

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN  
AIRBOX PARA UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN KTM 690 SEGÚN  
NORMATIVA DE LA FORMULA  
STUDENT.

Trabajo de fin de grado,2020

**Ismael Serrano Rubio**

Director: Jordi Vives Costa

Fecha: 03/07/2020

Curso: 2019/2020

GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Resumen

La participación de los equipos universitarios en la Formula Student es una oportunidad única y muy enriquecedora para el alumnado. Es una experiencia en la que se presentan una enorme cantidad de retos técnicos y logísticos que difícilmente alguno de sus participantes se haya podido encontrar anteriormente.

El equipo Dynamics UPC Manresa, por ejemplo, realizó mejoras en su monoplaza en la temporada 2019/2020. Una de las mejoras consiste en la sustitución del motor tetracilíndrico de CBR 600rr, utilizado en las 4 temporadas anteriores, por un motor KTM 690 monocilíndrico. Dicho motor tiene como ventajas principales que su peso es más reducido que el anterior y, además, su rango de funcionamiento es más apropiado para esta competición.

El hecho de haber cambiado el motor, requiere rediseñar todos los sistemas auxiliares, entre ellos el sistema de alimentación de aire que es hacia donde nos lleva este trabajo de investigación.

El diseño del sistema de alimentación de aire parte de varios conceptos obtenidos por la experiencia de las anteriores competiciones y por los consejos de otros equipos y jueces del evento. Se reúne de toda la información necesaria y se calculan los parámetros de diseño base para el modelo. A medida que avanza el diseño, también se realizan numerosas simulaciones CFD para determinar que la dirección en la que se dirige el diseño es correcta. De esta forma, se pueden solventar posibles errores de diseño en una fase muy inicial de diseño.

Una vez decidida la geometría del modelo, se realiza un análisis para su viabilidad de fabricación. Para hacer esto, se divide todo el conjunto en diferentes partes, teniendo en cuenta cómo será su futura unión y qué elementos intervendrán en ella.

Este modelo no pretende ser un diseño 100% optimizado, sino el primer concepto de diseño base fiable para futuras evoluciones, garantizando el buen rendimiento del motor desde un inicio. En futuras temporadas, a partir de este modelo, se podrán realizar estudios físicos a tiempo real en bancos de prueba pudiendo adquirir más datos para posibles mejoras.



## Resum

La participació dels equips universitaris a la Formula Student és una oportunitat única i molt enriquidora per a l'alumnat. És una experiència en la qual es presenten una enorme quantitat de reptes tècnics i logístics que difícilment algun dels seus participants s'hagi pogut trobar anteriorment.

L'equip Dynamics UPC Manresa, per exemple, va realitzar millores en el seu monoplaça en la temporada 2019/2020. Una de les millores consisteix en la substitució del motor tetracilíndric de CBR 600RR, utilitzat en les 4 temporades anteriors, per un motor KTM 690 monocilíndric. Dit motor té com a avantatges principals que el seu pes és més reduït que l'anterior i, a més, el seu rang de funcionament és més apropiat per a aquesta competició.

El fet d'haver canviat el motor, requereix redissenyar tots els sistemes auxiliars, entre ells el sistema d'alimentació d'aire que és cap a on ens porta aquest treball de recerca.

El disseny de el sistema d'alimentació d'aire part de diversos conceptes obtinguts per l'experiència de les anteriors competicions i pels consells d'altres equips i jutges de l'esdeveniment. Es reuneix de tota la informació necessària i es calculen els paràmetres de disseny base per al model. A mesura que avança el disseny, també es realitzen nombroses simulacions CFD per determinar que la direcció en què es dirigeix el disseny és correcta. D'aquesta manera, es poden solucionar possibles errors de disseny en una fase molt inicial de disseny.

Un cop decidida la geometria de el model, es realitza una anàlisi per a la seva viabilitat de fabricació. Per fer això, es divideix tot el conjunt en diferents parts, tenint en compte com serà la seva futura unió i quins elements hi intervindran.

Aquest model no pretén ser un disseny 100% optimitzat, sinó el primer concepte de disseny base fiable per a futures evolucions, garantint el bon rendiment de el motor des d'un inici. En futures temporades, a partir d'aquest model, es podran realitzar estudis físics a temps real en bancs de prova i pot adquirir més dades per a possibles millores.



## Abstract

The participation of university teams in the Formula Student is a unique and very enriching opportunity for students. It is an experience in which there are a huge number of technical and logistical challenges that hardly any of its participants could have found before.

The Dynamics UPC Manresa team, for example, made improvements to its car in the 2019/2020 season. One of the improvements is the replacement of the CBR 600rr four-cylinder engine, used in the previous 4 seasons, with a single-cylinder KTM 690 engine. The main advantages of this engine are that its weight is lower than the previous one and, in addition, its operating range is more appropriate for this competition.

The fact of having changed the engine requires redesigning all the auxiliary systems, including the air supply system, which is where this research work leads us.

The design of the air supply system is based on several concepts obtained from the experience of previous competitions and from the advice from other teams and judges of the event. All necessary information is gathered and the base design parameters for the model are calculated. As the design progresses, numerous CFD simulations are also performed to determine if the direction the design is going on is correct. In this way, possible design errors can be solved in a very early design phase.

Once the geometry of the model has been decided, an analysis is made for its manufacturing feasibility. To do this, the whole set is divided into different parts, taking into account how their future union will be and what elements will intervene in it.

This model is not intended to be a 100% optimized design, but the first reliable base design concept for future evolutions, guaranteeing good engine performance from the start. In future seasons, from this model, physics studies can be carried out in real time in test benches, being able to acquire more data for possible improvements.



## Contenido

1.Introducción .....	8
1.2 Justificación .....	9
1.3 Objetivo .....	9
2.Formula Student.....	9
Especificaciones de la normativa FSS 2020 .....	14
3.Desarrollo.....	16
4.Elementos mecánicos a tener en cuenta.....	19
4.1 Motor KTM 690cm <sup>3</sup> .....	19
4.1.1 Imagen del motor:.....	20
4.1.2 Tabal de especificaciones:.....	21
4.2 Restrictor:.....	21
4.3 Cuerpo del acelerador.....	22
5.Conceptos teóricos.....	23
5.1 Motor de 4 tiempos .....	23
5.1.1 Primer Tiempo o Admisión:.....	23
5.1.2 Segundo tiempo o compresión .....	23
5.1.4 Tercer Tiempo .....	24
5.1.4 Cuarto tiempo: .....	24
5.2 Avance y retraso de válvulas.....	24
5.2.1 Avance de la apertura de Admisión (AAA) .....	25
5.2.2 Retraso del cierre del escape (RCE).....	25
5.2.3 Avance de apertura de escape (AAE) .....	25
5.2.4 Retraso del cierre de escape (RCE).....	25
5.3 Cruce de válvulas.....	25
5.4 Potencia.....	26
5.5 Par Motor .....	27
5.6 Eficiencia volumétrica.....	27
6. Definición de un colector de admisión.....	28
6.1 Sistema de alimentación de aire.....	28
6.2 Objetivos de un colector de admisión.....	28
6.3 Tipos de colectores de admisión .....	28
6.3.1 Admisión convencional: .....	28
6.3.2 Admisión variable:.....	30



6.2 Partes de un múltiple de admisión. ....	30
6.4 Resonancia en un múltiple de admisión .....	31
6.6 Diámetro del colector .....	32
6.7 Longitud del tubo de entrada (Runner) .....	33
6.7.1 Calculo de la longitud .....	34
6.5 Volumen del plenum .....	35
7. Diseño Geométrico .....	36
7.1 CATIA V5 .....	36
7.2 Primeros pasos .....	36
7.3 Parametrización en CATIA V5 .....	39
7.5 Plenum .....	39
7.6 Restrictor .....	40
7.7 Colector. ....	41
7.8 Motor .....	42
8. Simulación CFD .....	43
8.1 Mallado .....	43
8.2 Condiciones de contorno .....	44
8.3 Restricor .....	45
8.3.1 Simulación inicial. ....	46
8.3.2 Simulación final. ....	47
8.4 Simulación del conjunto completo .....	48
8.4.1 Simulación inicial. ....	48
8.4.2 Simulación final. ....	50
9. Fabricación .....	52
9.1 Sinterizado selectivo por láser (SLS) .....	52
9.2 Historia .....	52
9.3 La tecnología .....	52
9.4 Aplicaciones y material. ....	53
9.5 Fabricación del Airbox .....	53
9.6 Dimensiones máximas de fabricación .....	53
10 conclusión i trabajos futuros .....	55
10.1 Conclusión. ....	55
10.2 Trabajos Futuros .....	55
11 Referencias .....	56



## Índice de figuras

Imagen 1 Monoplaza DYN-03 del equipo Dynamics .....	9
Imagen 2 Imagen realizada durante el scrutineering.....	10
Imagen 3 Modo de medición de la sonoridad del sistema de escape. ....	11
Imagen 4 Layout del circuito Skidpad. ....	12
Imagen 5 fotografía obtenida durante el evento endurance.. ....	13
Imagen 6 Disposición del restrictor en motores turbo y atmosféricos.....	15
Imagen 7 DYN-04 temporada 2018/2019. ....	16
Imagen 8 Imagen general del paso del aire a través del sistema de alimentación.....	17
Imagen 9 Grafica de Par y Potencia KTM 690. ....	18
Imagen 10 Grafica de Par y Potencia CBR 600rr. ....	19
Imagen 11 KTM SMC 690R. ....	19
Imagen 12 Motor KTM de 690cc. ....	20
Imagen 13 Restrictor de aire comercial Ø20mm. ....	21
Imagen 14 Restrictor modelado para este proyecto. ....	22
Imagen 15 Cuerpo de la mariposa electrónico. ....	23
Imagen 16 Imagen característica de los 4 tiempos.....	24
Imagen 17 Diagrama de distribución teórico.....	26
Imagen 18 Colector convencional Original Honda Civic EP3 2001-2005. ....	29
Imagen 19 ITB implementado en un Alfa Romeo 155 V6 TI DTM 1992-1998 .....	29
Imagen 20 Interior de un colector de admisión variable. ....	30
Imagen 21 Despiece general. ....	31
Imagen 22 vista de la onda de presión desplazándose en el interior del colector .....	32
Imagen 23 Imagen ilustrativa de las dimensiones del colector. ....	32
Imagen 24 Vista en detalle del colector.....	35
Imagen 25 Vista en detalle del plenum.....	36
Imagen 26 Vista lateral del monoplaza.....	37
Imagen 27 Vista trasera del monoplaza.....	37
Imagen 28 Vista superior del monoplaza.....	38
Imagen 29 Vista frontal del monoplaza. ....	38
Imagen 30 parámetros utilizados para configurar el Airbox.....	39
Imagen 31 Geometría base del plenum. ....	40
Imagen 32 Vista seccionada del restricto.....	40
Imagen 33 Muestra del ajuste del diámetro para la fabricación. ....	41
Imagen 34 Longitud del plenum.....	41
Imagen 35 Cuerpo del inyector. ....	42
Imagen 36 Motor KTM 690 modelado en 3D.....	42
Imagen 37 Muestra del mallado aplicado en las simulaciones.....	44
Imagen 38 Zona donde se aplica el parámetro de velocidad de aire. ....	45
Imagen 39 simulación de la velocidad del aire por el interior del primer restrictor. ....	46
Imagen 40 Grafica de la presión en el restrictor inicial.....	47
Imagen 41 simulación de la velocidad del aire del segundo modelo de restrictor.....	48
Imagen 42 Grafico de presión en el segundo modelo de restrictor. ....	48
Imagen 43 Simulación de la velocidad del aire en el primer modelo de airbox. ....	49
Imagen 44 Muestra de la presión en el interior del colector.....	49



Imagen 45 Presión en el modelo inicial de airbox .....	50
Imagen 46 Presión en modelo final del plenum. ....	51
Imagen 47 simulación de la velocidad del aire en el airbox final.....	51
Imagen 48 colocación de las piezas en la impresora 3D. ....	54

## Índice de tablas

Tabla 1 Puntuaciones de los diferentes eventos.....	13
Tabla 2 Especificaciones del motor. ....	21
Tabla 3 Datos para calcular la longitud del colector.....	34





## 1.Introducción

La Formula Student también conocida como la Formula SAE, es una competición a nivel mundial entre alumnos de ingeniería y otras especialidades de diferentes universidades donde los miembros del equipo desarrollan, diseñan y construyen un vehículo monoplace con la finalidad de competir en diferentes pruebas tanto de carácter estáticas como dinámicas en diferentes circuitos de carreras automovilísticas.

Existen 3 categorías principales de vehículos, combustión, eléctricos y autónomos. Estos monoplaces se desarrollan teniendo en cuenta la reglamentación correspondiente a cada temporada que pone a disposición el organismo regulador, existen dos tipos de normativas, SAE (*Society of Automotive Engineers*) y FSG (*Formula Student Germany*).

Estas reglas aseguran un entorno seguro y más igualado entre los diferentes equipos. Muchas de estas reglas están destinadas a desafiar a los participantes con la finalidad de que con su ingenio encuentren soluciones a través de estudios, simulaciones, test de análisis y en algunos casos inevitablemente prueba y error.

La organización de cada evento decide que reglamentación quiere adoptar durante el transcurso de este, los equipos deben asegurar que su vehículo cumpla estrictamente con la normativa ya que la organización durante el evento realiza un exhaustivo chequeo a cada monoplace pudiendo llegar a no permitir participar en las pruebas dinámicas en caso de que este no cumpla correctamente con la normativa.

Un ejemplo claro y que afecta en gran medida a este proyecto es la limitación del diámetro de la entrada de aire del sistema de admisión con la finalidad de limitar la potencia del motor e igualarla entre los participantes. Aquí entra el ingenio de cada equipo para optimizar al máximo todos los elementos internos y auxiliares del motor para conseguir el máximo rendimiento de este.

Este punto en concreto es un tema muy desafiante para los equipos ya que cubre múltiples disciplinas de ingeniería como la mecánica de fluidos, materiales, térmica, diseño y fabricación.

Esto es debido a que los motores de combustión utilizados no son específicos para esta competición, sino que provienen de motores no restringidos comerciales diseñados para su uso en la vía pública, para algunos modelos existen componentes comerciales destinados a evolucionar estos motores para el uso en competición, esto haría pensar que es relativamente sencillo mejorar estos motores, pero no es así, las características tan específicas de los trazados y la reglamentación utilizada en la Formula Student alejan mucho a estos motores de ser idóneos para este tipo de competición, obligando a los equipos a desarrollar e implementar diferentes soluciones a cada uno de los parámetros que no se adaptan o no son beneficiosos para su uso, como podría ser el sistema de admisión, escape, refrigeración, lubricación y relación de transmisión entre otros.

En este proyecto se pretende estudiar, diseñar y fabricar todo un sistema de admisión de aire para un motor KTM 690 teniendo en cuenta las limitaciones de la competición y de las especificaciones del motor. El desafío de este proyecto se debe a referencias muy limitadas disponibles para realizar el diseño, al ser una competición muy específica en la que se utilizan



motores muy concretos fuera del uso al cual fueron diseñados. Los programas de simulación son imprescindibles tanto para la industria, mundo de la competición y para realizar el próximo estudio.

## 1.2 Justificación

En esta temporada se incorpora un nuevo motor cuyas características son más idóneas que el motor previamente utilizado de CBR 600rr, esta evolución es un gran paso adelante para el equipo, pero también implica una gran cantidad de cambios que hay que suplir, uno de ellos es el nuevo diseño del sistema de alimentación de aire al que se debe este proyecto.

Debido a las restricciones de la reglamentación de la Formula Student, no es posible utilizar el sistema de alimentación de aire original del motor, por lo que requiere un cuidadoso estudio de todos sus elementos garantizando el poder desarrollar la máxima eficiencia volumétrica del motor.

## 1.3 Objetivo

El objetivo captar toda la información necesaria para realizar el estudio y diseñar un sistema de admisión de aire específico para el buen funcionamiento de un motor KTM 690, trabajando paralelamente validando su diseño mediante numerosas simulaciones CFD, una vez finalizado el diseño del modelo se estudiará su viabilidad y método de fabricación. Cabe destacar que este proyecto no pretende ser un modelo final, sino que servirá como un modelo base que garantice el buen funcionamiento del motor y permita realizar más estudios en banco de pruebas una vez este fabricado.

## 2. Formula Student



*Imagen 1 Monoplaza DYN-03 del equipo Dynamics (Circuit de catalunya 2018)*

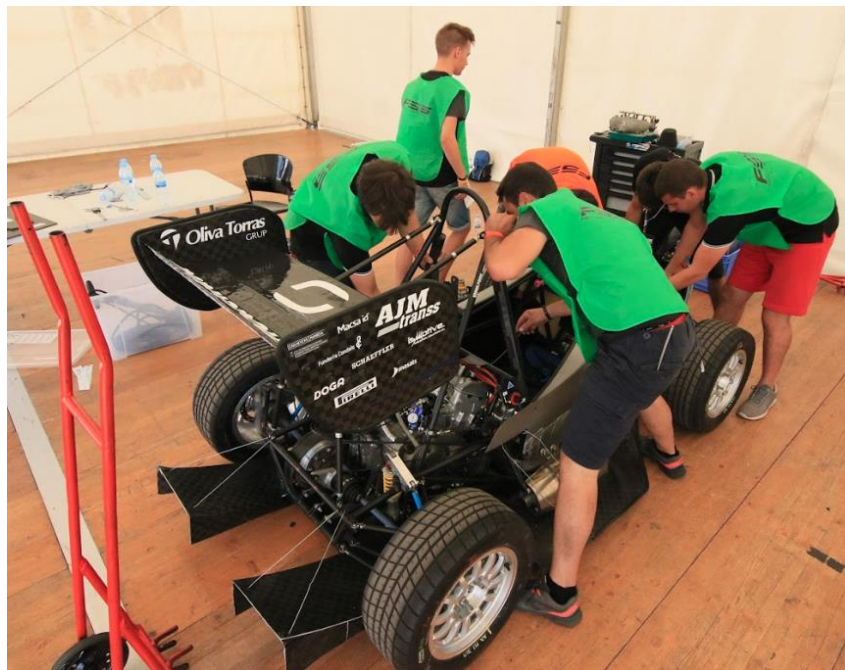


La Formula Student es una competición a nivel mundial en el que participan universidades de diferentes disciplinas de todo el mundo. Uno de los requisitos esenciales es que los participantes han de pertenecer a las instituciones que representan, la normativa no permite que el monoplaza se utilice durante dos temporadas seguidas por lo que obliga a todos los equipos a estudiar, diseñar y fabricar un nuevo monoplaza cada temporada.

Este punto no suele ser un problema para los equipos ya que la constante evolución temporada tras temporada de estos monoplazas ya obliga a modificar el diseño de este, en equipos primerizos la evolución de los monoplazas suele ser más evidente que en equipos ya muy asentados en la competición donde sus diseños están mucho más desarrollados y su evolución requiere mucho más estudio.

Existen dos tipos de eventos muy diferenciados en la Formula Student que se diferencian en dos categorías, eventos dinámicos y eventos estáticos.

Antes de realizar cualquier prueba dinámica, la organización realiza una serie de inspección exhaustivas del monoplaza que puede durar en el mejor de los casos unas 4 horas. En ella 3 inspectores revisan que el vehículo cumpla todos los puntos de la normativa. En el caso de que el vehículo no cumpla alguno de los apartados este tendrá la oportunidad de regresar a la zona de trabajo habilitada por la organización para realizar las modificaciones pertinentes para subsanar el problema. Si el vehículo pasa esta primera inspección significa que es seguro y puede pasar a la siguiente inspección en la que el piloto se encontrara dentro del monoplaza.



*Imagen 2 Imagen realizada durante el scrutineering (Circuit de Catalunya 2018).*

En la siguiente inspección se coloca el vehículo en una plataforma que se inclina hasta 60° respecto el suelo, en él se revisa que el monoplaza presente ningún problema de estanqueidad



de los diferentes fluidos que se requieren para su funcionamiento en pista como puede ser el combustible, líquido de frenos y líquido refrigerante, también se revisa que el monoplaza al estar inclinado no tienda a volcar ni a levantar ninguna rueda para asegurar que no se produzcan posibles vuelcos en pista.

En la siguiente inspección se revisa la sonoridad del sistema de escape, este no puede sobrepasar los 100db a unas determinadas RPM que varía según normativa dependiendo del motor que se esté utilizando.



*Imagen 3* Modo de medición de la sonoridad del sistema de escape. (Circuit de Catalunya 2018).

Por último, se realiza el Break Test, consiste en realizar una frenada de emergencia en la que se pueda comprobar visualmente que el coche frena completamente recto y las 4 ruedas se bloqueen firmemente.

Una vez pasados todos los test el monoplaza ya es apto para participar en las pruebas dinámicas.

Para entender los eventos estáticos hay que imaginar que el equipo es una empresa que quiere vender un producto, este caso el producto es el monoplaza. Hay diferentes pruebas donde se evalúan diferentes ámbitos que no necesariamente han de ser de ingeniería, la prueba estática más técnica es el (Engineering Design Event) donde se evalúa el diseño del monoplaza, cabe destacar que no por tener una fabricación o diseño más sofisticado se obtendrá una mejor puntuación, la clave es justificar con los cálculos necesarios, simulaciones información o lo que sea necesario para justificar cada punto del diseño de este, aunque sean diseños sencillos. El (Cost Report Event) analiza el coste del monoplaza y es trabajo del equipo el justificar las decisiones de diseño y fabricación, el último evento estático es el (Business Plant Even) en el que se valora la capacidad del equipo de vender el proyecto. El formato de las pruebas estáticas permite que los equipos pequeños y grandes se puedan medir



directamente sin importar el presupuesto del equipo, aquí se mide la dedicación de los participantes al estudio y justificación del monoplaza que han construido, es frecuente ver equipos pequeños con puntuaciones muy altas pro lo que motiva a los equipos a mejorar cada año en estos tipos de eventos.

Los eventos dinámicos son los que se realizan con el monoplaza en la pista, la primera prueba es la carrera de Aceleración, en la que los monoplazas se miden en una recta intentado llegar a la meta en el menor tiempo posible. La siguiente prueba se denomina (Skid-Pad), se trata de un circuito de conos con forma de número 8 en la que los participantes tratan de dar lo más rápido posible dos vueltas en un sentido y dos vueltas más en el sentido contrario evitando tumbar los conos que marcan el camino como se muestra en la **Imagen 4**.

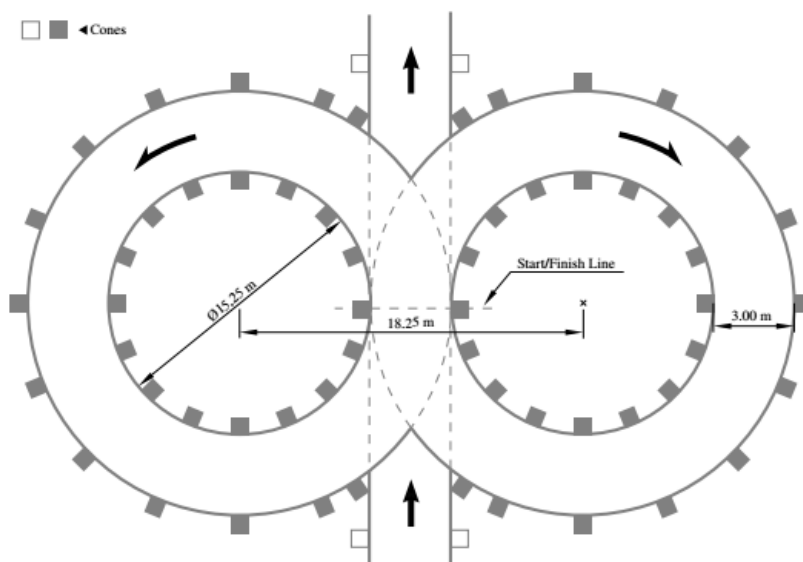


Figure 23: Skidpad Track Layout

*Imagen 4 Layout del circuito Skidpad.  
FS-Rules\_2020\_V1.0 pag 120*

El Autocross ya se realiza en un circuito más grande normalmente de conos, aunque se pueden aprovechar partes de los circuitos en los que se disputa, los equipos tratan de dar una vuelta lo más rápido posible al circuito en la que tienen dos intentos, pero solo será válido el tiempo más rápido de los dos. Por último, dependiendo del tiempo realizado en la prueba de Autocross se decide el orden de salida de los equipos en la prueba Endurance, que trata de una carrera de resistencia de unos 27 km en el que se pone a prueba la fiabilidad del monoplaza en la que también hay un cambio de piloto justo en la mitad de la prueba. Es la única competición en la que existen varios monoplazas en pista como muestra la imagen 5. Al terminar también existe una puntuación denominada Efficiency que se mide con la cantidad de combustible consumida durante la Endurance, de manera que reciben mejor puntuación los equipos que menos combustible hayan consumido durante los 27 km.



*Imagen 5 fotografía obtenida durante el evento endurance. (Circuit de Catalunya 2018).*

En la **Tabla 1** se muestran las diferentes puntuaciones de las competiciones, cada temporada estas puntuaciones se modifican y es trabajo del equipo dividir sus esfuerzos en cada una de ellas.

## A2 Vehicle Eligibility

	CV & EV	DV
<b>Static Events:</b>		
Business Plan Presentation	75 points	75 points
Cost and Manufacturing	100 points	100 points
Engineering Design	150 points	300 points
<b>Dynamic Events:</b>		
Skid Pad	75 points	75 points
Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	100 points
Endurance	325 points	-
Efficiency	100 points	75 points
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	1000 points

Table 3: Maximum points awarded

**Tabla 1** Puntuaciones de los diferentes eventos.  
FS-Rules\_2020\_V1.0 pag 115



## Especificaciones de la normativa FSS 2020

La normativa de la formula Student ha de ser estudiada minuciosamente por todos los miembros del equipo ya que los jueces pueden no permitir participar en las pruebas estáticas sobre todo si se trata un punto en el que afecta a la seguridad del piloto.

A continuación, se muestran los puntos de la normativa fe la temporada 2020 que afecta directamente al desarrollo de este proyecto.

### CV1.1 Engine Limitation

CV1.1.1 The engine(s) used to power the vehicle must be piston engine(s) using a four-stroke primary

heat cycle with a displacement not exceeding 710 cm<sup>3</sup> per cycle. Hybrid powertrains, such as those using electric motors running off stored energy, are prohibited.

### CV1.2 Starter

CV1.2.1 Each vehicle must be equipped with an on-board starter, which must be used to start the vehicle.

### CV1.4 Throttle

CV1.4.1 The vehicle must be equipped with a throttle body. The throttle body may be of any size or design

### CV1.7 Intake System Restrictor

CV1.7.1 In order to limit the power capability from the engine(s), a single circular restrictor must be placed in the intake system and all engine(s) airflow must pass through this restrictor. The only allowed sequence of components are the following:

- For naturally aspirated engines, the sequence must be: throttle body, restrictor, and engine, see figure 16
- For turbocharged or supercharged engines, the sequence must be: restrictor, compressor, throttle body, engine, see figure 17

CV1.7.2 The maximum restrictor diameters which must be respected at all times during the competition are:

- Gasoline fueled vehicles - 20 mm
- E 85 fueled vehicles - 19 mm

CV1.7.3 The restrictor must be located to facilitate measurement during the inspection process.

CV1.7.4 The circular restricting cross section may not be movable or flexible in any way, e.g. the restrictor must not be part of the movable portion of a barrel throttle body

### Traducción:

CV1.1.1 El(los) motor(es) utilizado(s) para propulsar el vehículo deben ser motores de pistón utilizando un ciclo de calentamiento primario de cuatro tiempos con una cilindrada no superior a 710 cm<sup>3</sup> por ciclo. Los trenes motrices



híbridos, como los que utilizan motores eléctricos que se ejecutan sin energía almacenada, están prohibidos.

CV1.2.1 Cada vehículo debe estar equipado con un arrancador a bordo, que debe utilizarse para iniciar el vehículo.

CV1.4 Acelerador

CV1.4.1 El vehículo debe estar equipado con un cuerpo de acelerador. El cuerpo del acelerador puede ser de cualquier tamaño o diseño

CV1.7 Restrictor del sistema de admisión

CV1.7.1 Para limitar la capacidad de potencia de los motores, se debe colocar un solo restrictor circular en el sistema de admisión y todo el flujo de aire del motor debe pasar a través de este restrictor. La única secuencia permitida de componentes es la siguiente:

- Para los motores de aspiración natural, la secuencia debe ser: cuerpo del acelerador, restrictor y motor, ver figura 16
- Para los motores turboalimentados o sobrealimentados, la secuencia debe ser: restrictor, compresor, cuerpo del acelerador, motor, ver figura 17

CV1.7.2 Los diámetros máximos de restrictor que deben respetarse en todo momento durante la competición son:

- Vehículos de gasolina - 20 mm
- Vehículos de combustible E 85 - 19 mm

CV1.7.3 El limitador debe estar ubicado para facilitar la medición durante el proceso de inspección.

CV1.7.4 La sección transversal circular que restringe no puede ser móvil o flexible de ninguna manera, por ejemplo, el limitador no debe formar parte de la porción móvil de un cuerpo del acelerador

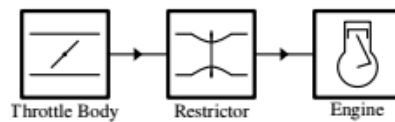


Figure 16: Intake configuration for naturally aspirated engines.

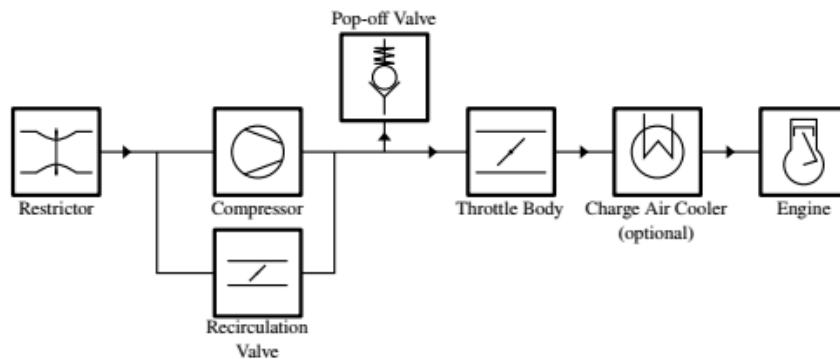


Figure 17: Intake configuration for turbocharged or supercharged engines.

Imagen 6 Disposición del restrictor en motores turbo y atmosféricos.  
 FS-Rules\_2020\_V1.0 pag 66



### 3.Desarrollo.



*Imagen 7 DYN-04 temporada 2018/2019.*

En la temporada 2019/2020 el equipo Dynamics en su monoplaza DYN-05 estrena un nuevo tipo de motor, en las temporadas anteriores el motor utilizado era un tetracilíndrico de 600 cm<sup>3</sup> proveniente de una motocicleta Honda CBR 600rr, por diversos motivos que se explicaran con más detalle en los siguientes apartados en la temporada 2020 se sustituye el motor de CBR por un motor monocilíndrico KTM de 690 cm<sup>3</sup>, esto obliga a rediseñar completamente todo el sistema de admisión ya que no es posible reutilizar ni evolucionar el diseño anterior debido a que pasar de un motor tetracilíndrico a un motor monocilíndrico no permite reutilizar el diseño.

La orientación del colector de admisión anterior se situaba aproximadamente por encima de la cabeza del piloto como se muestra en la **Imagen 7**, en el nuevo diseño. Un motor monocilíndrico por su constitución permite simplificar mucho el diseño, es posible diseñar un colector de forma horizontal al monoplaza mirando hacia un lateral del vehículo, esto permite rebajar el centro de gravedad de todo el conjunto del monoplaza y mejorar la aerodinámica ya que los estudios del departamento de aerodinámica determinan que en la parte superior del monoplaza los objetos que interfieren con el aire generan más resistencia aerodinámica que si se colocan en el lateral del monoplaza.

El proceso que seguir comenzara realizándose los cálculos de teóricos de volumen del plenum y el cálculo teórico tanto de la longitud del conducto principal como la de su diámetro. Una se obtienen los parámetros se diseña un prototipo "Ideal" con CATIA respetando las medidas previamente calculadas.

El siguiente paso es introducir el airbox en el diseño general del coche para asegurar que no colisione con ningún elemento y su posición sea correcta. En este punto como el monoplaza requiere diseños de carrocería, chasis y demás que son independientes al airbox y que no tienen una flexibilidad de diseño tan amplia como este, es más conveniente y necesario adecuar la geometría del airbox a los diferentes elementos, aunque esto sea contraproducente



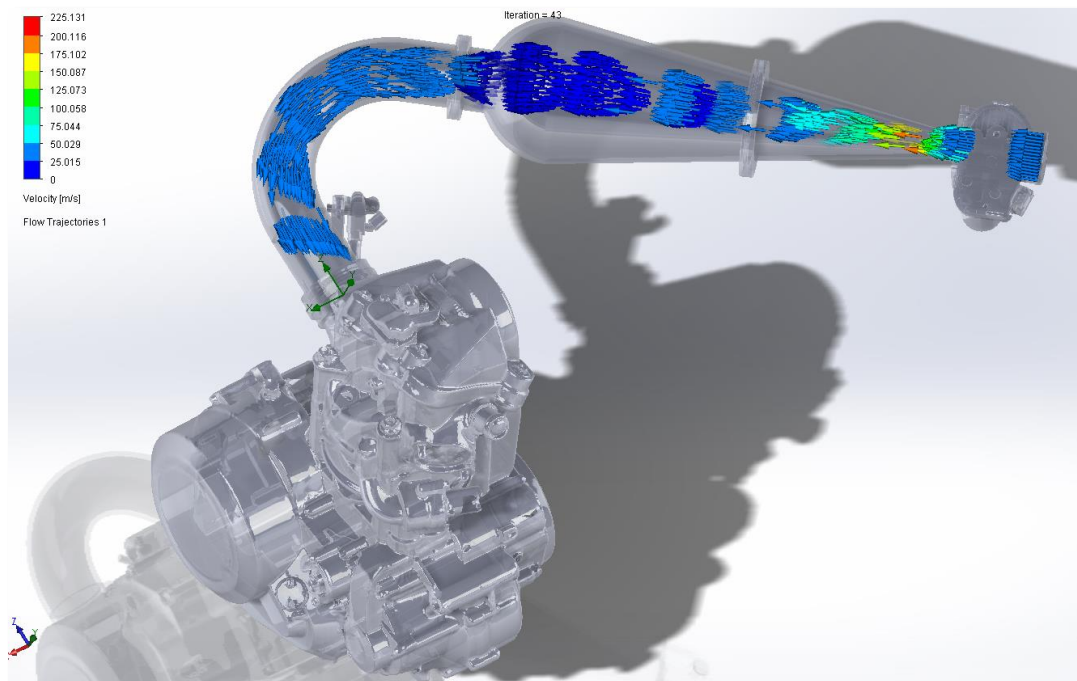
para su buen funcionamiento. Por ello el siguiente paso cobra una gran importancia, se trata de las simulaciones CFD que se realizara con ANSYS y SolidWorks, una vez se decide la posición del airbox en el monoplaza se procede a simularlo y realizar las modificaciones que sean necesarias para obtener el resultado óptimo.

Antes de comenzar es necesario conocer los conceptos básicos de funcionamiento del sistema de admisión de un motor de combustión de 4 tiempos.

A medida que el cigüeñal gira, en el tiempo de admisión el pistón comienza a descender provocando una succión de aire que pasa al interior del cilindro gracias a la apertura de la válvula de admisión. En el otro extremo el aire comienza a introducirse en el sistema de admisión, el cual en su primera etapa se le eliminan posibles partículas sólidas dañinas para el motor a través de un filtro para seguir su camino por el cuerpo del acelerador que se encarga de regular la cantidad de aire que ingresa en el sistema, este puede ser controlado mediante accionamiento mecánico o electrónico.

A continuación, el aire pasa a través de los conductos del colector de admisión hacia el conducto de aire de la culata, siguiendo la reglamentación de la Formula SAE, este paso está regulado con un diámetro de 20mm, esta zona se puede apreciar en la imagen 8 marcada como un incremento repentino de la velocidad del aire debido al cambio de sección.

En la **Imagen 8** se puede apreciar como el aire realiza su recorrido desde el cuerpo del acelerador pasando a continuación a través del restrictor para perder velocidad en el plenum la vez que se almacena una pequeña cantidad de aire y por último el aire circula hacia el puerto de la culata a través del colector.



**Imagen 8** Imagen general del paso del aire a través del sistema de alimentación.  
 (Simulación realizada con SolidWorks)



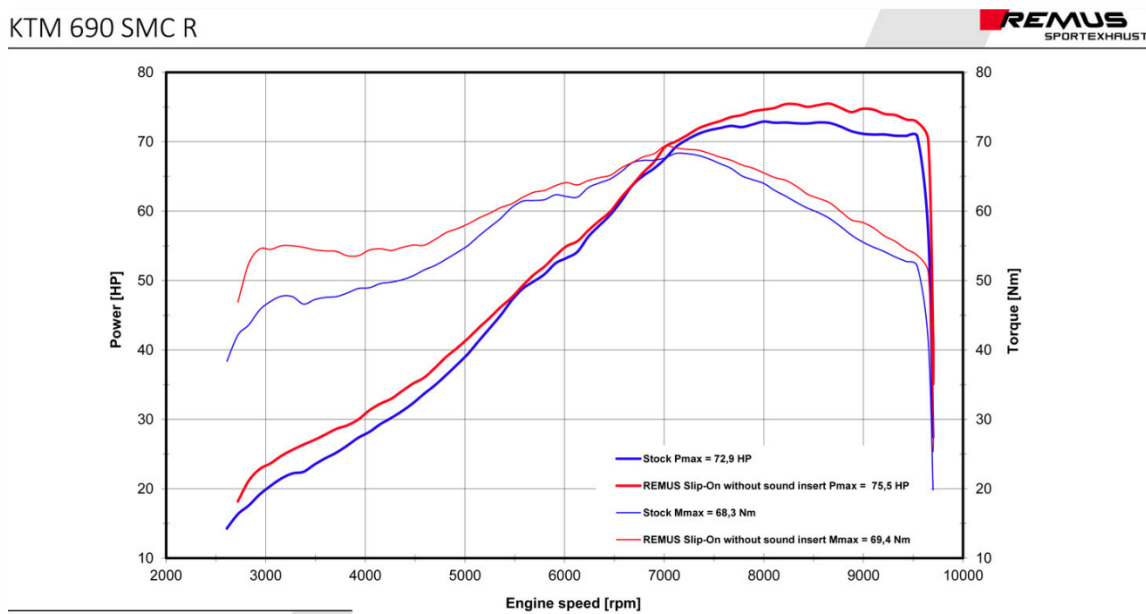
Cabe destacar que en contra de lo que sería lógico, en las competiciones automovilísticas, sobre todo en las actuales, no se busca siempre la potencia y el par máximo, sino que se busca una curva mucho más lineal para proporcionarle un carácter más suave al motor y una buena respuesta en cualquier régimen ya que el conductor necesita tener una respuesta previsible e inmediata en cualquier régimen de motor y en posición del acelerador.

Antiguamente existía una gran limitación de materiales y los sistemas electrónicos eran muy básicos, cuando se buscaba potencia se tendía a utilizar motores de altas revoluciones o con una gran cilindrada, esto marcaba inevitablemente el régimen de motor en el que se quería trabajar y difícilmente se podía tener un motor elástico, sino que más bien eran motores puntiagudos con entregas de potencia poco dosificables, por estos motivos, la relación de transmisión cobraba una gran importancia para poder trabajar en la zona óptima dependiendo del trazado en el que se competía.

Dicho esto, en la FSS el trabajo de los ingenieros se enfoca en conseguir una curva amplia de par y conseguir la máxima eficiencia volumétrica.

Para entender los veneficios del motor KTM 690 respecto el de CBR600rr se deben comparar las gráficas de par y potencia de ambos motores. La **Imagen 9** corresponde a la gráfica del motor de KTM, en el se muestra como la el rango de trabajo óptimo se encuentra entre las 6000 y 8000 rpm cuyo rango se adapta al tipo de trazado en el que transcurre el evento. Por otro lado el grafico de la **Imagen 10** correspondiente al motor de CBR su potencia máxima se encuentra a 14000 Rpm con un par muy máximo a 11500 Rpm constante durante toda la curva, el problema es que con la utilización del restrictor, las simulaciones indican que el restrictor por encima de 8000 rpm no proporciona mayor velocidad de aire por lo que provoca un rango de rpm en las que no se aprovecha el rendimiento del motor.

KTM 690 SMC R



**Imagen 9** Grafica de Par y Potencia KTM 690.

Product information Bike 11 - MEDIA. (2020). Retrieved 26 June 2020, from <https://remus.eu/product-information-bike-11-19-media>

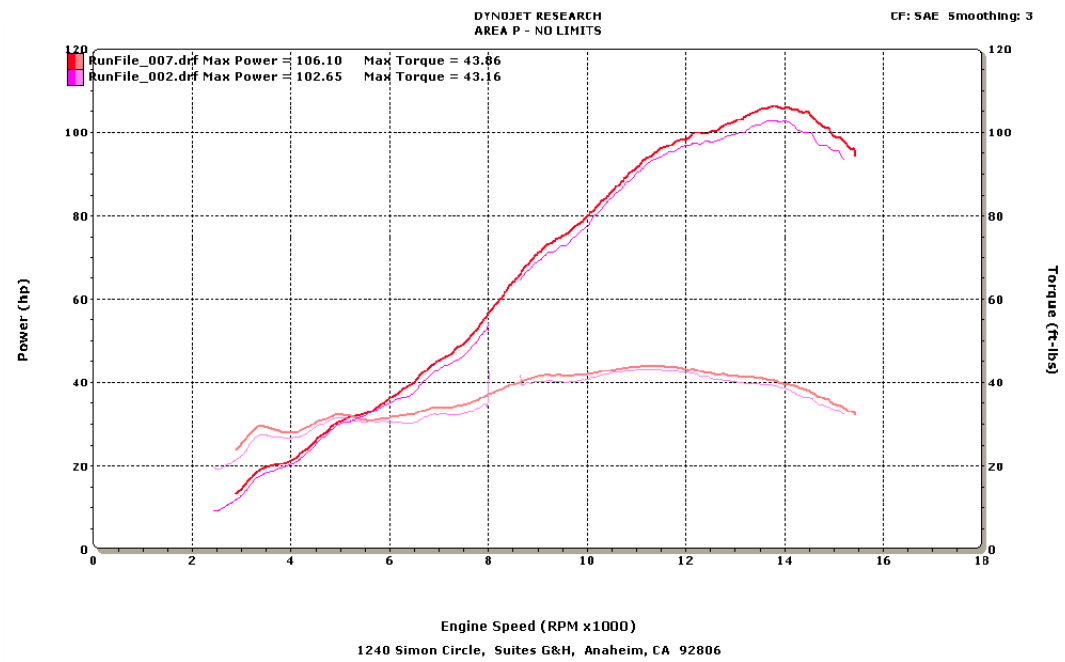


Imagen 10 Grafica de Par y Potencia CBR 600rr.  
 (2020). Retrieved 26 June 2020, from [http://areapolimits.com/images/product/cbr600rr\\_07\\_dyno\\_big.gif](http://areapolimits.com/images/product/cbr600rr_07_dyno_big.gif)

## 4.Elementos mecánicos a tener en cuenta.

### 4.1 Motor KTM 690cm<sup>3</sup>

El motor seleccionado para este monoplaza proveniente de una motocicleta modelo KTM 690 R que cumple con los puntos 1.1 y 1.2 de la normativa, su cilindrada es de 690cm<sup>3</sup> por lo que no sobrepasa el límite de los 710cm<sup>3</sup> y cuenta con motor de arranque eléctrico.



Imagen 11 KTM SMC 690R.

[https://www.ktm.com/ktmgroup-storage/PHO\\_BIKE\\_90\\_RE\\_690-smcr-2019-90-re\\_%23SALL\\_%23AEPI\\_%23V1.png](https://www.ktm.com/ktmgroup-storage/PHO_BIKE_90_RE_690-smcr-2019-90-re_%23SALL_%23AEPI_%23V1.png)



Aun así, hay varios factores que hacen de este motor una muy buena opción para ser utilizado en la FSS. Una gran ventaja es que tratándose de un motor monocilíndrico su tamaño es muy reducido y como consecuencia de ello su peso también es muy bajo 35kg al tratarse de una moto diseñada para el enduro, su relación de cambio es más corta comparando con un motor de una motocicleta de carretera como por ejemplo una HONDA CBR 600rr. Esta relación de cambio no es idónea para su uso en la Formula Student, pero se puede compensar modificando la relación final.

Otro factor determinante es su rango de RPM efectivo, su régimen de trabajo se podría considerar que se trata de un régimen de trabajo bajo/medio teniendo en cuenta que es un motor de motocicleta, las RPM máximas que puede alcanzar son 8000 rev/min, esto influye directamente en el momento de diseñar el colector de admisión ya que su volumen dependerá directamente de las RPM máximas que pueda alcanzar durante su funcionamiento. A lo largo de este estudio se mostrará como el restrictor afecta en enorme medida cuando el motor trabaja en regímenes altas de RPM. Se observa que la velocidad máxima de entrada de aire hacia el plenum se encuentra en el rango de 8000 Rpm, aunque las RPM del motor aumenten de rango la velocidad de aire no se ve significativamente incrementada, por ello un motor un motor que un límite de RPM es más alto no es necesariamente más beneficioso como si podría ser en otro tipo de competición.

#### 4.1.1 Imagen del motor:



*Imagen 12 Motor KTM de 690cc.*

[https://www.ktm.com/ktmgroupp-storage/PHO\\_BIKE\\_DET\\_690-duke-2018-engine\\_%23SALL\\_%23AEPI\\_%23V1.jpg](https://www.ktm.com/ktmgroupp-storage/PHO_BIKE_DET_690-duke-2018-engine_%23SALL_%23AEPI_%23V1.jpg)



#### 4.1.2 Tabal de especificaciones:

Especificaciones motor KTM 690 r	
Diseño	1 cilindro de 4 tiempos
Cilindrada	690 cm <sup>3</sup>
Carrera	84,5mm
Ø Cilindro	102mm
R/C	12,5:1
Control	OHC 4 válvulas
Ø válvula admisión	40mm
Ø válvula escape	34mm
Caja de cambios	6 velocidades
Ratio	
1ª Velocidad	14:35
2ª Velocidad	16:28
3ª Velocidad	21:28
4ª Velocidad	21:23
5ª Velocidad	23:22
6ª Velocidad	23:20
Encendido	electrónico con dos bobinas
inyección	inyección indirecta electrónica
refrigeración	refrigeración líquida

*Tabla 2 Especificaciones del motor.*

#### 4.2 Restrictor:

La reglamentación de la FSS no especifica si el restrictor ha de ser un elemento comercial o de fabricación. Los restrictores comerciales cuentan con la ventaja de que ya incluyen el cuerpo del acelerador por lo que simplifica mucho el diseño del conjunto. La parte negativa es que al ser elementos que se podrían decir universales no están optimizados para cada sistema de admisión por lo que para llegar a tener la máxima eficiencia volumétrica no es lo más indicado.



*Imagen 13 Restrictor de aire comercial Ø20mm.*  
<https://www.atpower.com/products/28mm-fs-20mm-restrictor>



La segunda opción es utilizar un restrictor diseñado y fabricado según las especificaciones requeridas por el sistema de admisión a desarrollar, la reglamentación tampoco obliga a que el restrictor sea una parte desmontable del sistema de admisión, por lo que este puede formar parte del plenum siempre que se encuentre situado antes del cuerpo del acelerador.



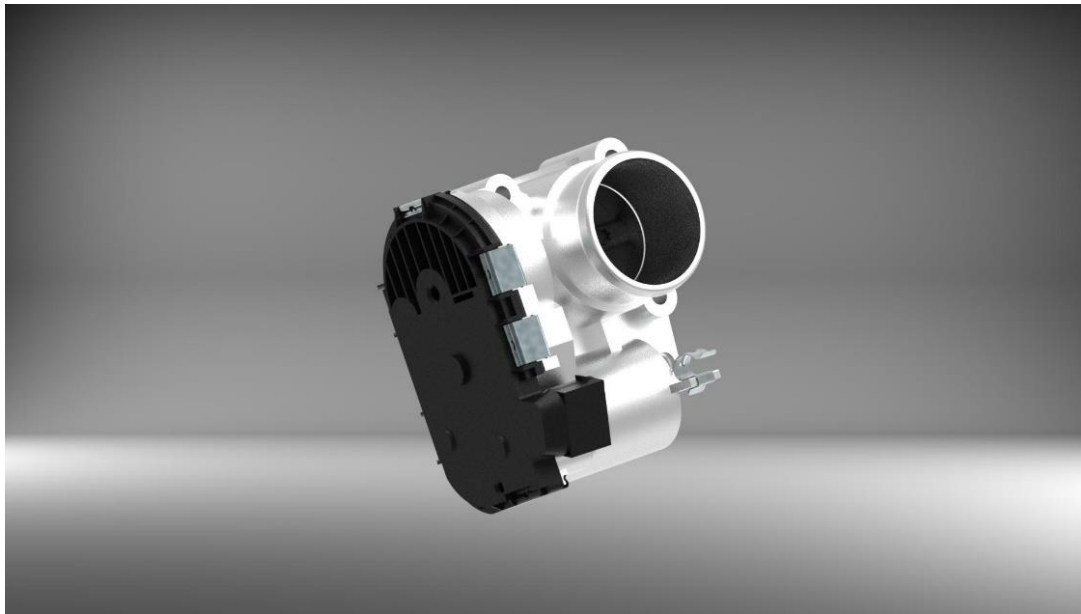
*Imagen 14 Restrictor modelado para este proyecto.*

### 4.3 Cuerpo del acelerador

En este proyecto, una de las evoluciones respecto a las temporadas anteriores es la incorporación de un cuerpo de acelerador de accionamiento electrónico.

En los monoplazas anteriores el sistema de cambio de marchas trataba de un cambio manual accionado con cables metálicos, para subir una marcha no se requería el accionamiento del pedal de embrague situado en pedaliar del cockpit ya que se disponía de un sistema cut off que cortaba encendido permitiendo subir la marcha, en cambio para reducir una marcha era necesario utilizar el embrague por lo que obligaba a tener 3 pedales, cosa que complicaba el diseño por su reducido espacio y no era cómodo para el piloto.

Para poder reducir marcha sin accionar el embrague, uno de los sistemas más utilizados es el llamado Throttle blip, en el momento que el piloto acciona la leva para reducir una marcha, esta envía una señal eléctrica a la centralita del motor, mediante gestión electrónica la centralita acciona momentáneamente la mariposa de modo que ese golpe de acelerador libera la carga existente entre los piñones de la caja de cambios, también aumentan las Rpm del motor hasta la zona óptima según la relación de transmisión. Este sistema se podía implementar con un cuerpo de mariposa mecánico, pero implicaba una serie de mecanismos que provocaban una cierta complejidad innecesaria en un sistema tan delicado por la seguridad del piloto como puede ser el acelerador. Por lo que utilizar un cuerpo de mariposa electrónica es un cambio mucho más sencillo y fiable.



*Imagen 15 Cuerpo de la mariposa electrónico.*

## 5. Conceptos teóricos

### 5.1 Motor de 4 tiempos

Las bases del primer motor de gas de cuatro tiempos (4T) se experimentaron por primera vez en 1861 gracias al alemán Nicolaus Otto, pero se abandonó este concepto por dificultades técnicas hasta el año 1867, los siguientes años Eugen Langen y Nicolaus Otto idearon un motor de 4T con ignición de mezcla Aire/Gasolina que presentaron en 1868 en París. La gran revolución de este concepto fue provocar la chispa en la mezcla ya comprimida en lugar de solo aspirada, aumentando tanto la eficiencia como el rendimiento del motor-

Un motor de combustión interna de 4T precisa cuatro carreras del pistón o embolo para completar un ciclo completo ciclo termodinámico completo, existen dos tipos de ciclos, el ciclo OTTO y el ciclo Diésel.

Estos cuatro tiempos son: Admisión, Compresión, Explosión, Escape.

**5.1.1 Primer Tiempo o Admisión:** Este ciclo al igual que todos los nombrados en los siguientes apartados tiene una duración de 180° de giro de cigüeñal y de 90° árbol de levas, el pistón desciende provocando una aspiración de aire en motores de encendido por compresión (MEC) o aire/combustible en los motores de encendido provocado (MEP). En este tiempo la válvula de escape se encuentra cerrada a la vez que la válvula de admisión permanece abierta.

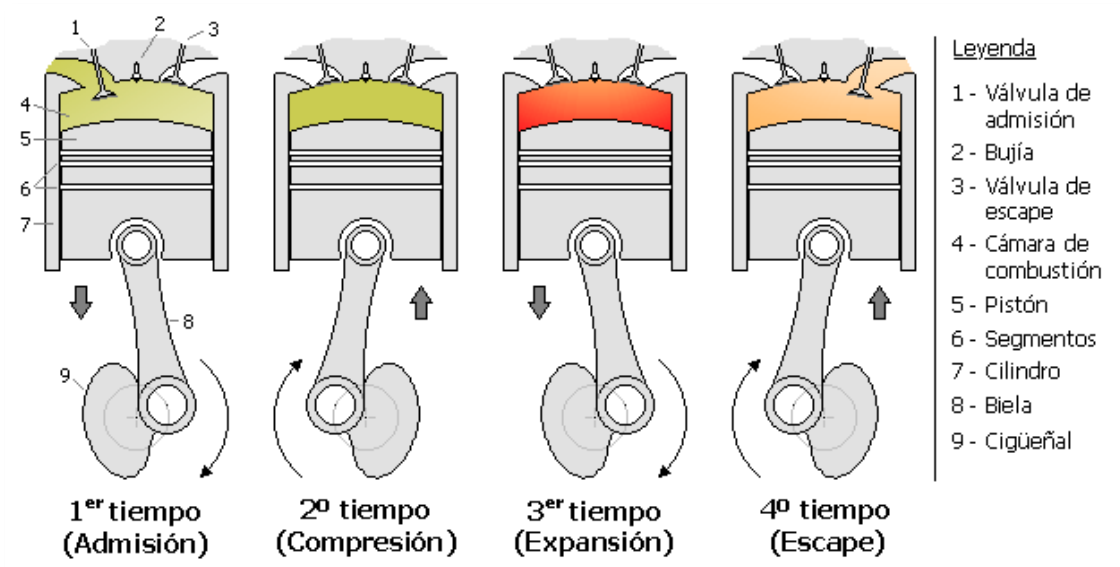
**5.1.2 Segundo tiempo o compresión:** Al llegar al final de la carrera la válvula de admisión se cierra y el pistón asciende comprimiendo el aire ya que tanto la válvula de escape como la de admisión se encuentran cerradas.





**5.1.4 Tercer Tiempo:** A medida que el pistón se desplaza en la fase de compresión, aumenta progresivamente la compresión del interior de la Cámara de combustión hasta que llega a la presión máxima cuando el pistón llega al punto muerto superior en el final de la carrera. En este punto se acciona el sistema de encendido y se provoca la combustión de la mezcla aire/carburante en el caso de los motores Otto mientras que en los motores diésel es el momento que se inyecta el combustible directamente dentro de la Cámara de combustión a través de un inyector. En los dos casos la expansión de los gases empuja el pistón hacia la parte inferior de la carrera provocando un trabajo en este movimiento, el tercer tiempo es el único que produce trabajo.

**5.1.4 Cuarto tiempo:** En esta fase la válvula de escape se abre y el pistón asciende empujando los gases de combustión a través de la válvula para evacuarlos hasta que el pistón llega al final de la carrera en la parte superior. Este es el punto final teórico del ciclo de 4T. En todo este proceso el cigüeñal ha girado 720° y el árbol de levas 360°.



*Imagen 16 Imagen característica de los 4 tiempos.*  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_de\\_cuatro\\_tiempos](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos)

## 5.2 Avance y retraso de válvulas

Se denomina avance y retraso de válvulas a la diferencia de momentos en que abren y cierran las válvulas en los motores de combustión interna con relación al momento teórico para hacerlo. Es decir que no abren o cierran exactamente cada 180° de giro de cigüeñal.

El punto teórico para abrir y cerrar las válvulas es en el punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI), las válvulas de admisión abren en el PMS y cierran en el PMI, en el caso de las válvulas de escape lo hacen justo en el orden inverso. El propósito de abrir y cerrar las válvulas fuera del momento teórico es favorecer la circulación de los gases y por ello mejorar el rendimiento y prestaciones del motor.

Estos tiempos están relacionados con las levas de los árboles de levas del motor, su geometría se estudia y diseña con un fin específico para el que está destinado el motor. Por ejemplo un motor de altas prestaciones que trabajan a altas RPM suelen tener un perfil de leva más larga y puntiaguda para tener más tiempo de apertura de válvulas i favorecer el llenado del cilindro a



altas RPM, en cambio un motor de bajas prestaciones en el que el rango de RPM es mucho más bajo la leva tendrá un perfil más corto y redondeado, el carácter fundamental de un motor depende completamente de esta geometría y es un punto altamente determinante en el desarrollo de un motor.

Tanto el avance como el retroceso se mide en grados de giro de cigüeñal, y la referencia será los grados de apertura y cierre en referencia al PMS y PMI.

#### 5.2.1 Avance de la apertura de Admisión (AAA)

Debido a que el aire no se introduce instantáneamente en la cámara de combustión, sino que requiere un determinado tiempo para introducirse en el cilindro, es necesario comenzar a abrir la válvula de admisión unos grados antes del PMS aumentando así el tiempo total de apertura de la válvula para poder garantizar un buen llenado del cilindro.

#### 5.2.2 Retraso del cierre del escape (RCE)

El retraso del cierre de escape se produce unos grados después del PMI, la válvula se mantiene abierta incluso cuando el pistón comienza a ascender en la fase de compresión para aprovechar la inercia de los gases al entrar asegurando un mayor llenado del cilindro.

#### 5.2.3 Avance de apertura de escape (AAE)

El avance de apertura de escape se realiza unos grados antes de del PMI. Como el tiempo anterior es el de expansión, al abrir esta válvula antes de que el tiempo de expansión termine, parte del trabajo generado por la expansión de los gases al abrir la válvula de escape la presión se pierde. Pero con esta acción se asegura un buen barrido de los gases de escape que es mucho más beneficiosos y compensa esa pequeña pérdida de potencia.

#### 5.2.4 Retraso del cierre de escape (RCE)

Al igual que en los casos anteriores, para aprovechar la inercia de los gases la válvula se mantiene abierta después del PMS incluso cuando el pistón comienza a descender.

### 5.3 Cruce de válvulas

El tiempo de admisión comienza cuando se está realizando la evacuación de gases de la combustión en el tiempo de escape y el pistón se encuentra próximo al punto muerto superior (PMS). Antes de que el pistón llegue al PMS se produce un avance de apertura de la válvula de admisión (AAA) mientras que la válvula de escape permanece abierta un pequeño periodo después de pasar por el PMS, esto se le llama retraso de cierre de escape (RCE), en este punto tenemos simultáneamente las dos válvulas abiertas y suele durar unos 20° en motores de calle y 30° en los motores de competición. Este tiempo que transcurre entre AAA y RCE se denomina cruce de válvulas. Durante este periodo los gases de admisión se introducen a una presión más elevada que la que se encuentran los gases de escape cuya presión es la atmosférica, esta diferencia de presión ayuda a evacuar la cámara de combustión de gases de la combustión que podrían ser perjudiciales para el rendimiento del motor si se mezclara con el aire limpio entrante.

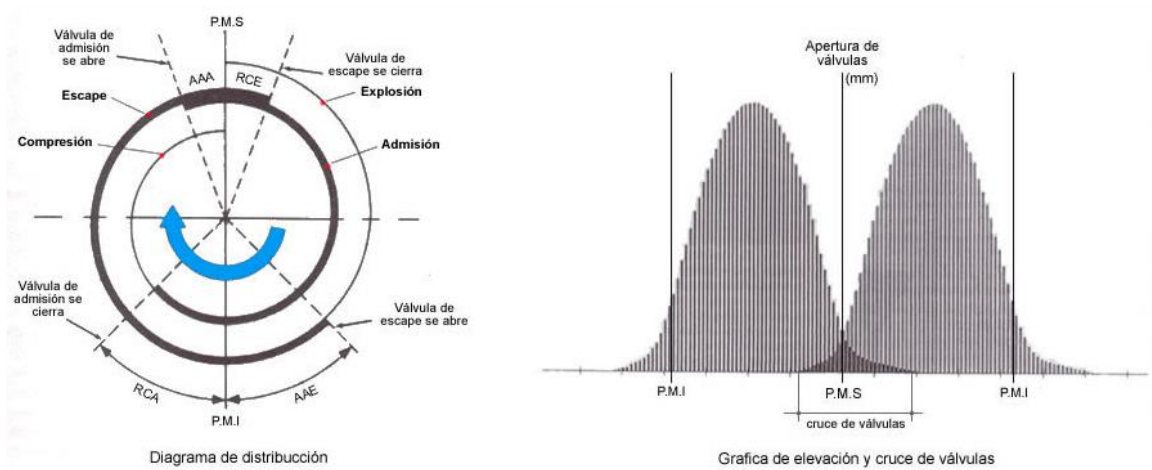


Imagen 17 Diagrama de distribución teórico.  
<https://foro.clubjapo.com/t/que-es-la-sincronizacion-y-cruce-de-valvulas/24693>

### 5.4 Potencia

Se denomina potencia a la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo, en el caso de los motores alternativos de 4 tiempos la potencia se genera durante el tiempo de combustión de la mezcla.

Un aumento de cilindrada proporciona más fuerza en el momento de la combustión produciendo más potencia. A su vez un incremento de revoluciones aumenta la cantidad de ciclos por unidad de tiempo por lo que la potencia se ve directamente incrementada.

Generalmente los desarrolladores de motores utilizan estos y más factores para ajustar la potencia dependiendo la aplicación a la que se va a someter el motor. Un motor de gran cilindrada requiere de piezas móviles más grandes y pesadas por lo que estas producen más vibraciones e inercias que requiere de más energía para aumentar sus revoluciones.

Esto obliga a tener siempre un equilibrio entre funcionalidad, fiabilidad y costes. Un motor de competición se puede permitir durar unas pocas horas, por lo que los motores de altas prestaciones suelen ser de altas revoluciones y una fiabilidad a largo plazo baja, en cambio un generador eléctrico su funcionamiento se contará en días por lo que requiere de un motor mucho más fiable, económico y con un reducido consumo, por lo que los motores de gran cilindrada, pero de muy bajas RPM son idóneos para este fin.

y se define como:

$$P = \frac{W}{t} \rightarrow \frac{F \cdot r}{t}$$

Donde;

P; Potencia (W).

F; Fuerza generada por el aumento de presión durante la combustión (N).

T; Tiempo en el que se realiza el trabajo.



## 5.5 Par Motor

El par es el momento de fuerza transmitida por el eje transmisor de potencia, la potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión y se expresa con la ecuación siguiente:

Donde;

$$W = M \cdot \Omega$$

W; Potencia (W).

M; Par motor (N·m).

$\Omega$ ; Velocidad angular eje (rad/s).

## 5.6 Eficiencia volumétrica.

Se considera un 100% de eficiencia volumétrica cuando el cilindro se encuentra completamente lleno de aire, sin embargo esto solo sucede cuando el movimiento del pistón es muy lento y el aire tiene tiempo de llenar todo el cilindro durante el tiempo de admisión. En un motor en marcha el aire pasar rápidamente a través de los conductos de admisión de la culata hacia el cilindro en apenas una fracción de segundo a su vez el aire es calentado por la radiación térmica emitida por el motor por lo que este se expande impidiendo el llenado completo. Por ello es tan común que un motor de combustión interna ofrezca su par máximo en la zona baja de RPM ya que la eficiencia volumétrica es más alta en esta zona, al haber más cantidad de aire como consecuencia se requiere más combustible por lo que la fuerza generada será mayor aumentando el par, su valor suele rondar el 80% en zona baja/media de RPM y puede caer hasta el 50% a altas Rpm.

Por este motivo el diseño de un sistema de alimentación de aire óptimo es esencial para minimizar las pérdidas de potencia.

La cantidad de aire que entra en el motor se define como:

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

M; Masa de aire por unidad de tiempo.

N; Numero de carreras de motor por unidad de tiempo.

V; Volumen desplazado del cilindro

P; Densidad del aire

EV; Eficiencia volumétrica



## 6. Definición de un colector de admisión

### 6.1 Sistema de alimentación de aire.

En el mundo de la automoción se denomina colector de admisión o múltiple de admisión, es la pieza del motor que proporciona la mezcla de aire/combustible a los cilindros.

La función principal del colector de admisión es distribuir la mezcla equitativamente a todos los cilindros de la forma más eficiente posible. También tiene la función mecánica de alojar los inyectores, carburador o diferentes elementos necesarios para el funcionamiento del motor.

### 6.2 Objetivos de un colector de admisión.

Para poder proporcionar la máxima eficiencia volumétrica, un colector de admisión bien diseñado debe suministrar una carga de aire/combustible uniforme al cilindro con un flujo de aire lo más directo posible favoreciendo una velocidad de aire adecuada en bajas y altas revoluciones. Las diferentes combinaciones de estilos de colectores están directamente vinculados al objetivo de rendimiento del motor.

El colector de admisión también se encarga de almacenar aire para garantizar que siempre llegue un buen volumen de este a la cámara de combustión sin importar el régimen de motor o la carga del acelerador. En nuestro caso es importante tener un gran volumen interior por que el restrictor afecta muy negativamente al llenado de aire afectando drásticamente a la eficiencia del motor

### 6.3 Tipos de colectores de admisión

A lo largo de la historia se han ideado múltiples variantes de sistema de alimentación de aire, pero todos se basan en dos conceptos básicos que se conocen como admisión convencional y admisión variable.

#### 6.3.1 Admisión convencional:

Estos sistemas son los más utilizados por su sencillez de fabricación, aunque no cuentan con un rango de funcionamiento óptimo tan grande como tiene un colector de admisión variable.

En el momento de desarrollar un motor, el fabricante dependiendo del rango de trabajo del motor, determina una longitud óptima para trabajar en este rango, un colector de admisión corto proporciona un buen comportamiento en altas revoluciones y un colector largo su funcionamiento óptimo es en un rango bajo/medio de revoluciones. Para subsanar este problema y tener un sistema que se adapte en un rango amplio de revoluciones, algunos fabricantes optan por utilizar el colector de admisión variable.



**HONDA**



*Imagen 18 Colector convencional Original Honda Civic EP3 2001-2005.*

*K20A, H., TypeR, EP3, AP2, B16A2/B18C, & B16A2/B18C et al. (2020). Honda Colector admisión RBC - Civic EP3 DC5 K20A. Retrieved 27 June 2020, from <https://eurohar.es/gl/honda/4145-honda-colector-adm>*

En competición y motocicletas, como se suelen utilizar motores de altas revoluciones se utiliza una de las variantes del sistema de alimentación convencional llamado ITB (individual throttle body) que como su nombre indica consiste en utilizar un cuerpo de mariposa individualizado para cada cilindro.

Las ventajas principales es que no requiere de un plenum para almacenar el aire como se muestra en la Imagen 19, por lo que garantiza un buen suministro de aire constante e igualado en todos los cilindros.



*Imagen 19 ITB implementado en un Alfa Romeo 155 V6 TI DTM 1992-1998 .*

*(2020). Retrieved 27 June 2020, from <https://static.carthrottle.com/workspace/uploads/comments/71f341f798566600beea8e099f8c451.jpg>*



### 6.3.2 Admisión variable:

Un sistema de admisión variable parte de un sistema convencional, su función es garantizar un suministro de aire constante y una longitud de colector óptima en diferentes rangos de revoluciones.

Estos Sistemas cuentan en su interior con un sistema de aletas accionadas mecánicamente que canalizan el aire por diferentes conductos en el interior del colector, de modo que varía el recorrido por el que tiene que circular el aire. El aire se desviará en una sección larga en un rango bajo de revoluciones y en la sección corta en un rango alto.

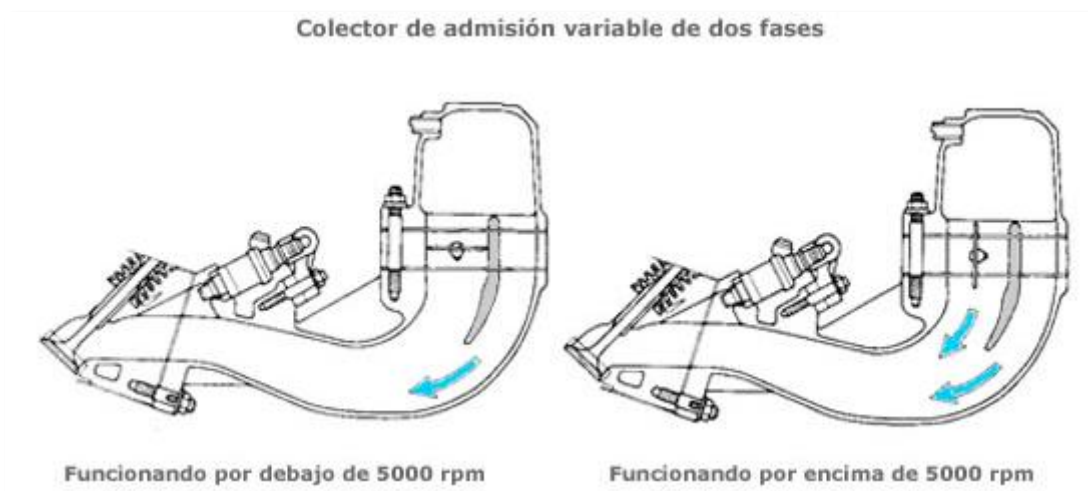


Imagen 20 Interior de un colector de admisión variable.  
 (2020). Retrieved 27 June 2020, from [https://2.bp.blogspot.com/-F2RfU92dY-8/XIsLuzJgnhl/AAAAAAAAABys/vW1X8\\_7Qfp4eEnfJLH5Xe065GeDDMJIIACLcBGAs/s1600/colector-dos-fases.jpg](https://2.bp.blogspot.com/-F2RfU92dY-8/XIsLuzJgnhl/AAAAAAAAABys/vW1X8_7Qfp4eEnfJLH5Xe065GeDDMJIIACLcBGAs/s1600/colector-dos-fases.jpg)

Otra variante comúnmente utilizada sobre todo en motocicletas es un sistema el cual varía físicamente la longitud del colector, el colector suele tener una zona de goma que se comprime por efecto Venturi o mecánicamente reduciendo su longitud a medida que aumenta el régimen de revoluciones.

### 6.2 Partes de un múltiple de admisión.

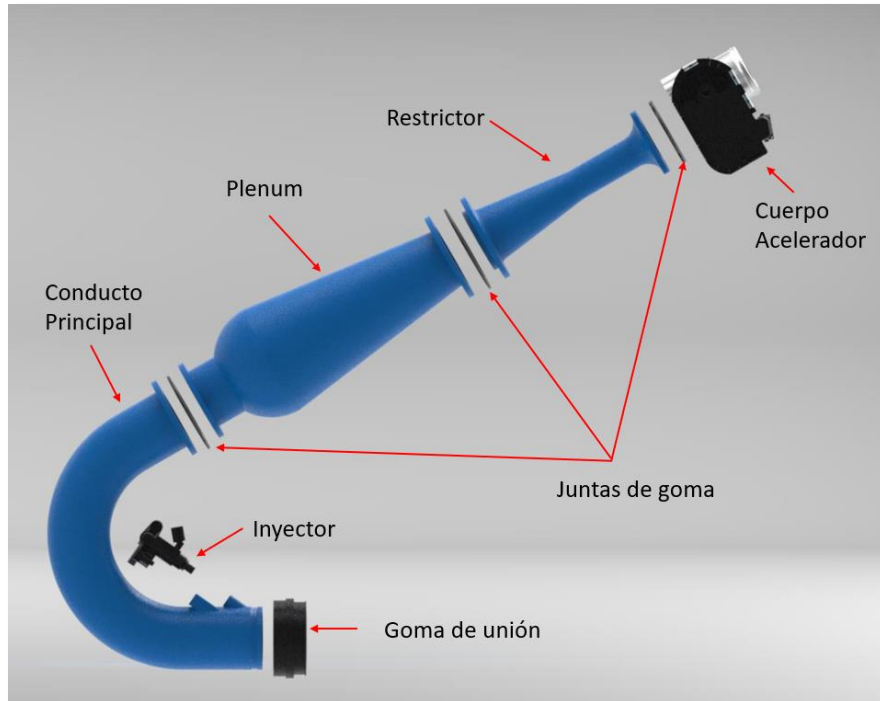
Principalmente el colector de admisión se compone de 5 partes: el pleno, conductos, cuerpo de admisión, juntas y en el caso de la FSS el restrictor.

La función principal del **pleno** es de almacenar el aire proveniente del **cuerpo del acelerador** y distribuirlo hacia los **conductos**. Los conductos no solo se encargan de transportar el aire desde el Plenum a la cámara de combustión, sino que también en su interior se realiza la mezcla de combustible en caso de tratarse de un sistema de **inyección** indirecta.

Para un motor restringido el **restrictor** también forma parte del conjunto del sistema de alimentación de aire. Concretamente se sitúa entre el cuerpo del acelerador y el plenum, como su nombre indica se encarga de limitar el flujo de aire al interior del plenum, el diámetro de este es un factor altamente decisivo en el momento de diseñar todo el conjunto ya que este afecta muy negativamente al llenado del plenum.



Para asegurar la estanqueidad entre todos los elementos se intercalan **juntas** de goma especialmente diseñadas y fabricadas para este prototipo.



*Imagen 21 Despiece general.*

#### 6.4 Resonancia en un múltiple de admisión

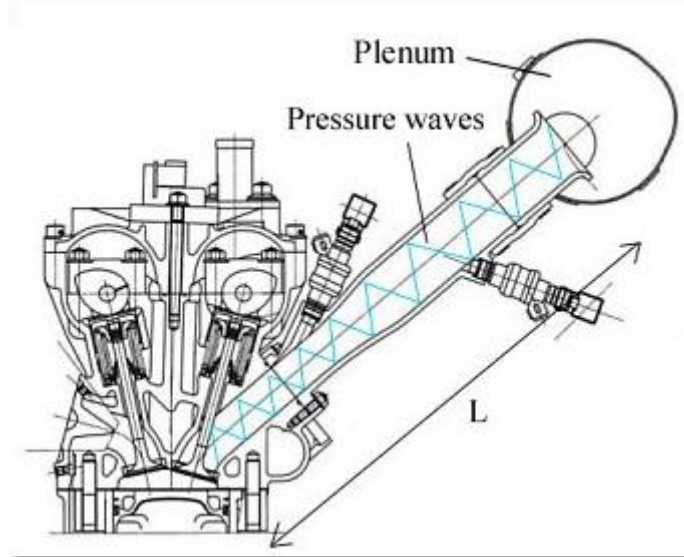
A medida que el pistón desciende y aumenta el volumen dentro del cilindro sigue entrando aire a gran velocidad proveniente del conducto de admisión a causa del vacío que está generando el movimiento descendente del pistón, a su vez se genera una onda de expansión (presión negativa) que se propaga desde la válvula de admisión a la entrada de aire del colector de admisión en la zona donde se une con el plenum hasta que la válvula de admisión queda completamente cerrada (RCA) pocos grados después de que el pistón se encuentre en el punto muerto inferior (PMI), en este punto la válvula de admisión al encontrarse cerrada detiene la entrada de los gases, estos dejan de entrar y como consecuencia de la inercia de estos gases al detenerse de golpe se genera una onda de choque que se propaga a gran velocidad en dirección contraria, es decir se desplaza desde la válvula en dirección al plenum, en el momento que la onda de choque entra en contacto con el final de la tubería esta se propaga y rebotan en las paredes del plenum.

Como consecuencia del rebote de las ondas estas vuelven a introducirse en la tubería del colector de admisión hacia la entrada de aire del cilindro, esta vez impulsando la columna de aire gracias a la energía cinética de la onda aumentando la velocidad del aire provocando un aumento de la presión en el interior del tubo.

Por este motivo es muy importante calcular adecuadamente la longitud del conducto para sincronizar este evento con el siguiente tiempo de admisión para poder aprovechar este



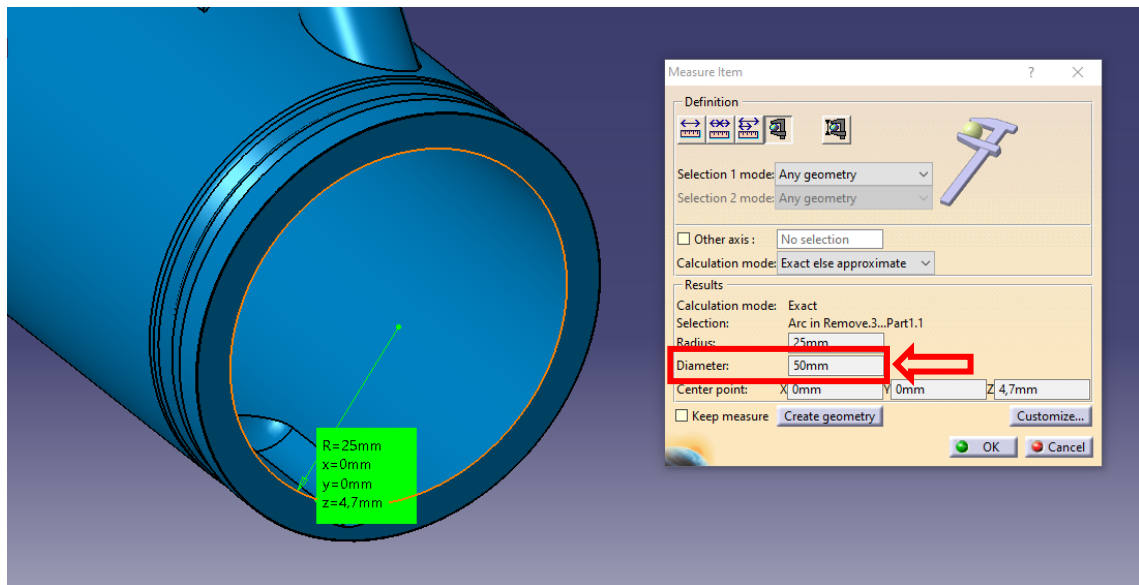
aumento de energía extra y como consecuencia aumentando a la eficiencia volumétrica del motor.



*Imagen 22* vista de la onda de presión desplazándose en el interior del colector.  
[https://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](https://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html)

### 6.6 Diámetro del colector

Con la finalidad de maximizar y facilitar el flujo del aire, el diámetro utilizado es el máximo que permite el conducto de admisión de la culata cuyo diámetro es de 50mm.



*Imagen 23* Imagen ilustrativa de las dimensiones del colector.



## 6.7 Longitud del tubo de entrada (Runner)

Como se ha mencionado anteriormente, el colector de admisión se sitúa entre la mariposa del acelerador y el conducto de aire de admisión de la culata. Su propósito principal es repartir el aire en los diferentes cilindros del motor, que en nuestro caso es uno y de proporcionar una zona para realizar la mezcla de combustible en caso de que el tipo de inyección se trate de un sistema de inyección indirecta.

Uno de los parámetros más fundamentales en el diseño de un runner es su longitud hasta el plenum. En este punto es donde se debe tener en cuenta los conceptos mencionados anteriormente de resonancia. En primer momento se debe realizar un estudio teórico para poder determinar una longitud base para el diseño y estudio CFD posterior.

La longitud teórica se puede calcular utilizando la ecuación del resonador de Helmholtz.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{L \times V_{e_{ff}}}}$$

Donde;

F; es la velocidad de giro del motor (*Rpm*).

C; es la velocidad del sonido (*pie/s*).

A; Área transversal del colector de admisión (*Inch<sup>2</sup>*).

L; Longitud del conducto desde la válvula de admisión al plenum (*inch*).

A continuación, es necesario determinar el volumen de la cámara de combustión aislando desde la ecuación de la relación de compresión del motor:

$$RC = \frac{VCI + VCA}{VCA}$$

Donde:

RC; Relación de compresión del motor.

VCI; Volumen del cilindro (*inch<sup>3</sup>*).

VCA; Volumen de la cámara de combustión (*inch<sup>3</sup>*).

El volumen efectivo del motor ( $V_{ff}$ ) es considerado máximo cuando el pistón se encuentra en la mitad del recorrido en el interior del cilindro:



$$V_{eff} = \frac{VCI}{2} + VCA$$

Sustituyendo y simplificando tenemos que:

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

Sustituyendo la ecuación simplificada ( $V_{ff}$ ) en la ecuación de Helmholtz para adaptarla a un motor de combustión interna tenemos:

$$f_p = \frac{162}{K} C \sqrt{\frac{A \cdot (RC - 1)}{L \cdot V_d (RC + 1)}}$$

Despejando la longitud obtenemos como ecuación final:

$$L = \frac{A \cdot (RC - 1)}{VD(RC + 1)} \left( \frac{162c}{f_p \cdot K} \right)^2$$

Según la curva de potencia de este motor, la potencia máxima se entrega a las 6500rpm, pero el rango de trabajo real oscilará entre 5000 y 8000 RPM por lo que el airbox se estudiará en la zona media de trabajo que se encuentra sobre las 6500 rpm

### 6.7.1 Calculo de la longitud

Parámetros de trabajo		
Descripción	Valor	unidades
Velocidad del cigüeñal (fp)	6500	RPM
∅ Colector (D)	1,97	Inch
Área mm <sup>2</sup> (A)	3,04	Inch <sup>2</sup>
V Sonido (C)	1125,33	pies/s
RC	12,5	RC:1
Volumen Cilindro (VCI)	42,11	Inch <sup>3</sup>
K Entre 2 y 2,5 (K)	2,25	cte

*Tabla 3 Datos para calcular la longitud del colector*

Para realizar el cálculo se utilizará como valor del diámetro del colector el mismo que el diámetro de la tobera de admisión de la culata que esta mide 50mm(1.97inch) y las RPM a las que se realizara el estudio son 6500RPM

Teniendo en cuenta los datos de la tabla y sustituyendo en la ecuación final tenemos que:

$$\text{Longitud teòrica } (L) = \frac{A \cdot (RC - 1)}{VCI(RC + 1)} \left( \frac{162c}{f_p \cdot K} \right)^2 \rightarrow \frac{3.04 \cdot (12.5 - 1)}{42.11(12.5 + 1)} \left( \frac{162 \cdot 1125.33}{6500 \cdot 2.25} \right)^2 = 243\text{mm}$$

Teniendo en cuenta que la longitud del conducto de admisión de aire de la culata mide 80 mm y el factor K puede variar de 2 a 2.5 tenemos respectivamente una longitud de 307mm para K=2 y 196mm para el factor k=2.5 tenemos una longitud total:

$$L_{\text{maxima}} = (\text{Longitud } K = 2) - (\text{Longitud conducto}) = 307 - 80 = 227\text{mm}$$

$$L_{\text{minima}} = (\text{Longitud } K = 2.5) - (\text{Longitud conducto}) = 196 - 80 = 116\text{mm}$$

Por motivos de diseño del monoplaza para poder alojar correctamente el airbox es necesario ajustar al máximo la longitud del airbox a su longitud máxima, que en este caso será 227mm que será la longitud de partida en las simulaciones.

**Longitud optima = 227mm**



*Imagen 24 Vista en detalle del colector.*

## 6.5 Volumen del plenum

Para dimensionar su volumen inicial, se recurre a los consejos proporcionados por los jueces de las últimas competiciones, durante el transcurso de la prueba Design, los jueces aconsejaban partir de un volumen total que se encuentre entre 2 y 2.5 veces el tamaño de la cilindrada del motor. En nuestro caso el plenum tendría un volumen inicial que se moverá entre 1.38l y 1.75l y mediante simulaciones se estudiara la viabilidad de estos volúmenes y se realizaran los cambios pertinentes.

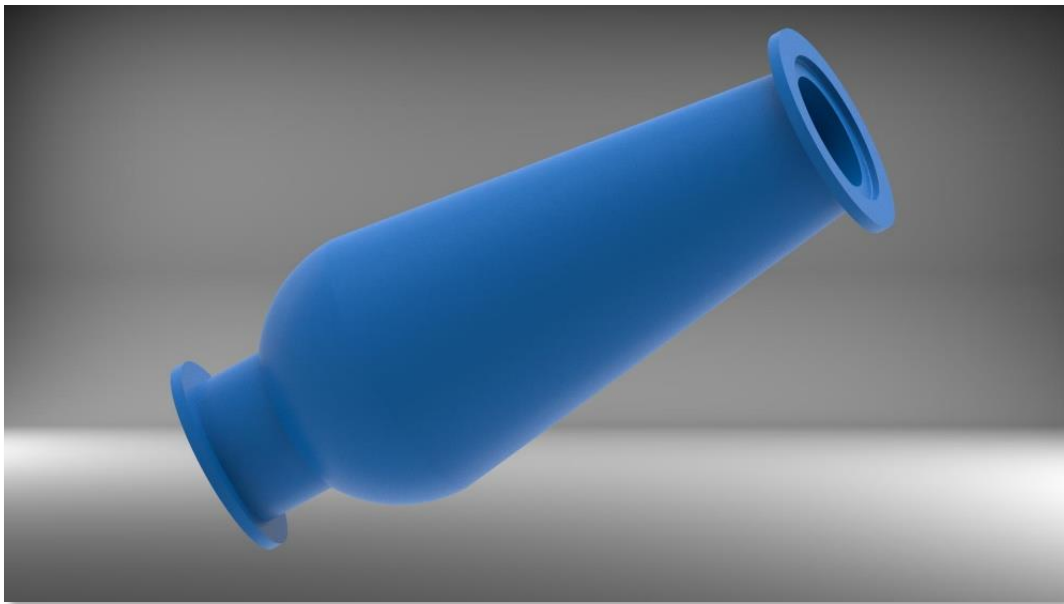


Imagen 25 Vista en detalle del plenum.

## 7. Diseño Geométrico

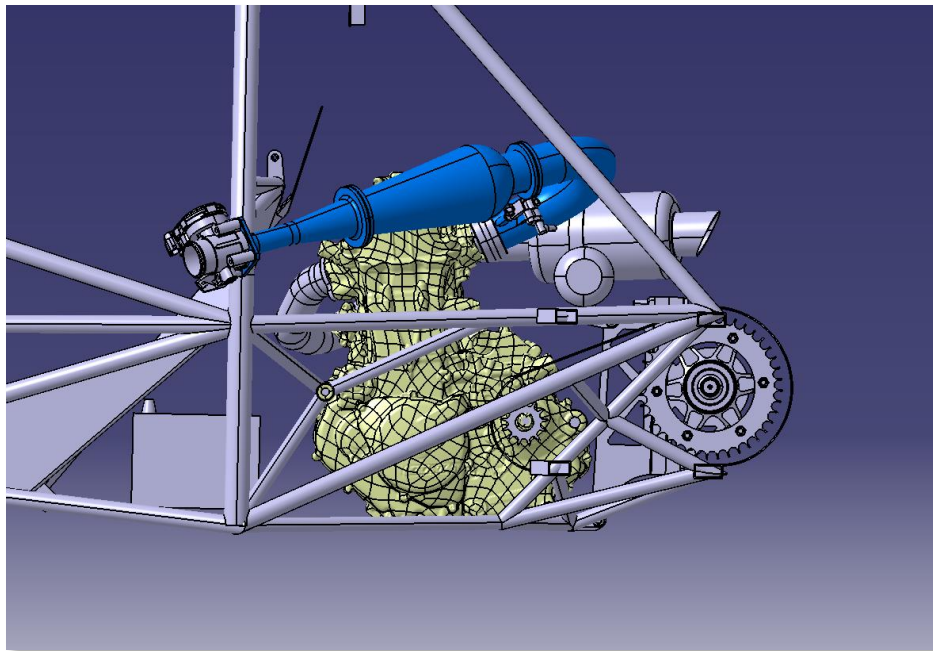
### 7.1 CATIA V5

Para realizar el modelado 3D se ha utilizado el software CATIA (*computer-aided three dimensional interactive applicatio*), es un programa de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador de la empresa Dassault Systèmes. Fue lanzado el año 1977 para servir a la industria aeronáutica militar, ya que está especialmente diseñado para el tratamiento de superficies complejas. A medida que ha ido evolucionando se ha ido expandiendo en diferentes industrias principalmente en el mundo de la automoción en el que es difícil nombrar alguna compañía que no utilice este software, aunque también se utiliza en la industria naval, equipamiento industrial y arquitectura.

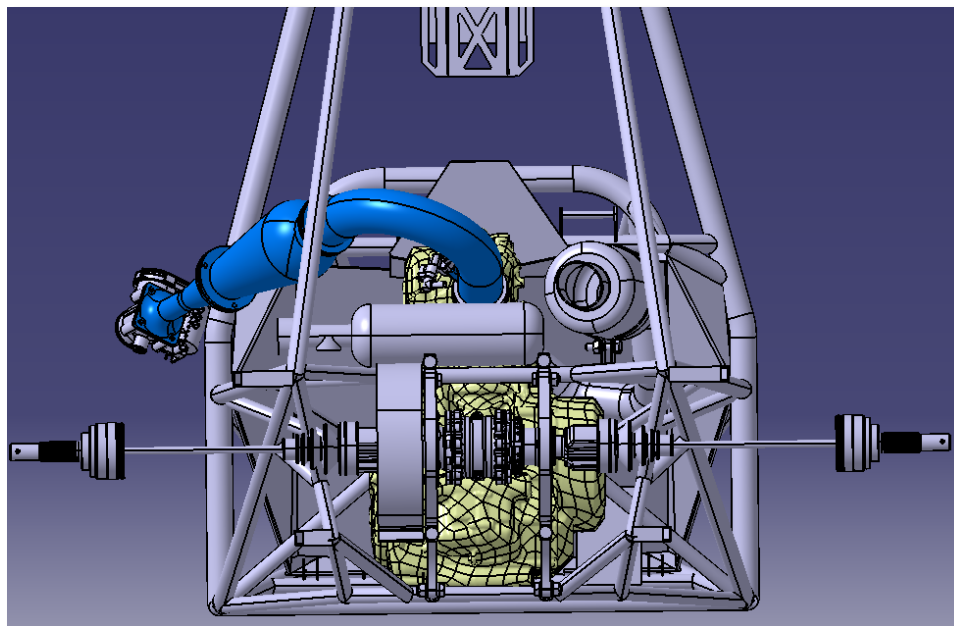
### 7.2 Primeros pasos

Para determinar un diseño inicial del airbox se han valorado diferentes propuestas teniendo en cuenta la experiencia de las anteriores competiciones en las que ha participado el equipo y se ha analizado el diseño y soluciones a la que han llegado otros equipos en la Formula Student.

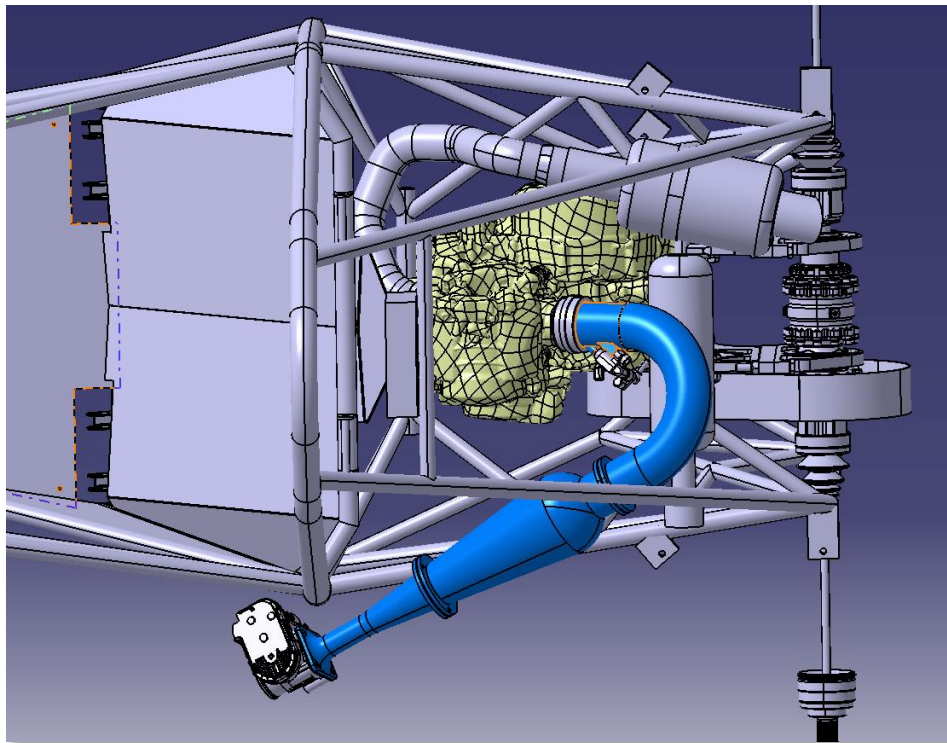
En el desarrollo de este prototipo se ha partido realizando un diseño concepto que reúna las condiciones estudiadas en cuanto a longitud de conducto, volumen, tamaño y resistencia al paso del aire, para posteriormente colocarlo en el ensamblaje general del monoplaza y adaptarlo hasta conseguir una posición en que el airbox no colisione con ningún elemento conservando todo los posible los parámetros de diseño del Airbox.



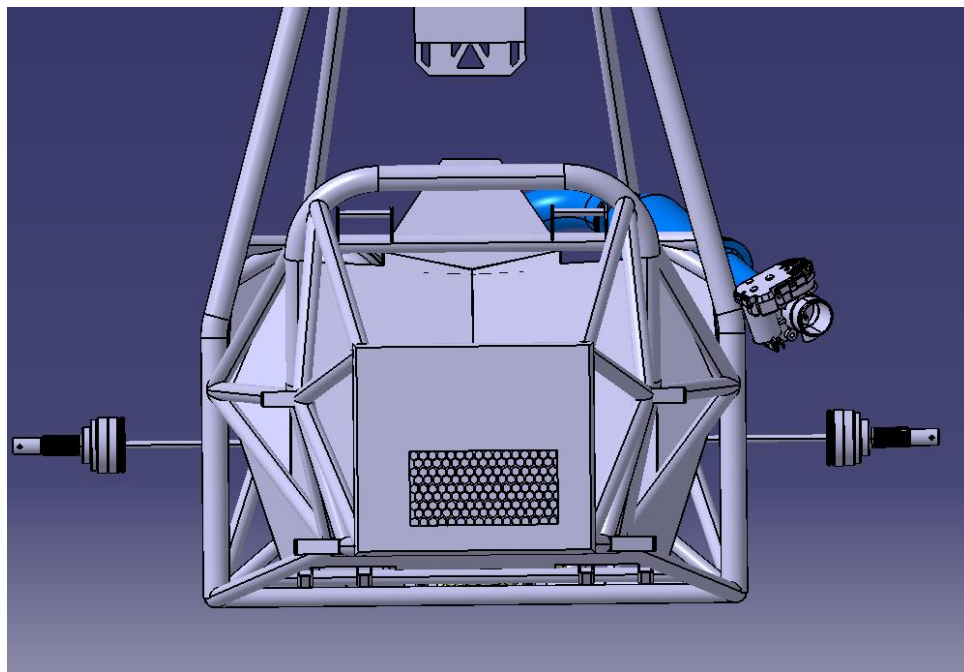
*Imagen 26 Vista lateral del monoplace.*



*Imagen 27 Vista trasera del monoplace.*



*Imagen 28 Vista superior del monoplace.*



*Imagen 29 Vista frontal del monoplace.*



### 7.3 Parametrización en CATIA V5

Una de las grandes virtudes de CATIA es la facilidad para poder parametrizar, una buena parametrización nos permitirá poder modificar el modelo rápidamente para adaptarlo al monoplaza y generar la geometría óptima para el flujo del aire, esto permite realizar cambios con mucha facilidad y sin que se generen errores, de forma que es mucho más cómodo poder realizar un gran número de simulaciones con diferentes configuraciones.

A continuación, se muestran los diferentes parámetros generados para poder realizar estos cambios:



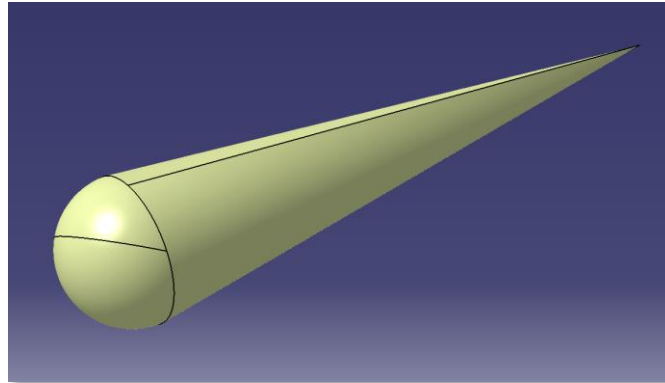
*Imagen 30 parámetros utilizados para configurar el Airbox.*

### 7.5 Plenum

El plenum servirá de depósito de aire para asegurar que en ningún momento el motor se encuentre con déficit de alimentación de aire, su geometría parte de dos geometrías muy sencillas, estas son respectivamente un cono y una esfera.

Su tamaño final se determina mediante simulaciones, se deberá observar que en el interior del plenum no se genere una presión por debajo de la atmosférica, factor que indicaría que indicaría que el motor aspira más aire del que puede asumir la entrada de aire en el plenum.

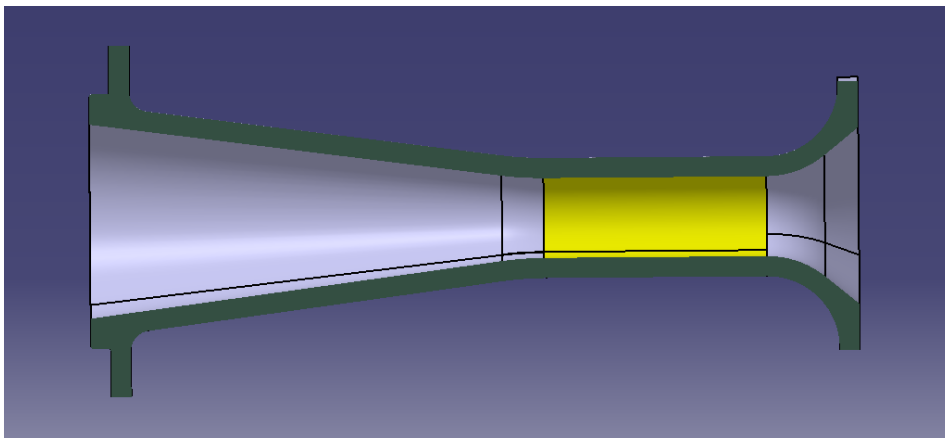




*Imagen 31 Geometría base del plenum.*

## 7.6 Restrictor

El restrictor tiene varios puntos importantes a tener en cuenta. Por un lado, la normativa de la Formula Student indica que el diámetro interior ha de ser de 20mm pero no indica su longitud. Esta longitud se determinará mediante simulaciones hasta conseguir que el aire pase con la mayor facilidad posible, esta zona se muestra en amarillo en la ilustración Imagen 32



*Imagen 32 Vista seccionada del restrictor.*

Por otro lado, teniendo en cuenta las tolerancias de fabricación por impresión 3D, se reduce el diámetro del conducto a 19.9 mm ya que su tolerancia de fabricación es  $\pm 0.1$  por lo que obtendremos un diámetro que oscilará entre 19.8mm y 20mm, en caso de que la medida quede en un diámetro inferior a 20mm se podrá rectificar mediante métodos tradicionales para ajustar esta medida.

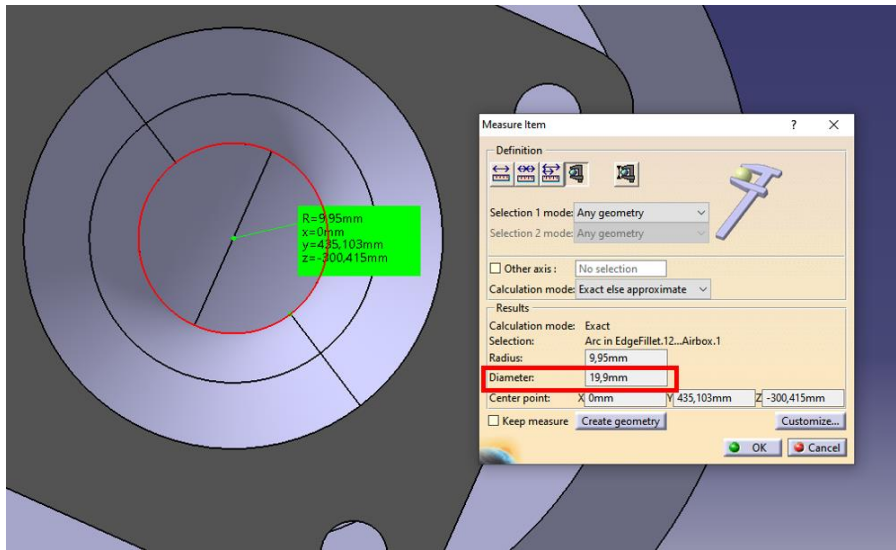


Imagen 33 Muestra del ajuste del diámetro para la fabricación.

## 7.7 Colector.

El colector de admisión se puede dividir en dos pares, conducto y el alojamiento del inyector.

El colector de admisión parte de una tubería con un diámetro interior de 50mm y una longitud de cuerda de 227mm.

Por otra parte, se modela el alojamiento, soportes del inyector y el labio para alojar la goma de unión del colector con la boca de entrada del motor.

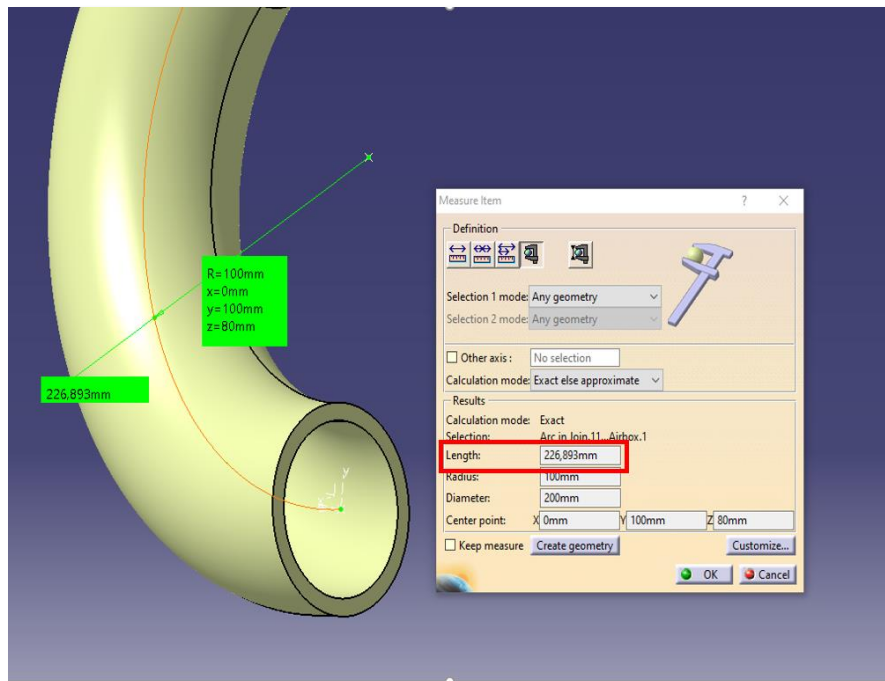
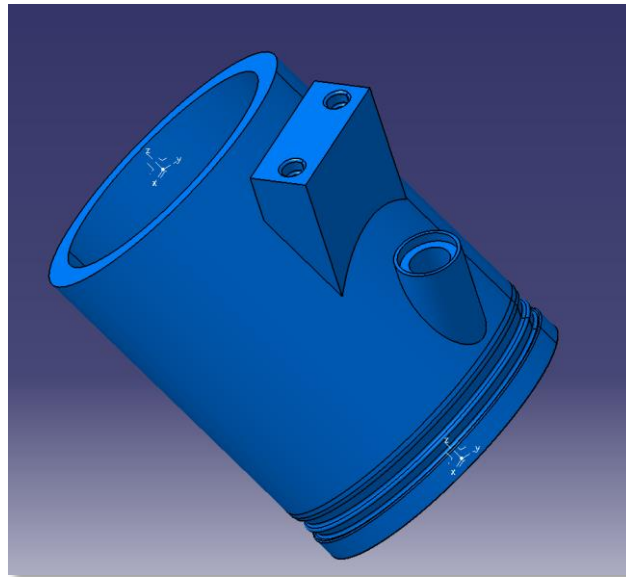


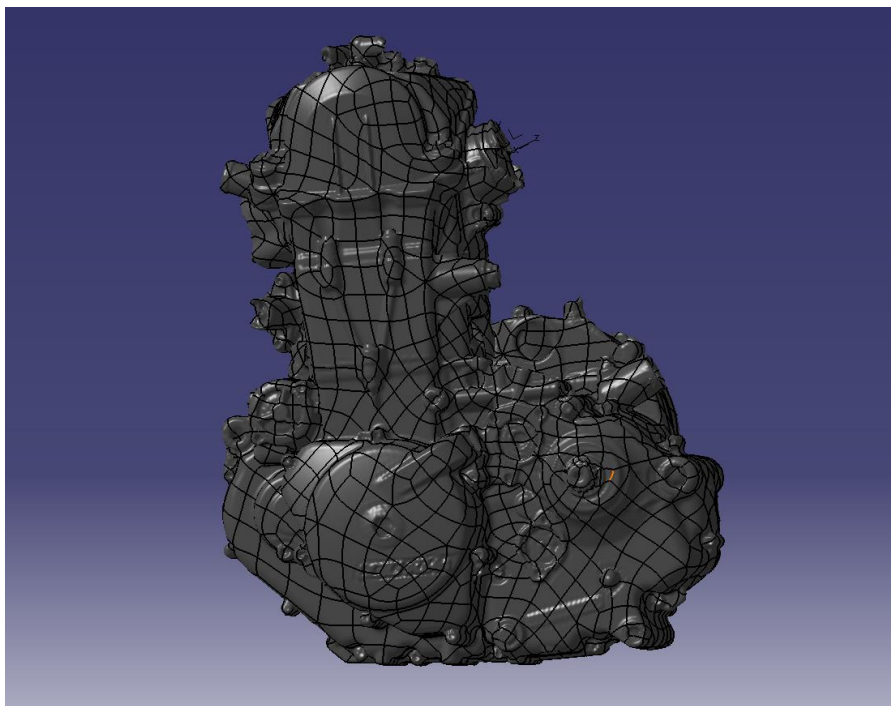
Imagen 34 Longitud del plenum.



*Imagen 35 Cuerpo del inyector.*

## 7.8 Motor

El archivo 3D del motor se ha obtenido mediante tecnología de Ingeniería inversa, concretamente con un escáner laser tridimensional. Las ventajas de este método es que tiene una precisión muy buena por lo que se obtiene un modelo muy fiable, anteriormente se había diseñado manualmente un modelo sencillo con las medidas básicas, pero generaba muchos problemas a lo largo del desarrollo del monoplaza por lo que conseguir este modelo ha sido un paso muy importante para la evolución del proyecto.



*Imagen 36 Motor KTM 690 modelado en 3D.*



## 8. Simulación CFD

La mecánica de fluidos es la rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos, las fuerzas que provocan y la interacción del fluido con el contorno que lo limita. La característica fundamental que define un fluido es su capacidad de cambiar de forma sin que aparezcan fuerzas que tiendan a retornarlo a su forma inicial y su incapacidad de resistir los esfuerzos cortantes.

El estudio fluidodinámico de este proyecto se realizará a través de las herramientas de simulación SolidWorks y ANSYS. SolidWorks permite realizar diseños complejos y simulaciones, en este caso se utilizara su módulo de simulación Flow simulación ya que debido a su sencillez permite realizar simulaciones muy rápidas que servirán para ganar tiempo en la fase de diseño, por otro lado cuando ya se tienen las geometrías muy definidas se realiza la simulación con ANSYS, concretamente con el módulo FLUENT, el cual permite resolver con mayor precisión los problemas relacionados con el movimiento y la dinámica de fluidos en el interior del volumen de control, la combinación de estas dos herramientas también permite contrastar los resultados ayudando a detectar posibles errores durante la configuración de las simulaciones.

El diseño geométrico y el estudio fluido-dinámico van estrechamente relacionados uno del otro, los cuales se realimentan constantemente dependiendo de las necesidades de diseño o rendimiento volumétrico, por lo que conseguir un diseño optimo no siempre es posible y es necesario realizar un diseño en que el equilibrio entre eficiencia volumétrica, geometría y viabilidad de fabricación estén estrechamente relacionados, teniendo que sacrificar ciertos puntos para poder avanzar en el proyecto.

### 8.1 Mallado

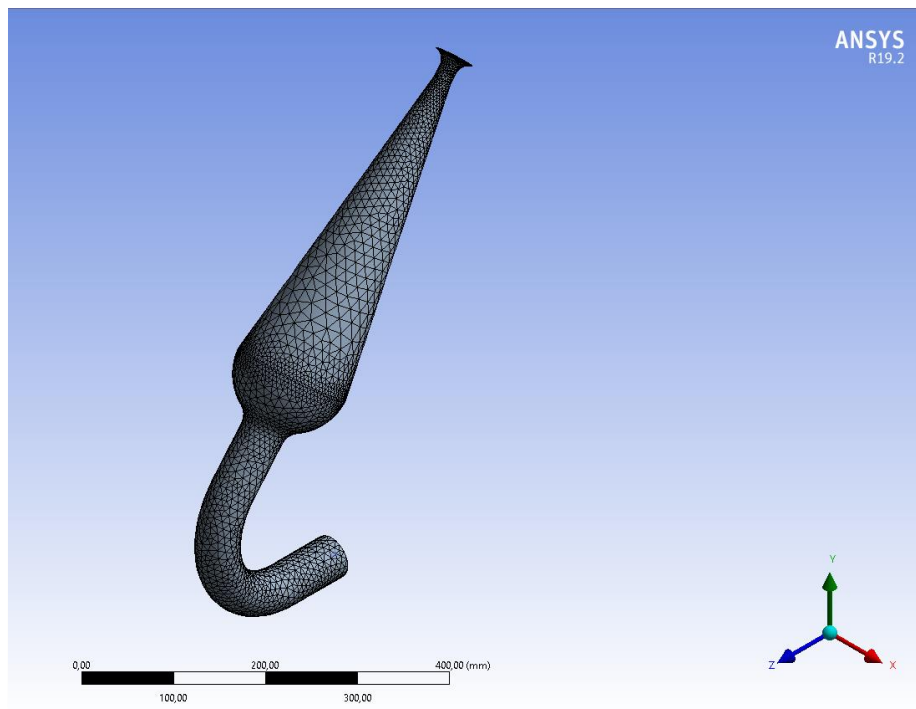
La base principal en una simulación en ingeniería es crear el mallado más adecuado para la geometría en estudio, la fidelidad y la precisión son puntos fundamentales en la simulación CFD, ya que si se realiza un mallado correcto hoy en día es posible guardando las distancias sustituir el modelo prototipo real por un modelo 3D hasta una fase de diseño muy avanzada, evitando tener que fabricar costosos prototipos en fases iniciales de diseño para realizar el estudio fluido-dinámico analizándolo en un túnel de viento o maquinaria específica dedicada a este fin.

La malla es el grado de fidelidad que tiene nuestro modelo con la realidad una vez fabricado, por lo que una malla muy densa proporciona una fidelidad muy aproximada pero también se requiere una potencia de cálculo mucho más grande para realizar las simulaciones.

El usuario tendrá que definir una serie de parámetros dentro de la malla como puede ser la geometría de la malla, ya que no es lo mismo mallar con elementos triangulares que con rectángulos. Para elementos curvados el triángulo es mucho más optimo par elementos curvados, pero al tener mayor densidad requiere una cantidad mayor de iteraciones incrementando notablemente el tiempo de cálculo. Por este mismo motivo utilizar una geometría cuadrada en zonas planas no sacrifica precisión de cálculo incrementando notablemente la velocidad de los cálculos.

Otro aspecto importante es el tamaño del polinomio, un tamaño grande proporciona una mayor velocidad de cálculo, pero menos adaptabilidad a la geometría por lo que pueden

producirse errores en el momento de generar la maya y menos equivalencia de geometría respecto al modelo, por lo que su precisión de cálculo se ve afectado, pero puede servir para realizar test rápidos y poder determinar si la dirección a la que se dirige el proyecto es buena. Un tamaño de grano más pequeño es muy beneficioso para la precisión de los cálculos ya que la geometría generada es más acorde al modelo, pero el tiempo de cálculo se incrementa notablemente, por ello es muy importante estudiar una estrategia de mallado para cada zona del modelo teniendo en cuenta la potencia de cálculo disponible, tiempo y precisión de cálculos requerida.



*Imagen 37 Muestra del mallado aplicado en las simulaciones.*

## 8.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno al igual que el mallado es uno de los puntos claves para poder realizar un estudio fidedigno a la realidad.

Un valor esencial que se utilizara para introducir en las simulaciones es la velocidad máxima del aire en el puerto de admisión de la culata, que se calculara con la siguiente formula:

$$V_g = \frac{SN}{30000} \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

En el que:

$V_g$ , Velocidad del gas (m/s).

$S$ ; Carrera del pistón (mm).



N; Velocidad del cigüeñal (Rpm).

D; Ø Cilindro (mm).

d; Ø Válvula/s (m).

Utilizando los valores mencionados en los apartados anteriores tenemos que:

$$V_g = \frac{SN}{30000} \left(\frac{D}{d}\right)^2 \rightarrow \frac{84.5 \cdot 6500}{30000} \left(\frac{102}{70}\right)^2 = 38,87 \text{ m/s.}$$

Este valor es el que servirá como parámetro de referencia para realizar las simulaciones y corresponderá a la zona inicial del colector de admisión.

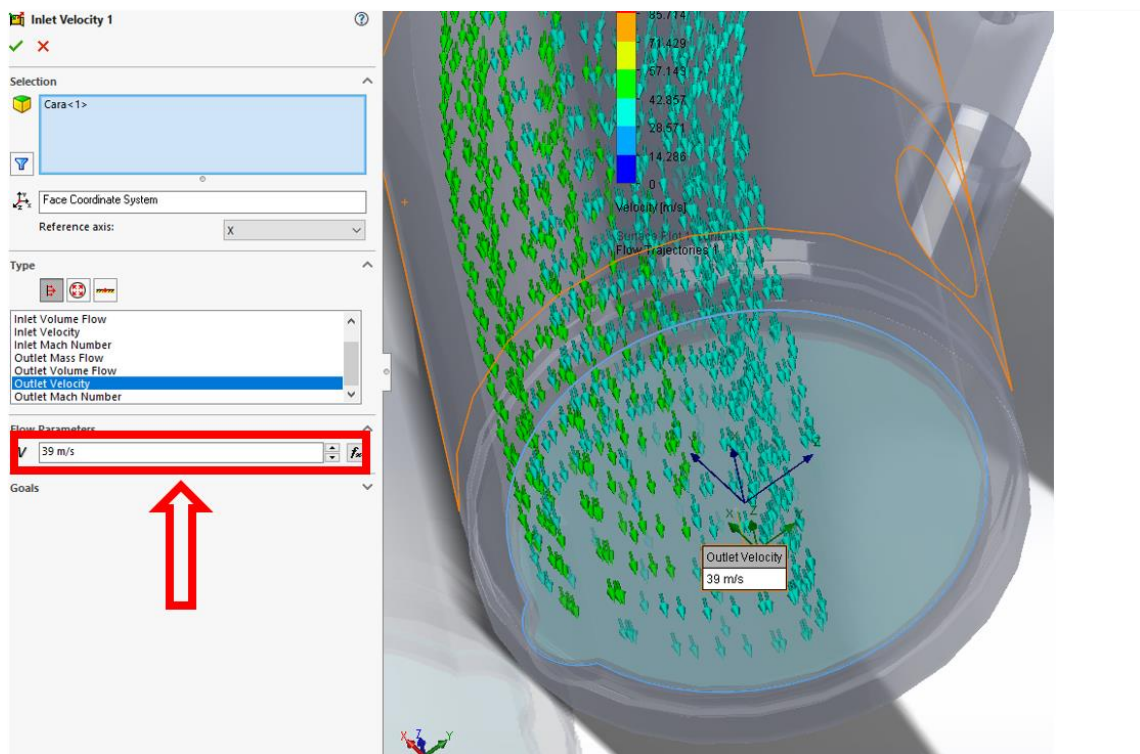


Imagen 38 Zona donde se aplica el parámetro de velocidad de aire.

### 8.3 Restricor

El restrictor es el primer elemento que afecta en gran medida a todo el conjunto del sistema de admisión por lo que merece un estudio aislado para realizar las modificaciones necesarias y reducir al máximo sus efectos negativos asegurando que este no sea un factor limitante en las simulaciones del sistema de admisión completo.

Se toma como primera referencia de diseño el restrictor que se muestra en la **Imagen 13** **Imagen 14** utilizado en las temporadas anteriores, la longitud de su conducto es



de 150 mm por lo que se implementa en el modelo en estudio y se procede a realizar la simulación.

### 8.3.1 Simulación inicial.

En este modelo el parámetro que indica que el diseño no es correcto es la presión de salida, esta desciende a gran velocidad después de pasar por el interior del restrictor, hasta llegar a presión atmosférica como muestra la Imagen 39 a una velocidad de 10m/s mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Estos resultados obligan a replantear el diseño ya que su comportamiento es inferior al esperado inicialmente, al utilizar una geometría similar a un elemento comercial ya utilizado se esperaba un resultado óptimo.

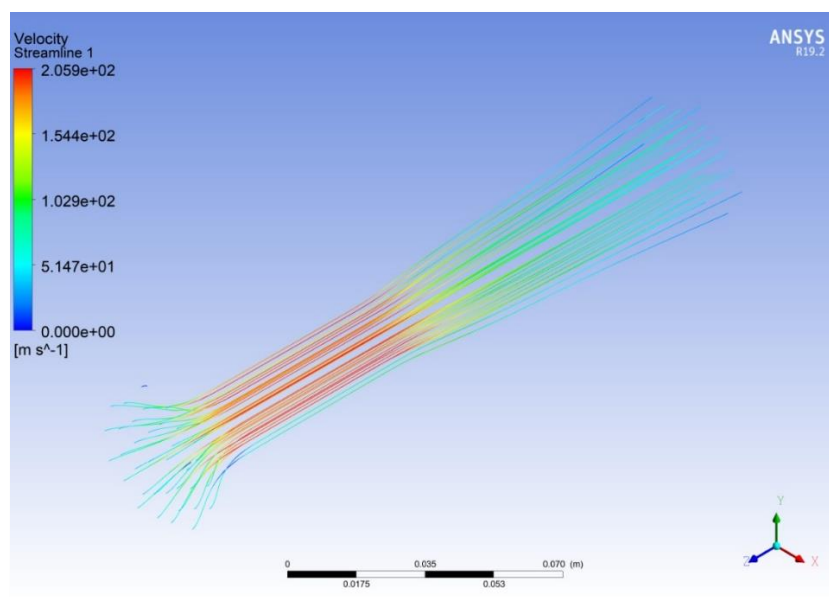


Imagen 39 simulación de la velocidad del aire por el interior del primer restrictor.

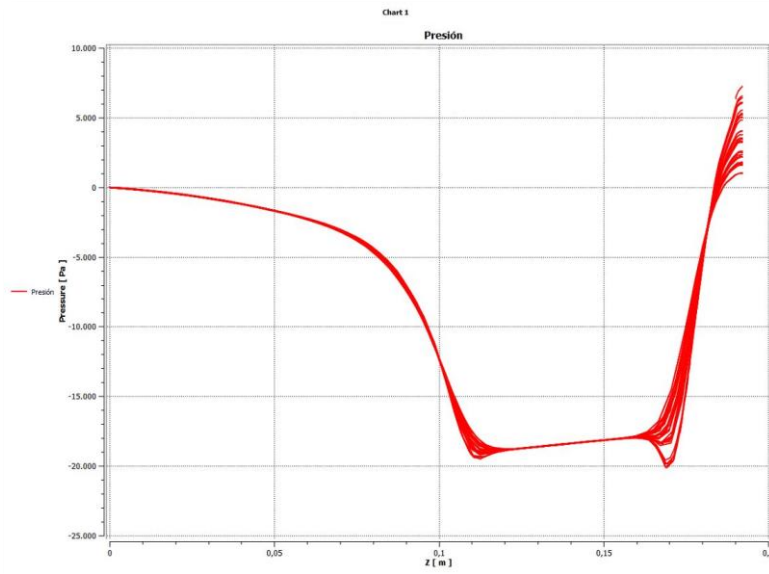


Imagen 40 Grafica de la presión en el restrictor inicial.

### 8.3.2 Simulación final.

A continuación, se procede a analizar el modelo modificado del restrictor inicial. El primer paso es reducir la longitud del restrictor y se modifica la conicidad de la salida. Después de realizar varias simulaciones se llega a la conclusión de que esta longitud ha de ser mínima.

Teniendo en cuenta que en la competición se revisa el diámetro del conducto introduciendo un cilindro calibrado en el interior, se debe tener en cuenta que el cilindro ha de alojarse con cierta estabilidad en su interior, se realiza un test imprimiendo en 3D unas probetas y se verifican con varias medidas cual proporciona mejor ajuste con una longitud lo más reducida posible.

Finalmente se obtiene que esta longitud ha de ser de 30mm aproximadamente y se modifica el modelo para realizar la simulación. Después de diferentes pruebas se llega a un modelo satisfactorio en el que se alcanza 12500 Pa (Imagen 42) y una velocidad de 14m/s Imagen 41.



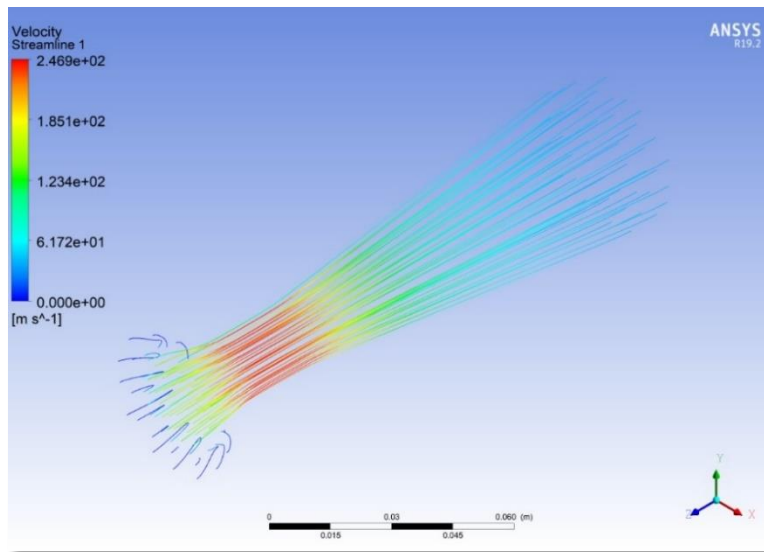


Imagen 41 simulación de la velocidad del aire del segundo modelo de restrictor.

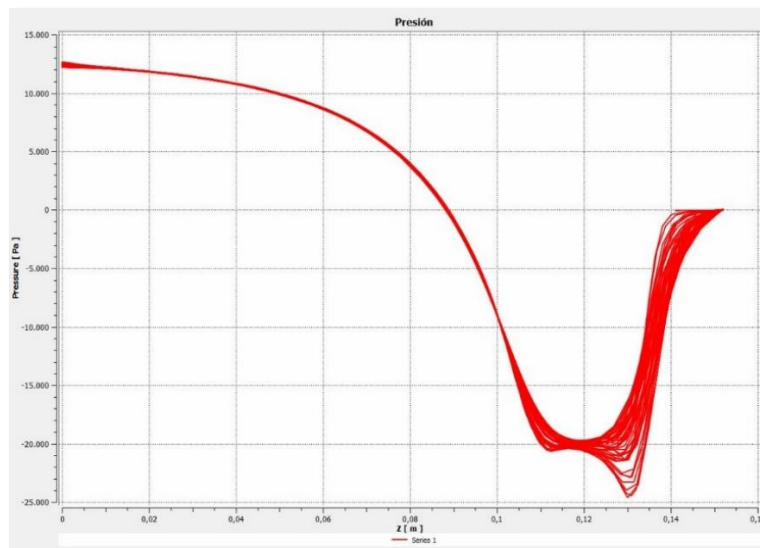


Imagen 42 Gráfico de presión en el segundo modelo de restrictor.

## 8.4 Simulación del conjunto completo.

### 8.4.1 Simulación inicial.

El diseño del airbox obliga a tomar ciertas decisiones mirando más en el contexto de la competición que en las propias simulaciones. El primer modelo que se estudia tiene un volumen interior de 1,4 litros cuyo volumen es el mínimo recomendado. En la Imagen 43 muestra una velocidad de salida de  $\pm 17$  m/s cuyo valor es muy satisfactorio, en cambio no se alcanza la presión esperada y se sitúa en  $\pm 10000$  Pa (Imagen 45) el cual indica una presión por debajo de la atmosférica, de esto se deduce que su capacidad no es suficiente



ya que el motor absorbe una cantidad de aire mayor del que la entrada de aire del airbox puede asumir por lo que se descarta este modelo.

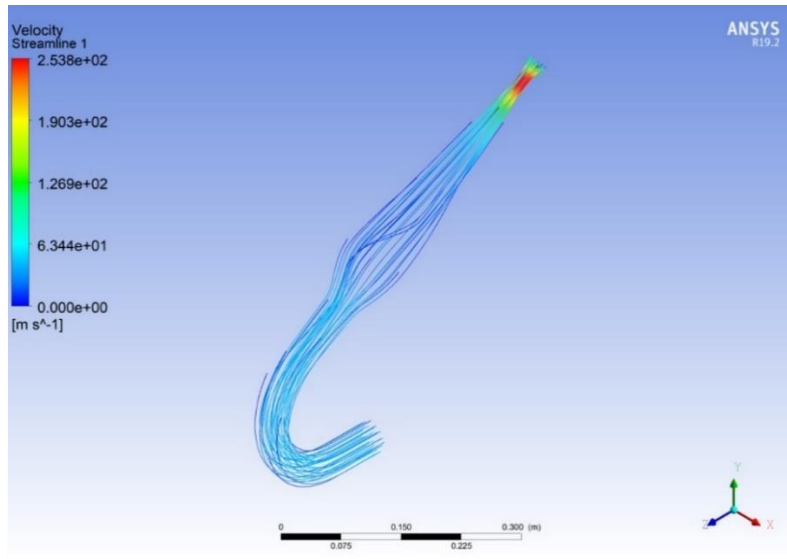


Imagen 43 Simulación de la velocidad del aire en el primer modelo de airbox.

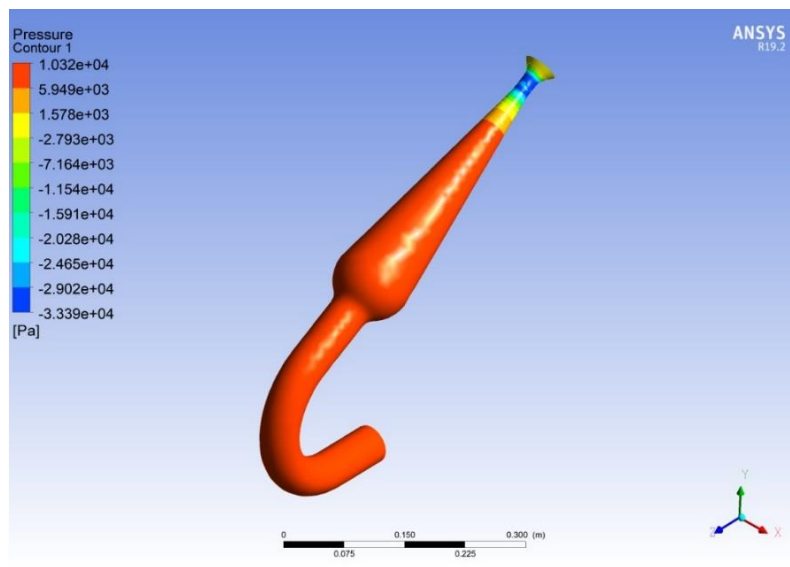
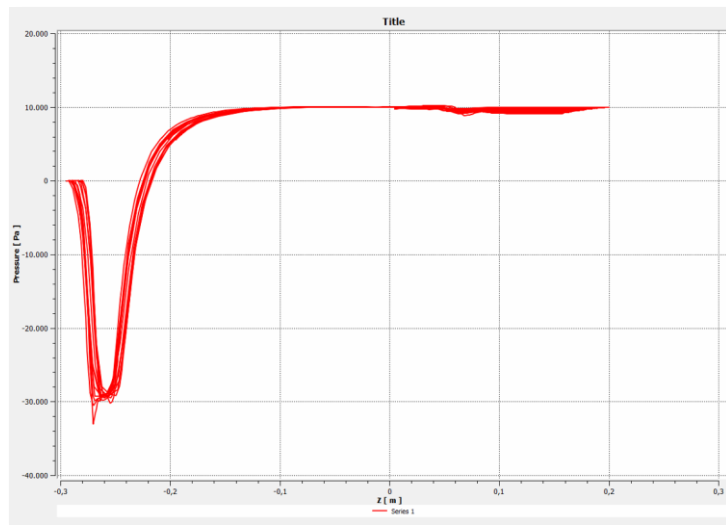


Imagen 44 Muestra de la presión en el interior del colector.



*Imagen 45 Presión en el modelo inicial de airbox*

#### 8.4.2 Simulación final.

En el modelo final, se prueba de realizan varias simulaciones que pasan desde 2 veces el volumen del motor a 2.5 cuyos volúmenes son 1.4 litros y 1.8l litros, pero las simulaciones indican que estos volúmenes son insuficientes hasta llegar a un volumen de 3 litros el cual ya es apropiado para este estudio. En la Imagen 47 se muestra una velocidad de salida del aire de  $\pm 16$  m/s el cual es 1m/s inferior a las simulación inicial por lo que se puede considerar un valor satisfactorio. En cambio sí se estudia la Imagen 46 esta muestra una presión de  $\pm 165000$ Pa superior a la atmosférica, no solo es un valor correcto sino que en su interior se está generando una sobrepresión por lo que ayudara al motor a admitir más aire mejorando su rendimiento volumétrico.

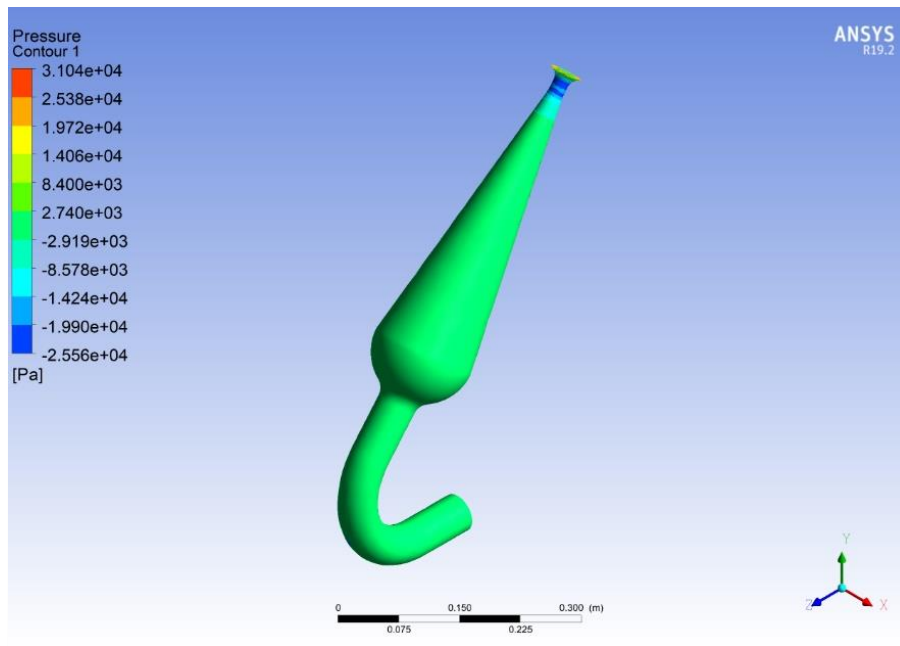


Imagen 46 Presión en modelo final del plenum.

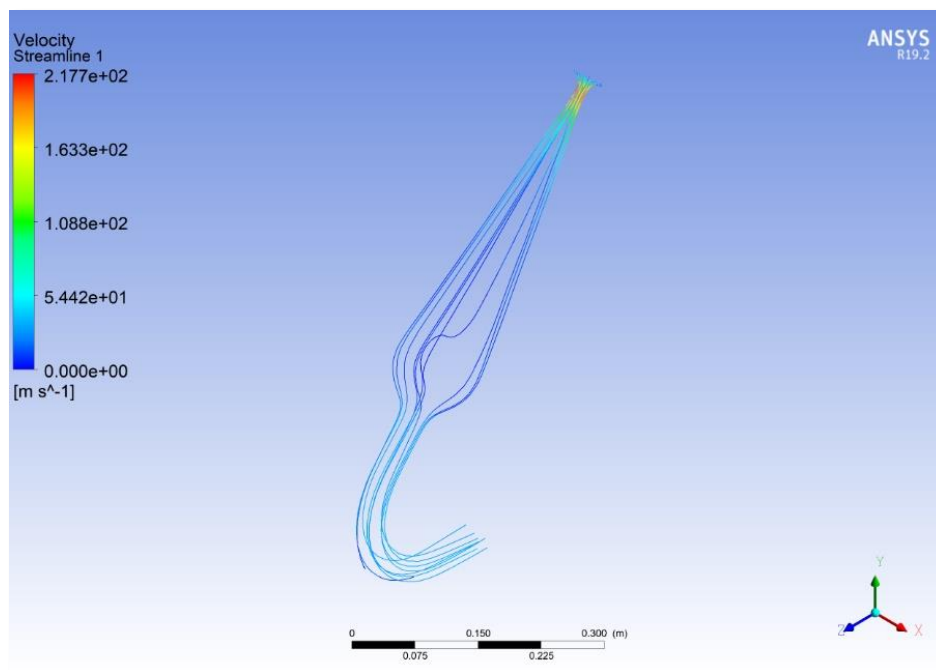


Imagen 47 simulación de la velocidad del aire en el airbox final.



## 9. Fabricación

### 9.1 Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Dentro de las diferentes opciones que proporciona la impresión 3D, se utilizara el sistema de impresión sinterizado selectivo por láser SLS (Selective laser sintering), este proceso de fabricación trata de depositar una capa de polvo muy fina, de apenas una décima de milímetro en un depósito el cual se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de fusión del polvo. A continuación, un láser de alta potencia sinteriza el polvo en los puntos seleccionados fundiendo el material el cual se enfría posteriormente instantes después.

Este sistema proporciona una gran flexibilidad de fabricación de prototipados con tamaños contenido y permite imprimir en una gran variedad de materiales como polvo de titanio, hierro o polímeros.

### 9.2 Historia

En el año 1980 Carl Deckard y Joe Beaman en la universidad de Texas en Austin desarrollaron el primer concepto y patente de este sistema, bajo el patrocinio de la empresa DTM nacida como start up para diseñar, fabricar y construir las primeras máquinas de fabricación aditiva SLS. En 2001 3D systems compró la empresa DTM adquiriendo la tecnología SLS junto a sus patentes que expiran en el año 2005.

### 9.3 La tecnología

Para generar la forma tridimensional requerida mediante la impresión 3D, se utiliza un láser de alta intensidad (comúnmente un láser de CO<sub>2</sub>) que fusiona pequeñas partículas de plástico, metal, cristal o cerámica. El láser fusiona de forma selectiva el polvo del material depositado en un depósito mediante el barrido de finas capas transversales generándose capa a capa el objeto tridimensional. Para imprimir el objeto, la impresora interpreta un archivo Gcode generado por un programa de laminado específico que permite ajustar parámetros esenciales como puede ser la altura de capa, que afecta directamente a la calidad de la impresión, temperatura de trabajo, velocidad de desplazamiento del cabezal y relleno entre otros. Esta capacidad de poder ajustar los parámetros de impresión proporciona una gran flexibilidad para poder optimizar las propiedades de cada modelo a las exigencias requeridas durante su funcionamiento.

Los equipos de impresión SLS utilizan un sistema de pulsos laser cuya potencia de este determina la calidad de impresión ya que no se utiliza un sistema de laser continuo por lo que la densidad de la pieza final dependerá directamente de la potencia utilizada en su fabricación.

En las impresiones de tipo fundición de filamento (FDM) y la esterolitología (SLA) requieren de soportes de apoyo en la pieza durante la impresión, los cuales se van generando a la vez que las piezas se imprimen, en cambio en la impresión SLS, como el modelo se imprime en la cubeta la cual contiene una gran cantidad de polvo este envuelve a la pieza a medida que se imprime impidiendo su movimiento, por lo que este proceso de fabricación no requiere soportes mejorando considerablemente la calidad de la impresión.



#### 9.4 Aplicaciones y material.

Debido a la facilidad de impresión de geometrías complejas, precisión y rapidez de preparación, la tecnología SLS se ha extendido rápidamente por todo el mundo utilizado comúnmente en la fabricación de prototipados ya que permite tratar fácilmente los modelos digitales CAD, su evolución ha permitido que también se utilice en la producción de piezas de tiradas cotas de uso final, muy utilizado en la industria aeroespacial y en soluciones para maquinaria en cadenas de producción.

La materia prima utilizada al tratarse de un polvo y no en rollos de material como podría ser con la fabricación (FDM), permite una gran flexibilidad en cuanto a los tipos de material que se pueden utilizar. Estos materiales pueden ser homogéneos como el nailon, titanio, aleaciones y compuestos dando una 100% de la densidad del material teniendo la pieza propiedades físicas comparables a aquellas fabricadas con métodos tradicionales.

#### 9.5 Fabricación del Airbox

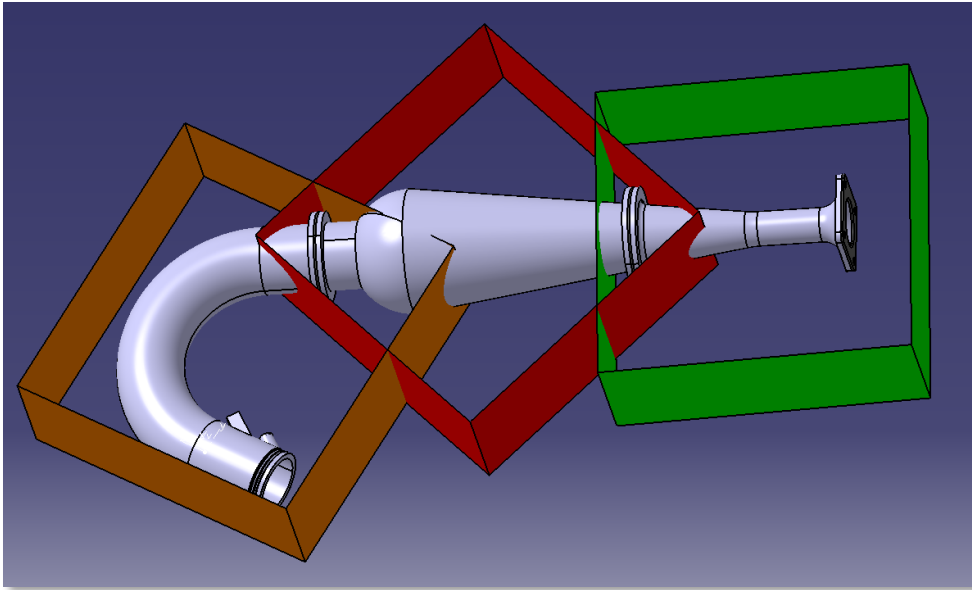
En este proyecto se descarta la fabricación por FDM ya que este tipo de fabricación aditiva no proporciona la calidad de acabado superficial requerido para este proyecto y su menor resistencia obliga a aumentar el relleno de la pieza por lo que aumenta su peso considerablemente. Por otro lado, también se descarta la impresión SLA ya que las impresoras que incorporan esta tecnología no cuentan con una superficie de impresión tan grande obligando a partir en modelo en más partes corriendo el riesgo de perder estanqueidad, aumentar la complejidad de diseño y el aumento de peso del conjunto por los tornillos y juntas requeridas para montar el sistema.

Teniendo en cuenta factores anteriormente mencionados la fabricación SLS es idónea para el modelo estudiado en este documento.

#### 9.6 Dimensiones máximas de fabricación

Para realizar el diseño se debe tener en cuenta las dimensiones máximas de impresión, en este caso es de 280x280x280mm. Como se menciona anteriormente se crea un parámetro con esta medida para prevenir posibles cambios de fabricación y poder tener en controladas en todo momento las zonas en la que se dividirá el modelo.

En la siguiente imagen se muestra las tres zonas de corte la naranja corresponde a la tobera, rojo al plenum y finalmente verde para el restrictor.



*Imagen 48 colocación de las piezas en la impresora 3D.*



## 10 conclusió i treballs futurs

### 10.1 Conclusió.

Després de realitzar nombroses simulacions, obtenir resultats favorables és una ardua tasca de modificacions de model i simulacions el qual lleva molt temps de disseny i computació. Realitzar una bona cerca de informació al principi del projecte és essencial per alligera el procés.

Durante el procés prendre decisions és una part essencial i determinant per a l'evolució del projecte, en nombroses ocasions se han de sacrificar certes avantatges per subsanar problemes de disseny, en el cas de que la primera simulació ja hagués obtingut resultats satisfactoris se tendria que posar en dubte la seva viabilitat ja que allunyant-se de les simulacions el sentit comú també és una part essencial d'un enginyer. Els valors obtinguts del model final se consideren satisfactoris per a aquest estudi, però és essencial realitzar tests de pressió i velocitat d'aire per corroborar el seu bon funcionament.

### 10.2 Treballs Futurs.

Un bon mètode per optimitzar el sistema és mitjançant simuladors que puguin integrar dinàmiques d'un motor de combustió interna, com podria ser el Software AVL, Ricardo Wave entre altres. Això permet modelar un motor teòric i el propi Software ja proporciona les característiques idònies per dissenyar el col·lector d'admissió, una bona evolució per a aquest projecte seria adquirir un software anteriorment mencionat.

Una vegada fabricat el airbox se han de col·locar els sensors pertinents per a la gestió electrònica, això permetrà corroborar l'estudi i realitzar les millores pertinents per a les properes temporades.





## 11 Referencias

2020, from <https://respuestas.me/q/co-mo-afecta-la-longitud-del-corredor-del-mu-ltiple-de-admisio-n-a-la-curva-24468094064>

(2020). Retrieved 29 June 2020, from [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)

(2020). Retrieved 29 June 2020, from [https://impnesa.com/IMAGES\\_30/catalogo-mx-atv-impnesa-2017-18.pdf](https://impnesa.com/IMAGES_30/catalogo-mx-atv-impnesa-2017-18.pdf)

Engineerin Explained 08/07/2016 Variable Intake Manifolds & Intake Tuning.

<https://www.youtube.com/watch?v=FaYIHQGU00k&t=8s>

Arias-Paz, M. (2008). *Manual de automóviles*. Madrid: Cie Dossat 2000.

Fragoso Carrión, R. (2006). *Motores de 4 tiempos* (3rd ed.). [Tarragona]: el autor.

Giliani, R. (2020). *Engine Simulation Model for a Formula SAE Race Car* (Student). Luleal University of Technology.

Gillieri, S. (2005). *Preparación de motores en serie para competición*. Barcelona: CEAC.

M.Shelagowski., L., & A.Mahank., T. (2020). *CFR Formula SAE Intake Restrictor Desing and Performance* (Student). Saginaw Valley State Univerity.

Márquez López, R. (2017). *Diseño óptimo del sistema de admisión de un monoplaza de competición*. (Estudiante). Universidad de Sevilla.

Robinson, J. (2004). *Motocicletas* (4th ed.). Madrid: Thomson-Paraninfo.

User, S. (2020). Piratamotor - Eficiencia volumetrica. Retrieved 29 June 2020, from <https://www.piratamotor.com/manuales-y-articulos/articulos-de-mecanica/eficiencia-volumetrica>

User, S. (2020). Piratamotor - Válvulas y conductos. Retrieved 29 June 2020, from <https://www.piratamotor.com/manuales-y-articulos/articulos-de-mecanica/valvulas-y-conductos>

Wan, M. (2020). AutoZine Technical School. Retrieved 29 June 2020, from [https://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](https://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html)