to the intake system. Supports to the engine must be rigid. Supports to the frame or chassis must incorporate some isolation to allow for engine movement and chassis flex.

Ilustración 4.- Normativa referente al sistema de admisión, del documento '2017-18 Formula SAE® Rules'.

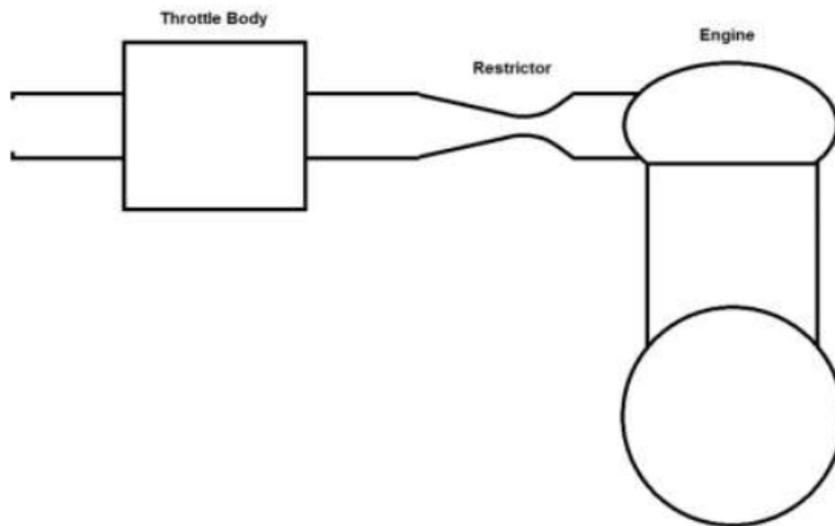
En la ilustración anterior se puede observar que la admisión debe de estar dentro de un límite, a una determinada distancia de cualquier zona del escape, que debe estar completamente acoplada al bloque y que dependiendo de la masa se debe poner o no una serie de muelles para asegurar la rigidez del sistema de admisión.

Además, tenemos que tener en cuenta que la competición limita por norma la entrada del aire en el motor, si es de gasolina a 20 mm y si es de E-85 de 19 mm:

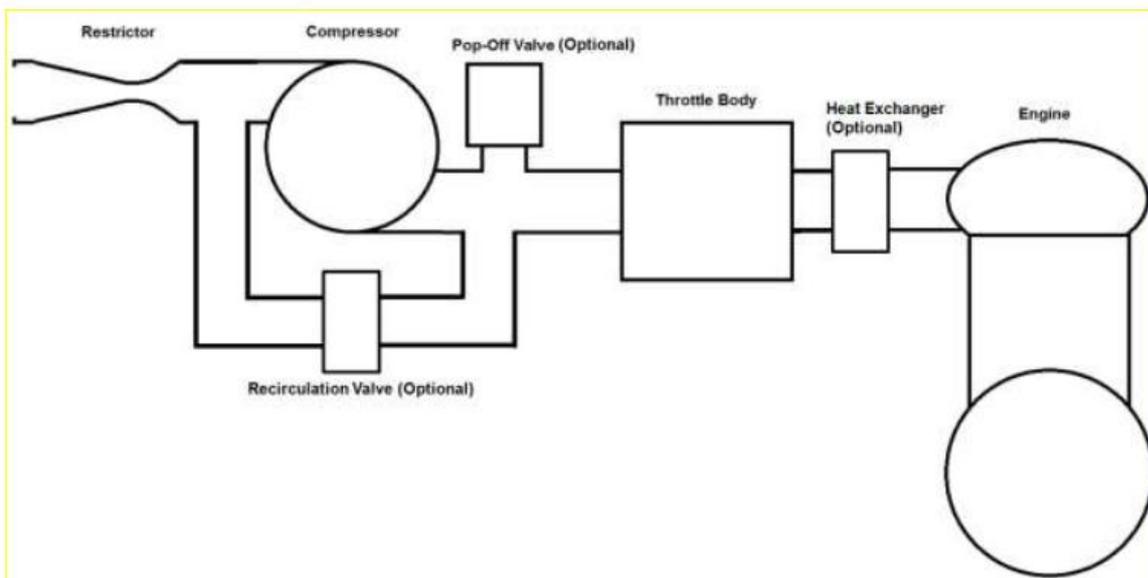
**IC1.6 Intake System Restrictor**

IC1.6.1 In order to limit the power capability from the engine, a single circular restrictor must be placed in the intake system and all engine airflow must pass through the restrictor. The only allowed sequence of components are the following:

- a. For naturally aspirated engines, the sequence must be (see Fig 1): throttle body, restrictor, and engine.
- b. For turbocharged or supercharged engines, the sequence must be (see Fig 2): restrictor, compressor, throttle body, engine.



*Figure 1*



*Figure 2*

- IC1.6.2 The maximum restrictor diameters at any time during the competition are:
- Gasoline fueled cars - 20.0 mm (0.7874 inch)
  - E-85 fueled cars – 19.0 mm (0.7480 inch)
- IC1.6.3 The restrictor must be located to facilitate measurement during the inspection process.
- IC1.6.4 The circular restricting cross section may NOT be movable or flexible in any way, e.g. the restrictor may not be part of the movable portion of a barrel throttle body.
- IC1.6.5 If more than one engine is used, the intake air for all engines must pass through the one restrictor.

Ilustración 5.- Normativa referente a la restricción de la entrada de aire al motor, cogida también del documento '2017-18 Formula SAE® Rules'.

En el caso que se estudia en este proyecto, hay que tener en cuenta que el motor es de 4 cilindros, concretamente el motor de una Honda 600 RR (599 cc), por lo que el motor cumple la normativa. Para buscar una nueva geometría para la admisión, se va a realizar una primera consulta con el resto de equipos que compiten, y se observa que básicamente hay tres tipos de admisión utilizados:

- Admisión superior: es el que se utiliza en la admisión actual. La entrada del aire se encuentra por encima del piloto. La suelen utilizar monoplazas con motor de 4 cilindros.
- Admisión lateral: la admisión tiene la entrada del aire en el lado del piloto, por debajo del cuello generalmente. Al igual que el anterior, también suelen usarla equipos con motores de 4 cilindros.

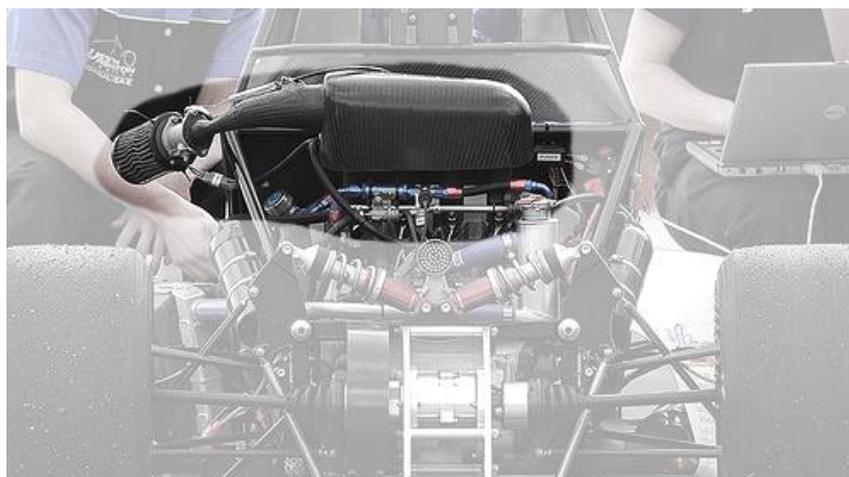


Ilustración 6.- Monoplaza de Formula SAE con admisión lateral.

- Admisión trasera: es igual que el vertical a excepción de que la entrada del aire está en la parte trasera del coche y no en la zona superior de la cabeza del piloto. Este tipo de admisión, además de que es más difícil de encontrar en otros equipos, los vehículos que la utilizan suelen llevar motores de 2 cilindros o monocilíndricos con turbo.

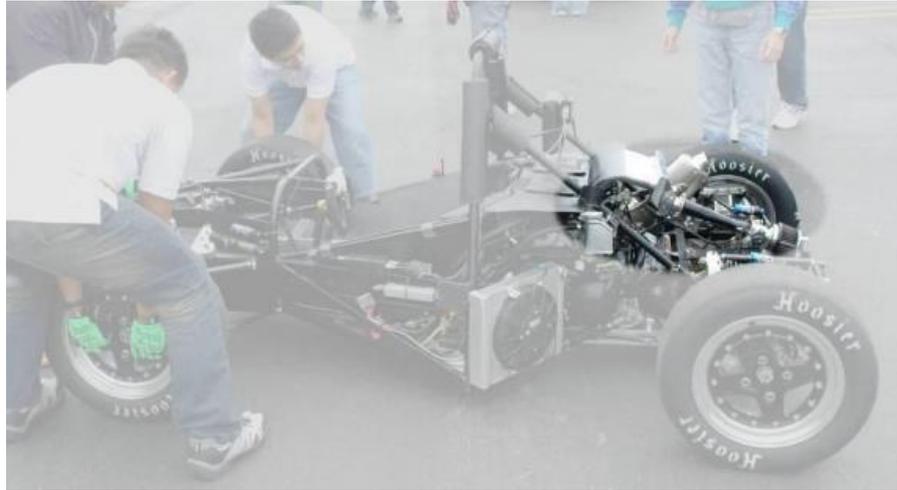


Ilustración 7.- Monoplaza de Formula SAE con admisión trasera.

Viendo los tres tipos de admisión que hay, se va a escoger el que ayude a bajar el centro de gravedad (se descarta el tipo el vertical) y que mejor se pueda adaptar al motor Honda CBR 600 RR, que es de 4 cilindros. Por tanto, se elige como admisión para estudiar la admisión lateral.





## 2 OBJETIVO

---

**E**n este proyecto se va a estudiar cómo diseñar una admisión para un monoplaza de competición. Concretamente, será diseñada para el modelo ART. Este monoplaza es diseñado por el equipo ARUS, del que luego se hablará.

Como punto de partida de este proyecto, se va a tomar la admisión que utiliza el ART actualmente, concretamente, el ART16.



Ilustración 8.- Admisión actual.

El sistema de admisión actual es del tipo vertical, tomando el aire por encima de la cabeza del piloto. En el nuevo diseño, queremos tener una nueva disposición del sistema de admisión, ya sea horizontal o inferior, de tal forma que se estaría contribuyendo a bajar el centro de gravedad del coche (lo que permite una mejor manejabilidad del propio vehículo).

Además, en la posición actual, se ve muy afectada la aerodinámica del vehículo, ya que la entrada de la admisión es un obstáculo que provoca una cierta estela detrás de ella, por lo que el flujo no llega limpio al alerón trasero y hace que no trabaje como debería.

Si se cambiara la posición actual a otra en la que se bajara el centro de gravedad, sería posible también disminuir la altura de la barra del 'Main', que es la barra situada justo encima de la admisión. Esta barra está limitada ahora por la entrada de aire a la admisión, pero si se bajara, se podría bajar el centro de gravedad del vehículo así como

la aerodinámica del mismo.

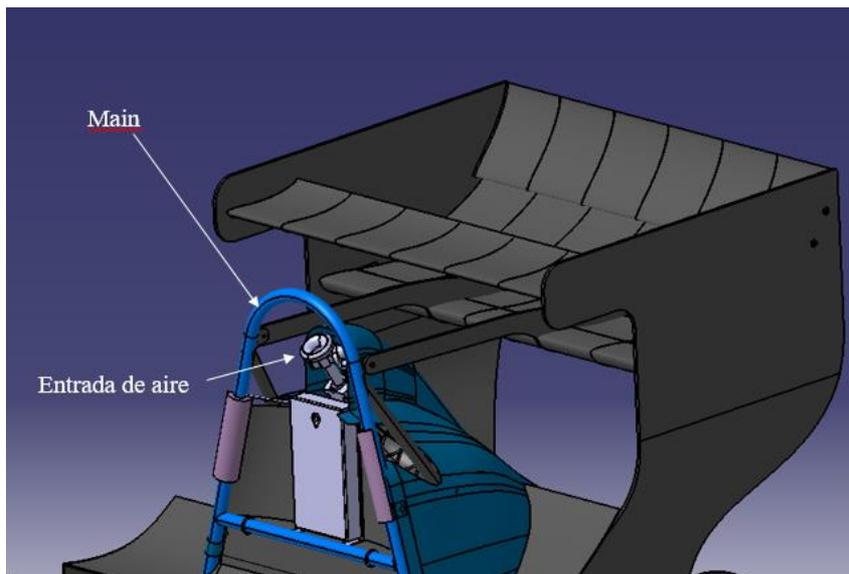


Ilustración 9.- Posición de la entrada de aire a la admisión en el ART-17.



Ilustración 10.- En la foto se observa el ART-16 durante un test. Se observa que la admisión tiene una posición muy perjudicial para el flujo que llega al alerón trasero.

Viendo el gran número de problemas que supone la admisión actual, se va a estudiar otro tipo de geometrías sin cambiar las características técnicas que ofrece el motor con esta admisión.

Para ello, se tendrá que tener en cuenta tanto la normativa vigente de la competición, así como la influencia de los diferentes parámetros de los que consta la admisión sobre las propiedades del motor.

El proceso a seguir para la elección de la mejor geometría posible para la admisión constará de varias partes.

La primera será asignar unos parámetros geométricos que definan de la mejor forma posible la admisión completa. Posteriormente se asignará una serie de valores a cada parámetro, creando así una lista de casos a estudiar. Después se simulará cada uno de los modelos en el programa Ricardo Wave, para lo que deberemos definir una serie de parámetros del motor. Cuando se obtengan todos los resultados de las simulaciones, se analizará qué admisión es la mejor.





# 3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

---

**E**n este apartado se va a estudiar qué parámetros del sistema de admisión vamos a definir. Posteriormente asignaremos unos determinados valores a cada uno de estos parámetros.

Como se dijo anteriormente, la elección de los parámetros es un proceso muy importante de este proyecto, ya que deben ser los menos posibles (si fueran muchos parámetros saldrían demasiados casos) pero tienen que definir la admisión geoméricamente lo mejor posible. Hay que tener en cuenta que los parámetros que se elijan debe de ser totalmente independientes unos de otros.

Como mínimo, podremos definir la admisión con 4 parámetros independientes (volumen del plenum, diámetro de los runners, longitud de los runners y ángulo del difusor). El volumen es una magnitud que a su vez depende de más parámetros. Concretamente, en este proyecto se va a definir el volumen del plenum por el diámetro de entrada del mismo (conexión entre difusor y plenum), diámetro final del plenum (situado después del último runner) y longitud del depósito.

Esto hace un total de 6 parámetros. Si eligiéramos 3 valores para cada parámetro, se tendrían un total de  $3^6 = 729$  posibles combinaciones. Esta cifra supone la inversión de demasiado tiempo y esfuerzo, por lo que se procede a utilizar dos valores por cada parámetro, lo que nos deja un total de  $2^6 = 64$  casos. Además, para simplificar un poco más, se irán analizando los resultados que se obtengan con cada admisión para comprobar si se podría descartar algún valor de algún parámetro.

Generalmente los parámetros que más influyen en el rendimiento del motor son el volumen del depósito del aire, la longitud y diámetro de los runners (conductos que unen el depósito con la entrada de los cilindros) y la entrada del aire (si hay un codo en la entrada, supondrá una pérdida de carga).

## 3.1 Volumen del Plenum

El volumen y la forma de este depósito (plenum) son parámetros que influyen en la respuesta del motor. Así, un gran volumen conseguirá evitar que el motor se quede sin aire a altos regímenes de giro pero, producirá una respuesta al acelerador lenta perjudicando seriamente la conducción del vehículo. Por el contrario, un volumen pequeño producirá una respuesta casi instantánea al acelerador pero puede no alimentar correctamente al motor en los casos en los que el motor necesita una gran cantidad de aire en la alimentación.

La admisión actual tiene un volumen de 3,64 l. En cuanto al volumen idóneo del plenum hay muchas discrepancias entre los diseñadores.

Se van a diseñar las admisiones por tanto entre 3 y 12,5 l.

Para diseñar el plenum, se va a parametrizar el volumen en tres parámetros. Uno el diámetro de entrada, otro el diámetro final del del plenum y el tercero será la longitud del plenum. En la ilustración 10 podemos observar un esquema con estos parámetros.

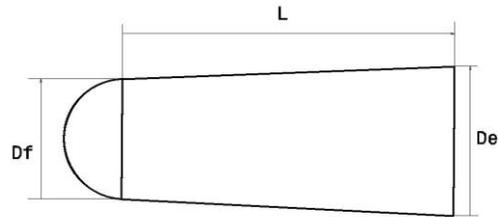


Ilustración 1.- Parámetros que definen el volumen del Plenum. “De”: diámetro de entrada al plenum (conexión con el adaptador). “Df”: diámetro final del Plenum. “L”: longitud del Plenum.

Los valores de este parámetro deben satisfacer en todo momento los límites de volumen que se han mencionado anteriormente. Además hay que tener en cuenta el apartado IC1.4.1 de la normativa vigente de la competición, en la que se imponen los límites entre los que debe estar la admisión completa. Con este tipo de admisión, el mayor problema lo tendremos en los extremos horizontales, como se muestra en la figura.

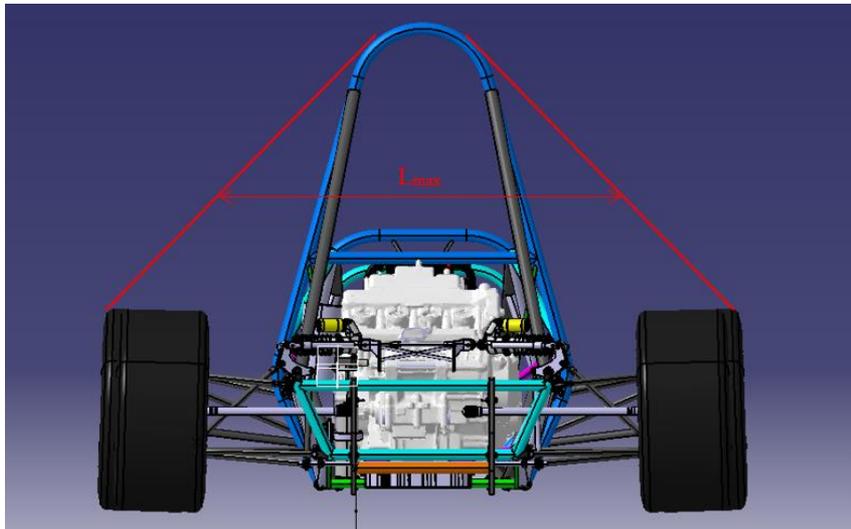


Ilustración 2.- Límite a cumplir por la admisión. En el caso más desfavorable en el que la admisión se sitúa más alta y con la barra del Main del ART-17 (se supone que del ART-18 será más baja y se tendrá mayor límite) es  $L_{max} = 600 \text{ mm}$ .

Teniendo en cuenta todos estos factores, se decide que se van a realizar las simulaciones de las admisiones con un diámetro de entrada igual a  $60 \text{ mm}$  o bien de  $100 \text{ mm}$ . Los dos valores del diámetro final serán  $45 \text{ mm}$  o bien  $80 \text{ mm}$ . Por último, la longitud que tendrá el Plenum será o bien  $330 \text{ mm}$  o  $450 \text{ mm}$  (se cumple de sobra la normativa).

### 3.2 Diámetro de los runners

Para escoger los valores del diámetro de los runners vamos a tener en cuenta el diámetro de entrada de aire que posee la culata del motor. Para el caso que se está estudiando, dicha medida es de  $36,5 \text{ mm}$ . No obstante, cabe la posibilidad de elegir otra medida y observar cómo influye. Si el segundo valor que se tome fuera superior a  $36,5$ , se tendrá un escalón al pasar el aire del runner a la culata, lo que provocará una pérdida de carga y una disminución de la eficiencia del motor. Por tanto, vamos a coger un segundo valor más pequeño, por ejemplo,  $25 \text{ mm}$ . Cogemos este valor sólo para ver si el efecto de introducir unos runners con menor diámetro es beneficiario o perjudicial para la respuesta del motor.

### 3.3 Longitud de los Runners

La longitud de los runners es un parámetro muy crítico y que no debe de tomarse a la ligera. Esto es así ya que cuando se cierra la válvula de la admisión se genera una onda de sobrepresión debido a la inercia que aún llevan los gases producida por la succión del motor que chocan con la válvula cerrada. Esta onda de presión retorna hasta el plenum, donde se producen unas fluctuaciones de la presión que retornan hacia la cámara de combustión. Se debe buscar una longitud adecuada para que el retorno de la onda coincida con la apertura de la válvula, comprimiendo así estas ondas al aire en el interior de la cámara de combustión aumentando con esto la eficiencia volumétrica del motor.

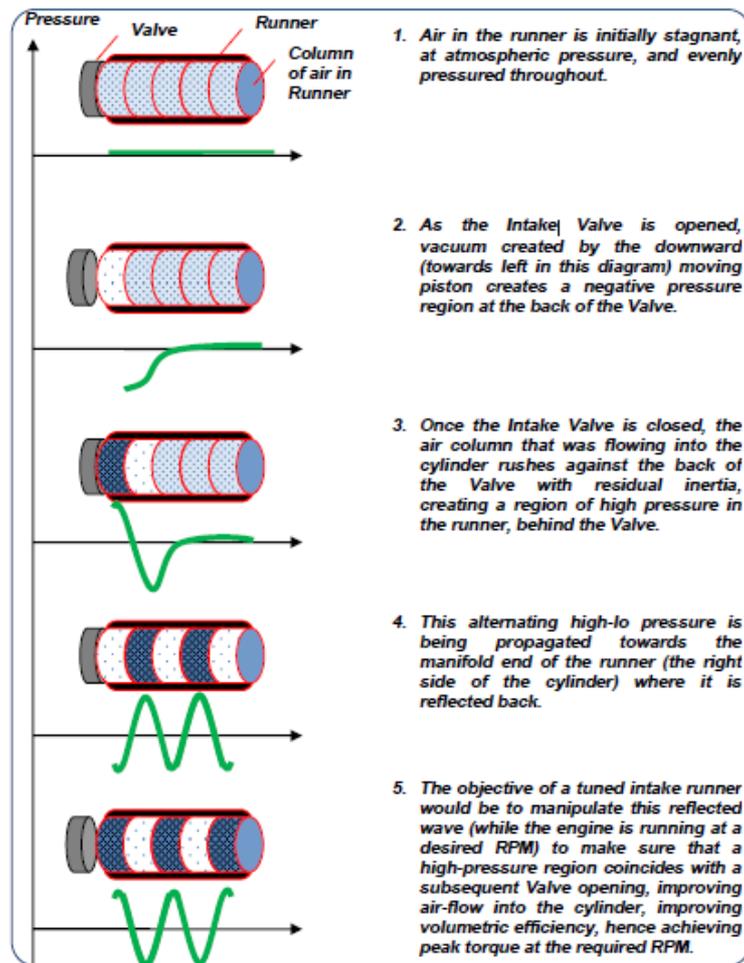


Ilustración 3.- Ondas de presión producidas por la apertura y el cierre de válvulas.

Se puede realizar una estimación de la longitud que aproximadamente tendrán los conductos con la ecuación del resonador de Helmholtz.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{L * V_{eff}}}$$

Donde;

f, es la velocidad de giro del cigüeñal.

c, es la velocidad del sonido (343 m/s).

A, es el área transversal de los runners, cuyos diámetros son los mencionados anteriormente y tienen forma circular.

L, es la longitud de los conductos.

$V_{eff}$ , es el volumen efectivo del motor. Se considera como el volumen del cilindro con el pistón en la mitad de la carrera. Se refiere a ese punto ya que en esa posición la velocidad es máxima.

$$V_{eff} = \frac{V_D}{2} + V_{CL}$$

Donde;

$V_D$ , es el volumen de barrido del pistón.

$V_{CL}$ , es el volumen de la cámara de combustión.

Del motor que se está estudiando, sería mucho mejor poder dejarlo todo en función del volumen de barrido del pistón y de la relación de compresión (CR). Para ello, se sabe que:

$$CR = \frac{V_D + V_{CL}}{V_{CL}}$$

Sustituyendo y simplificando quedaría:

$$V_{eff} = \frac{V_D(CR + 1)}{2(CR - 1)}$$

Teniendo en cuenta esta expresión, se puede llegar a la ecuación de Helmholtz aplicada a los conductos de admisión de un motor de combustión interna alternativo, cuya expresión es:

$$f_p = \frac{162}{K} c \sqrt{\frac{A * (CR - 1)}{L * V_D * (CR + 1)}}$$

De donde podemos despejar la longitud del conducto:

$$L = \frac{A * (CR - 1)}{V_D * (CR + 1)} \left( \frac{162c}{f_p * K} \right)^2$$

Donde;

$f_p$ , es la velocidad de giro del cigüeñal en revoluciones por minuto (*rpm*).

$c$ , es la velocidad del sonido en pie por segundos (1125,33 *pie/s*).

$A$ , es el área transversal de los runners cuyas áreas se pueden calcular con los diámetros antes mencionados. El área debe estar expresada en pulgadas al cuadrado (*in<sup>2</sup>*).

$L$ , es la longitud del conducto en pulgadas.

$CR$ , es la relación de compresión. Para el motor Honda CBR 600 RR es de 12:1.

$V_D$ , volumen de desplazamiento (barrido del pistón) cuyo valor es de 599/4 *cc* (9,15 *in<sup>3</sup>*).

$K$ , es una constante, cuyo valor puede oscilar entre 2 y 2,5 para motores convencionales.

En este caso, se va a intentar que el motor obtenga las mejores prestaciones entre 7000 y 9000 *rpm*. Se cogerá por tanto  $f_p = 8000$  *rpm*.

Con todos estos datos, se obtiene que para el diámetro de 36,5 *mm* de conducto, la longitud óptima es de 350 *mm*. Hay que tener en cuenta que la entrada de la culata mide 100 *mm*, por lo que la longitud real del runner debe ser de 350 – 100 = 250 *mm*.

Para el diámetro de 25 *mm* la longitud sería de 300 *mm*, que aplicando el mismo proceso de antes, quedaría en 200 *mm*.

Por tanto, los dos valores para la longitud de los runner serán 200 y 250 *mm*. Vamos a estudiar este parámetro como otro independiente y no sólo como combinación de los diámetros ya que esta ecuación es sólo una

estimación. Debemos comprobar con las simulaciones de Ricardo Wave que esto se cumple.

### 3.4 Ángulo del difusor

En el tipo de admisión lateral, caben dos posibilidades de difusor. O bien directamente coge el aire del lateral (el difusor no tendría ángulo). Con este tipo de difusor, la entrada de aire quedaría por detrás del piloto, justo a la salida del flujo de aire de los pontones.

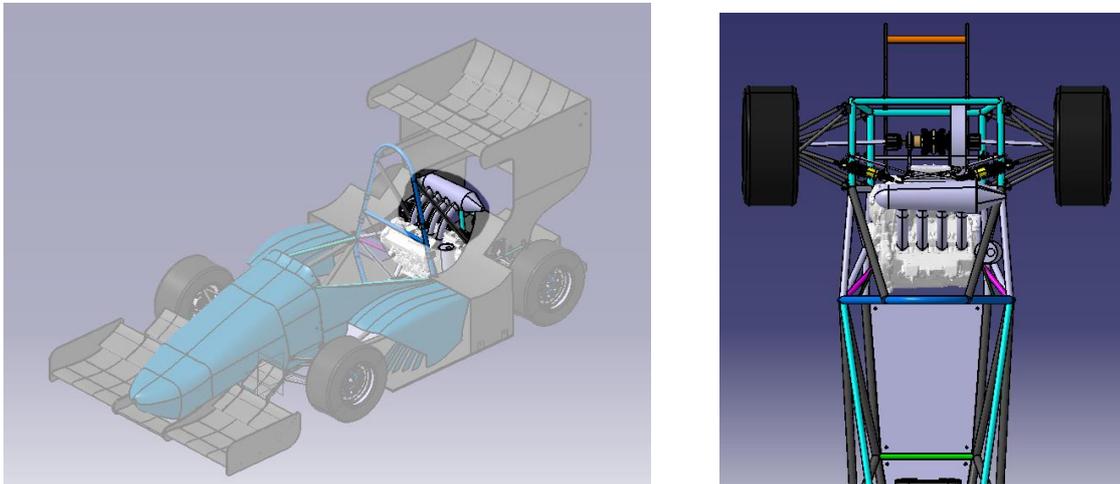


Ilustración 4.- Diseño de admisión lateral sin ángulo en el difusor.

La otra disposición que se puede poner para cumplir la normativa, es que el difusor forme un ángulo de  $90^\circ$  con la línea media del plenum. Para producir la menor pérdida de carga posible, la curvatura del radio interno será un poco menor que la curvatura del radio externo. Además, para que no haya problemas de ensamblaje en el monoplaza, el ángulo no podrá ser exactamente de  $90^\circ$ , sino que tendrá que ser un poco mayor. Por lo que se ve en la ilustración, parece que el más favorable puede ser un ángulo entre  $100^\circ$  y  $110^\circ$ .

Por tanto, los valores que vamos a coger para el ángulo del difusor serán  $105^\circ$  y  $0^\circ$ .



# 4 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

---

**E**n este apartado se van a definir qué parámetros del motor vamos a utilizar para comparar los diferentes diseños de sistemas de admisión realizados.

Para ello, debemos saber primero qué parámetros son los que mejor definen las características del motor. De forma general, los parámetros que mejor definen las características de un motor de combustión son la potencia que es capaz de desarrollar así como el par que puede ofrecer. Además, este proyecto está estudiando el diseño del sistema de admisión de aire al motor, cuya finalidad es conducir la mayor cantidad de aire posible hacia la cabeza del cilindro del motor. El parámetro que relaciona la cantidad de aire real que entra al cilindro con el volumen de la cámara de combustión es la eficiencia volumétrica.

## 4.1 Potencia

La potencia que se mide en un motor de combustión interna alternativo es el que es capaz de desarrollar la explosión. El programa que se va a utilizar para la simulación del motor nos da la potencia a la salida del eje del cigüeñal. La potencia nos da información sobre cuánta energía es capaz de producir el motor en la combustión en un determinado instante de tiempo, ya que la potencia se define como:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F * r}{t}$$

Donde;

F es la fuerza que ha sido capaz de desarrollar el cilindro, que se obtiene por la presión que se produce justo detrás de la combustión multiplicado por el área del pistón.

r es la distancia que recorre el pistón (la carrera del cilindro) que siempre es la misma.

t es el tiempo en el que lo realiza.

Generalmente, cuanto más rápido gira el cigüeñal, más fuerza es capaz de transmitir el motor en un determinado instante de tiempo, dependiendo de la forma de la admisión, de la cantidad de gasolina que reacciona con el oxígeno en la explosión, etc.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es optimizar el sistema de admisión para que las mejores prestaciones se obtengan a unas 8000 *rpm*. No obstante, la potencia tiende a crecer más linealmente, por lo que vamos a buscar es que si se produjera algún pico, fuera en este régimen.

## 4.2 Par

El par es un parámetro muy importante que se debe conocer de la respuesta de un motor. Mide la fuerza que es capaz de desarrollar el motor a una determinada de distancia. Sirve sobre todo cuando el coche empieza a moverse, ya que la fuerza que hay que transmitir a los neumáticos debe ser superior al peso del propio vehículo para poder moverse. Para ello, cuanto más par sea capaz de producir el motor a la salida del cigüeñal, mayor será el par que le llegue a las ruedas con una determinada transmisión.

### 4.3 Eficiencia Volumétrica

Los motores de combustión interna alternativos, como el CBR 600 RR, producen el movimiento del vehículo gracias a las reacciones que se producen en el interior de los cilindros, que hacen que aumente muchísimo la presión en el interior de la cámara de combustión haciendo así que se desplace el pistón.

Esta reacción se produce gracias a la mezcla aire ( $O_2$ ) – gasolina que reacciona al producirse una chispa (en la bujía). La relación de aire-gasolina siempre va a ser una cantidad que imponga la ECU según se haya marcado, pero si teóricamente es fija, esto quiere decir que a mayor cantidad de aire ( $O_2$ ) que sea capaz de entrar en el cilindro, mayor cantidad de gasolina entrará y se producirán presiones mayores al reaccionar. Esto se traduce en un aumento de velocidad de recorrido del pistón, que a su vez proporciona una mayor velocidad del cigüeñal. Este tipo de subidas de aire ocurre, por ejemplo, cuando se pisa el acelerador (se abre la mariposa) permitiendo así la entrada de una mayor cantidad de aire.

La cuestión que se plantea aquí es si sería posible que se aumentara al máximo la cantidad de aire que pueda entrar según la forma que tenga la admisión. Para ello, vamos a poder comprobarlo con un coeficiente, que es la eficiencia volumétrica.

La cantidad de aire que entra al motor puede definirse como:

$$M = n \cdot V \cdot \rho \cdot \eta$$

donde:

$M$  = masa de aire atrapado por unidad de tiempo

$\rho_i$  = densidad del aire en la entrada del motor

$n$  = número de carreras de aspiración por unidad de tiempo

$V_D$  = volumen desplazado por el pistón en un cilindro

$\eta_v$  = eficiencia volumétrica

El rendimiento volumétrico, definido en la fórmula anterior, es la relación entre la masa de aire atrapado en un cilindro y la masa de aire que llenaría todo el cilindro a la densidad de entrada al motor. Esto es una característica que bien puede ser usada como mérito o demérito a la hora de comparar motores: su capacidad de bombear el aire necesario para su funcionamiento. Se puede comparar en diferentes tamaños y diferentes velocidades.

La eficiencia volumétrica es adimensional y puede ser mayor o menor que la unidad.

Se va a usar por tanto este parámetro también, además de motor y potencia, como medida de resultados obtenidos según el modelo de admisión simulado.





# 5 SIMULACIÓN

A continuación se va a describir la forma de simular para probar todas las admisiones. Para ello vamos a definir primero unos inputs básicos que debe tener el modelo, en el que se incluirán tanto las características del motor como las geometrías más relevantes (admisión, colectores de escape, silencioso, etc.). Posteriormente se procederá a definir unos parámetros para la simulación y finalmente definiremos unos inputs avanzados.

## 5.1 Inputs básicos

Lo primero es introducir los datos y parámetros geométricos del motor en cuestión. Sin embargo, no se conocen muchos de ellos. Para algunos de estos valores que no conocemos, el programa asigna unos valores “default” que suelen ser válidos para la mayoría de motores. Además, en este ámbito de definición de los parámetros básicos, el desconocimiento de algunos valores no tiene por qué intervenir en exceso en el resultado de nuestra simulación.

Las principales características del motor se definen en el tipo de modelo que le indiquemos a Ricardo.

Primero, al iniciar el programa, tenemos esta pantalla:

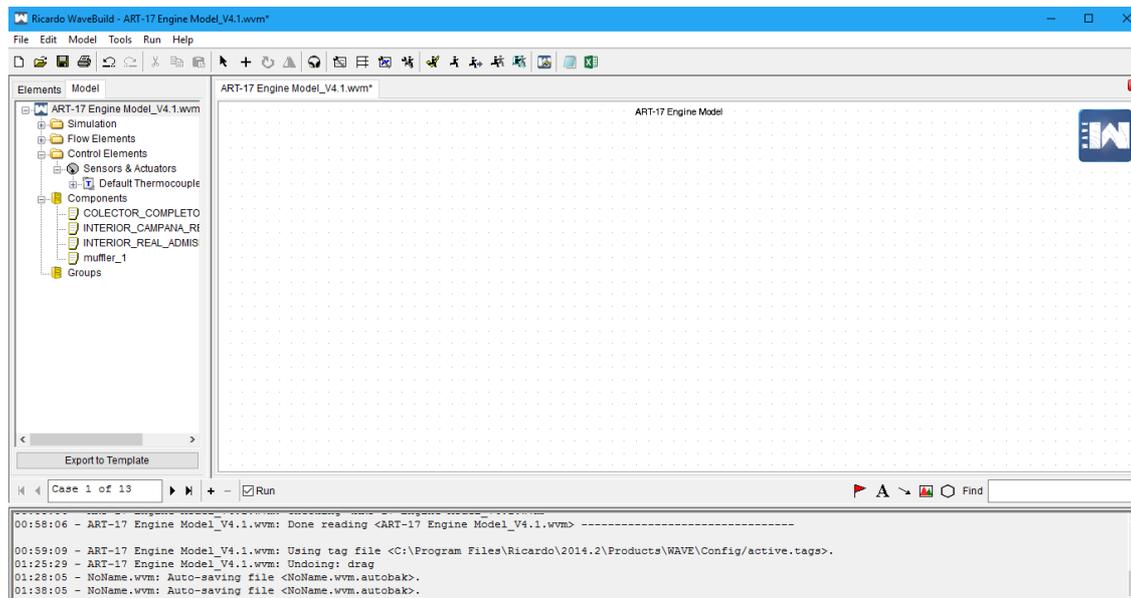


Ilustración 5.- Pantalla inicial de Ricardo Wave.

### 5.1.1 Características del bloque del motor

Para definir el modelo, en la barra superior elegimos “Model” y seleccionamos el modelo “Engine”. Aquí nos aparece la ventana “Engine General Panel”, donde podremos definir las características de nuestro motor:

	1	2	3	4
Cylinder	1	2	4	3
TDC	0	180	180	180

Ilustración 6.- Ventana “Engine General Panel”, en la que se configuran las características principales del motor.

- N° de cilindros: en el caso estudiado son 4.
- Tiempos por ciclo: en este motor 4T.
- Tipo de motor: inyección por chispa (motor de gasolina).
- Orden de explosión de los cilindros: según el manual del motor en cuestión, el firing order es 1-2-4-3.

Todos estos datos pueden encontrarse en el manual Honda CBR 600 RR 2003-2006.

En esta misma ventana se pueden ajustar también otras características del motor como son la combustión, la conducción, la transmisión de calor, etc. Estos parámetros son de carácter más avanzado, por lo que se estudiarán más adelante.

### 5.1.2 Características de los cilindros

Otro aspecto importante que hay que definir son las características geométricas de los cilindros. Para ello, se arrastran los elementos “Cylinders” a la pantalla principal de Ricardo. Sobre ellos, se definen sus características en la ventana correspondiente:

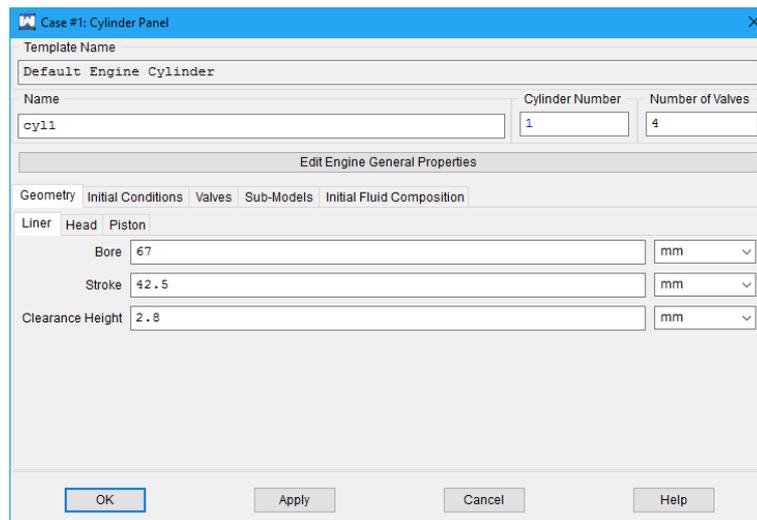


Ilustración 7.- Ventana “Cylinder Panel”, donde se definen las características de los cilindros.

En la ilustración 17 se pueden observar los valores característicos de los cilindros del CBR 600, como el número de válvulas por cilindro (dos para admisión y dos para escape), el diámetro de la camisa, la longitud de la carrera o la altura de la cámara de combustión. Todos estos datos se encuentran también en el manual Honda CBR 600 RR 2003-2006

En esta misma ventana, se encuentran varias pestañas, en las que podemos incluir en nuestro modelo unas condiciones iniciales de temperatura tanto en el pistón como en el cilindro entero o elegir el modelo de combustión que utilice (en este caso el especificado anteriormente).

### 5.1.3 Cuerpos geométricos en 3D

#### 5.1.3.1 Admisión

En este apartado se va a explicar el método que se utilizará para mallar todos los modelos de admisiones que se van a realizar. Para ello, se define la geometría de la admisión correspondiente en un programa de CAD (en este caso se ha utilizado el programa CATIA). Una vez obtenida la geometría, se hace un sólido del interior de la misma y se exporta en un archivo .stl.

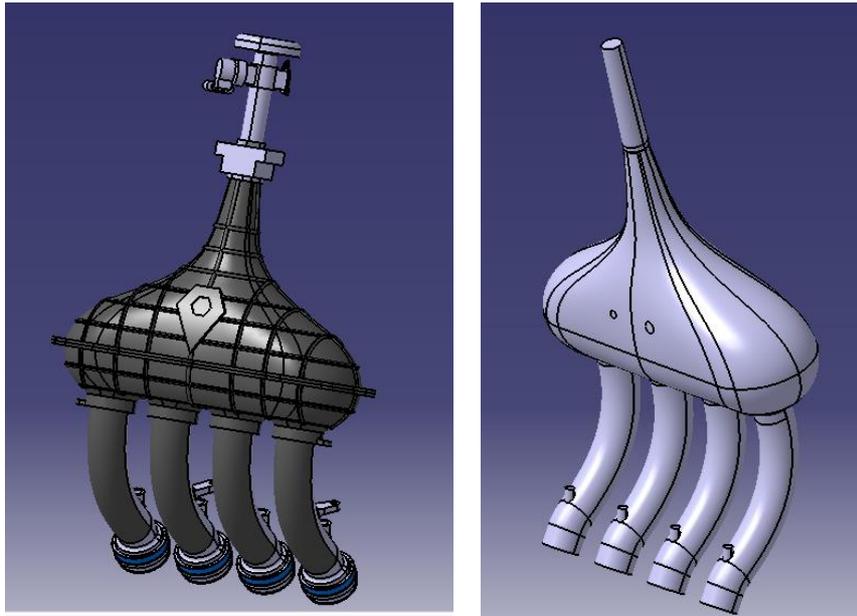


Ilustración 8.- A la izquierda, el exterior de la admisión actual. A la izquierda, el interior hecho sólido de la admisión actual.

Después, con el subprograma Wave Mesher de Ricardo Wave, se importa la geometría y se definen las conexiones correspondientes. En la siguiente pestaña, Wave Mesher permite definir manualmente el número de elementos que se deseen, de tal forma que se puede hacer el modelo tan preciso como se quiera. Finalmente, en la pestaña “Elements” se comprueba que todos los elementos estén unidos correctamente.

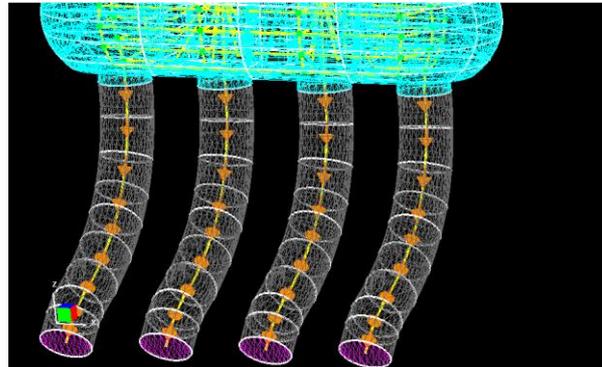
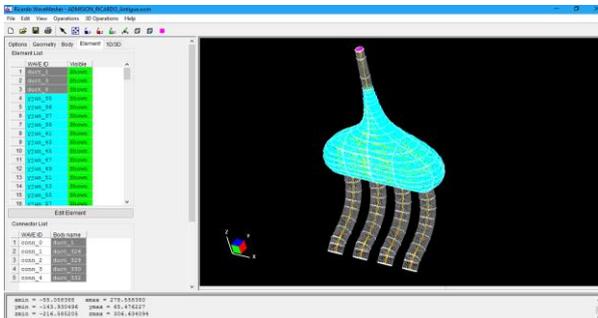


Ilustración 9.- A la izquierda, admisión actual mallada con Wave Mesher. A la derecha lo mismo, con más detalle para comprobar que las conexiones están bien realizadas.

Para incluir esta admisión en nuestro modelo, basta con arrastrar desde el apartado “Element” del modelo general el componente “File Reference”.

Este procedimiento se va a utilizar con varias geometrías, como son por ejemplo la campana de entrada del aire (antes de la mariposa):

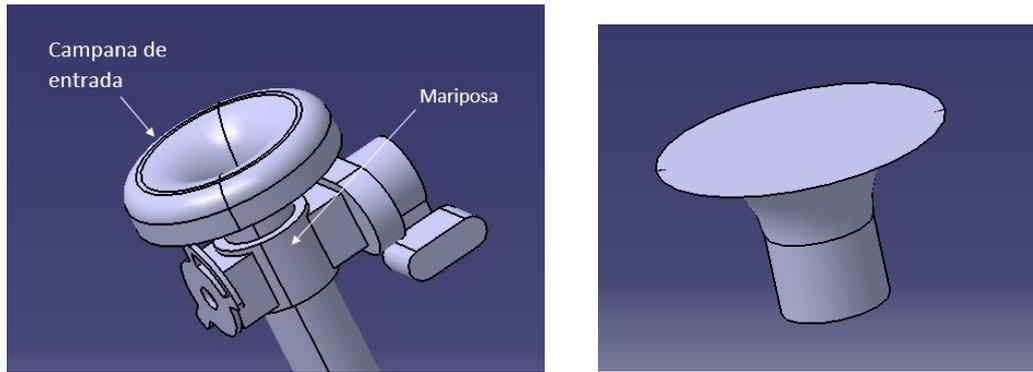


Ilustración 10.- A la izquierda esquema de la campana de entrada. A la derecha, el interior de dicha campana hecho sólido.

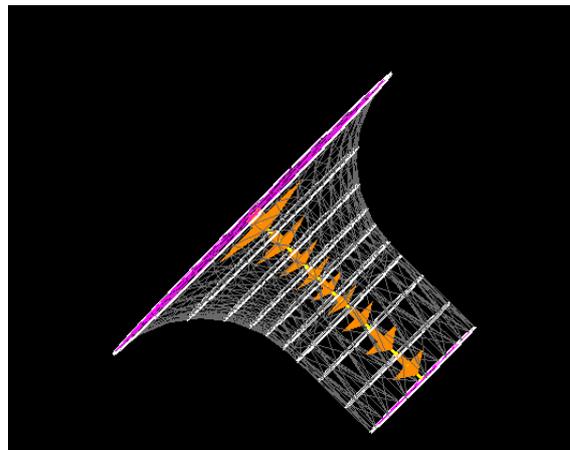


Ilustración 11.- Campana de entrada mallada y correctamente conectada.

El hecho de realizar la campana de entrada por un lado y el cuerpo de la admisión por otro se debe a que entre estos dos cuerpos, vamos a incorporar en el modelo una válvula de mariposa, para que los resultados se aproximen lo máximo posible a la realidad.

### 5.1.3.2 Escape

Para la inclusión de los colectores de escape en nuestro modelo, se utiliza el mismo procedimiento:

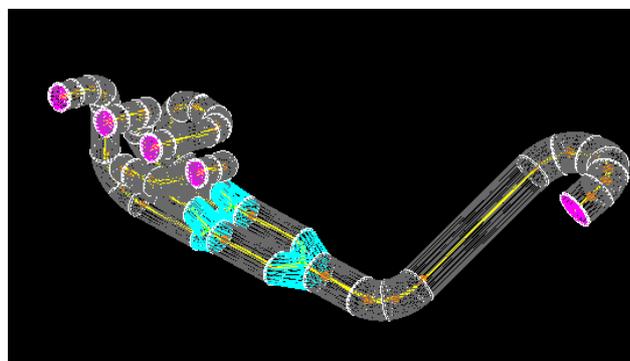


Ilustración 12.- Colectores de escape mallados y correctamente conectados.

Para el silencioso sin embargo, se va a utilizar un subprograma distinto, en el que no se necesita un programa

externo para el diseño de la geometría. El subprograma es Wave Build3D. Aquí definimos un cilindro con las características de nuestro silencioso, así como el número y la dimensión de los orificios, los diámetros correspondientes de los tubos, etc.

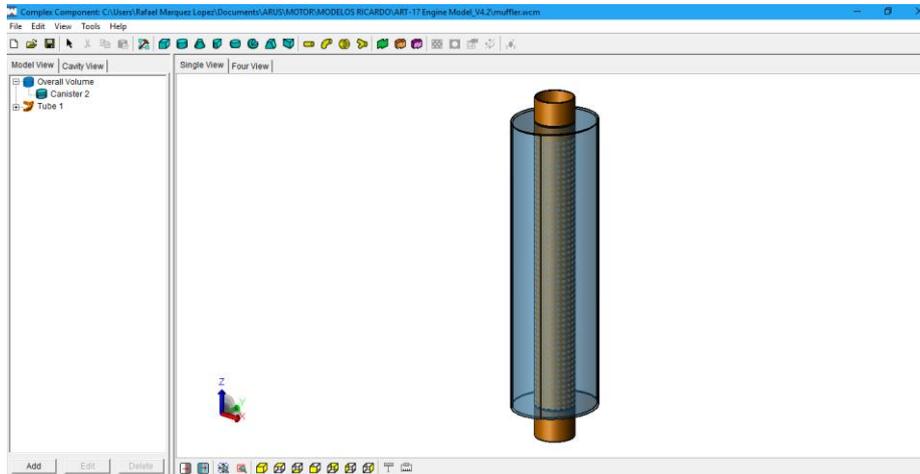


Ilustración 13.- Esquema del silencioso en el programa Wave Build3D.

Como se puede observar, el modelo es más simple que las otras geometrías y además las características de que dispone éste son muy similares al silencioso real.

Para incluir el silencioso en el modelo solo se debe volver a arrastrar el componente “File Reference” y seleccionar el archivo donde se haya guardado.

## 5.1.4 Otros

### 5.1.4.1 Ambiente

Además de los ya mencionados, se deben de incluir también otra serie de elementos en el modelo para hacerlo real, como son las condiciones atmosféricas (con el elemento “Ambient”, se dejan las condiciones ambientales por defecto) tanto a la entrada de la admisión como a la salida del silencioso.

### 5.1.4.2 Throttle Valve

Como se ha mencionado anteriormente, se va a situar entre la campana de entrada y el cuerpo de admisión una mariposa, mediante el elemento “Throttle valve”.

### 5.1.4.3 Inyectores

Se pueden incluir también los inyectores. El problema es que Ricardo no permite situar la entrada de los inyectores en el lugar donde se encuentran realmente (en la parte más baja de los runners). No obstante, se definen unos conductos (elementos “duct”) que simbolizan los conductos que se encuentran en la primera parte de la culata del motor y se conectan los inyectores a estos conductos, de tal forma que están tan próximos al lugar real en comparación con el que se encuentra en Ricardo, que dicha diferencia no provocará grandes cambios en el resultado.

Además, el valor que viene por defecto de la relación Combustible/Aire es cero. Este valor es difícil de averiguar ya que para ello se requiere tener un buen mapa del motor en cuestión. No obstante, podemos usar el valor de la mezcla estequiométrica (relación 14:1). Por tanto, el valor del Ratio Combustible/Aire sería  $1/14 = 0.07$ .

### 5.1.4.4 Juntas “Y”

Son las juntas que unen dos conductos en uno o que separa un conducto en dos (en cada cilindro hay dos válvulas de admisión y dos de escape). De estas juntas hablaremos en el siguiente apartado, ya que algunas se consideran como inputs avanzados.

Por tanto, el modelo de Ricardo quedaría de la siguiente forma:

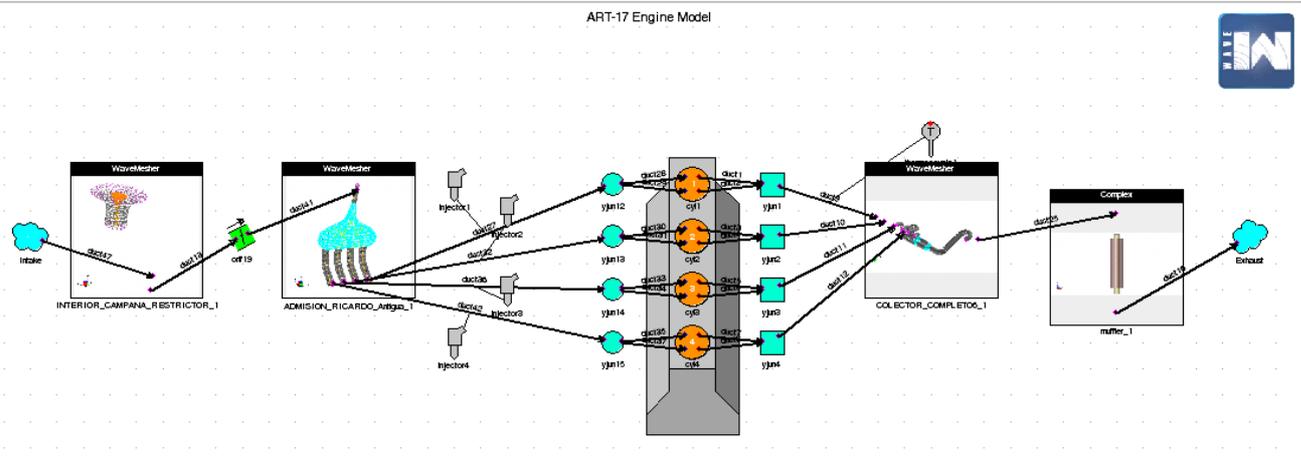


Ilustración 14.- Modelo del motor Honda CBR 600 en Ricardo Wave.

## 5.2 Parámetros de la simulación

Introducidos los parámetros básicos de la geometría del modelo, hay que establecer ahora los valores necesarios para la simulación del mismo.

### 5.2.1 Régimen de simulación

Ricardo Wave permite realizar análisis del motor en régimen transitorio (transient) o en permanente (steady-state). Las simulaciones en transitorio pueden dar unos valores más específicos de todos los parámetros del motor, sin embargo, se debe introducir (para cada parámetro) un valor diferente dependiendo de las revoluciones a las que esté trabajando el motor en ese instante. En el caso estudiado, esto es inviable ya que se debería averiguar una dependencia con las revoluciones del motor de todos y cada uno de los parámetros que influyen en la simulación (el modelo de combustion cambiaría, el ratio combustible/aire, etc.). Además, el fin último de la simulación es averiguar qué admisión se comporta mejor trabajando en unas condiciones normales, por lo que los cálculos que realiza el modelo en estacionario son válidos para comparar una admisión con otras.

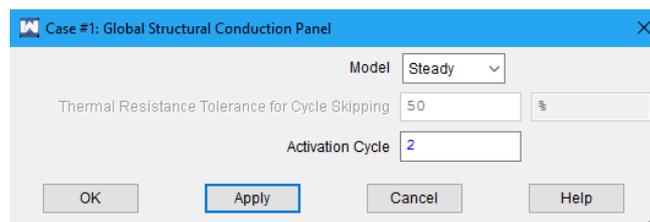


Ilustración 15.- Ventana de elección de la simulación en estacionario.

### 5.2.2 Parámetros generales

El resto de parámetros de la simulación se van a ajustar en el apartado de Model, concretamente en el icono “Simulation Control”:

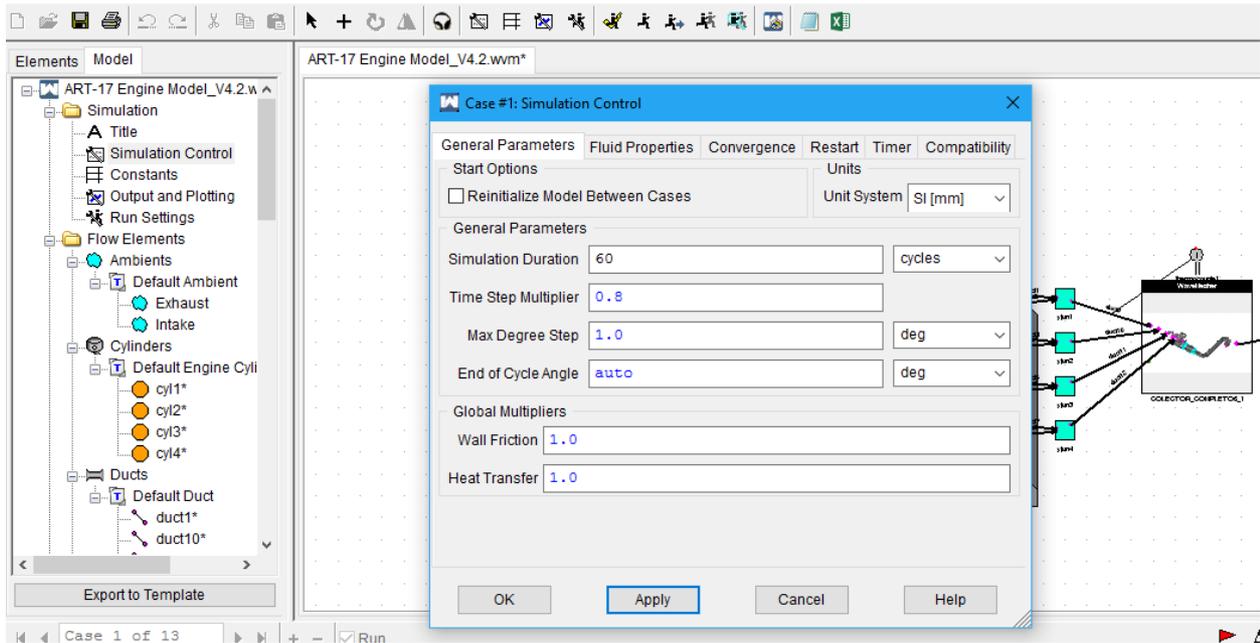


Ilustración 16.- Ventana “Simulation Control” con los valores de los parámetros de la simulación.

Como se puede observar en la ilustración 27, el primer parámetro general de simulación que encontramos es la duración de la simulación (*Simulation Duration*). Este parámetro representa el número de ciclos que el motor ha de correr antes de que se establezca una solución. El resto de parámetros de esta pestaña se refieren a los intervalos de tiempo y de grados con los que va a ir avanzando la simulación (se harán los cálculos para cada ciclo cada 0.8 s, por ejemplo). Para estos parámetros, usamos el valor que Ricardo Wave ofrece por defecto.

### 5.2.3 Propiedades del fluido durante la simulación

La siguiente pestaña que podemos editar es “*Fluid Properties*”:

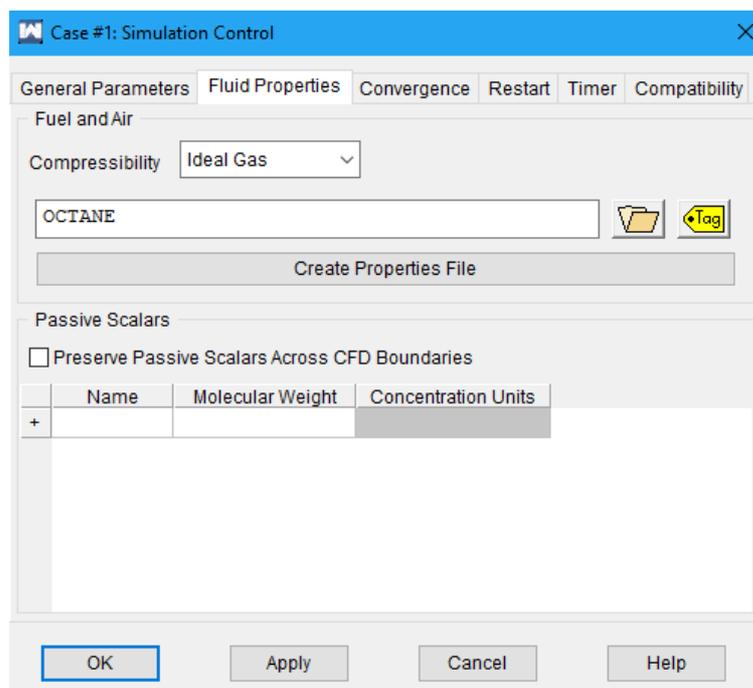


Ilustración 17.- Pestaña en la que elegir las características de los fluidos.

Como se puede observar, el fluido elegido como combustible es el Octano, ya que es el que más se asemeja a la gasolina (que es el combustible que se utiliza en este motor).

Para la compresibilidad no se queda muy bien reflejado qué ecuaciones usa para cada valor elegido. Podemos elegir varios tipos de compresibilidad. Se hace uso de la ayuda de Ricardo Wave para averiguar a qué se refiere cada una de ellas.

Compressibility Option	Description
Perfect Air	This executes a simplified simulation with air-only using a constant specific heat, using the perfect gas equation of state. The "Fuel and Air Properties" file need not be selected when this value is used.
Ideal Gas	The gas follows the ideal gas equation of state. This is recommended for best simulation speed, spark-ignited engines, and low pressure non-engine models.
Real Gas (Fast)	The effects of real gases are considered when the pressure is above 5 bar. The real gas properties are calculated from the <a href="#">Lee-Kesler</a> generalized correlation tables. This option is recommended for high compression ratio Diesel engines.
Real Gas	The effects of real gases are considered in the entire flow network. The real gas properties are calculated from the <a href="#">Lee-Kesler</a> generalized correlation tables.

Ilustración 18.- Copia de la ayuda de Ricardo Wave para la compresibilidad.

Por lo que se puede observar, la primera opción calcularía con un método simple en el que solo hay aire. En la opción de Gas Ideal, se indica que utilizaría la ecuación de los gases ideales y que además se recomienda para motores de ignición por chispa, como es nuestro caso. Además, se indica que para los casos de "Real Gas", hay que introducir unos archivos con unos valores determinados para el cálculo de los que no disponemos. Por tanto, usaremos el modelo de Gas Ideal (*Ideal Gas*).

## 5.2.4 Convergencia

En el siguiente apartado vamos a seleccionar los parámetros de convergencia que ha de seguir el modelo:

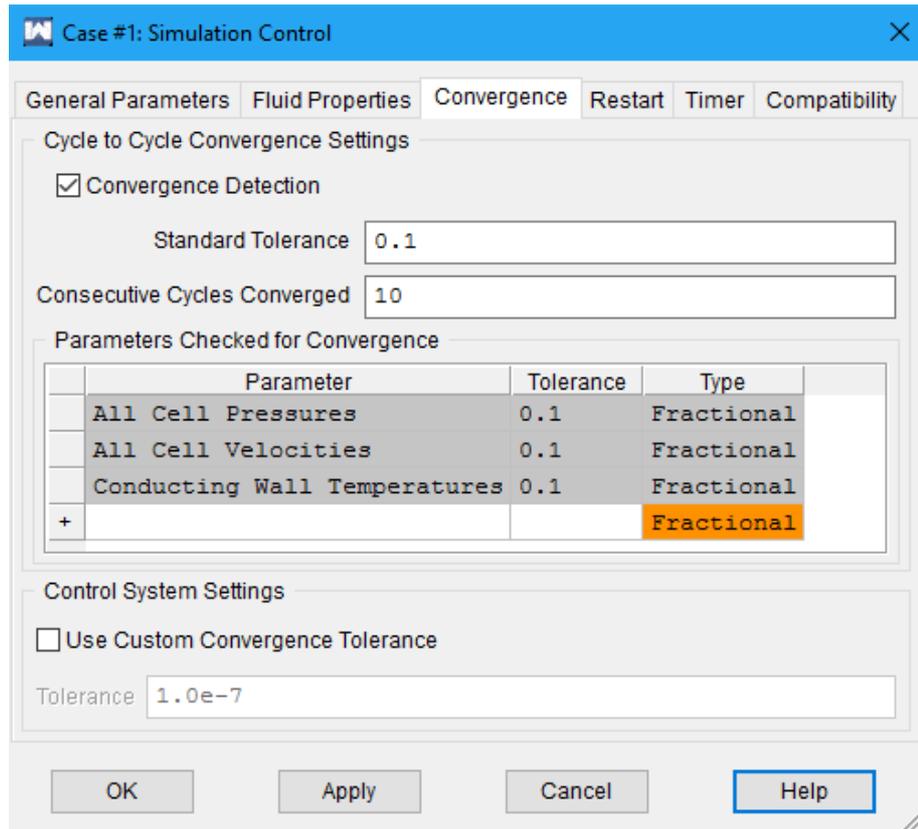


Ilustración 19.- Pestaña de Convergencia (*Convergence*).

Primero hay que indicar que el modelo detecte la convergencia de los resultados. Esto permite al código de Wave saltar al siguiente caso cuando la diferencia entre el valor de los parámetros de una iteración y el valor de esos mismos parámetros en la siguiente iteración sea menor que una determinada cantidad que podemos indicarle, con el parámetro de tolerancia estándar (*Standard Tolerance*). Los parámetros que tomarán esta tolerancia en el modelo estudiado serán todas las presiones de todos los elementos, así como las velocidades en cada uno de los elementos y la diferencia de temperatura en la pared de contacto del elemento. En este caso, se considera una tolerancia de 0.1.

Además, por si acaso hubiera algún problema y los valores de los parámetros entre una iteración y otra fuera mayor de 0.1, se considerará que la solución ha convergido después de realizar 10 iteraciones (suele converger entre la cuarta y la quinta iteración).

### 5.2.5 Otros

Del resto de parámetros que se pueden tocar, vamos a destacar el de reinicialización de los parámetros. En este caso no se va a utilizar esta opción, ya que hemos establecido unos valores de presión y temperaturas iniciales por defecto. Pero si tuviéramos datos reales de los que poder partir, se utilizaría esta opción.

## 5.3 Inputs avanzados

En este apartado se van a definir una serie de Inputs que nosotros podemos introducirle al motor pero que son un poco más complejas, ya sea por su dificultad a la hora de conocer los datos, así como datos geométricos internos del motor que solo podremos conocer si abrimos un bloque motor del Honda CBR 600 RR.

### 5.3.1 Modelo de combustión

Para la combustión, se necesitan una serie de parámetros imposibles de obtener experimentalmente en el caso elegido para este proyecto. Por tanto, se mantienen los valores que usa el programa por defecto, ya que en la ayuda del programa se puede encontrar que estos valores independientes del número de revoluciones son los usados para el modelo de un motor de 4 cilindros de 4 tiempos con ignición por chispa. A saber, estos valores son:

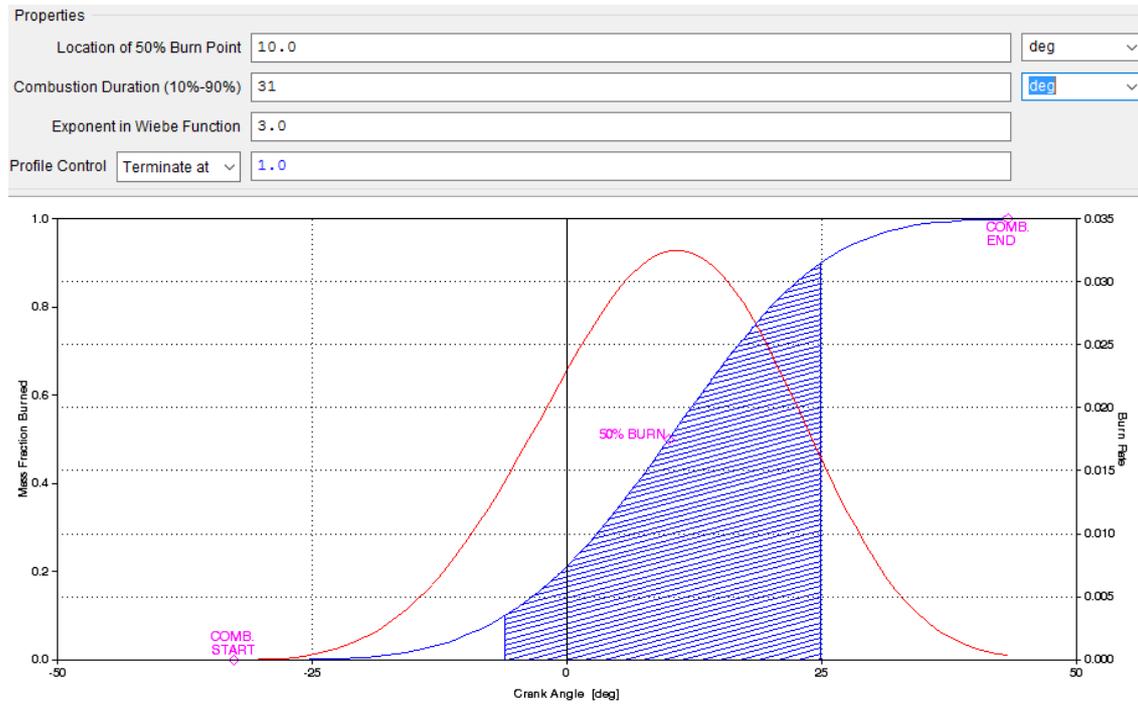


Ilustración 20.- Ventana de propiedades de la combustión. Se incluyen los valores generalizados para un motor 4cyl4T.

- Localización del punto en el que ocurre el 50% de la combustión: 10° después del “Top Dead Center” (TDC) o punto muerto superior.
- Duración de la combustión (10% - 90%): 31°.
- Exponente de la función utilizada: 3.

### 5.3.2 Coeficientes de flujo por apertura de válvula

Estos coeficientes son los encargados de evaluar la pérdida de carga del flujo en la culata. El flujo a través del motor es altamente dependiente del flujo que pasa por las aperturas de las válvulas. Para evaluar estos datos experimentalmente, se necesitaría un banco de flujo. En este caso, resulta inviable ya que no se alcanza a la utilización de un banco de flujo en este proyecto. No obstante, Ricardo Wave puede calcular una muy buena aproximación de esta pérdida de carga si introducimos con la mayor precisión posible la geometría de los conductos de la culata, que en el modelo se representan con las *y-junctions*.

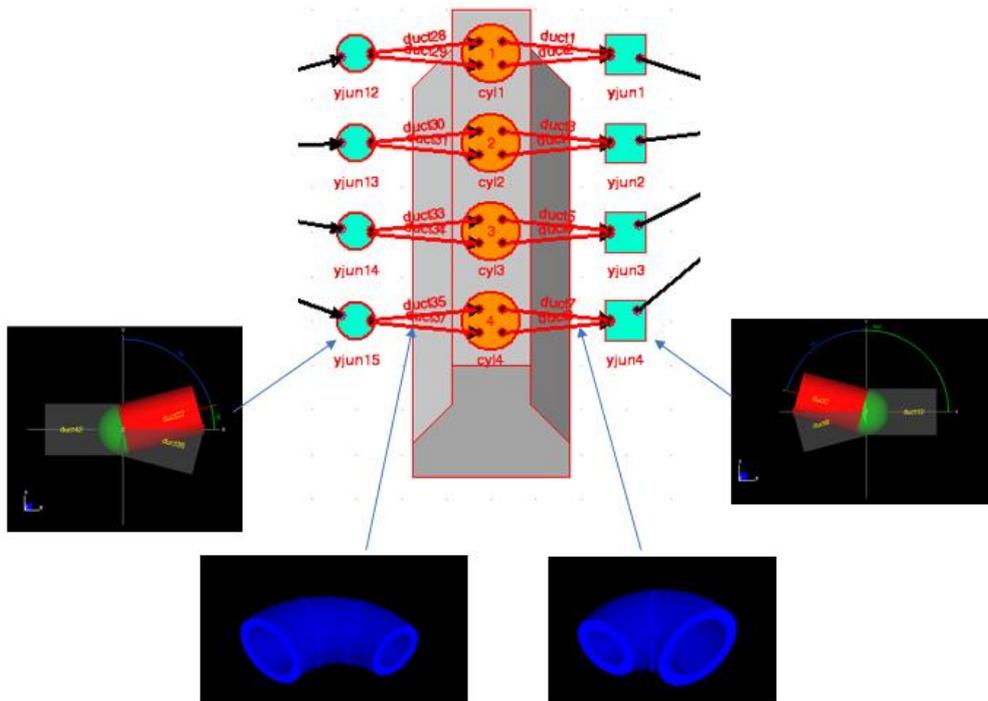


Ilustración 21.- Esquema geométrico sobre la situación tanto de las *y-junctions* como de los últimos conductos que van a parar a las válvulas (a la izquierda los de admisión y a la derecha los del escape).

Abriendo la culata del motor Honda, se puede observar que el ángulo que forman los conductos en los que se encuentran las válvulas de la admisión son simétricas respecto al plano medio (plano que atraviesa el conducto procedente del *runner*) es de 15°.

Para los conductos de las válvulas de admisión, se tiene que el diámetro inicial de los conductos es 36,50 *mm* y que se reduce hasta 24,88 *mm*. Además, tienen un ángulo de doblado de 100°.

Todas estas características se pueden editar en las ventanas correspondientes a cada geometría:

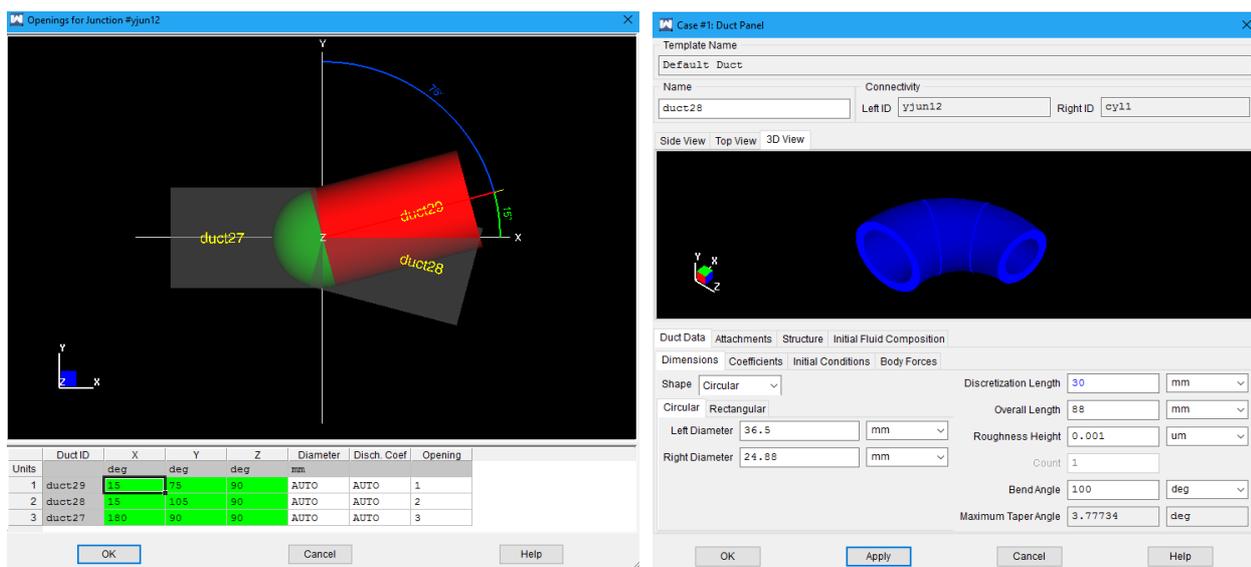


Ilustración 22.- Geometrías tanto de la junta que separa el conducto procedente del *runner* en los conductos que se dirigen a las válvulas (izquierda) como de este mismo conducto (derecha).

Para el escape se configura de la misma forma que en la admisión. Sin embargo, ahora el tipo de junta que se utiliza permite definir algunos parámetros más. Esto es debido a que por este conducto salen los gases del escape a una temperatura y presión muy altas. Para ello, se le deben indicar unas condiciones iniciales de presión y temperatura a la entrada, así como valores geométricos. Además, este tipo de *y-junction* tienen opciones para editar los parámetros de pérdida de carga. No obstante, en este caso se dejarán los valores predeterminados por el programa Ricardo Wave.

### 5.3.3 Alzada de válvula respecto a la rotación del cigüeñal

El programa Ricardo Wave incorpora un alzado de válvulas usando un perfil por defecto. No obstante, este parámetro puede ser medido experimentalmente girando el árbol de levas incrementalmente y midiendo la elevación producida de la válvula con un reloj comparador. Los puntos de apertura y cierre de admisión y escape relativos al TDC deben ser conocidos para referenciar la rotación del árbol a la del cigüeñal.

Este parámetro sí que se puede introducir, ya que se dispone de un reloj comparador, así como de los componentes del motor necesarios para poder realizar la medición.

El primer paso es realizar un círculo graduado (en este caso con escalas de  $1^\circ$ ) y acoplarlo al eje de giro del árbol de levas. Después, acoplar un marcador fijo para asegurarnos que estamos girando  $1^\circ$  cada vez. Posteriormente, se procede a colocar el reloj comparador que es capaz de medir hasta  $25\text{ mm}$  (según el manual, el máximo alzado de válvula debe de ser de  $8,3\text{ mm}$ ). Es importante colocarlo en la misma dirección en la que se va a alzar la válvula, ya que si no está en la misma línea, se estaría falseando la medida y la simulación daría unos datos erróneos.

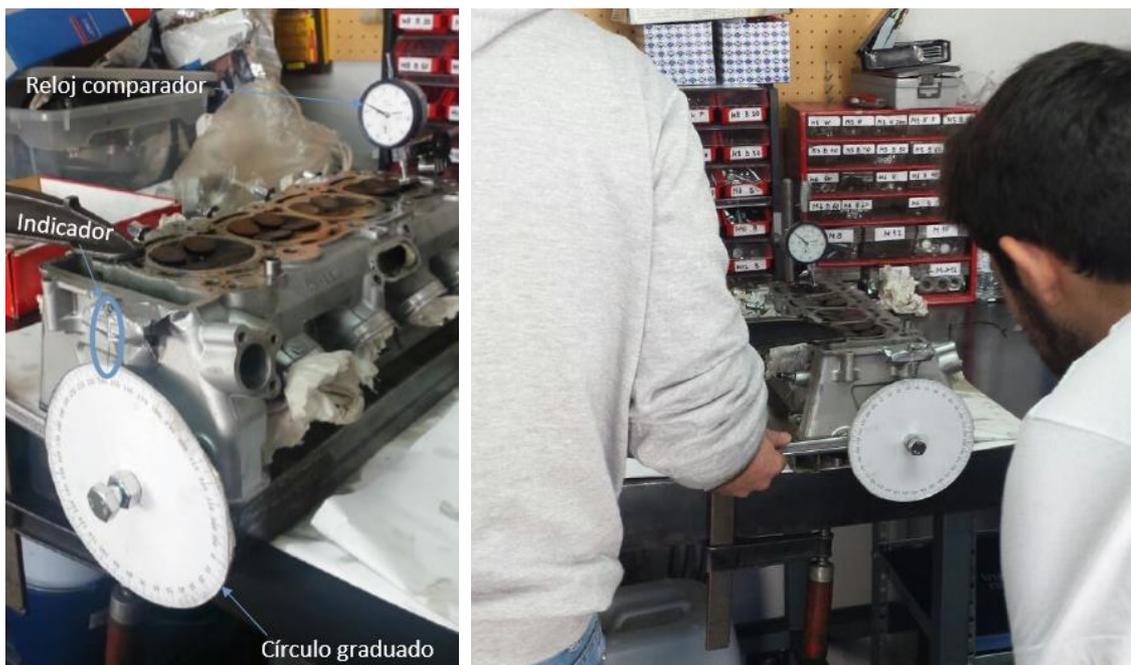


Ilustración 23.- Obtención experimental de la medida del alzado de válvulas.

Además, para tomar la referencia de medida (y poder introducir las después en Ricardo) es importante conocer en qué ángulos se producen algunas de las características más importantes como a qué grado se abren o cierran las válvulas, tanto de admisión como de escape. Este dato puede conocerse gracias al manual del motor:

Intake Valve Maximum Lift	8.3 mm
Exhaust Valve Maximum Lift	7.2 mm
Intake Valve Timing	
Open BTDC	22 degrees
Close ABDC	43 degrees
Duration	245 degrees
Exhaust Valve Timing	
Open BBDC	40 degrees
Close ATDC	5 degrees
Duration	225 degrees
Valve Timing Measuring Point	0.3 mm.

Ilustración 24.- Datos sobre el alzado de válvulas obtenidos del manual del motor Honda CBR 600 RR 2003-2006.

Una vez obtenidas todas las medidas, se procede a introducirlas en Ricardo. Para ello, en la pestaña de Model se selecciona el apartado *Valves*, donde podremos seleccionar tanto las válvulas de admisión, las de escape o la mariposa. Eligiendo a cada una y con la precisión de 1°, se introducen estos valores en la tabla que aparece.

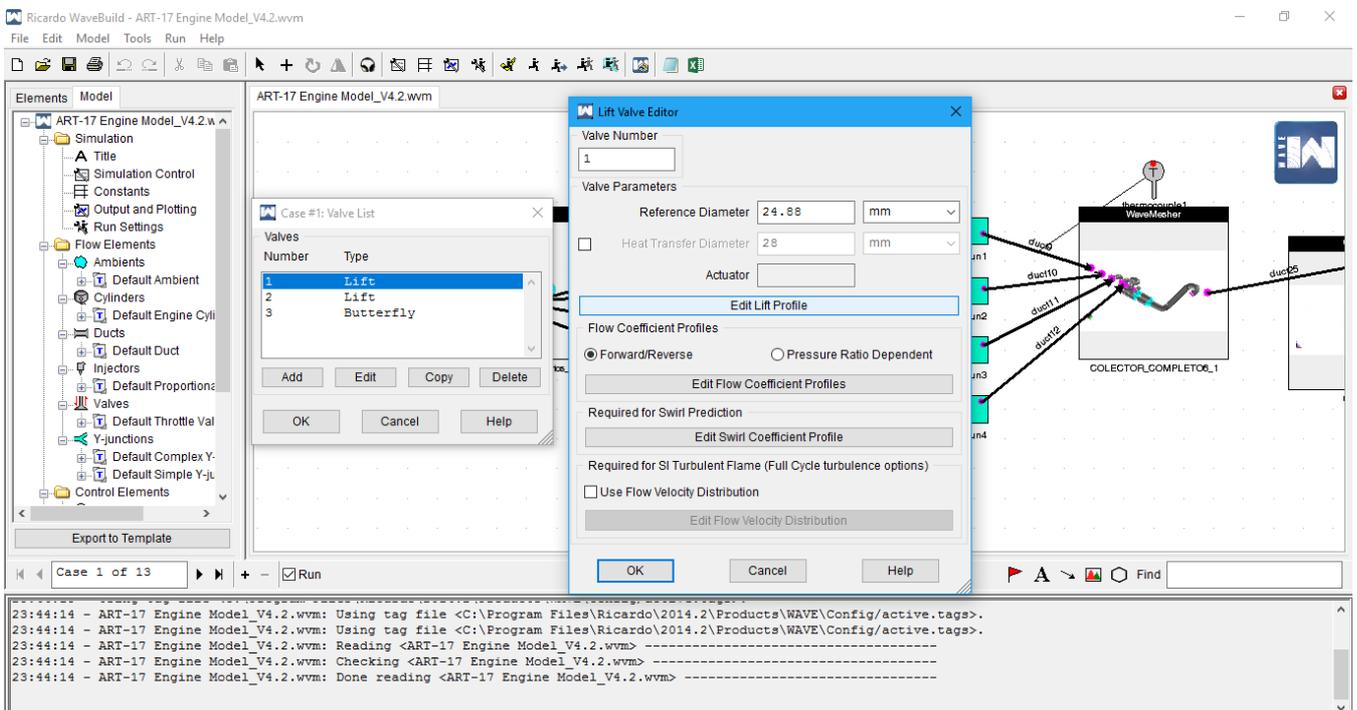


Ilustración 25.- Ventanas que permiten acceder a la edición de los alzados de válvulas.

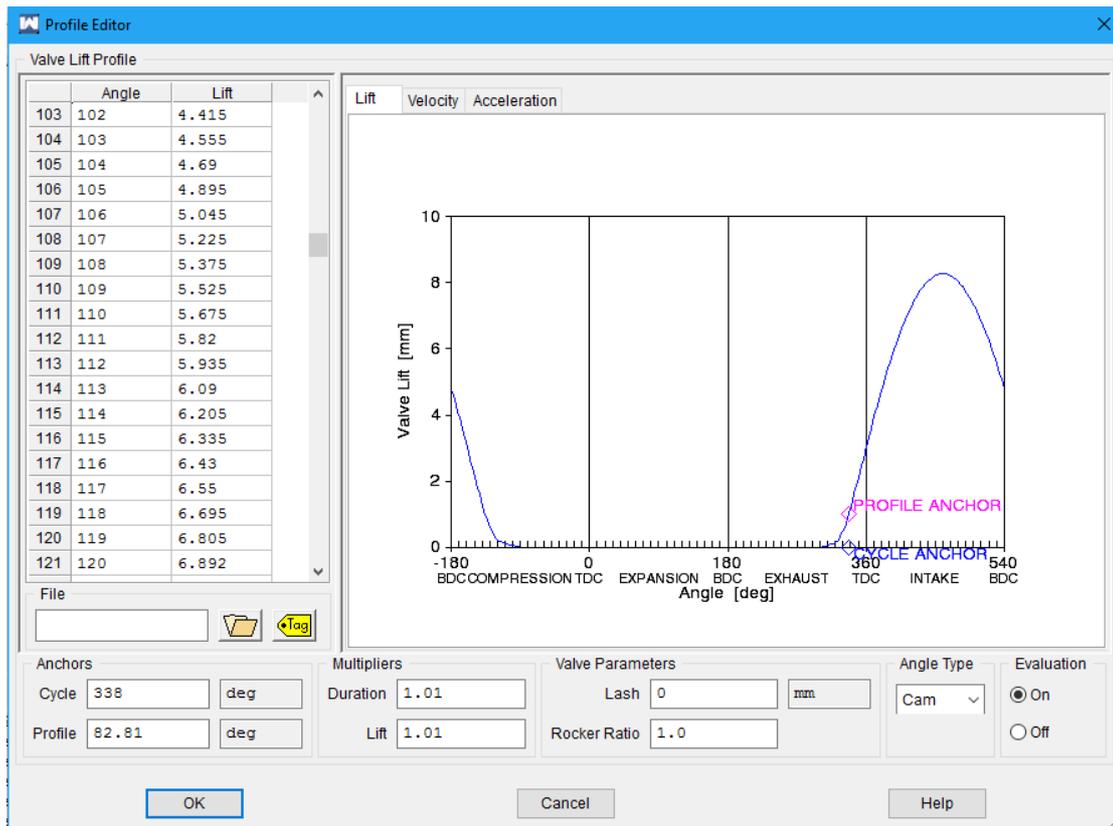


Ilustración 26.- Datos del alzado de las válvulas de la admisión con su correspondiente perfil en Ricardo Wave.

## 5.4 Simulación

Por último, una vez introducidos todos los parámetros de la simulación, hay que definir el número de casos en los que se desea que simule nuestro modelo. La única diferencia que pondremos en cada caso será el número de revoluciones a las que esté trabajando el motor.

En la moto de serie (sin la restricción de la admisión) el motor puede llegar a unas 13000 *rpm*. No obstante, para poder cumplir la normativa de la competición hay que incluir un *restrictor*. Con esta restricción, se estima que el motor no llegará a tantas revoluciones. Sin embargo, al tratarse de una simulación, podemos poner que evalúe también para este régimen. Así, vamos a definir 13 casos. Vamos a intercalar de 1000 en 1000 *rpm*. Así, el caso 1 será para 1000 *rpm*, el caso 2 para 2000 *rpm*, etc.

Para introducir esto en Ricardo, hay que volver a abrir la ventana en la que se cambian las características generales del motor y seleccionar la pestaña *Operating Parameters*. Aquí se introduce en el campo *Engine Speed* un vector llamado *Speed*, que contiene una velocidad distinta para cada caso.

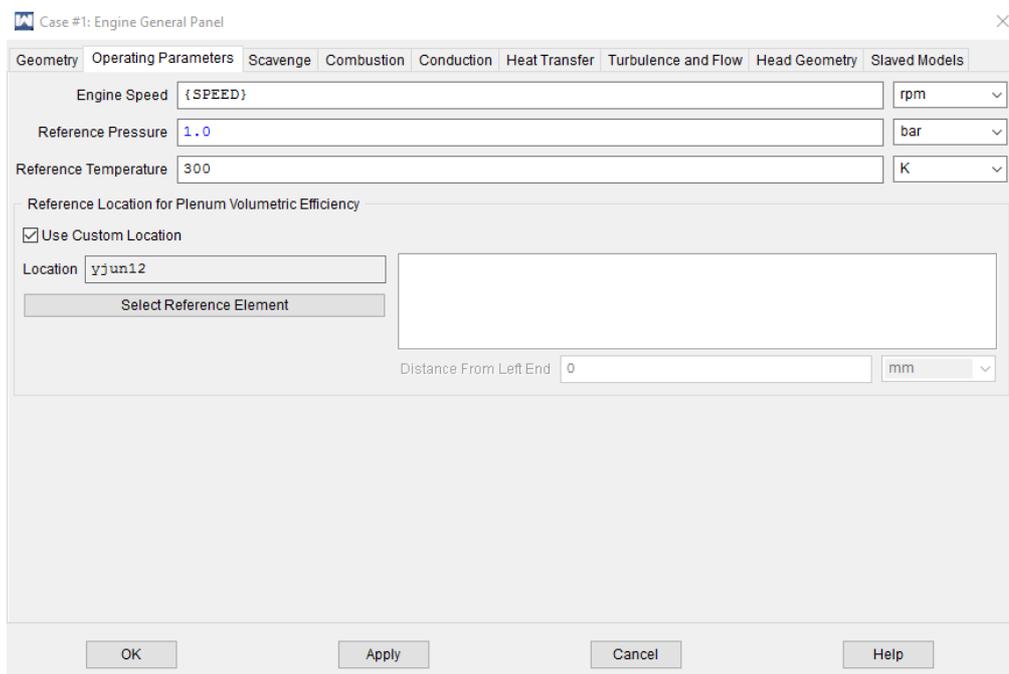


Ilustración 27.- Ventana donde introducir los diferentes regímenes.

Para observar los valores que contiene este vector, podemos abrir desde el panel de la izquierda el valor *Constants*, como se puede observar en la ilustración 38.

Status	Name	Units	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
			Run	Run	Run									
Title			Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
1	SPEED	rpm	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000
2	A_F		14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7
3	BDUR	deg	14	15	16	17	19	21	22	23	23	23.5	24	24
4	CASO	deg	20	25	25	27	29	32	33	34	35	35	35	35
5	diam1	mm	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
6	diam2	mm	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
7	diam3	mm	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8
8	Primary	mm	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
9	Secondary	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	thickness	mm	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
11	Third	mm	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
12	WEXP		1.72	1.93	1.85	1.75	1.7	1.64	1.55	1.5	1.45	1.45	1.45	1.45

Ilustración 28.- Valores de los vectores incluidos en Constants.

Ya se puede correr el modelo y obtener las soluciones correspondientes a cada caso. Antes de que realice todos los cálculos, es conveniente realizar un chequeo para comprobar que no hemos cometido ningún fallo en todo el proceso. Para ello, Ricardo Wave incluye una pestaña llamada *Run Input Check*. Si hubiera algún error, el programa nos indicaría en la barra de mensajes que hay un error y que el programa no podrá simular correctamente. Además, informa también de dónde se encuentra el error, por lo que será más fácil solventarlo.

Una vez que se compruebe que todo está correctamente, corremos el modelo para que el programa empiece la simulación. Esta acción se empieza clicando en *Run Direct*. Cuando esto suceda, aparecerá una ventana negra donde se irán corriendo los modelos hasta que todos converjan.

Se sabe que la simulación ha terminado cuando al pulsar la tecla *Enter* aparece la ubicación dentro del ordenador en la que se ha guardado el modelo.

**Run Input Check**

**Run Direct**

```

I*** BEGINNING 720 DEGREE CYCLIC WAVE SIMULATION
I*** End of cycle angle = -88.716

TOTAL DUCTS : 377          TOTAL JUNCTIONS : 209
TOTAL VOLUMES: 428        TOTAL BOUNDARIES: 1065
REG. VOLUMES: 168         INT. BOUNDARIES: 51      DUCT/JUNC. BOUNDARIES: 1014  AUX. VOLUMES: 268

TITLE: ART-17 Engine Model
NC ICYC ISTEP AIR-KG/HR VOLEF  TEXH  PHI  IMEP  PHEP  IHP  ISFC  PCYL  TCYL  FTR
ENG: 1 0 1 0.00 0.000 1100.0 0.000 0.000 0.000 0.00 0.0000 1.001 300.1 0.00
ENG VOLEF(TOT) = 0.0000 PHI(1) = 0.000
ENG: 2 1 6255 0.00 0.000 1100.0 0.005 0.000 0.000 0.00 0.0000 1.568 394.5 0.343E-03
ENG: 4 1 12578 0.00 0.000 1100.0 0.281 0.000 0.000 0.00 0.0000 1.548 408.5 0.187E-01
ENG: 3 1 18913 0.00 0.000 1100.0 0.314 0.000 0.000 0.00 0.0000 1.542 409.1 0.209E-01
ENG: 1 1 25273 4.29 0.820 371.7 0.324 -0.104 -0.005 -0.02 -6.2399 1.528 407.8 0.216E-01
ENG VOLEF(TOT) = 0.2051 PHI(1) = 0.324
W*** AXIAL CONDUCTION STILL DOMINANT AFTER 10000 OFFLINE CYCLES
Maximum warmup rate of duct duct11 = 1679.6 [K/min]
ENG: 2 2 31611 3.46 0.662 390.4 0.421 -0.061 -0.009 -0.01 -12.2029 1.517 423.3 0.280E-01
ENG: 4 2 37864 4.16 0.794 602.9 0.798 2.912 -0.016 0.49 0.5700 1.513 428.1 0.531E-01
ENG: 3 2 44083 4.56 0.872 614.6 0.833 3.206 -0.017 0.54 0.5829 1.512 428.9 0.554E-01
ENG: 1 2 50339 4.96 0.947 560.0 0.864 3.016 -0.017 0.51 0.7110 1.486 360.0 0.575E-01
ENG VOLEF(TOT) = 0.8186 PHI(1) = 0.864
I*** AUTO-CONVERGENCE: Uvariance = 0.7229 Pvariance = 0.6593E-01 Tvariance = 0.8044
W*** AXIAL CONDUCTION STILL DOMINANT AFTER 10000 OFFLINE CYCLES
Maximum warmup rate of duct duct3 = 810.42 [K/min]
    
```

23:44:14 - ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm: Using tag file <C:\Program Files\Ricardo\2014.2\Products\WAVE\Config\active.tag>.  
 23:44:14 - ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm: Reading <ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm>  
 23:44:14 - ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm: Checking <ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm>  
 23:44:14 - ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm: Done reading <ART-17 Engine Model\_V4.2.wvm>

Ilustración 29.- Simulación del modelo realizado.



## 6 RESULTADOS

Una vez que ha terminado la simulación, se procede a mirar los resultados obtenidos para el modelo que se acaba de simular exportándolos directamente al programa Excel. Para ello, se ha de utilizar el subprograma *Wave Post*.

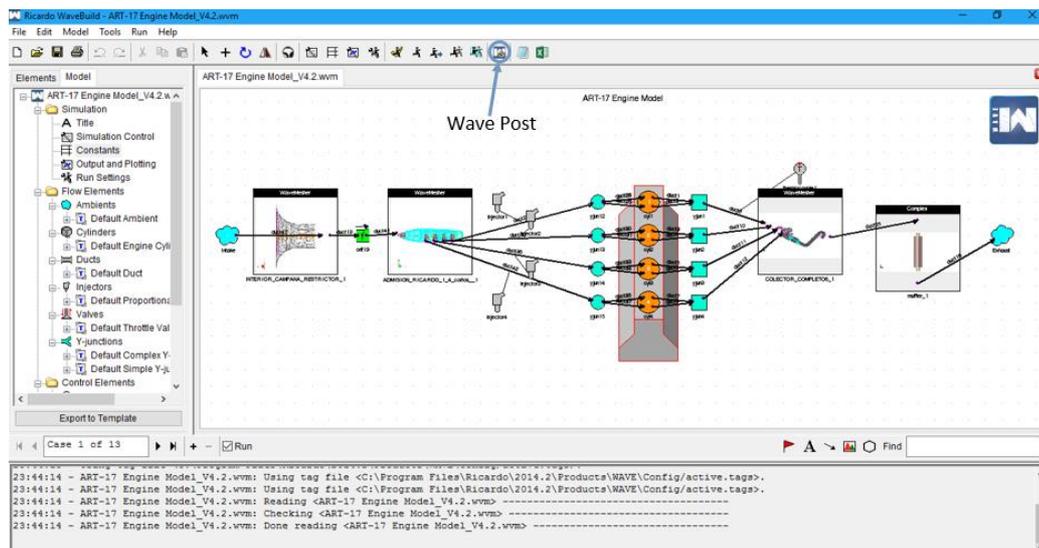


Ilustración 30.- Localización de *Wave Post* en el entorno de Ricardo.

Se abrirá una nueva ventana en la que se puede observar el modelo simulado. A continuación se exportan los datos de interés para este proyecto, que como se ha mencionado anteriormente, son la potencia, el par y la eficiencia volumétrica.

La potencia podemos encontrarla en la ventana inferior izquierda de *Wave Post*. Esta gráfica recibe el nombre de *Indicated engine power* y se encuentra siguiendo el directorio siguiente: *Plots > Sweep Plots > Engine > Performance*. El par se encuentra siguiendo el mismo directorio, aunque recibe el nombre de *Indicated engine torque*. Por último, la eficiencia volumétrica se encuentra siguiendo el directorio: *Plots > Sweep Plots > Engine > Breathing* y recibe el nombre de *Total volumetric efficiency*.

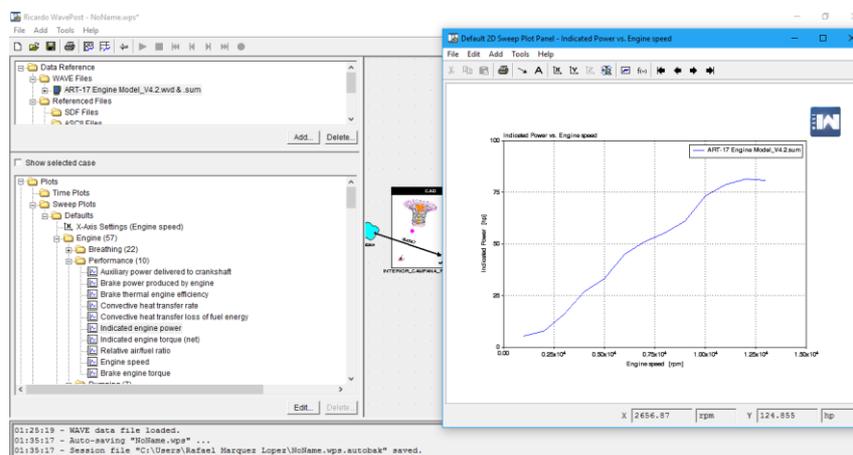


Ilustración 31.- Selección de la gráfica de potencia en *Wave Post*.

El procedimiento a seguir para exportar los datos a Excel es el mismo para todas las gráficas. Una vez que se haya abierto la gráfica correspondiente, en la barra de herramientas se selecciona *File > Export > Excel* y aparecerá una ventana para elegir el nombre y la ubicación que se le dará al archivo, así como otras características de exportación, donde lo más relevante es que hay que elegir exportar todas las curvas que se estén representando en esa gráfica.

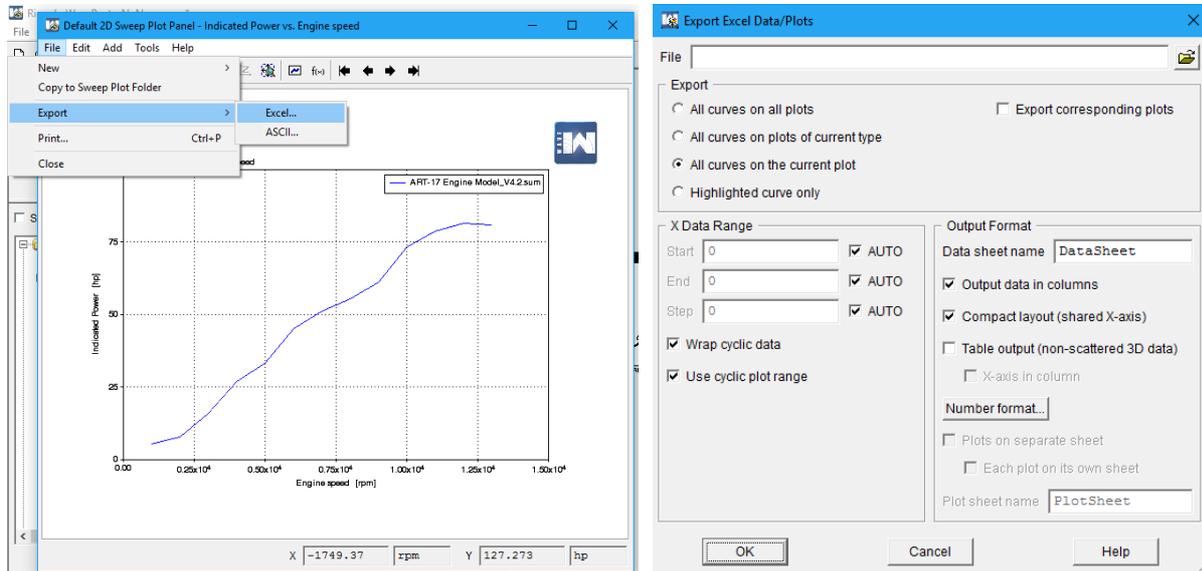


Ilustración 32.- Exportación de una gráfica desde Ricardo a Excel.



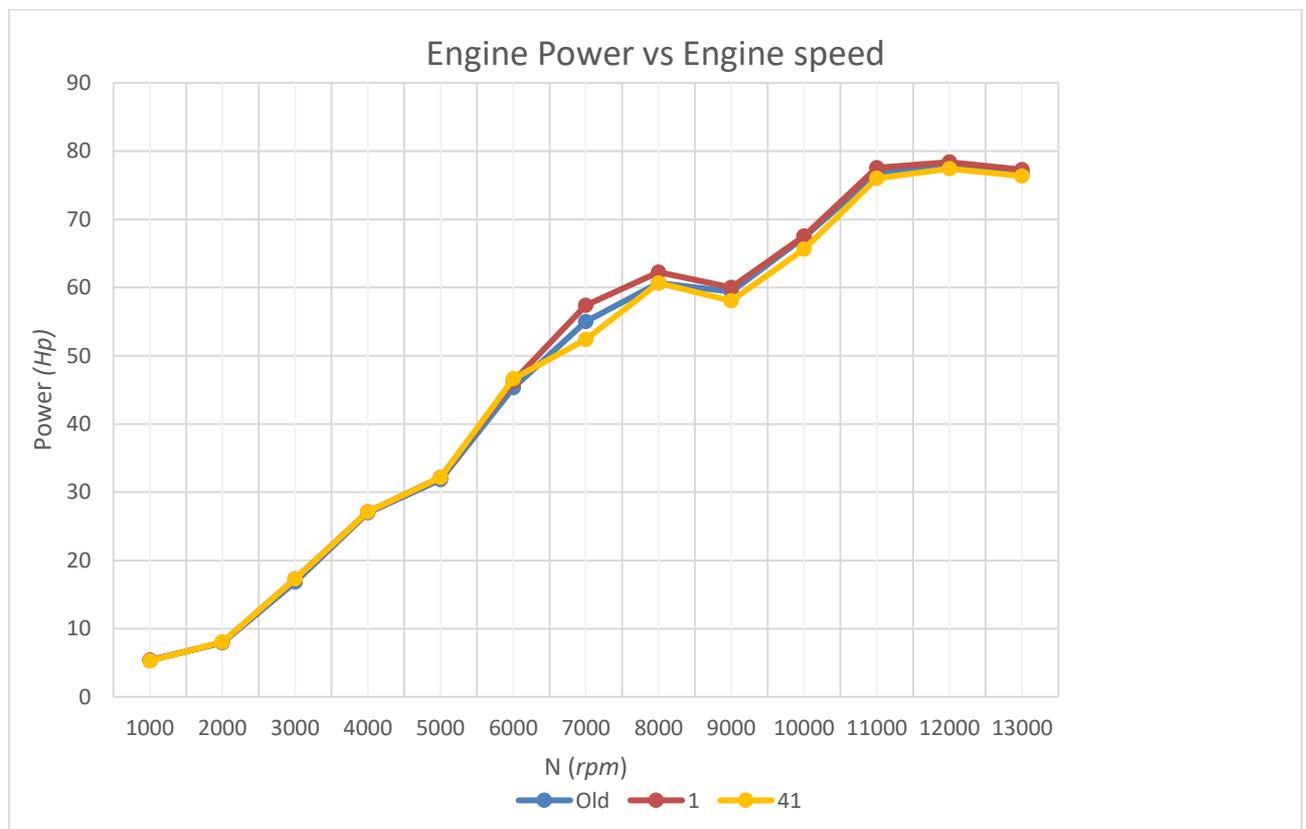


## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

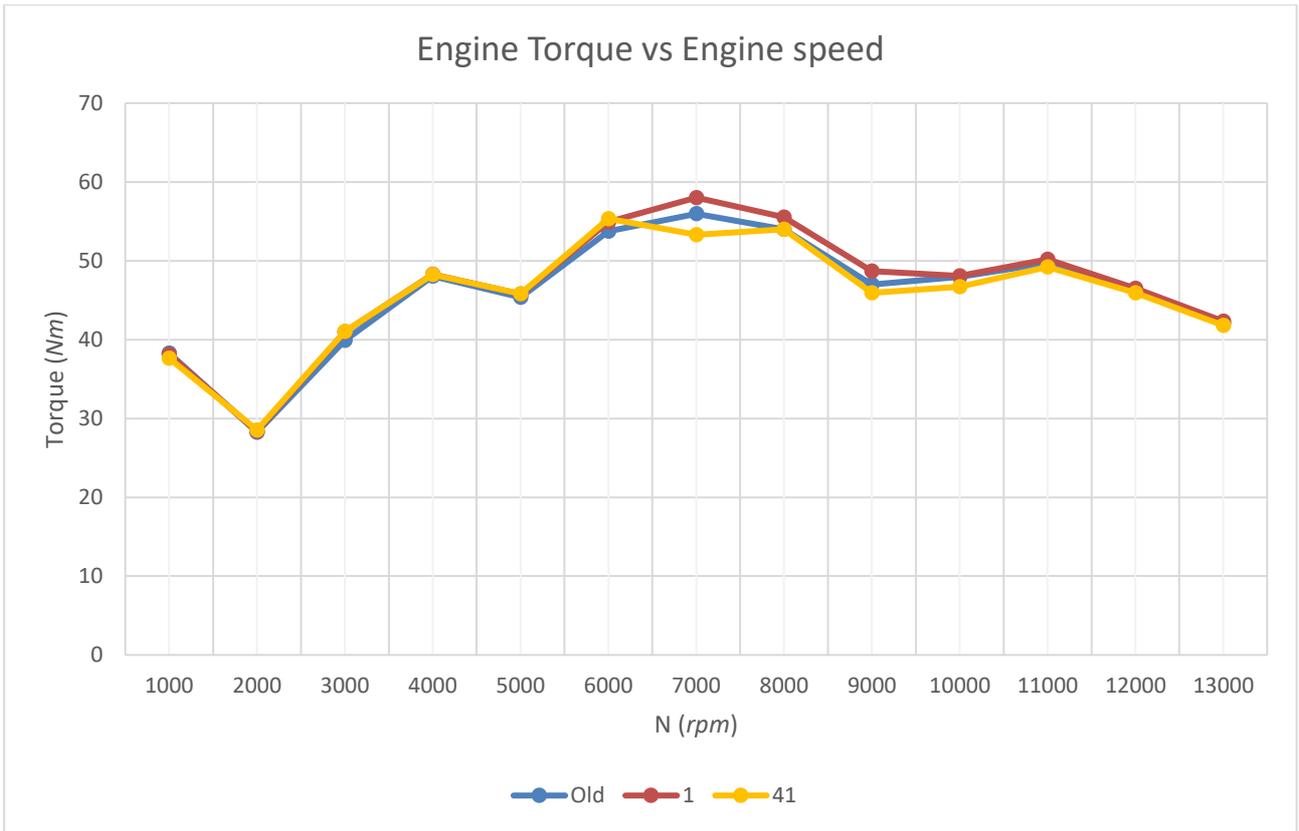
Todo lo comentado en los apartados 5 y 6 de este proyecto, habría que repetirlo las 64 veces con los 64 modelos diferentes de admisión que se han obtenido.

Tras realizar todas las simulaciones, se procede a comparar todas las gráficas obtenidas, incluida también la admisión actual. Así se obtienen las siguientes gráficas. En el Anexo se incluyen las gráficas con sus respectivas tablas de valores.

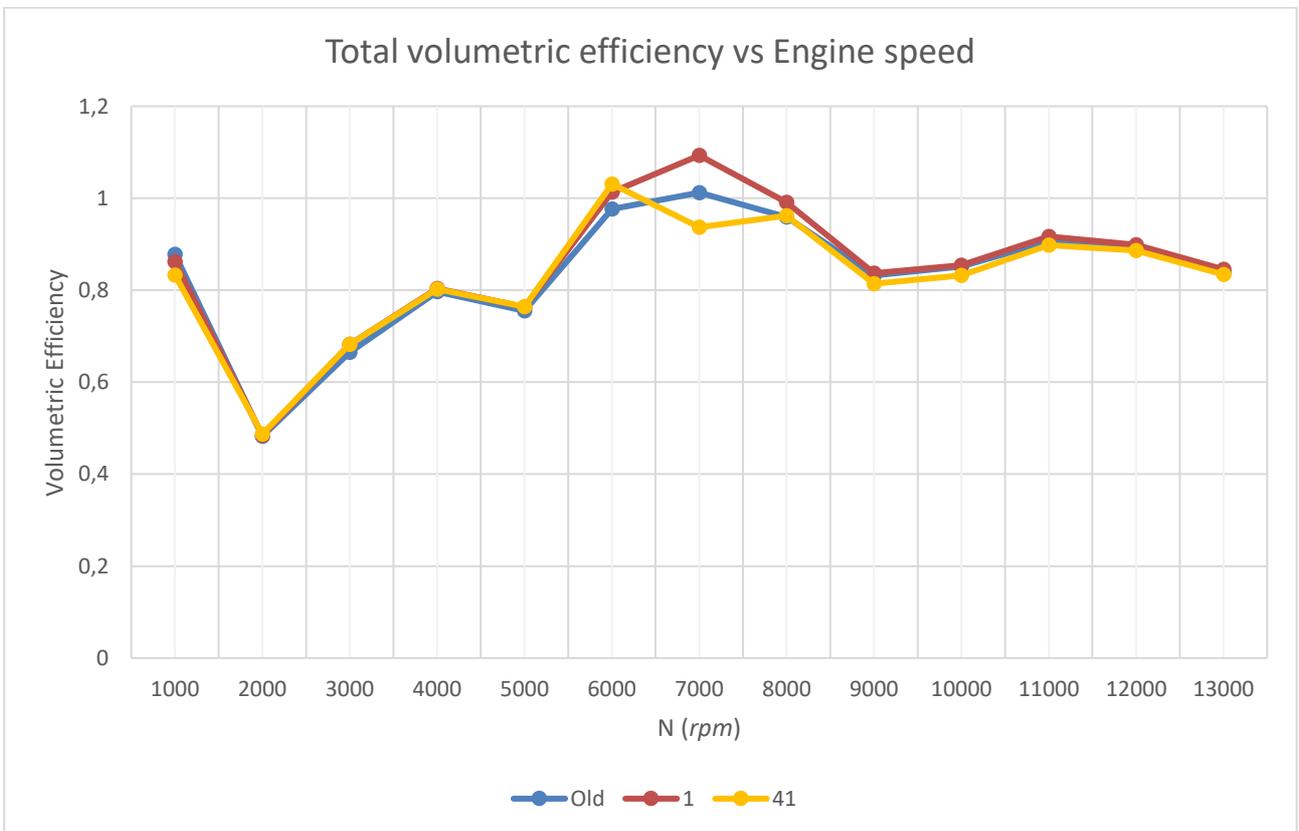
Al ir simulando los modelos uno a uno, se va comprobando que todas las admisiones cuyo diámetro de los *runners* es de 25 mm (segunda opción) empiezan a empeorar las prestaciones del motor notablemente a partir de un régimen de 5000 rpm. Por tanto, a partir del modelo 20, se descartan todos los modelos restantes que tengan esta característica, quedando así por tanto un total de 42 modelos simulados. De todos los resultados obtenidos, observamos que los mejores modelos obtenidos de la simulación son el 1 (mejores prestaciones que la admisión actual) y el 41 (características similares a la admisión actual).



Gráfica 1.- Representación de la potencia del motor con los modelos 1, 41 y actual.



Gráfica 2.- Representación del par del motor para los modelos 1, 41 y actual.



Gráfica 3.- Eficiencia volumétrica total frente a número de revoluciones.

De las gráficas, podemos observar que tanto la potencia como el par son muy similares en la mayoría de los regímenes de velocidades. Los puntos en los que se encuentran las mayores discrepancias se corresponden con los puntos intermedios, sobre todo para 7000, 8000 y 9000 *rpm*. Es posible que esto se debe porque los tres modelos tienen la misma longitud y diámetro de los runners. De hecho, lo único en lo que se diferencian es en la forma del plenum y en el volumen del mismo.

Se puede afirmar por tanto que según se tenga un volumen u otro las prestaciones del motor cambiarán notablemente a partir de unas 6000 *rpm*.

Para el caso que se está estudiando, hay que fijarse en las prestaciones entre 7000 y 9000 *rpm*. La potencia máxima que se da en este intervalo se encuentra a unas 8000 *rpm* y tiene un valor de 62,28 *Hp*. El modelo que ofrece este valor es el número 1. En cuanto al par, el máximo punto de par se da a 7000 *rpm* y tiene un valor de 58,02 *Nm*. También se corresponde con el modelo 1 este valor.

Cabe citar también que hay una muy estrecha relación entre las gráficas del par y de la eficiencia volumétrica. Esto es así y tiene sentido ya que a mayor eficiencia volumétrica, mayor cantidad de oxígeno reacciona en la combustión. A mayor cantidad de oxígeno que reaccione, mayor será la presión resultante en la cámara de combustión, por tanto mayor será la fuerza que se ejerce sobre el pistón, que se transmite en el par al cigüeñal.

Además, se puede observar que a partir de las 6000 *rpm* el modelo 1 da unas prestaciones ligeramente superiores al modelo actual.



## 8 ELECCIÓN DE LA ADMISIÓN

**A**ntes de decidir cuál va a ser el modelo elegido, vamos a describir varias deducciones que hemos realizado una vez vistos los resultados.

La primera de todas es que las admisiones que han tenido mejores resultados no han sido ni las más voluminosas ni las que menos cantidad de fluido son capaces de retener en el plenum. Los mejores modelos obtenidos tienen formas y volúmenes diferentes. Por tanto, fue una buena decisión el dividir el volumen del plenum en tres parámetros más a su vez, para aumentar así el número de casos que se pueden dar con distintos volúmenes. De hecho, los mejores resultados no tienen mucho que ver, ya que el modelo 1 tiene un volumen de 3,93 l mientras que el modelo 41 tiene 8,211 l (más del doble). No obstante, en el intervalo entre 7000 y 9000 rpm tanto la potencia como el par desarrollados por el motor se decaen en el modelo 41.

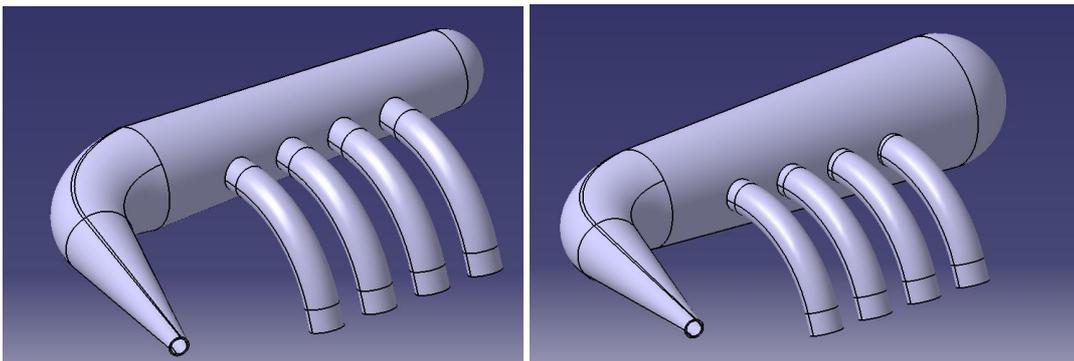


Ilustración 33.- A la izquierda el modelo 1. A la derecha, el modelo 41 de las admisiones.

Un aspecto en el que difieren el modelo 41 y el 1 es en la forma del plenum, ya que el modelo 1 es decreciente (el diámetro inicial es mayor que el diámetro final) mientras que el 41 es creciente. Quizás se deba a este motivo la caída tanto de potencia como de par entre las 7000 y 9000 rpm. Al tener un volumen más grande y además ir llenando cada vez espacios más grandes, al final la simulación que hace Ricardo del movimiento del aire a través de la admisión es más lenta para el modelo 41 (tarda más en llenarse de aire). Además para este modelo, suponemos que el aire que llega al cilindro más alejado de la entrada

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se decide que el mejor modelo posible que cumpla con la normativa de la Formula SAE y que mejore las prestaciones actuales del monoplaza de competición, ofreciendo mayor potencia y par al vehículo, así como contribuyendo a bajar el centro de gravedad del coche, permitiendo bajar además la barra principal del chasis y ayudando al paquete aerodinámico (ya que no influiría en el flujo del alerón trasero) es el modelo 1.

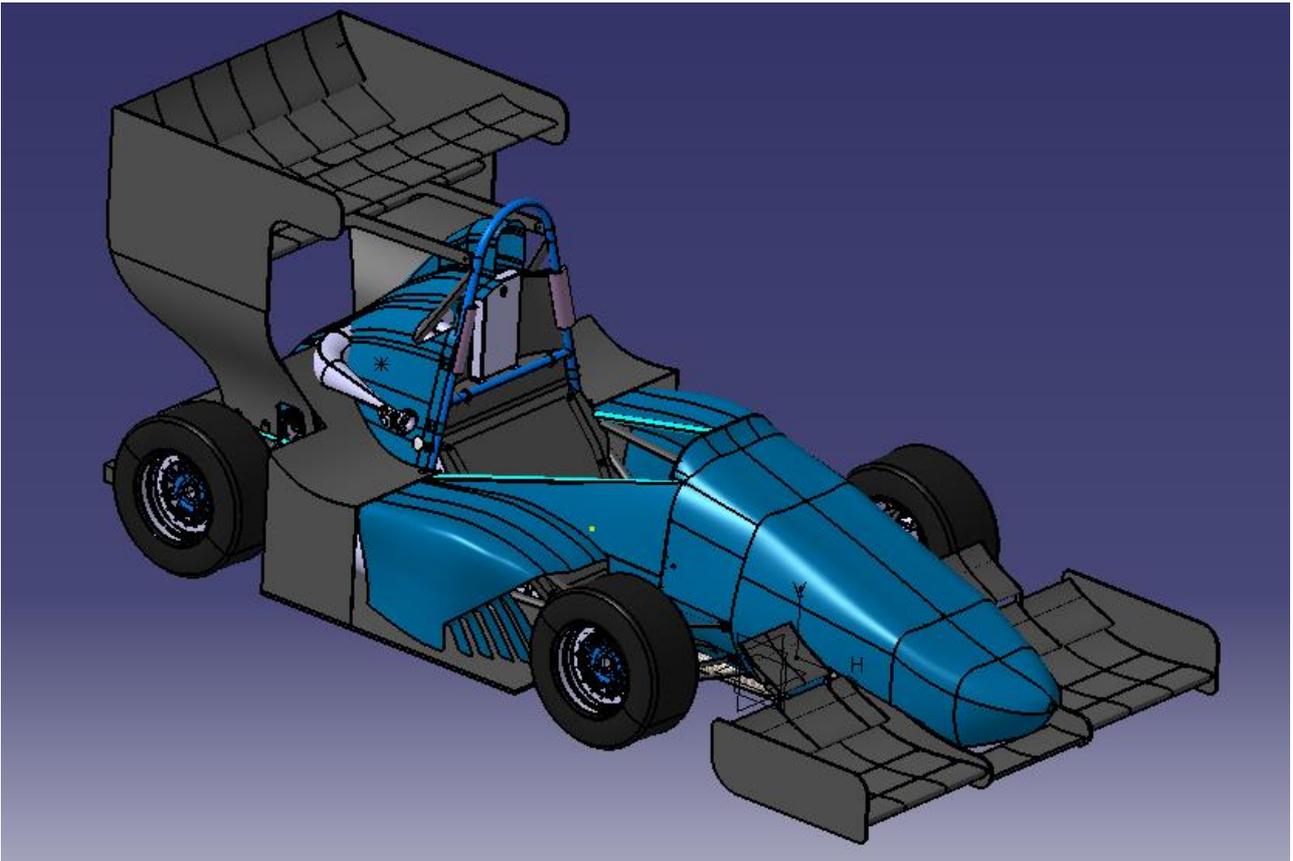


Ilustración 34.- ART17 completo con la admisión elegida.

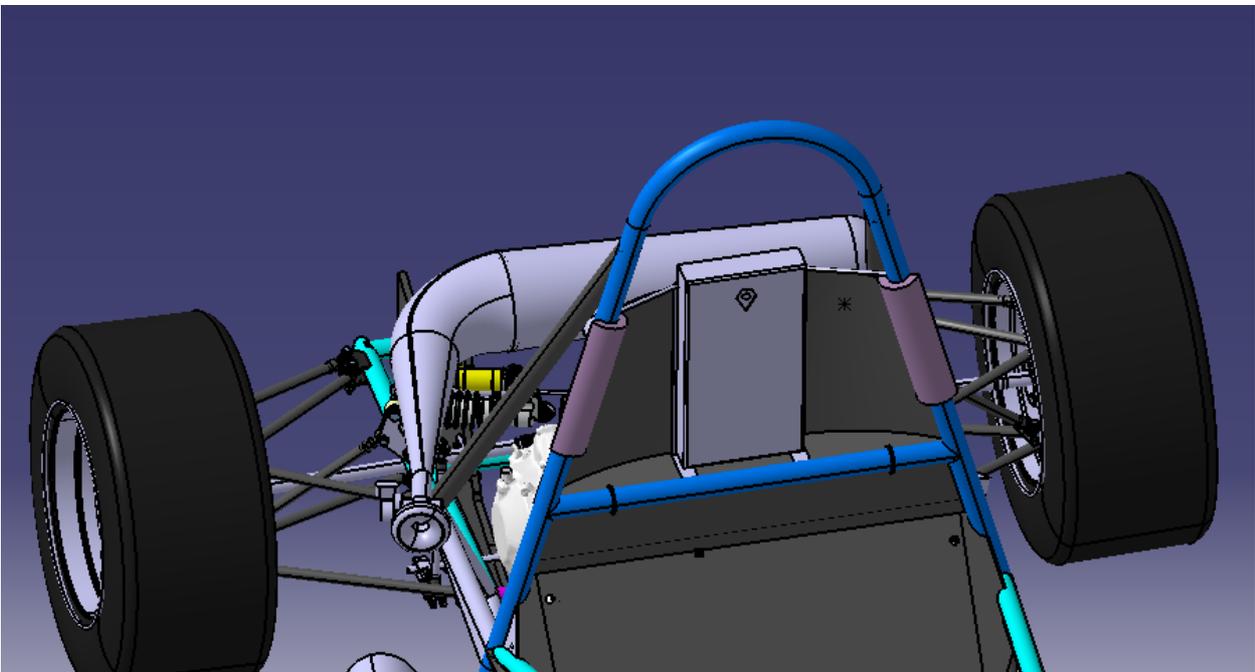


Ilustración 35.- Parte trasera del coche sin la parte aerodinámica. Se observa que la admisión no chocaría con el chasis.

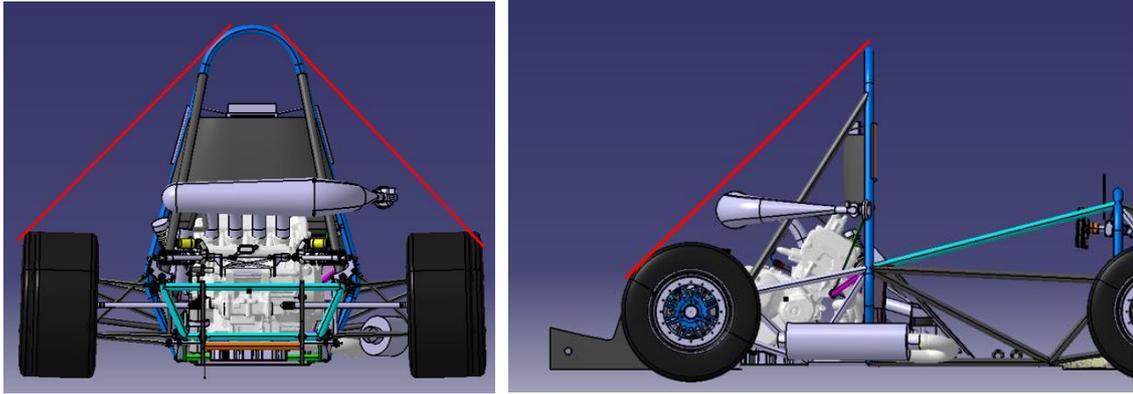
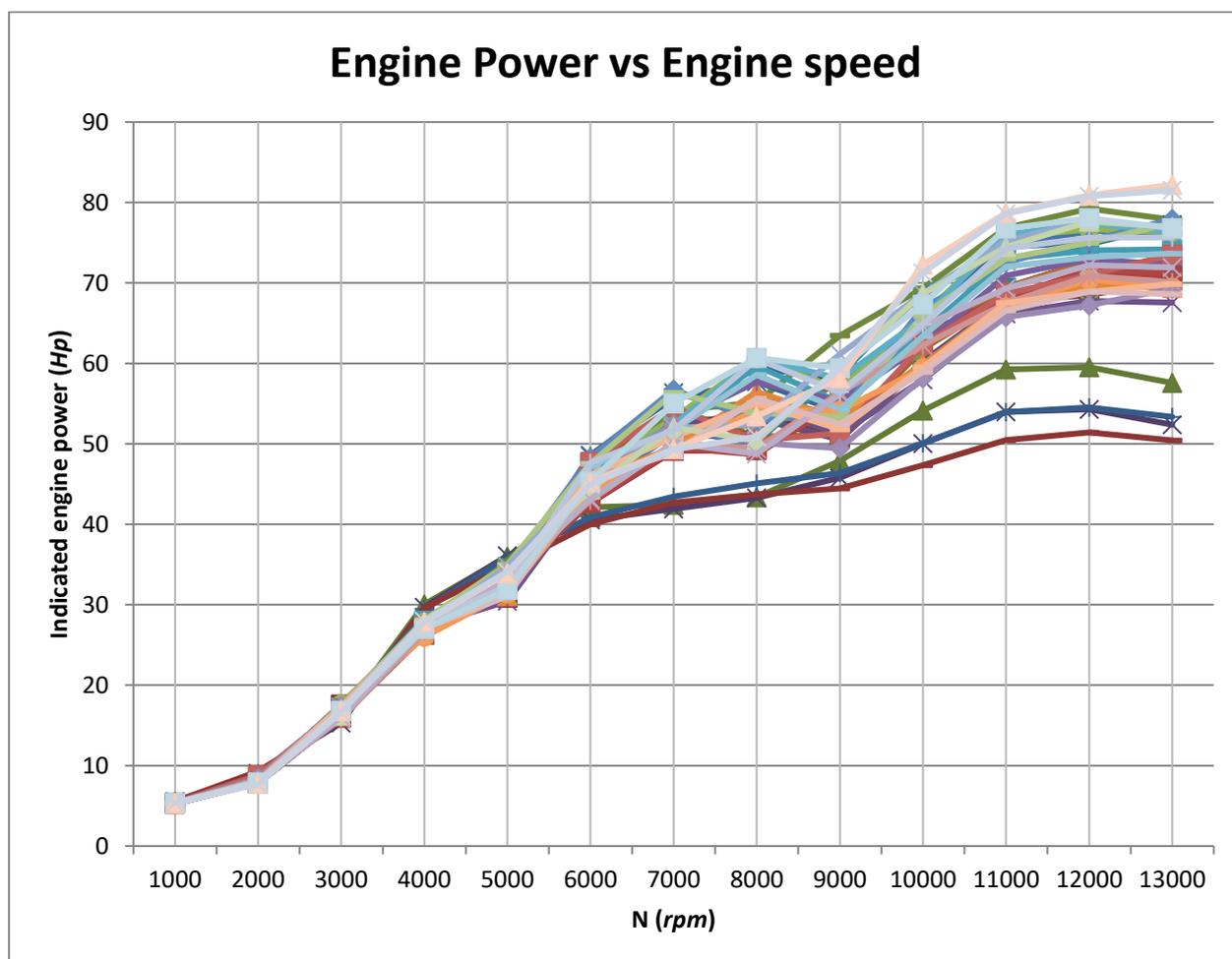


Ilustración 36.- Se observa que la admisión elegida cumple perfectamente la normativa.

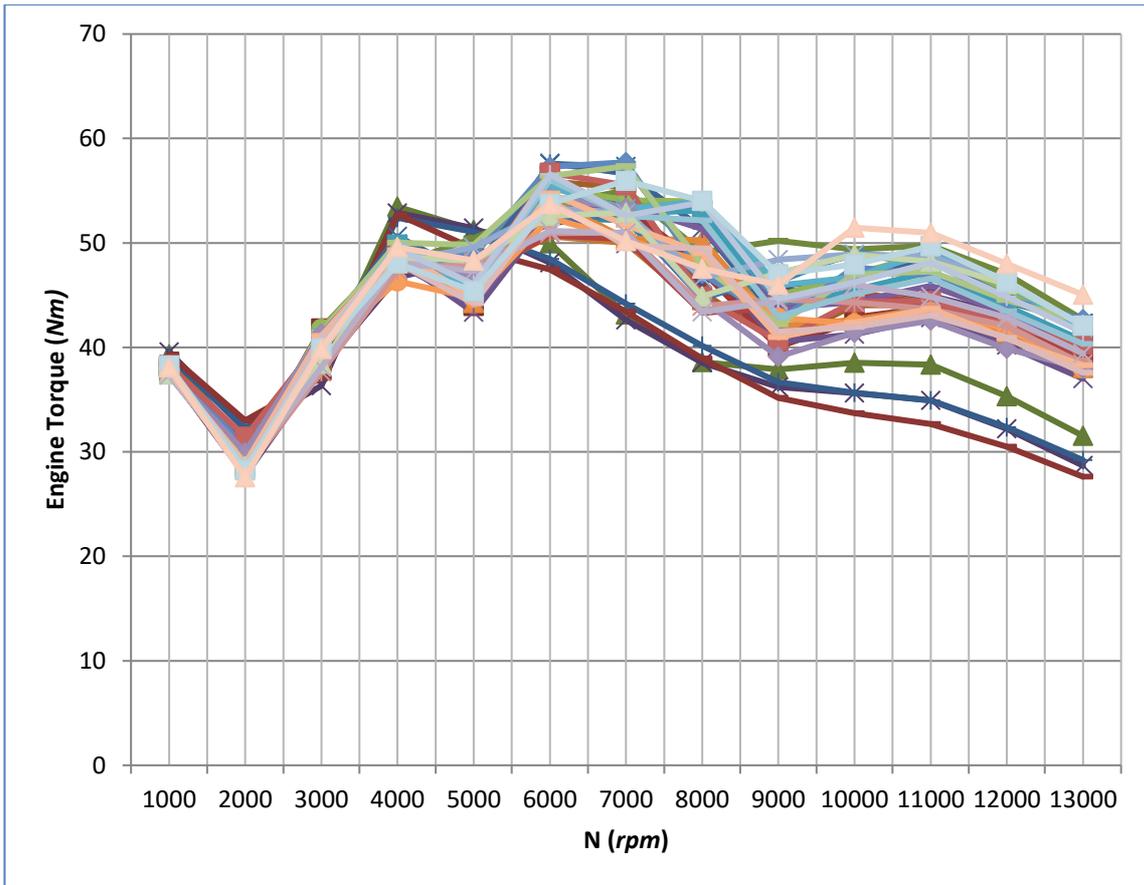


# ANEXOS

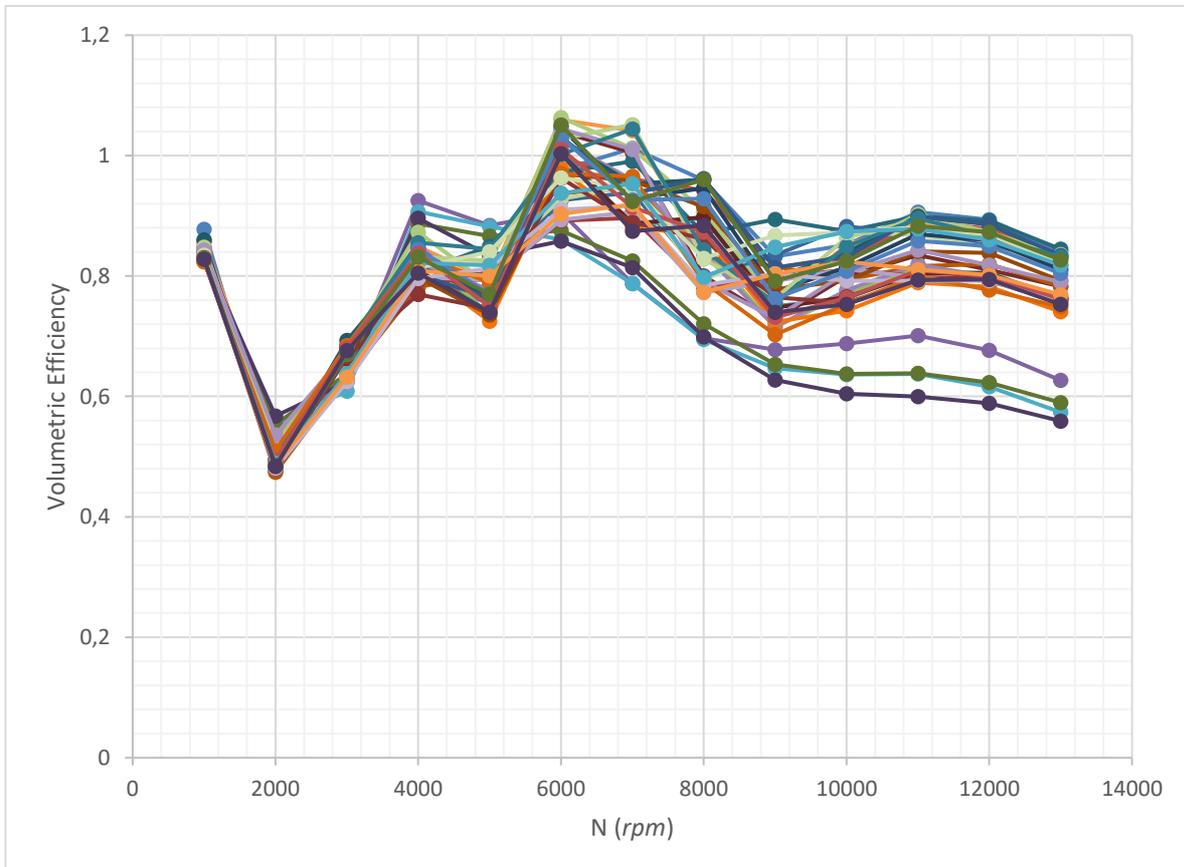
Anexo 1.- Gráficas y tablas de valores completas de potencia par y eficiencia volumétrica de todos los modelos estudiados



Gráfica de potencia



Gráfica de par



Gráfica de eficiencia volumétrica





## BIBLIOGRAFÍA

---

- Taylor & Tylor Segunda Edición. Capítulo 10 – << Air capacity of four stroke engines>>.
- John Shami. “Air Induction Design for Restricted Race Engines”, Thesis
- OH YIDE, ANDRE. “Design and analysis of the intake system of a Formula SAE car”. Final Thesis
- 2017-18 Formula SAE® Rules
- Guía de usuario de Ricardo Wave
- Apuntes trabajo fin de master, “Modelado del motor de un vehículo tipo fórmula”. Autor: Jaime Gómez de la Universidad Politécnica de Madrid
- Apuntes proyecto fin de grado, “Concepción de la admisión de aire y de los brazos de suspensión de un monoplace Formula Student”. Autor: Pablo Omeñaca
- Manual de taller del Motor Honda CBR 600