

Proyecto Fin de Carrera
Máster en Ingeniería Industrial

Estudio numérico de un novedoso sistema de
admisión en una motocicleta Moto3

Autor: Rafael Ángel Carbajo
Moraira

Tutor: Miguel Torres García

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

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Máster en Ingeniería Industrial

Estudio numérico de un novedoso sistema de admisión en una motocicleta Moto3

Autor:

Rafael Ángel Carbajo Moraira

Tutor:

Miguel Torres García

Profesor titular

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Estudio numérico de un novedoso sistema de admisión en una motocicleta Moto3

Autor: Rafael Ángel Carbajo Moraira

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, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Cada persona es el resultado de aquellas situaciones y personas que les ha tocado vivir y conocer. De esa misma manera, este documento recoge, no sólo los dos últimos años de Máster, sino toda una trayectoria vivida por mi parte. Concretamente, los seis últimos años son los que más han impulsado este documento, pues es gracias al equipo US-Racing quienes me dieron la oportunidad de participar en este maravilloso proyecto y del cual surge la idea.

Agradecer a mi tutor, Miguel Torres, por aparecer y querer formar parte de este proyecto cuando nadie quería hacerlo, dándome base técnica para su posible construcción.

Agradecer también a mis amigos por poseer una gran capacidad de escucha, aún después de seis años, cuando lo he necesitado.

Finalmente y sobre todo, agradecer a mis familiares y mi pareja, por estar siempre ahí en los momentos más difíciles, dándome un empujón siempre que lo he necesitado y estando ahí en los momentos de alegría para disfrutarlos conmigo.

Con el presente documento, se cierra una etapa de mi vida para abrirse otra llena de momentos y oportunidades.

Rafael Ángel Carbajo Moraira

Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2019

Resumen

Los diferentes avances acontecidos en el mundo de la ingeniería en general, han permitido construir una línea temporal evolutiva acontecida por la introducción de nuevos sistemas, que ha hecho mejorar las prestaciones de los vehículos a motor, y en particular, el de las motocicletas.

En el mundo de la competición, dichos avances han originado a su vez nuevas necesidades para la obtención de una mayor precisión en el funcionamiento total del vehículo. Así, aspectos como la velocidad, rendimiento del motor, eficacia del combustible o aprovechamiento de recursos menos costosos son ahora el centro de la investigación ingenieril, aprovechando las tecnologías existentes y los conocimientos sabidos.

Este trabajo pretende ejemplificar el uso de un sistema que mejore la ganancia de presión estática a la entrada de las válvulas del motor, lo que a su vez supone una mejora en la potencia del mismo. A través de la relación de áreas de entrada y salida de un conducto, y teniendo en cuenta aspectos específicos como los referidos a la resonancia de los fluidos, se obtendría el efecto buscado y que se detalla a través de un estudio geométrico y fluido-dinámico, pasando por un proceso de fabricación y obteniendo finalmente la pieza que cumpla las condiciones buscadas.

Abstract

The different advances that have taken place in the world of engineering, in general have allowed the construction of an evolutionary time line that has been introduced by new systems, which has improved of motor vehicles, and in particular, motorcycles.

In the world of competition, these advances have in turn created new needs for obtaining greater precision in the total operation of the vehicle. Thus, aspects such as speed, engine performance, fuel efficiency or use of less expensive resources are now the center of engineering research, taking advantage of existing technologies and knowledge.

This work aims to exemplify the use of a system that improves the static pressure gain at the inlet of the engine valves, which in turn supposes an improvement in the power of the engine. Through the relationship of input and output areas of a conduit, and taking into account specific aspects such as those related to the resonance of fluids, the desired effect would be obtained and detailed through a geometric and fluid-dynamic study , going through a manufacturing process and finally obtaining the piece that meets the desired conditions.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Introducción y objetivos	11
1.1 <i>Introducción</i>	11
1.2 <i>Contexto de desarrollo</i>	11
1.3 <i>Estructura del proyecto</i>	13
1.4 <i>Objetivo</i>	14
2 Historia de la motocicleta	15
2.1 <i>Origen de la motocicleta</i>	15
2.2 <i>Evolución de la motocicleta</i>	16
3 Historia del motociclismo	18
4 Sistema Ram-Air	20
5 Resonancia en los fluidos	22
6 Ecuaciones e hipótesis	24
6.1 <i>Condición isentrópica</i>	24
6.2 <i>Ganancia de presión</i>	26
6.3 <i>Cálculo del número de Mach</i>	27

6.4	<i>Relación de áreas</i>	28
6.5	<i>Ecuaciones de resonancia</i>	30
7	Diseño geométrico	34
8	Estudio Fluido-Dinámico	40
8.1	<i>Definición geométrica y mallado</i>	41
8.2	<i>Condiciones de contorno y método de resolución</i>	42
8.3	<i>Post-procesado o visualización de los resultados</i>	44
9	Diseño final	48
10	Fabricación	51
11	Conclusiones	55
	Referencias	56
	Índice de Conceptos	¡Error! Marcador no definido.
	Glosario	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

Tabla 6-1: Especificaciones del motor

31

Índice de Figuras

Figura 1-1: US-Racing	11
Figura 1-2: Motostudent	11
Figura 1-3: Pruebas estáticas y dinámicas de la competición Motostudent	12
Figura 1-4: Ediciones I y II de US-Racing	12
Figura 1-5: Ediciones III y IV de US-Racing	13
Figura 1-6: Edición V de US-Racing	13
Figura 2-1 Motocicleta Harley Davidson 1907	15
Figura 2-2 Modelo de Sylvester Howard Roper	16
Figura 2-3 Modelo de Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler	16
Figura 2-4 Modelo de los hermanos Werner	16
Figura 2-5 Scooter de 1902	17
Figura 3-1 Primeras carreras (1894-1906)	18
Figura 3-2 Leslie Graham subido en su AJS	18
Figura 3-3: Marc Márquez 2018	19
Figura 4-1 Sistema Ram-Air	20
Figura 5-1 Propagación de una onda en un muelle [12]	22
Figura 6-1 Problema tobera divergente	25
Figura 6-2 Banco de potencia de Kawasaki	26
Figura 6-3 Gráfica presión- velocidad	27
Figura 6-4 Problema Ram-Air	29
Figura 7-1: Geometría inicial real del resto de elementos del prototipo.	34
Figura 7-2: Geometría inicial CAD del resto de elementos del prototipo	35
Figura 7-3: Ubicaciones posibles del Airbox.	35
Figura 7-4: Airbox de la III Edición de US-Racing.	36
Figura 7-5: Detalle del chasis	36
Figura 7-6: Disposición carenado	37
Figura 7-7: Conflicto con depósito	38
Figura 8-1: Efecto del desprendimiento de la capa límite	40
Figura 8-2: Definiciones geométricas en ANSYS	41
Figura 8-3: Mallado del sistema	42
Figura 8-4: Sección del mallado interno	42
Figura 8-5: Modelo k-epsilon	43
Figura 8-6: Cálculo de soluciones	44
Figura 8-7: Trayectoria del flujo	45

Figura 8-8: Distribución de presiones globales	46
Figura 8-9: Distribución local de presiones	47
Figura 9-1: Volumen de control definitivo	48
Figura 9-2: Explosionado del diseño final.	49
Figura 9-3: Montaje del prototipo en la motocicleta.	50
Figura 10-1: Fibra de carbono	51
Figura 10-2: Esquema método por infusión en vacío	52
Figura 10-3: Ejemplo real del método por infusión en vacío	52
Figura 10-4: Molde 4ª Edición <i>US-Racing</i>	53
Figura 10-5: Montaje final	54

A^*	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de x elevado a y
$\cos^x y$	Función coseno de x elevado a y
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
$\text{Pr}(A)$	Probabilidad del suceso A
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
$<$	Menor o igual
$>$	Mayor o igual
\	Backslash
cc	Centímetros cúbicos

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El documento presente trata de desarrollar todo el proceso comprendido en el diseño de un sistema Ram-Air, desde la aplicación de los principios físicos relacionados con el mundo fluido-dinámico, hasta llegar a su fabricación real, pasando por el diseño geométrico y estudio mediante Elementos Finitos.

La fabricación y todo el proceso relativo al sistema que se va a desarrollar ve la luz gracias al equipo de competición universitario sevillano *US-Racing* [1]. Éste compete a nivel internacional en la competición universitaria *Motostudent* [2], organizada por *Motor Engineering Foundation*, de la que hablaremos en el siguiente apartado de forma más precisa.

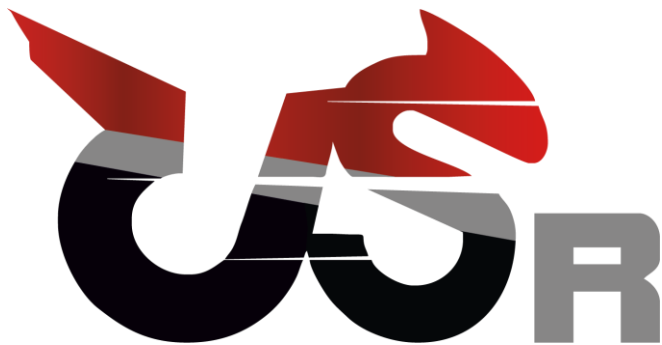


Figura 1-1: US-Racing



Figura 1-2: Motostudent

El presente escrito representará una guía de todos los pasos necesarios para el diseño de este tipo de sistemas que, actualmente, son imprescindibles dentro del mundo de la competición y, por este motivo, la escasez de información es evidente. De esta manera cualquier integrante del equipo o aquellas personas que sientan inquietud por este tipo de sistemas puedan encontrar una base con la que empezar su propio diseño.

Este trabajo pretende ser la continuación del Trabajo de Fin de Grado realizado en 2016 [3] por el mismo autor que firma este documento, ahondando en el estudio de la resonancia dentro de los fluidos, la cual desarrollaremos más adelante.

1.2 Contexto de desarrollo

La idea de este trabajo surge como la necesidad del equipo *US-Racing* para participar en la competición internacional *Motostudent* en su V edición (2017-2018). Esta competición universitaria surge en el año 2009-2010 donde se reúnan universidades de todo el mundo con el objetivo de diseñar un prototipo de motocicleta y realizar un fin de semana de competición al mismo nivel que las vistas en la competición Moto3. La competición tenía dos partes perfectamente diferenciadas: por un lado existía una parte en forma de proyecto y una segunda parte relativa a las pruebas de fiabilidad del prototipo y la correspondiente carrera.

El proyecto que era necesario entregar no era muy distante al que debe presentar una empresa que se enfrente a un proyecto de nueva construcción. Era preciso realizar los cálculos y demostrar que el prototipo era fiable (lo cual se llevaría a la práctica el fin de semana de competición). Además, los equipos debían diseñar una fábrica que produjera los prototipos en serie y justificar los balances y cuentas de resultados de la misma. Esto hacía que la ya mencionada competición tuviera un nivel de dificultad elevado y que, empresas dentro del sector ingenieril valoraran de forma muy positiva que posibles futuros trabajadores de la empresa se hubieran enfrentado a un proyecto ingenieril muy cercano a la realidad.

Respecto a la parte relativa al fin de semana de competición, el ser una prueba universitaria no exige de verificar elementos semejantes a los realizados en la competición internacional de Moto3. Los equipos debían

de someter a sus prototipos a una serie de pruebas ya definidas al inicio de la competición, las cuales eran preciso superar para garantizar la fiabilidad de las motocicletas. Pruebas de esfuerzos, sonoridad y frenada junto con pruebas dinámicas como las que pueden observarse en la Figura 1-3: Pruebas estáticas y dinámicas de la competición Motostudent son algunos ejemplos de los requisitos que debían verificarse para poder participar en la carrera, la cual lleva celebrándose tradicionalmente en el circuito de MotoGP de Motorland, Aragón.



Figura 1-3: Pruebas estáticas y dinámicas de la competición Motostudent

Desde la primera edición (2009-2010) hasta la quinta (2017-2018) disputada el pasado octubre, el modo operandi no ha variado significativamente. Sin embargo, el peso de la competición ha ido aumentando exponencialmente con el paso de los años. Si se echa la vista atrás, la edición I contaba con la participación de 23 competidores, la mayoría españoles, mientras que en la última edición se podían contar los 70 participantes venidos de todas las partes del mundo para competir en nuestro país (45 equipos para la competición Petrol gasolina y 25 equipos para la categoría Electric eléctrica, competición que está actualmente en auge).

Respecto al equipo US-Racing es considerado uno de los equipos fundadores ya que desde la Edición I lleva participando sin perderse ninguna de las ediciones hasta ahora realizadas. A cada edición el equipo ha ido evolucionando e introduciendo nuevas mejoras que han hecho que pasemos de una moto soldada en acero a una moto con chasis en aluminio y carenado en fibra de carbono, pudiendo incluso participar en el campeonato mundialmente conocido Moto3 por la calidad en su construcción:



Figura 1-4: Ediciones I y II de US-Racing



Figura 1-5: Ediciones III y IV de US-Racing



Figura 1-6: Edición V de US-Racing

El equipo US-Racing está segmentado internamente por departamentos. Uno de estos es el departamento de fluido-dinámica. Éste se basa en el estudio de los fluidos para usarlos en favor del prototipo. Elementos como el escape, el carenado o la admisión son ejemplos de piezas diseñadas por este departamento. En términos generales podemos decir que son piezas que aumentan (o si están mal diseñadas disminuyen) la potencia del prototipo. El documento aquí presente está sumergido específicamente en la parte de la admisión motor de la motocicleta, y nace como recogida de toda la información y trabajos realizados por el autor que lo escribe, el cual ha sido encargado de realizar la pieza desde la tercera edición hasta hoy. En los siguientes puntos se tratará de explicar los fundamentos físicos, el diseño geométrico y la fabricación de la pieza diseñada para la V Edición y sea así guía para los futuros integrantes del equipo.

1.3 Estructura del proyecto

El trabajo en cuestión está segmentado en tres partes perfectamente diferenciadas. La primera de estas partes es el estado del arte del proyecto, es el contexto histórico que existe alrededor de una pieza tan importante dentro del mundo de la competición y que, por esa misma razón, no se puede encontrar gran información de su estudio. De esta manera, para llegar al momento actual es preciso recorrer la historia de la motocicleta y del

motociclismo para así tener una idea del origen de este tipo de sistemas y cómo se ha podido innovar en este campo. Todo lo comentado se extenderá desde el capítulo 1 hasta el 5 inclusive.

Conocido el significado y la función de los sistemas Ram-Air pasamos al segundo bloque donde se recoge todo lo relativo al diseño propio de la pieza para el equipo universitario US-Racing. Se ahondará en las ecuaciones necesarias para un correcto funcionamiento, pasando después por el correspondiente diseño geométrico y finalizando con su estudio fluido-dinámico realizados con la ayuda de programas informáticos muy utilizados en el mundo ingenieril. Estos capítulos se llevan el mayor peso del presente documento, ya que en este apartado se realiza un exhaustivo trabajo cíclico. Esto se produce debido a que cualquier pequeña variación que se pretenda mejorar requiere realizar un diseño y un estudio, por lo que hasta llegar al estado óptimo se precisa realizar numerosas variaciones. Todos estos movimientos se recogerán del capítulo 6 al 9 inclusive.

Para finalizar, el último bloque recogerá todo lo relativo al proceso de fabricación y las conclusiones del presente trabajo. Esta parte se desarrolla en los capítulos 10 y 11, las cuales servirán para cerrar un trabajo que ha supuesto años de ensayos y esfuerzos por parte del autor.

1.4 Objetivo

Las piezas desarrolladas por el equipo US-Racing llevan a sus espaldas un gran trabajo llevado a cabo por sus miembros con el fin de conseguir un producto que sea viable, fiable y capaz de situarse en los puestos más altos de la tabla de Motostudent. La pieza que se va a desarrollar en las próximas páginas no es distinta del resto de elementos de la motocicleta y será diseñada y estudiada de la manera más minuciosa posible.

Basándonos en el Trabajo Fin de Grado realizado por la misma persona que firma este documento, se pretende dar un paso más grande en lo relativo al diseño de la admisión de una motocicleta que participa en un campeonato similar al de Moto3. Se pasarán por los mismos pasos que los vistos en el trabajo antes mencionado, con la salvedad de que en este caso se ahondará en todo lo relativo a la resonancia dentro de los fluidos, ya que, como se verá en capítulos más adelante, este fenómeno permitirá aumentar de forma más significativa la potencia añadida al prototipo gracias al sistema.

2 HISTORIA DE LA MOTOCICLETA

2.1 Origen de la motocicleta

Antes de indagar en la historia de la motocicleta debemos saber qué es este invento y su utilidad. La Real Academia Española de la Lengua define *motocicleta* como: "Vehículo automóvil de dos ruedas, con uno o dos sillines y, a veces, con sidecar" [4], definiéndose también *automóvil* como: "Que se mueve por sí mismo. Dicho principalmente de los vehículos que pueden ser guiados para marchar por una vía ordinaria sin necesidad de carriles y llevan un motor, generalmente de combustión interna o eléctrico, que los propulsa" [5]. Es decir, podemos definir una motocicleta como todo aquel vehículo de dos ruedas impulsado gracias a un motor, ya sea de combustión interna, eléctrico o de vapor que circula por algún tipo de vía.



Figura 2-1 Motocicleta Harley Davidson 1907

Una vez entendido lo que es una motocicleta podemos ahondar en su historia. Como ya es de sobra conocido, el nacimiento de la primera motocicleta se remonta hace ya más de cien años, sin embargo, como dice Leo Gómez en su artículo, "la historia de la motocicleta ha levantado muchas controversias en cuanto a quién fue el padre de la motocicleta, y es que muchos historiadores no tienen muy claro quién fue el primero en poner las bases de la historia de la bicicleta" ("*Historia de la motocicleta: orígenes, evolución y tipos*", Leo Gómez) [6].

Sin embargo, una cosa es clara, la bicicleta fue la base de la invención de la motocicleta ya que el americano Sylvester Howard Roper se le ocurrió la utilización de un motor de vapor para que su bicicleta se moviera de forma autopropulsada, llegando a su construcción en 1868 (Figura 2-2) [6]. Sin embargo, muchos expertos no consideran dicha invención como la primera motocicleta, adjudicando este hecho a los alemanes Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler, los cuales construyeron en 1885 la primera moto propulsada por un motor de combustión interna (Figura 2-3) [6]. Esta motocicleta poseía un cuadro de madera donde el motor utilizado fue invención del ingeniero Nikolaus August Otto proporcionando 0,5 caballos de fuerza, alcanzándose una velocidad de 18 kilómetros por hora.

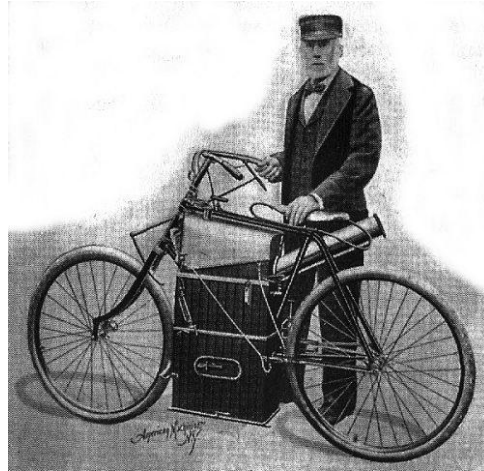


Figura 2-2 Modelo de Sylvester Howard Roper



Figura 2-3 Modelo de Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler

2.2 Evolución de la motocicleta

Lo visto anteriormente nos muestra la motocicleta como invento independiente. Sin embargo, la construcción en serie de una motocicleta no llegará hasta 1894 de la mano de los alemanes Hildebrand y Wolfmüller que presentaron su prototipo en Múnich. Esta motocicleta fue fabricada con fines puramente industriales ya que hasta 1897 la sociedad no había puesto gran interés por el invento, siendo ese año donde los hermanos y periodistas Eugene y Michel Werner empezaron a probar diferentes disposiciones del motor. En 1898 será cuando les llegue el éxito y empezaran a fabricar el prototipo denominándolo *motocicleta* (Figura 2-4), nombre que será extendido por todo el mundo [5].

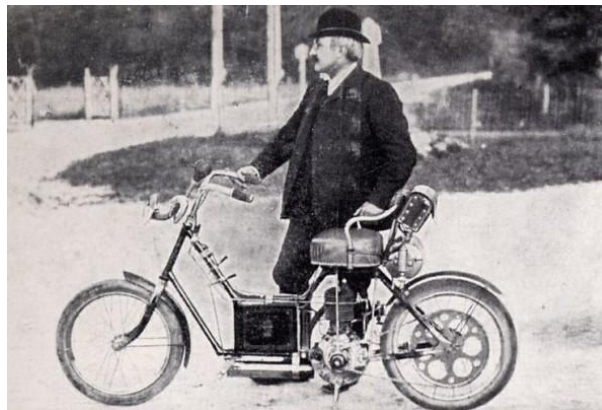


Figura 2-4 Modelo de los hermanos Werner

A partir de este punto comienzan el estallido de la creación de empresas dedicadas a la fabricación de motocicletas como son Triumph (1902), Harley-Davidson (1903) y Honda (1946) entre otros [7], produciendo grandes avances como el aumento del número de cilindros del motor y dejando atrás los motores mono cilíndricos del siglo anterior. Es importante enmarcar en la evolución de la motocicleta el estallido de la Primera Guerra Mundial debido a que se produjo un aumento de la fabricación de motocicletas, pues suponían una vía de comunicación efectiva, rápida y dinámica.

No podemos dejar fuera la aparición de las *Scooters* ya que esta modalidad de motocicleta supondrá un antes y un después en el mundo del motor de las dos ruedas. Esta última hace su aparición en 1902 en Francia de la mano de Georges Gauthier, sin embargo su fabricación no llegará hasta 1914. "El desarrollo de la Scooter, se hizo fuerte a partir de 1919 y tuvo un gran éxito con la Vespa italiana, a partir de 1946" (Leo Gómez, 2015)¹. Este tipo de motocicleta también se vio favorecida por el estallido de la Primera Guerra Mundial (1914-1918) llegando a ser en la actualidad el modelo de moto más vendido.



Figura 2-5 Scooter de 1902

¹ Información obtenida de [6].

3 HISTORIA DEL MOTOCICLISMO²

Después del auge de las motocicletas, a principio del siglo XX, comenzaron a celebrarse carreras de motocicletas en varios países, llegándose a formar en 1938 la *Fédération Internationale des Clubs Motocycliste*, la predecesora de la actual FIM³, la cual organizó el Campeonato Europeo. El desarrollo de esta competición se vio truncado debido al estallido de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) y posteriormente retomado con la ya instauración del FIM, creando lo que se conoce como el Campeonato del Mundo de motociclismo.



Figura 3-1 Primeras carreras (1894-1906)⁴

Las cilindradas de 500cc, 350cc, 250cc y 125cc fueron las escogidas para la primera edición del campeonato. El inglés Leslie Graham subido a una AJS, el también británico Freddie Frith con la Velocette y los italianos Bruno Ruffo (Moto Guzzi) y Nello Pagani (Mondial) fueron respectivamente los primeros en obtener los títulos en la categorías antes comentadas.



Figura 3-2 Leslie Graham subido en su AJS

² Datos sacados de [8].

³ Federación Internacional de Motociclismo.

⁴ Datos tomados de [9].

Desde que se instaurara el Campeonato Mundial de Motociclismo hasta nuestros días la competición sufrirá múltiples cambios. Actualmente las categorías presentes son las relativas a motores de cuatro tiempos y de cilindradas de 1000cc (MotoGP), 600cc (Moto2) y 250cc (Moto3), ganadas el pasado campeonato (2018) por el heptacampeón español Marc Márquez (Repsol Honda), el italiano Francesco Bagnaia (Kalex) y el español Jorge Martín (Repsol Honda) respectivamente. El nivel de exigencia actual es tan elevado que cualquier milésima arrancada al cronómetro puede suponer la victoria en un Gran Premio. Por ello los equipos de competición, formados por ingenieros entre otros, trabajan para desarrollar nuevos sistemas que presenten alguna mejora respecto al anterior (ya sea en peso o geometría). Una de esas piezas es la que recoge el desarrollo de este documento y en la que entramos en detalle a continuación.



Figura 3-3: Marc Márquez 2018

4 SISTEMA RAM-AIR

En el punto anterior se ha hecho hincapié en la necesidad de conseguir reducir los tiempos por vuelta en cada competición, ya que una milésima de segundo recortada por vuelta resulta una gran diferencia a final de carrera. Cualquier elemento que se incluya en la motocicleta que consiga realizar dicha función es plenamente factible para su colocación en el prototipo. Un sistema que consigue esto mismo sin variar demasiado la geometría principal de la moto e introduciendo un peso ínfimo comparado con el peso total de la motocicleta es el conocido como sistema Ram-Air.

En los tiempos anteriores a los años 50 el aire que rodeaba a la motocicleta se veía como un enemigo a combatir, debiéndose esto a que un cuerpo al moverse en un medio fluido (en este caso el aire exterior del prototipo) se produce una fuerza de rozamiento opuesta al movimiento. Esto se traduce a que parte de la potencia del motor era destinada al movimiento a través del medio, es decir, es un gasto inevitable. Además, al aumentar la velocidad por la que se circula en el medio, mayor es la fuerza de rozamiento soportada y, por tanto, mayor es la pérdida que se produce [10].

Como forma de aprovechar la presión que ejerce el aire en el carenado de la motocicleta surge en los años 50 el conocido como sistema Ram-Air. En términos generales, su función se basa en el aumento de la presión estática a la entrada del motor producido por la variación de áreas del conducto. El sistema está constituido por tres partes perfectamente diferenciadas:

- Conducto de entrada o Ram-Air: constituyen la parte inicial del sistema. Pueden ser uno o varios conductos que recogen el aire en el punto frontal de máxima presión que ejerce el aire en el carenado para llevarlos a la caja de resonancia o Airbox. Estos conductos son los encargados de frenar el aire que entra en el sistema gracias al aumento de la sección de estos conductos. Es aquí donde se produce el cambio de presión dinámica a presión estática, el cual hablaremos en las próximas líneas.
- Caja de resonancia o Airbox: representa la parte central del sistema. Su única función es la de llevar la presión estática obtenida en los conductos de entrada a la siguiente parte del sistema: las trompetas de admisión. Además de esta función también sirve como depósito de aire para evitar la carga insuficiente de aire en los cilindros (lo que provocaría una gran pérdida de potencia o incluso el fallo del motor) y es donde se suele colocar el filtro de aire para evitar que se introduzca en el motor cualquier tipo de elemento que pueda producir el fallo del mismo.
- Conducto de salida o trompetas de admisión: Estos elementos suelen ser conductos de pequeña longitud cuya función resulta de llevar el aire desde el airbox hasta el motor. En estos conductos al disminuir el área de la sección se produce un aumento de la velocidad del fluido, lo que provoca por tanto un llenado más rápido y de mayor cantidad en el cilindro del motor.

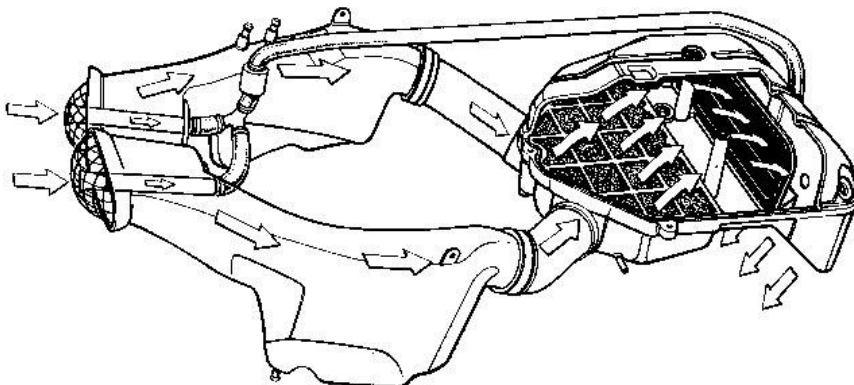


Figura 4-1 Sistema Ram-Air

Conocidas las partes que conforman el sistema podemos definir exactamente la función del mismo. En un primer instante, debido al movimiento del vehículo a través del aire, el fluido entra a la velocidad de circulación. Una vez dentro del sistema los conductos de entrada van aumentando el área de paso, produciéndose una disminución de la velocidad para transformarse en presión estática, es decir, a su paso por los conductos el fluido irá perdiendo presión dinámica para convertirse en presión estática. Esta presión se mantiene en el interior de la caja, evitando formas complejas de la misma, ya que se producirían pérdidas por rozamiento. Llegados a las trompetas de admisión, el fluido posee una cierta presión que, al abrirse las válvulas de admisión y estar éstas a mucha menor presión, se produce un llenado más rápido y en mayor cantidad en los cilindros del que se conseguiría sin este sistema.

Lo que pretende conseguirse instalando el elemento estudiado es conseguir una combustión más rica de aire, garantizando así que todas las partículas de carbono que se introducen en cada ciclo de combustión produzcan trabajo efectivo (llegar de mejor forma a una reacción lo más estequiométrica posible).

Como veremos en capítulos posteriores esto no es una tarea sencilla, pues el trabajo con fluidos requiere no sólo de un estudio de áreas, sino que cualquier variación de sección o curvatura de los conductos produce oscilaciones en el resultado. Lo que se pretende es conseguir un sistema lo más recto posible y con cambios de sección suaves para evitar problemas como el desprendimiento de la capa límite o excesivas pérdidas en el flujo. En todos estos términos entraremos en puntos posteriores del presente documento.

Como resumen del apartado, podemos decir que un sistema Ram-Air hasta donde se entiende hoy día es un elemento que con sólo el movimiento del vehículo consigue aumentar la cantidad de aire que entra en los cilindros, consiguiendo un aumento de la potencia del conjunto, sin apenas variar ni la geometría ni el peso del conjunto.

5 RESONANCIA EN LOS FLUIDOS

En el punto anterior se ha explicado cómo han sido estudiados y entendidos los sistemas de la admisión motor para prototipos de competición. Sin embargo, al igual que sucede con la mayoría de sistemas creados por el hombre, ha seguido evolucionando. Aunque un producto esté perfectamente optimizado, con el paso del tiempo y el descubrimiento de nuevos materiales o estudios, se pueden conseguir diferentes mejoras, ya sean en eficiencia, peso o resistencia. En el caso que recoge este documento, el sistema a estudiar también ha sufrido variaciones. Éstas vienen dirigidas a la realización de un estudio que tiene que ver con la *resonancia en los fluidos*.

En la actualidad, los equipos o empresas que quieren obtener un rendimiento mayor a ciertas velocidades del motor se basan en este estudio para obtener dicha mejora de rendimiento. Éste se adiciona a los ya existentes para así obtener un producto que cumpla los requisitos ya impuestos en los antiguos diseños de este sistema, atendiendo además a las nuevas exigencias impuestas.

La resonancia en los fluidos aplicada a los vehículos de competición podría catalogarse como reciente. Su fundamento está basado en las diferencias de presiones que se crean dentro del sistema. Para poder explicar los fundamentos físicos del dispositivo tenemos que partir del final del punto anterior. En él se había descrito que al final del Ram-Air se conseguía un aumento de presión a la entrada de las válvulas de admisión. Cuando éstas se abren, al descender el cilindro, se crea una depresión dentro del mismo, el cual produce un movimiento del aire hacia el interior del motor. Una vez cerradas las válvulas de admisión se produce una depresión en las trompetas de admisión que, al estar las partículas más cercanas al Airbox a mayor presión, se genera una onda de depresión que se dirige hacia el exterior del sistema (sentido contrario al flujo normal de aire). Dicha onda avanza por el sistema hasta llegar a la entrada del Ram-Air, donde, al estar a menor presión que el ambiente, se produce una onda de alta presión en sentido contrario al que había llevado (sentido a favor del flujo de aire), el cual avanza hasta situarse de nuevo en las válvulas de admisión. Este fenómeno se asemeja a lo que sucedería en un muelle como el que tenemos en la Figura 5-1 Propagación de una onda en un muelle [12]

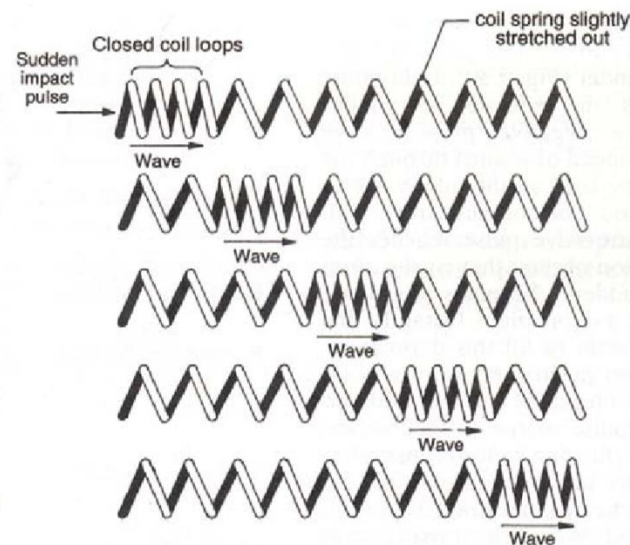


Figura 5-1 Propagación de una onda en un muelle [12]

El fenómeno en cuestión se repite con cada apertura de las válvulas de admisión, es decir, con cada ciclo que realiza el motor. La forma de aprovechar este movimiento de masa es la obtención de la revolución del motor, la cual consiga que el final de ese movimiento de presiones coincida con el inicio de apertura de válvulas del

siguiente ciclo. Dicho de otra manera, lo que se quiere conseguir con este fenómeno es obtener las revoluciones del motor a las cuales, al llegar la onda de alta presión a las trompetas de admisión, en ese instante sucedan las aperturas de las válvulas del siguiente ciclo del motor, ya que en ese caso se conseguiría un aumento de la cantidad de aire que ya de por sí se conseguía con el sistema sin este estudio.

Como veremos en los cálculos de los próximos puntos, se obtendrá que las revoluciones del motor a las que sucede el fenómeno están directamente relacionadas con la longitud total del sistema.

En el presente documento no se pretende hallar las revoluciones del sistema a las que el producto proporcionaría una potencia extra partiendo de un sistema dado, sino que a partir de unas revoluciones dadas se obtendrá la longitud que debe tener el sistema en la medida geométrica de lo posible. Las revoluciones elegidas dependerán de lo que el equipo *US-Racing* estima oportuno para su competición en el circuito de Motorland que, como se explicará en futuros capítulos, se tomará en torno a las 9000 rpm del motor.

6 ECUACIONES E HIPÓTESIS

En el desarrollo de este apartado se plasmarán todas las ecuaciones e hipótesis necesarias para poder desarrollar el diseño geométrico del sistema estudio.

Para comenzar, debemos saber que los sistemas Ram-Air en sus conductos de entrada se suelen utilizar toberas divergentes o convergentes-divergentes ya que éstas son las que producen un aumento de la presión estática al disminuir la velocidad del fluido que circula a través de los conductos (aumentando el área de paso), condición necesaria para nuestro prototipo. La obtención de la relación de áreas de entrada y salida de la tobera se obtendrá a través de la ecuación de Bernoulli, la cual precisará una serie de demostraciones que se expondrán a continuación.

Una vez obtenida la relación de áreas pasaremos al estudio de la resonancia, donde obtendremos el largo total que debe tener nuestro sistema.

6.1 Condición isentrópica

Para poder usar el Principio de Bernoulli nos basaremos en la condición isentrópica que tiene el fluido a su paso por el sistema. Para llegar a esta conclusión debemos partir de una serie de hipótesis en las condiciones de contorno del problema:

- Problema estacionario.
- Calor intercambiado aproximadamente igual a cero ($\dot{Q} = 0$).
- Trabajo intercambiado aproximadamente igual a cero ($\dot{W} = 0$).
- Número de Reynolds mucho mayor que 1 ($Re \gg 1$).
- Número de Froud mucho mayor que 1 ($Fr \gg 1$).

Partiendo de las ecuaciones de la energía (1) junto con las constantes termodinámicas (2) y la conservación lineal del movimiento (3) aplicadas al problema de la Figura 6-1, se puede demostrar que el flujo a través de la tobera tiene un carácter isentrópico:

$$h_0 = h + \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

$$h = C_p T \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) = - \frac{\partial (p + \rho U)}{\partial s} + \text{fricción} \quad (3)$$

La "h" viene a representar la entalpía del sistema, la "v" la velocidad del fluido y "T" la temperatura del mismo, siendo " h_0 " la entalpía de remanso, " ρ " la densidad del aire que circula y " C_p " la constante termodinámica. Si derivamos la ecuación (1) respecto de "s":

$$0 = \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} \right) \quad (4)$$

Si se aplican las hipótesis expuestas al principio del subcapítulo a la ecuación (3) se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} \quad (5)$$

La relación entre la entalpía, la presión y densidad del fluido se obtienen mediante la aplicación de las fórmulas de las constantes termodinámicas, donde la energía interna viene representada por "e" y $\gamma = C_p/C_v$:

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad \rightarrow \quad h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} \quad (6)$$

. Si se deriva la ecuación (6):

$$\frac{\partial h}{\partial s} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial s} \right) \quad (7)$$

El siguiente paso se consigue al sustituir las ecuaciones (5) y (7) en la ecuación (4) y al desarrollar la ecuación obtenida se llegaría a:

$$\frac{dp}{p} = \gamma \frac{d\rho}{\rho} \quad \rightarrow \quad \frac{p}{\rho^\gamma} = C \quad (8)$$

La letra "C" viene a representar una constante. Si nos fijamos en la definición de la entropía, la cual viene definida como $S = C_v \ln \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right)$, queda demostrado que el flujo será isentrópico.

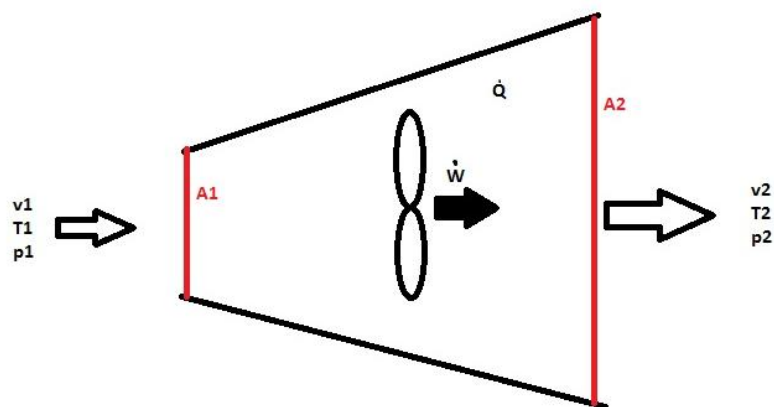


Figura 6-1 Problema tobera divergente

6.2 Ganancia de presión

El siguiente paso tras la demostración de la característica isentrópica del flujo, es necesario conocer el número de Mach que posee el sistema en su recorrido, ya que este valor nos dará unas características determinadas que adquiere el sistema debido a dicha magnitud. Sin embargo, primero es necesario conocer la ganancia de presión que se obtendrá a lo largo del prototipo. Para ello nos basaremos en el trabajo realizado por los técnicos de la conocida marca de motocicletas Kawasaki, lo cuales fueron los pioneros en estudiar la ganancia de presión como forma de aumento de la potencia (Carmen Fernández Pastor, 2010) [14].

Del ensayo que puede verse en la Figura 6-2 Banco de potencia de Kawasaki realizados a una Kawasaki ZX-9R se obtuvieron una serie de gráficas, de la que podemos destacar la observada en la Figura 6-3 Gráfica presión- velocidad En ella se representa la ganancia de presión obtenida frente a la velocidad a la que circula el prototipo que, aunque no sean específicas para nuestro prototipo, nos permite hacer una primera aproximación y un primer dimensionado del futuro producto.



Figura 6-2 Banco de potencia de Kawasaki

Si se precisa conocer el valor de la ganancia de presión generada, se debe entrar en la gráfica de la Figura 6-3 Gráfica presión- velocidad a partir de la velocidad del prototipo. En el caso aquí recogido se ha estimado una velocidad de 180 km/h basándonos en la velocidad alcanzada por los pilotos y equipos profesionales en el circuito de Motorland [15]. Este dato no se ha tomado al azar, ya que la competición, la cual motiva este documento, se desarrolla hasta el momento en el circuito antes mencionado.

Además del dato profesional, se ha tenido en cuenta el histórico del equipo, ya que éste cuenta con una base de datos de más de diez años, tiempo suficiente para sacar una serie de datos en cuanto a velocidades se refiere. En la IV Edición se sobrepasó los 150 km/h estimados por el mismo autor que firma este trabajo para su aquel entonces Trabajo de Fin de Grado. Dos años después en la edición estudio se espera que el prototipo alcance los 190 km/h, por lo que los 180km/h tomados se consideran un valor muy posible para los cálculos que se realizarán en posteriores capítulos.

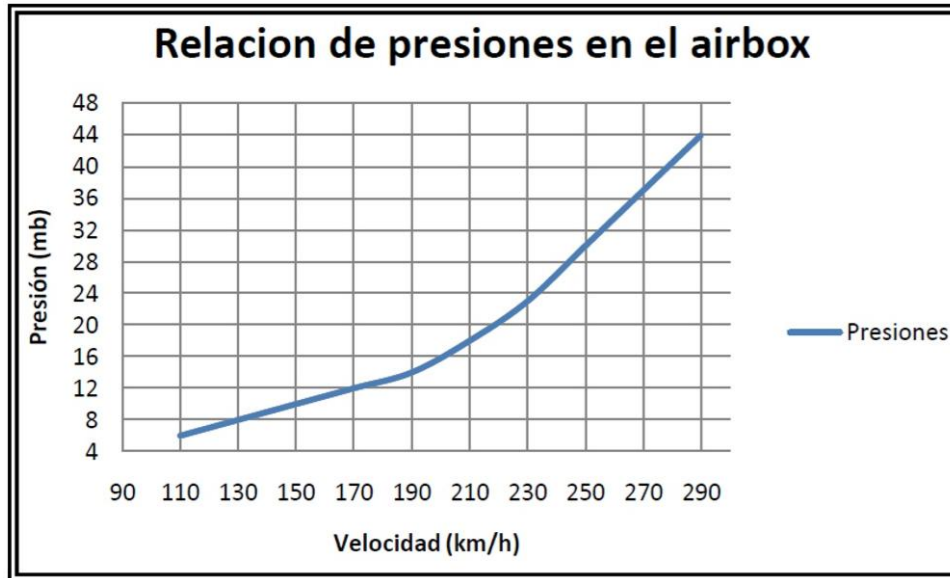


Figura 6-3 Gráfica presión- velocidad

Si tomamos la Figura 6-3 Gráfica presión- velocidad un valor de velocidad de 180 km/h se obtiene que en el estudio que se realizó en las instalaciones de Kawasaki se obtendría una ganancia de presión de 13 mbar (1300Pa), valor que se tomará para el futuro cálculo del número de Mach y para la obtención de la relación de áreas.

Debemos hacer hincapié en que estos datos no están obtenidos de nuestro sistema, pero permite hacer una aproximación del sistema futuro.

6.3 Cálculo del número de Mach

El número de Mach es una variable de vital importancia para el desarrollo del prototipo estudio ya que, dependiendo de su valor, el flujo obtendrá una serie de características específicas. Se puede definir el número de Mach como el cociente entre la velocidad que posee el flujo y la velocidad del sonido, y dependiendo del valor obtenido se puede distinguir entre flujo subsónico ($Mach < 1$) y flujo supersónico ($Mach > 1$).

El valor del número de Mach puede ir variando a lo largo del conducto, por lo que conocer las causas que provocan el aumento o la disminución del mismo permiten definir de forma previa su valor. La convergencia o divergencia de la tobera es un factor que ayuda a averiguar el número de Mach que posee el sistema, ya que si ésta fuera convergente sólo podría obtenerse un flujo subsónico. Sin embargo, cuando la tobera es divergente (como sucede en este estudio) el flujo puede ser de cualquiera de los dos tipos, incluso encontrarse ambos tipos en el mismo sistema.

La definición de Ram-Air nos explica que son conductos divergentes por definición, por lo que se debe estudiar el número de Mach en su recorrido para verificar el tipo de flujo presente en el mismo y, así conocer la evolución que tendría el mismo.

El primer cálculo que se debe realizar es la comprobación del bloqueo de la tobera. Si ésta se encuentra bloqueada estaremos ante el caso en el que en todo el sistema el flujo será supersónico. Dicha condición viene definida en la siguiente ecuación (9):

$$\frac{p_a}{p_o} > \frac{1}{0,528} \quad (9)$$

$$\frac{p_a}{p_a + \Delta p} = \frac{101325}{101325 + 1000} = 0,987 < \frac{1}{0,528} \quad (10)$$

Al no cumplirse la condición se demuestra que la tobera no se encuentra bloqueada, por lo que la condición de flujo supersónico a lo largo de todo el sistema queda descartada.

El siguiente paso consistiría en calcular el número de Mach en el punto de mayor valor, ya que si este es menor a la unidad se podría concluir que el flujo es subsónico en todo su recorrido. Al definirse el número de Mach como el cociente entre la velocidad del flujo en el punto y la velocidad del sonido (constante) (10), la ubicación de mayor valor de dicha magnitud estaría situada en la zona de mayor velocidad del flujo que, por definición de tobera divergente, estará situada a la entrada del sistema:

$$M = \frac{v}{a} \quad (11)$$

$$M = \frac{50 \frac{m}{s}}{340 \frac{m}{s}} = 0,147 \ll 1 \quad (12)$$

Como se puede observar, en el punto de mayor velocidad del flujo el número de Mach es menor a la unidad, por lo que el flujo en todo el sistema será de carácter subsónico. Esto produce que el flujo tenga unas características concretas, las cuales, al aumentar el área de la sección de paso, podemos resumir en:

- Una disminución de la velocidad del fluido.
- Un aumento de la presión estática.
- Un aumento de la densidad del fluido.
- Un aumento de la temperatura del fluido.

Estas características son las buscadas por nuestro sistema, por lo que un flujo subsónico unido a un aumento de la sección de los conductos es lo ideal para el correcto funcionamiento del Ram-Air. Además, al ser el número de Mach mucho menor que la unidad, la hipótesis de flujos incompresibles es de aplicación y necesaria para la futura aplicación del Principio de Bernoulli.

6.4 Relación de áreas

El desarrollo geométrico de los conductos es la parte más importante de este documento. Un buen modelo implicaría la obtención de grandes ganancias de presión, lo que se traduciría en un aumento significativo de la potencia del prototipo. Dentro de ese diseño geométrico, la parte fundamental es el conocimiento de las áreas de la sección del Ram-Air. Al ser un conducto relativamente largo y el espacio disponible escaso, el estudio se centraría en las secciones de entrada y salida del sistema, siendo éstas suficientes para el cálculo de la ganancia de presión.

La obtención de las áreas antes mencionadas se obtienen a partir del Principio de Bernoulli para flujos isentrópicos e incompresibles (13). Para poder aplicar dicho principio ha sido necesario la demostración de la característica isentrópica del flujo (capítulo 6.1), junto a la hipótesis de flujos incompresibles (capítulo 6.3) que, unido a la conservación del caudal a lo largo del sistema (14), permiten obtener la relación buscada:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = cte \quad (13)$$

$$Q = cte \quad (14)$$

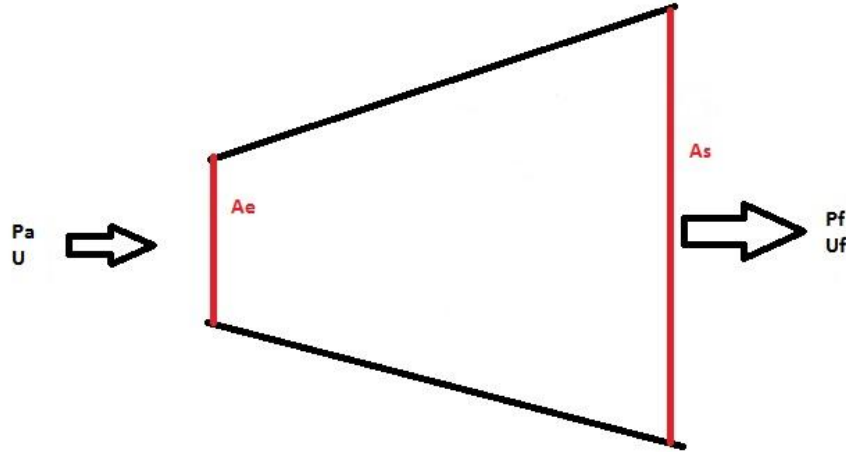


Figura 6-4 Problema Ram-Air

El problema que permitiría la obtención de la relación de áreas entre la entrada y la salida de los conductos de entrada es un problema típico de tobera divergente esquematizado en la Figura 6-4 Problema Ram-Air. Si aplicamos el Principio de Bernoulli (13) al problema descrito se obtendría la relación de áreas buscada:

$$p_a + \rho gh + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = p_f + \rho gh + \frac{1}{2} \rho U_f^2 \quad (15)$$

$$p_f - p_a = \Delta p = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left(1 - \left(\frac{U_f}{U_\infty} \right)^2 \right) \quad (16)$$

Aplicando la ecuación de continuidad (14) al mismo problema se obtendría la relación entre velocidades y áreas, la cual necesitaremos para transformar la ecuación (16):

$$U_\infty A_e = U_f A_s \quad (17)$$

$$\frac{U_f}{U_\infty} = \frac{A_e}{A_s} \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18) en la (16) nos permite transformar la ecuación del Principio de Bernoulli (16), donde aparecía la relación de velocidades entre la entrada y la salida, para que nos aparezca la relación de áreas buscada, imprescindible para el desarrollo geométrico:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left(1 - \left(\frac{A_e}{A_s} \right)^2 \right) \quad (19)$$

Sabiendo que:

- $\Delta p \sim 1300 \text{ Pa}$
- $U_\infty = 180 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $\rho = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Se puede obtener la relación de áreas necesarias para conseguir la ganancia de presión supuesta:

$$\frac{A_e}{A_s} = 0,349 \quad (20)$$

Cabe destacar que la relación de áreas obtenida es un valor orientativo pues, como ya veremos en capítulos posteriores, el alcanzar dichas cifras no es siempre posible debido al escaso espacio disponible en el prototipo.

6.5 Ecuaciones de resonancia

El estudio de la resonancia es el punto más importante del trabajo aquí expuesto ya que nos permite conseguir un aumento de la potencia extra sin tener en cuenta la potencia ya ganada aplicando las ecuaciones anteriores. Este apartado es el motivo que ha impulsado al autor de este documento y de su pasado Trabajo de Fin de Grado a seguir indagando en el aumento de la potencia de un sistema tan utilizado en la competición.

El aumento de potencia se produce gracias a lo conocido como *efecto Ram*. Este efecto, como ya se explicó en el apartado 5, permite introducir una mayor cantidad de masa de aire a unas determinadas revoluciones del motor. De esta manera, la elección de dicha velocidad es muy importante, ya que es en éstas donde se produce el tan deseado efecto. En el caso aquí recogido se va a tener en cuenta las revoluciones donde se produce el par máximo, las revoluciones de máxima potencia, las revoluciones a las que se produce el corte y las revoluciones medias en función de la pista.

Para poder saber las revoluciones mencionadas debemos conocer el motor con el cual se va a trabajar. En el caso de esta V Edición el motor proporcionado por la organización de Motostudent y de obligada instalación para la competición es el KTM 250R. Este motor de competición en su versión para motos de calle es un motor mono cilíndrico de cuatro tiempos y de 250cc, el cual otorga unos 30,7 CV a 9000 rpm de base. Este motor es el motor más potente otorgado por la competición hasta el momento, por lo que las velocidades de los prototipos deberían de ser más elevadas respecto a ediciones anteriores.

La ficha técnica del motor en cuestión, de la que puede obtenerse gran información, la tenemos en la Tabla 6-1: Especificaciones del motor. Dicha tabla está proporcionada por la organización de Motostudent:

KTM RC 250 ENGINE - TECHNICAL SPECS

GENERAL SPECS

Type	4-stroke single cylinder
Distribution	Twin overhead camshafts DOHC, 4 valves
Cooling	Liquid-cooled, permanent circulation of coolant by water pump
Engine Displacement	248.8 cm ³
Bore x stroke	72 x 61.1 mm
Compression ratio	12.5:1
Lubricating type	Wet sump
Intake valve diameter	29 mm
Exhaust valve diam.	24 mm

PERFORMANCE

Max Power output	30,87 Hp / 9000rpm
Max. Torque	24Nm / 7250rpm

TRANSMISION

Gearbox	6 speed transmission
Clutch configuration	Slipper clutch. Wet multiplate with coil springs
Clutch command	Mechanically operated
Gear selection	1 N 2 3 4 5 6
Primary transmission	30:80
Trans. Ratio 1st gear	12:32
Trans. Ratio 2nd gear	14:26
Trans. Ratio 3rd gear	19:27
Trans. Ratio 4th gear	21:24
Trans. Ratio 5th gear	23:22
Trans. Ratio 6th gear	25:21

IGNITION, FUEL SYSTEM AND ELECTRONICS

Start	Electric starter
Ignition system	Contactless ignition, controlled fully electronic
Ignition adjustment	Digital ignition timing adjustment
Fuel injection	Electronic fuel injection (stock)
Alternator	12V, 296 W
Recommended Batt.	12V/8Ah
Idle Speed	1,450 - 1,550 rpm

Tabla 6-1: Especificaciones del motor

USEFUL DATA

Intake duct diameter	48 mm (rubber piece)
Exhaust duct diam.	50 mm
Engine weight	37,2 Kg
Engine oil capacity	1.7 L
Engine oil type	SAE 15W/50 (stock recommended)

Tabla 6-1: Especificaciones del motor

En dicha tabla puede comprobarse que las revoluciones a las que se produce la potencia máxima y el par máximo⁵ son a 9000 y 7250 rpm respectivamente. Si además sabemos que las revoluciones de corte se sitúan en torno a las 13000 rpm, se supondrá que la velocidad a la que se podrá obtener mayor partido al motor se situará en la franja cercana a las 9000 rpm. Estas revoluciones son las que se tomarán como base para el estudio de resonancia.

Lo que pretende este apartado es obtener la longitud total del sistema, ya que esta es la que permite sincronizar el regreso de la onda de depresión generada en un ciclo con el inicio del siguiente. Para ello debemos calcular el tiempo que tarda el motor desde que se cierran las válvulas de admisión hasta su siguiente apertura del siguiente ciclo.

Partiendo de las revoluciones estudio se puede obtener el tiempo que tarda el motor en dar una vuelta:

$$9000 \frac{rev}{min} * \frac{1 min}{60 s} = 150 \frac{rev}{s} \quad (21)$$

$$\frac{1}{150 \frac{rev}{s}} = 0,0067 \frac{s}{vuelta} \quad (22)$$

El siguiente paso necesario es conocer el tiempo que tarda el motor desde que se cierran las válvulas de admisión hasta su posterior apertura. Para llegar a conocer este dato se debe conocer primero el número de grados en los que están cerradas las válvulas.

Como se explicó anteriormente, el motor estudio es un motor de cuatro tiempos, por lo que el número total de vueltas que realiza para completar un ciclo completo son de dos vueltas (720°). Sabiendo que en ese ciclo las válvulas están abiertas 246°, el resto del movimiento estarán cerradas:

$$720 - 246 = 474^\circ \quad (23)$$

$$\frac{474^\circ}{1 ciclo} * \frac{1 vuelta}{360^\circ} = 1,3167 \frac{vueltas}{ciclo} \quad (24)$$

Para conocer el tiempo que tardan las válvulas de admisión en abrirse tras finalizar la etapa de llenado del motor, lo único que se precisa es la multiplicación de las ecuaciones (22) y (24):

⁵ Revoluciones a las cuales se produce la mayor fuerza del motor.

$$0,0067 \frac{s}{vuelta} * 1,3167 \frac{vueltas}{ciclo} = 0,008778 \frac{s}{ciclo} \quad (25)$$

El conocimiento de este valor nos permite saber el tiempo que emplea la onda de depresión en recorrer el sistema dos veces, una hacia la entrada de nuestro sistema y otro hacia las válvulas de admisión.

En cuanto a la velocidad de las ondas en el aire, éstas pueden tomarse como valor igual a la velocidad del sonido en el mismo medio, estimada en 343 m/s. De esta manera podemos obtener la longitud que debe recorrer la onda al hacer el producto entre la ecuación (25) y la velocidad antes mencionada. El resultado obtenido representa el doble de la longitud total del sistema estudio:

$$0,008778 \frac{s}{ciclo} * 343 \frac{m}{s} = 3,0109 m \quad (26)$$

$$\frac{3,0109 m}{2} = 1,5054 m \quad (27)$$

Por tanto, se llega a la conclusión de que la longitud óptima del sistema es la dada en la ecuación (27). Dicha longitud se considera excesivamente larga para colocar dentro de una motocicleta de estas características, ya que dicha longitud podría llegar a considerarse incluso mayor que la longitud total del prototipo. De esta manera, se decide de reducir dicha longitud a la cuarta parte, tal como realizan Diego Vinicio Díaz Sinche, Jose Ignacio Hurtado Matute, Paúl Andrés Molina Campoverde y Jose Fernando Valarezo Ordoñez en su trabajo "Diseño, construcción e implementación del colector de admisión para el motor de combustión interna Yamaha FZR 600cc para la competencia Fórmula SAE" [13].

La complejidad de adaptar dicha longitud al vehículo es la principal causa de la reducción de la misma, por lo que se reducirán los efectos de sobrealimentación. Finalmente la longitud a buscar se establece según la ecuación (28):

$$\frac{1,5054 m}{4} = 0,376 m \quad (28)$$

Conocido el valor de la longitud total objetivo del sistema, disponemos de todos los datos necesarios para introducirnos en el proceso de diseño geométrico y estudio fluido-dinámico, del cual se llegarán a otro tipo de dificultades no tenidas en cuenta hasta el momento.

7 DISEÑO GEOMÉTRICO

En este punto del documento, se ha pasado de la parte más analítica a la parte que requiere mayor agudeza para poder obtener, del espacio disponible, una pieza capaz de alcanzar los datos calculados en los puntos previos. A partir de aquí nos sumergimos en un proceso cíclico, donde de cada diseño propuesto se pasará al cálculo fluido-dinámico para comprobar si los cambios realizados producen algún tipo de mejora. Este proceso terminaría cuando cualquier cambio realizado produzca una disminución de la potencia producida, por lo que se habría llegado al prototipo óptimo. Como se verá en puntos posteriores, no cualquier diseño produce mejoras, sino que pueden existir incluso pérdidas de potencia.

Si nos centramos en el diseño geométrico de la motocicleta, éste se realizará a través de la herramienta gráfica de diseño en 3D de CAD/CAM, CATIA V5 R19. Esta herramienta de diseño asistido por ordenador (CAD: Computer Aided Design) permite visualizar las piezas diseñadas por el resto de departamentos que conforman el equipo US-Racing para así poder observar las distintas incompatibilidades geométricas que pudieran producirse entre los distintos elementos.

El departamento de fluido-dinámica es uno de los departamentos que más sufre de las modificaciones del resto de piezas, ya que suelen ser los que se adaptan al conjunto completo. Para el desarrollo de la pieza estudio partiremos de un estado final en cuanto al diseño del resto de elementos que conforman el vehículo. Si se observa la Figura 7-1: Geometría inicial real del resto de elementos del prototipo. y la Figura 7-2: Geometría inicial CAD del resto de elementos del prototipo (fase de diseño y fase constructiva respectivamente) se puede observar el punto de partida del cual la pieza estudio debe amoldarse. Piezas como el chasis, el motor y el radiador son elementos que obligan a tomar ciertos caminos y no permite la total libertad en cuanto a diseño se refiere.

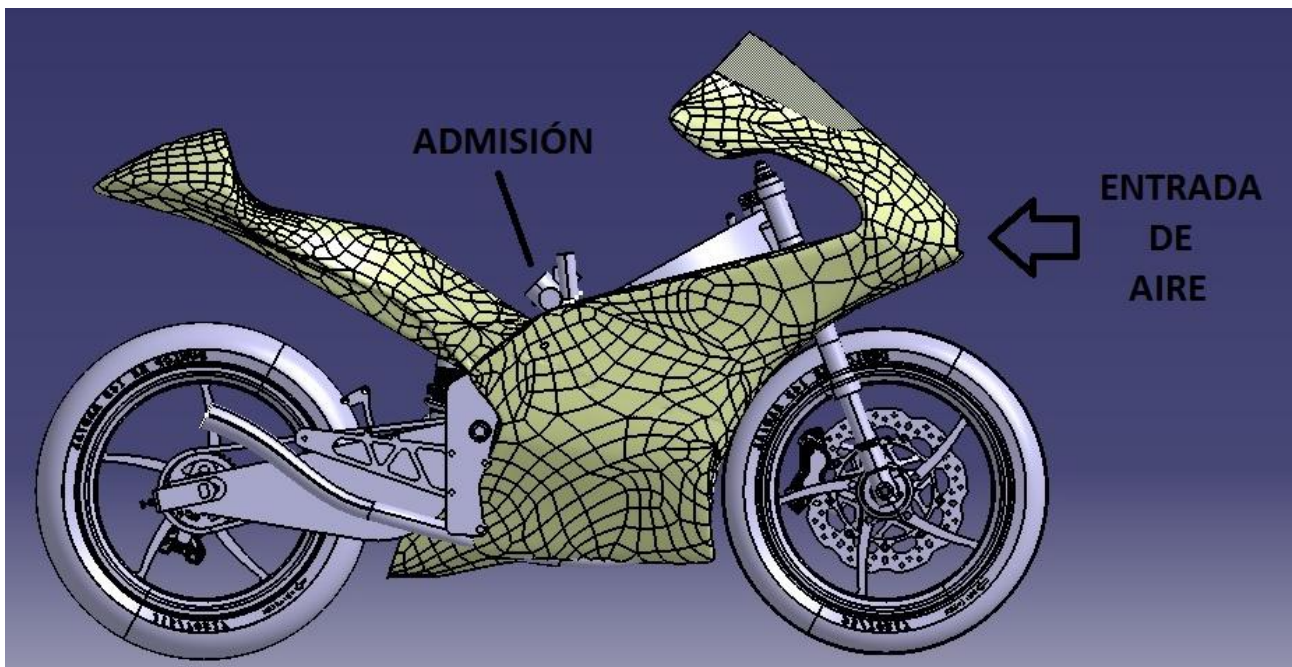


Figura 7-1: Geometría inicial real del resto de elementos del prototipo.

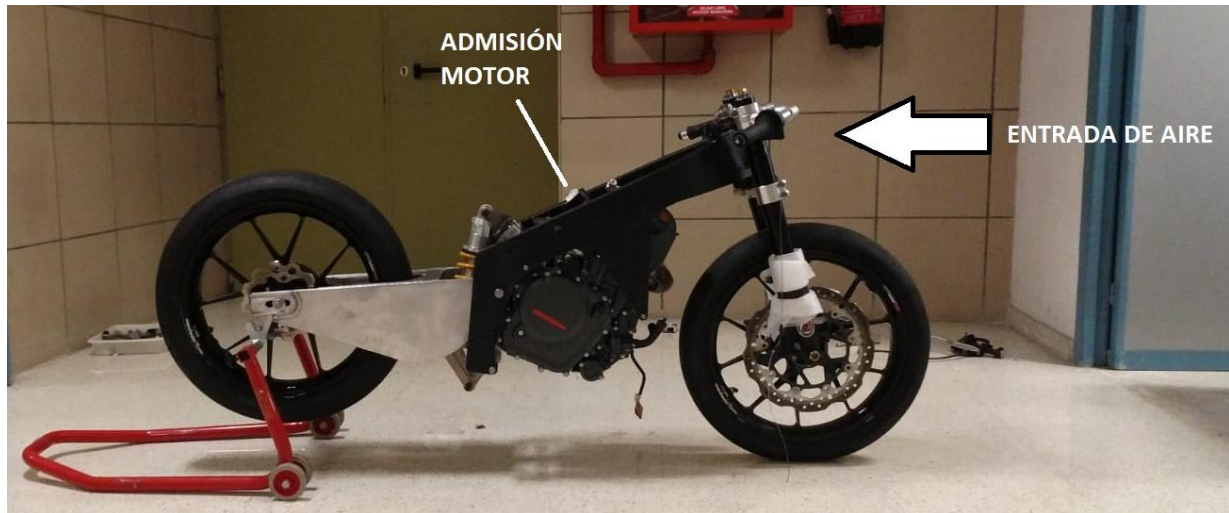


Figura 7-2: Geometría inicial CAD del resto de elementos del prototipo

Al comenzar el diseño geométrico del prototipo nos encontramos con un problema a resolver. El motor, al tratarse de un modelo para motocicleta de uso cotidiano (KTM Duke 250), tiene la entrada de la admisión de aire en la zona posterior a la dirección de la marcha. Esto resulta un inconveniente ya que nuestro sistema tendría que alcanzar una zona más lejana a la entrada de aire, ocupando un espacio valioso para la colocación del depósito del vehículo, además de las pérdidas de potencia producidas por el rozamiento con las paredes. En los motores de competición, la ubicación de la admisión del motor se sitúa en la parte delantera del motor, evitando así dichas pérdidas de potencia, creando un flujo directo a la admisión.

Definidas las ubicaciones de las entradas de aire y de la admisión se pasa a contemplar las posibles posiciones del prototipo que este trabajo recoge. Varias de estas localizaciones podrían situarse en el lateral de la moto o por debajo de la tija inferior, como se puede observar en la Figura 7-3: Ubicaciones posibles del Airbox.. Sin embargo, como se demostró en antiguas ediciones (Figura 7-4: Airbox de la III Edición de US-Racing., este tipo de diseños presentan numerosas curvaturas, produciendo las ya mencionadas pérdidas de potencia.

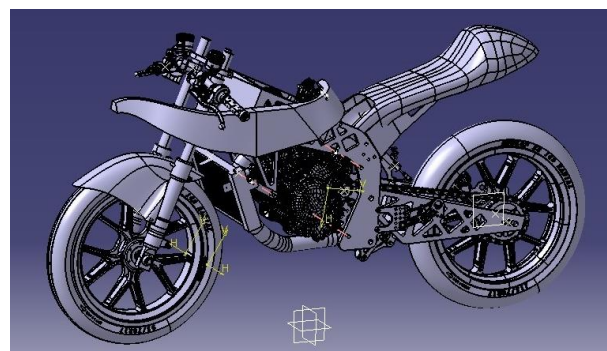
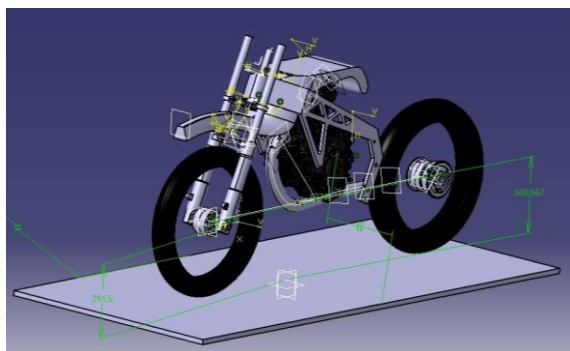


Figura 7-3: Ubicaciones posibles del Airbox.



Figura 7-4: Airbox de la III Edición de US-Racing.

Para el prototipo estudio de este documento, el equipo *US-Racing* optó por abrir unos espacios en el frente del chasis, para así poder crear un flujo completamente directo hacia la entrada del motor, evitando así cualquier pérdida derivada de la curvatura del flujo y la pérdida de la capa límite (la cual veremos en el punto 8 del presente documento), como puede verse en la Figura 7-5: Detalle del chasis. Este tipo de distribución es la más óptima en cuanto a diseño de Ram-Air se refiere, como veremos en los próximos puntos (donde se realizará el cálculo dinámico mediante Elementos Finitos).



Figura 7-5: Detalle del chasis

La ubicación escogida evita la necesidad de realizar una elevada curvatura para no producir colisiones con elementos como el radiador y la tija inferior, hecho que ha sucedido en ediciones anteriores del equipo *US-Racing*. Sin embargo, el tener un flujo directo no exime de realizar un estudio geométrico, ya que otro tipo de elementos pueden producir la incompatibilidad geométrica. En el caso aquí recogido se han tomado las aberturas del chasis como fijas, teniéndose por tanto que adecuar el prototipo a dicho espacio.

Además de esto y al igual que ocurre con el resto de piezas, el carenado de la motocicleta posee la forma y ubicación de la entrada definida. El procedimiento habitual para el diseño de un Airbox no es el que se está

siguiendo puesto que, por término general, el carenado de la motocicleta debe amoldarse a la estructura ya definida (incluyendo el Ram-Air) y ubicar los orificios en el lugar oportuno. Sin embargo, en el caso aquí propuesto, el equipo *US Racing* opta por la compra de un carenado de competición (Figura 7-6: Disposición carenado), cuya entrada de admisión está ya definida. Dicha entrada se sitúa en el centro del plano longitudinal de la motocicleta, en la zona más externa del mismo para, de esta manera, captar el aire a la mayor presión posible. Con esta ubicación de la entrada del conducto, el paso entre la horquilla es el más directo y el que produce menores pérdidas de carga, siendo el idóneo para el desarrollo de una motocicleta de competición donde cada segundo arrancado al cronómetro cuenta.

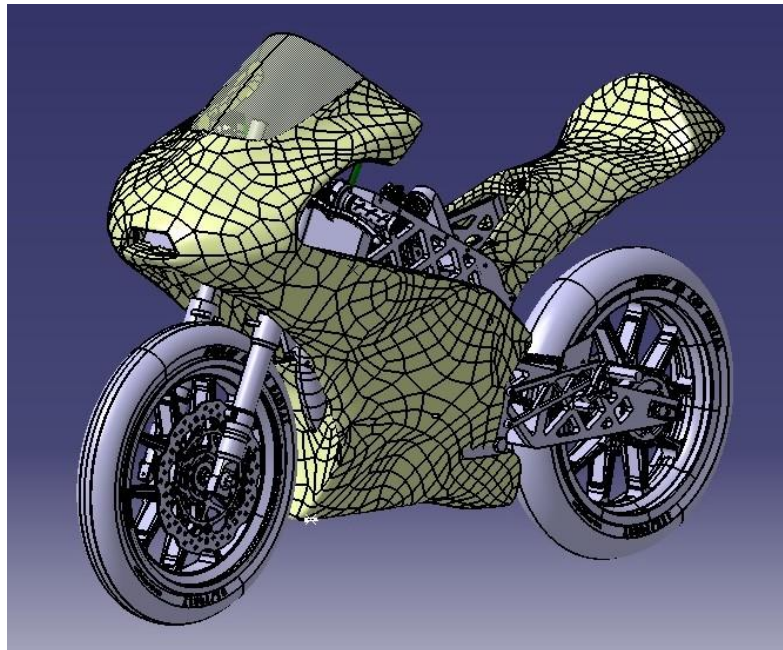


Figura 7-6: Disposición carenado

El conocimiento del valor de entrada del Ram-Air junto con la relación de áreas (20) obtenidas en el capítulo anterior permite obtener el valor del área que debe poseer la entrada de la caja de remanso:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_e = 3570,5 \text{ mm}^2 \\ \frac{A_e}{A_s} = 0,349 \end{array} \right\} \rightarrow A_s = 10230,659 \text{ mm}^2 \quad (29)$$

El dato obtenido de la ecuación (29) es el considerado para una única salida del Ram-Air (justo la entrada a la caja de remanso o Airbox). Al definir una entrada doble en el chasis para evitar la colisión con la pipa⁶ se precisa dividir el valor obtenido en la ecuación (29) entre dos salidas, ya que el área total debe ser el obtenido en la anterior ecuación:

$$A'_s = \frac{A_s}{2} = 5115,3295 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

⁶ Pipa: Elemento que funciona como eje de giro de la horquilla delantera en una motocicleta.

Por lo tanto, el área que deben poseer los conductos a la entrada del Airbox son los calculados en la ecuación (30).

Es imprescindible aclarar que, como se verá en el capítulo siguiente, el área obtenida a la salida del conducto será inviable por motivos geométricos y dinámicos.

Al estipularse la posición de la entrada de aire del carenado (ya que es un carenado de serie) y las aberturas del chasis fijas, la única posibilidad de recorrido del conducto del Ram-Air se sitúa a través de la horquilla de la suspensión delantera. El paso a través de la las mismas presenta un factor importante a tener en cuenta: el giro del manillar. Es imprescindible conocer el ángulo de giro máximo que puede llegar a producirse durante la vida de la motocicleta, ya que es un espacio que necesita estar liberado para permitir el correcto movimiento del sistema de dirección. Este valor de ángulo máximo viene reflejado en el reglamento y es el que se utilizará para tener en cuenta el espacio necesario. Al tratarse de un prototipo de competición, por término general, dichas motocicletas tomarán las curvas inclinando las mismas, para así conseguir hacer un giro a mayor velocidad. Durante dicha inclinación, el giro del manillar suele considerarse bastante pequeño, por lo que el reglamento ha estipulado que un giro de manillar desde la posición estable a la posición de giro máximo sea como valor límite 15° . Este valor será el considerado para el cálculo de espacios que no deben ocuparse.

El último aspecto destacable a tener en cuenta en el diseño geométrico del sistema estudio es el espacio requerido para el depósito de la motocicleta. Como puede apreciarse en la Figura 7-7: Conflicto con depósito, existe un espacio en el vehículo donde deben convivir la caja de remanso del sistema estudio y el depósito de gasolina de la motocicleta. La ubicación del depósito en dicho espacio viene acotada por el Reglamento de la competición, pues éste estipula que dicho sistema debe colocarse por encima de las válvulas de admisión, dejando únicamente la zona acotada en la figura:

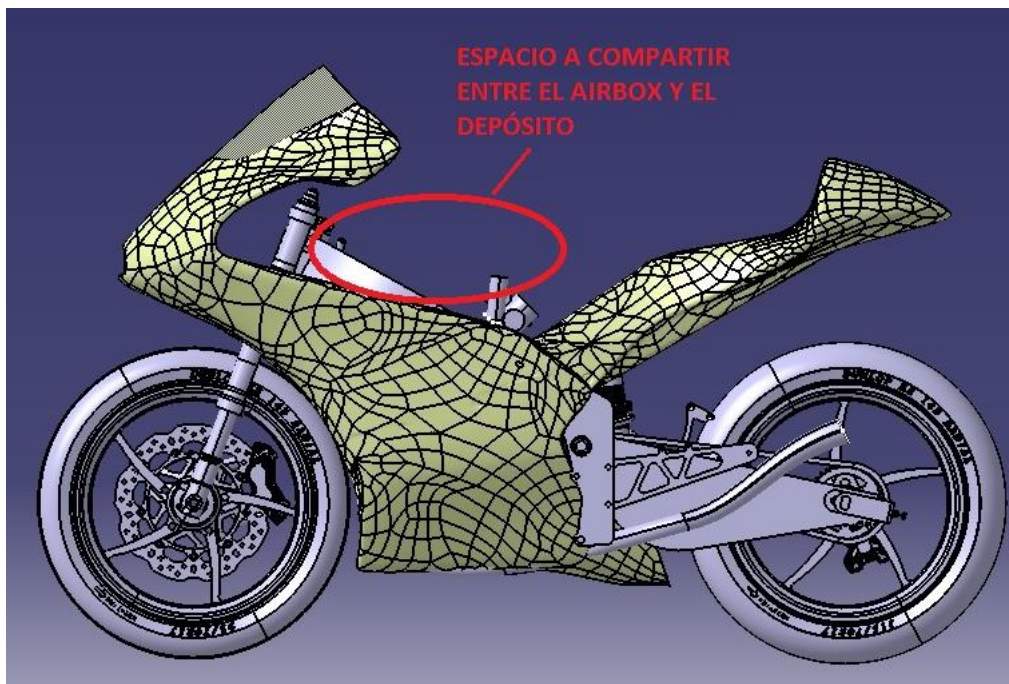


Figura 7-7: Conflicto con depósito

El depósito es de las pocas piezas que se han considerado dependientes del diseño del Airbox, sin embargo, no es viable la opción de ocupar todo el espacio disponible pues, aun teniendo libertad en cuanto al diseño, se debe dejar espacio suficiente para la colocación del depósito de gasolina.

Finalmente, cabe destacar que el diseño geométrico de la motocicleta no es una parte del diseño independiente, pues la geometría variará dependiendo de los resultados obtenidos en el ensayo de Elementos Finitos,

calculados en el próximo punto. Esto quiere decir que el diseño geométrico y los ensayos en Elementos Finitos son dos bucles realimentados, pues el cambio en uno de ellos provoca un cambio en el otro, como se verá en el capítulo siguiente.

8 ESTUDIO FLUIDO-DINÁMICO

Una vez finalizado un modelo geométrico es el momento de comprobar su validez mediante un estudio fluido-dinámico. En esta parte se pretenderá comprobar si el sistema geoméricamente compatible produce mejoras o pérdidas respecto a un modelo anterior y, de esa manera, llegar a un modelo donde cualquier variación de su geometría produzca pérdidas en el prototipo, llegando en ese caso al sistema óptimo.

El estudio fluido-dinámico se realiza a través de la herramienta informática ANSYS. Este programa es uno de los más usados en el mundo ingenieril debido a su gran posibilidad de cálculo y de condiciones de contorno posibles. Su utilización permite al usuario la elaboración y resolución de problemas del ámbito de la ingeniería a través del Método de Elementos Finitos (MEF) o, en el caso que aquí se recoge, mediante el Método de Volúmenes Finitos, facilitando el complejo cálculo de las ecuaciones del campo de los fluidos. En el problema expuesto en este documento se usará uno de los muchos módulos que conforman la herramienta: FLUENT. Este nos permite resolver problemas relacionados con la dinámica y el movimiento de los fluidos en el interior de un volumen de control, ya sea una tobera o el flujo de aire que rodea a un cohete en su desplazamiento.

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, el diseño geométrico y el estudio fluido-dinámico son dos bucles realimentados. Obtenido un diseño, a este se le realiza un estudio fluido-dinámico y, a la vista de los resultados, se modifica si procede el diseño geométrico. Éste es el caso que se puede visualizar en la Figura 8-1: Efecto del desprendimiento de la capa límite. Cabe destacar que dicha ilustración pertenece al modelo de la 3ª edición del equipo *US Racing*. Tras un primer diseño aplicando el tamaño de áreas obtenido de la ecuación (30) se puede observar que se produce un desprendimiento de la capa límite. Este efecto se puede observar gracias a las líneas de colores de la figura antes mencionada, las cuales representan el movimiento de una partícula fluida en su recorrido por la tobera. El desprendimiento de la capa límite es un efecto indeseado debido a que produce un movimiento de turbulencias y estas afectan al gradiente de presiones en el interior del conducto de forma negativa. Dichas presiones pueden incluso provocar un cambio en el sentido del flujo, generando grandes pérdidas de potencia al llevar al flujo en dirección opuesta a la deseada.

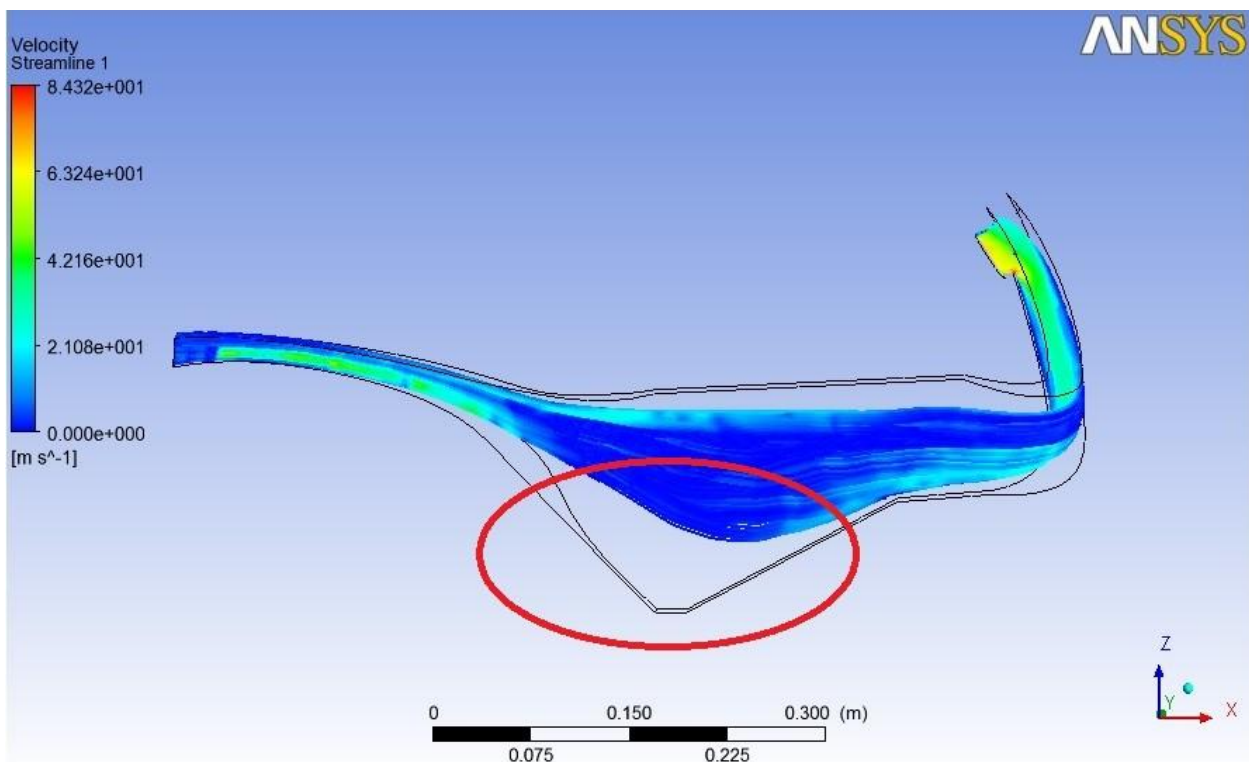


Figura 8-1: Efecto del desprendimiento de la capa límite

La forma de evitar este tipo de problemas es mediante la reducción de áreas o la modificación de la trayectoria del conducto. En el caso que recoge este documento puede comprobarse, por definición de los capítulos anteriores, que el Ram-Air tiene la trayectoria lo suficientemente rectilínea como para ser la causa de dicho desprendimiento. De esta manera la solución para evitar el efecto del desprendimiento de la capa límite es el de disminuir el área de salida de los conductor, creando una transición más suave entre entrada y salida, facilitando que el fluido se adapte a cada sección del sistema.

8.1 Definición geométrica y mallado

Lo primero que se debe de hacer una vez definido un modelo geométrico es la indicación de la abertura de entrada, la abertura de salida y las paredes del sistema (Figura 8-2: Definiciones geométricas en ANSYS respectivamente). De esta manera, la herramienta tendría en cuenta por donde se introduce el flujo de aire y por donde debe de salir, además de las zonas por las que no puede circular flujo (pared). Esto define la forma en la que el flujo debe comportarse en contacto con dicho elemento:

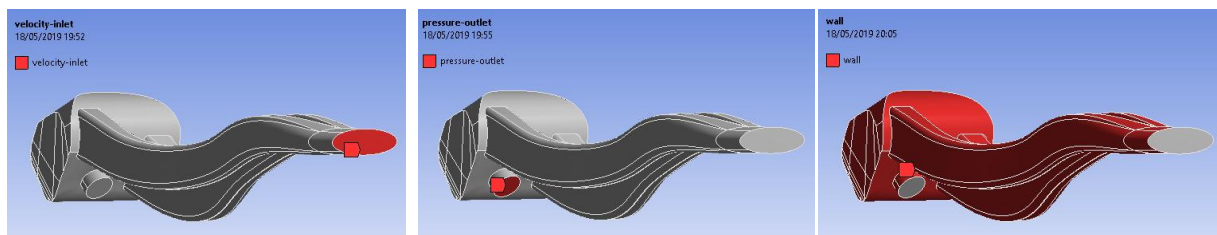


Figura 8-2: Definiciones geométricas en ANSYS

Tras la definición geométrica dentro del programa de cálculo, se procede a la generación del mallado del volumen de control. En el cálculo mediante Volúmenes Finitos, dicho mallado consiste en la subdivisión de nuestro sistema en pequeños paquetes de volumen donde en dicha porción de volumen, se realizan los cálculos necesarios para la obtención de los resultados precisos para un buen estudio del sistema. Esto permite un estudio local con una dificultad más reducida, facilitando de esta manera el cálculo general del sistema estudio.

El cálculo local de cada paquete repercute en el resultado de los paquetes adyacentes, llegando así al cálculo global de la pieza. Un buen mallado de un sistema repercute en el tiempo de cálculo y de la calidad de los resultados obtenidos, siendo menor el tiempo de cálculo y mayor calidad de resultados cuanto mejor sea el mallado. Un buen mallado puede consistir en aumentar el número de paquetes de volúmenes en las zonas más complejas (paquetes más pequeños) y menor número de ellos en las zonas más sencillas del sistema estudio (paquetes más grandes).

Conocido lo que significa la realización del mallado, en la Figura 8-3: Mallado del sistema se puede observar el obtenido para el sistema estudio. Como puede observarse, existe una mayor subdivisión del volumen en las zonas de unión, tanto entre los conductos como entre los conductos y la caja. Dichas zonas son geometrías complejas ya que la circulación del fluido por dichas secciones debe producir una variación en la trayectoria que poseían, por lo que se toma como bueno dicho mallado. Sin embargo, lo que puede visualizarse en la figura antes mencionada es el límite de aquellas porciones de volumen que están en contacto con la superficie y, al tratarse de volúmenes es necesario conocer su distribución por el interior del sistema. Para este caso, la herramienta permite realizar un corte en el sistema estudio para, de esta manera, poder visualizar la distribución de los paquetes volumétricos del interior del prototipo, comprobando de esta manera la correcta subdivisión del mismo. Dicha distribución interna se puede ver en la Figura 8-4: Sección del mallado interno

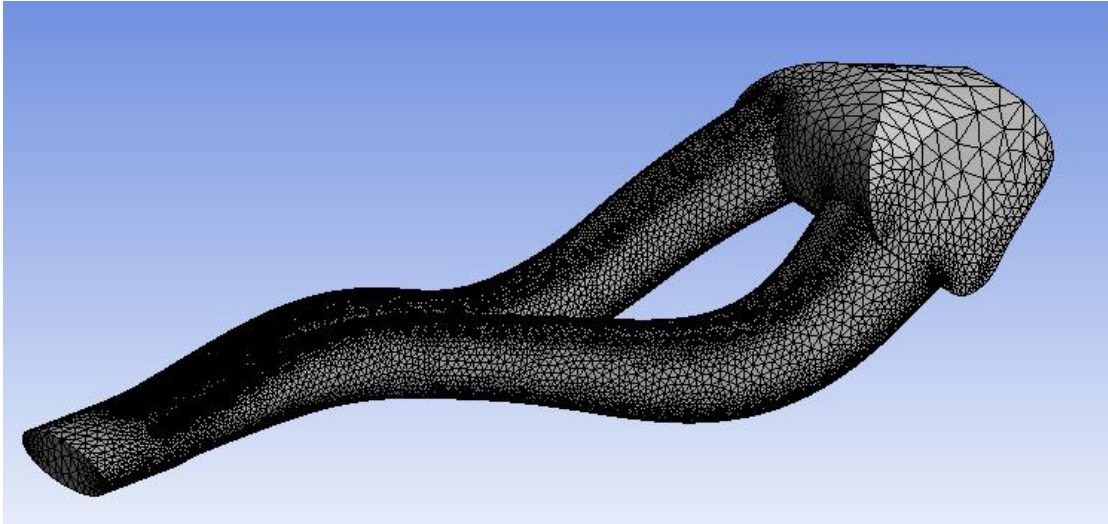


Figura 8-3: Mallado del sistema

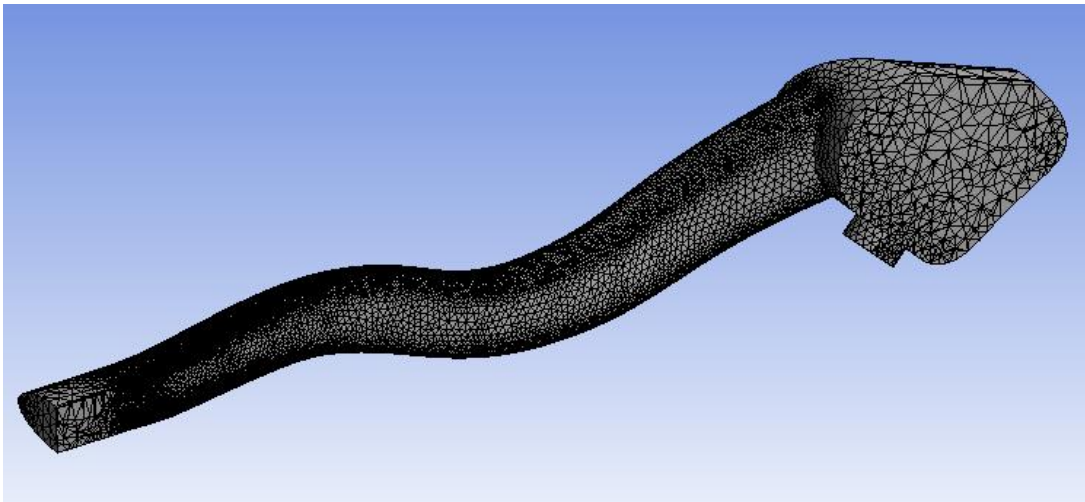


Figura 8-4: Sección del mallado interno

Una vez generada la malla del sistema estudio, el siguiente paso será la aplicación de las condiciones de contorno que afectan a nuestro sistema para así poder obtener las distribuciones de presiones y de velocidades del prototipo.

8.2 Condiciones de contorno y método de resolución

Previo a la inserción de las condiciones del contorno del sistema es preciso definir el tipo de método de cálculo a realizar. Esta elección está ligada al cálculo del número de Reynold, pues dicho valor es el que nos indica si un fluido posee flujo laminar o turbulento, del cual dependen los cálculos a realizar. Al calcular dicho número, si su valor se encuentra por debajo de 2300 ($Re < 2300$) estaríamos ante un flujo laminar, en caso contrario ($Re > 2300$) el flujo sería turbulento:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1,184 * 50 * 0,0526}{1,8 * 10^{-5}} = 172995,56 \gg 2300 \rightarrow \text{Turbulento} \quad (31)$$

La correcta aplicación de las condiciones de contorno y del método de resolución es algo primordial para la obtención de resultados buenos y correctos del problema a resolver. Para dicha resolución es necesario conocer las ecuaciones que dominan la mecánica de fluidos de nuestro sistema, las cuales son las ecuaciones de Navier-Stock para flujos incompresibles e isotermos⁷. Esta premisa es aplicable como se vino demostrando en capítulos anteriores ya que, el movimiento se produce a bajo números de Mach unido a variaciones térmicas dentro del dispositivo no muy elevadas. Además de esto, de la estimación del número de Reynolds del problema se deduce que el flujo es turbulento, por lo que teniendo en cuenta todas estas premisas se usará un modelo turbulento para cerrar el problema. Dentro de las posibilidades que proporciona el programa, se ha decidido usar un modelo de *k-epsilon* (Figura 8-5: Modelo k-epsilon).

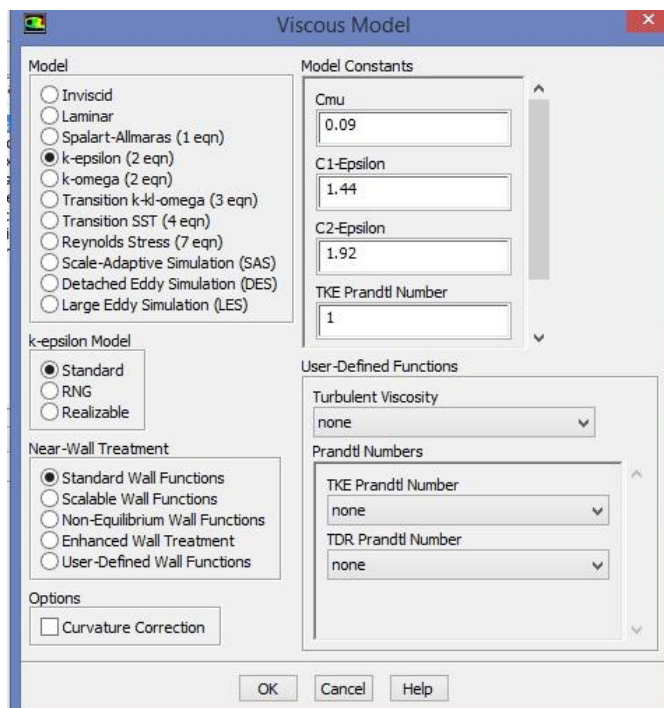


Figura 8-5: Modelo k-epsilon

Definido el modelo a utilizar, es necesario establecer las condiciones de contorno que afectan al sistema estudio:

- Caudal de aire impuesto a la entrada con una velocidad constante de $180 \frac{km}{h}$ ($50 \frac{m}{s}$).
- Condición de no deslizamiento en las paredes sólidas.
- A la salida se asume presión constante.

Aportada toda esta información, la herramienta informática ANSYS puede comenzar los cálculos para obtener una solución del sistema. La forma de obtener dicha solución es a través de un proceso iterativo en el que se van resolviendo las ecuaciones de forma secuencial hasta que el sistema converja a una solución. El programa

⁷ Demostrado en el apartado 6.3.

usa una linealización tipo Picard para resolver ecuaciones de forma desacoplada. Es bien sabido que este tipo de linealización es inestable, por lo que hay que estabilizarlo con factores de relajación. Para los cálculos realizados se usaron los valores que por defecto proporcionaba el programa.

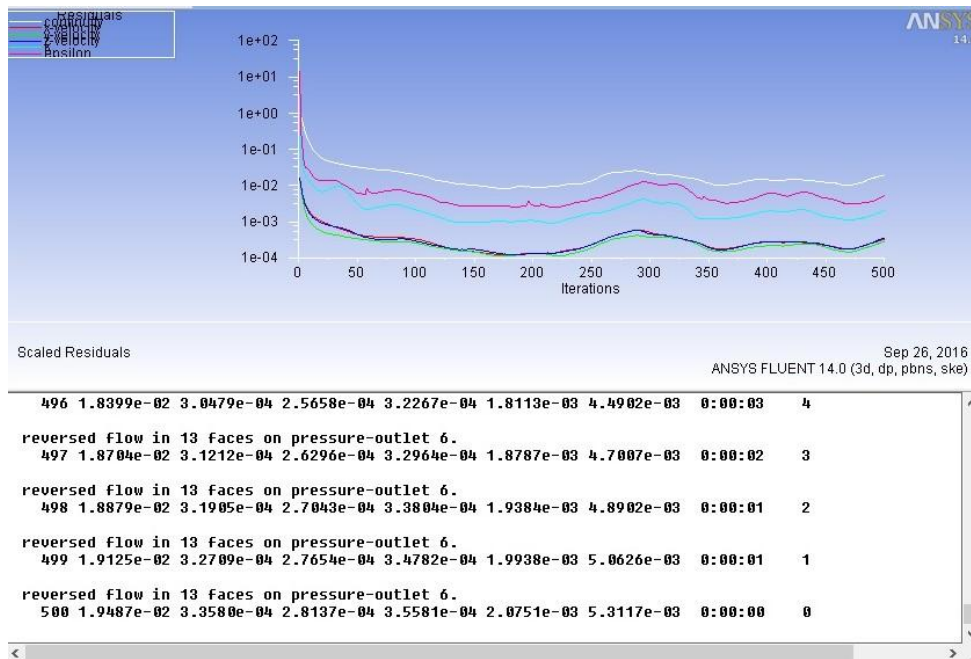


Figura 8-6: Cálculo de soluciones

La Figura 8-6: Cálculo de soluciones muestra lo que refleja el programa en cada proceso iterativo, representado en el eje x el número de la iteración y en el eje y el valor residual obtenido. En esta ilustración tipo puede comprobarse que en 500 iteraciones se ha llegado a unos valores constantes de los valores residuales, por lo que se habría llegado a la solución del problema.

8.3 Post-procesado o visualización de los resultados

Tras completarse el número de iteraciones necesarias para obtener la solución al sistema planteado, se procede a la visualización de las magnitudes físicas que permiten comprobar si el prototipo estudiado produce mejoras o pérdidas en el sistema global. Esto se hace a través del Post-procesado, incluido como paso final dentro del módulo FLUENT de la herramienta ANSYS.

Dentro de todas las magnitudes que pueden representarse en el módulo anteriormente mencionado, la más importante de ellas para el presente documento es la magnitud de la presión estática, seguida de la velocidad del flujo. La primera de ellas es considerada la que mayor peso posee debido al fin último que tiene la pieza a diseñar. Como se dijo en capítulos anteriores, un sistema Ram-Air busca el incremento de la presión estática a la entrada de las válvulas de admisión, por lo que poder visualizar dicha magnitud es considerado primordial para su correcta valoración. Seguida de esa magnitud se encuentra la velocidad. Como se verá en imágenes posteriores, la herramienta permite visualizar el flujo y detectar problemas, como los ya mencionados, pérdidas de la capa límite, turbulencias, etc.

A partir de este punto, todas las figuras y valores mostrados son los pertenecientes a la pieza estudio definitiva, la cual se obtendría tras un largo proceso iterativo hasta llegar al modelo óptimo, el cual se llevaría a

fabricación y a su posterior montaje en la motocicleta.

La trayectoria que posee el flujo a su paso por el interior del prototipo diseñado se puede ver en la Figura 8-7: Trayectoria del flujo. En dicha figura, las líneas de colores representan el movimiento de una partícula fluida a través del sistema, representando el color de la línea el valor de la velocidad en ese punto. Como puede observarse, apenas existe desprendimiento de la capa límite, por lo que las pérdidas debido a tal efecto pueden considerarse inexistentes. Esto se debe a que el área de los conductos a la entrada del Airbox es menor del que se había calculado, ya que producía excesivas pérdidas debido a tal efecto. Además de esto, la velocidad a la entrada de las válvulas puede comprobarse que es muy elevada respecto al resto del sistema, efecto buscado para el prototipo.

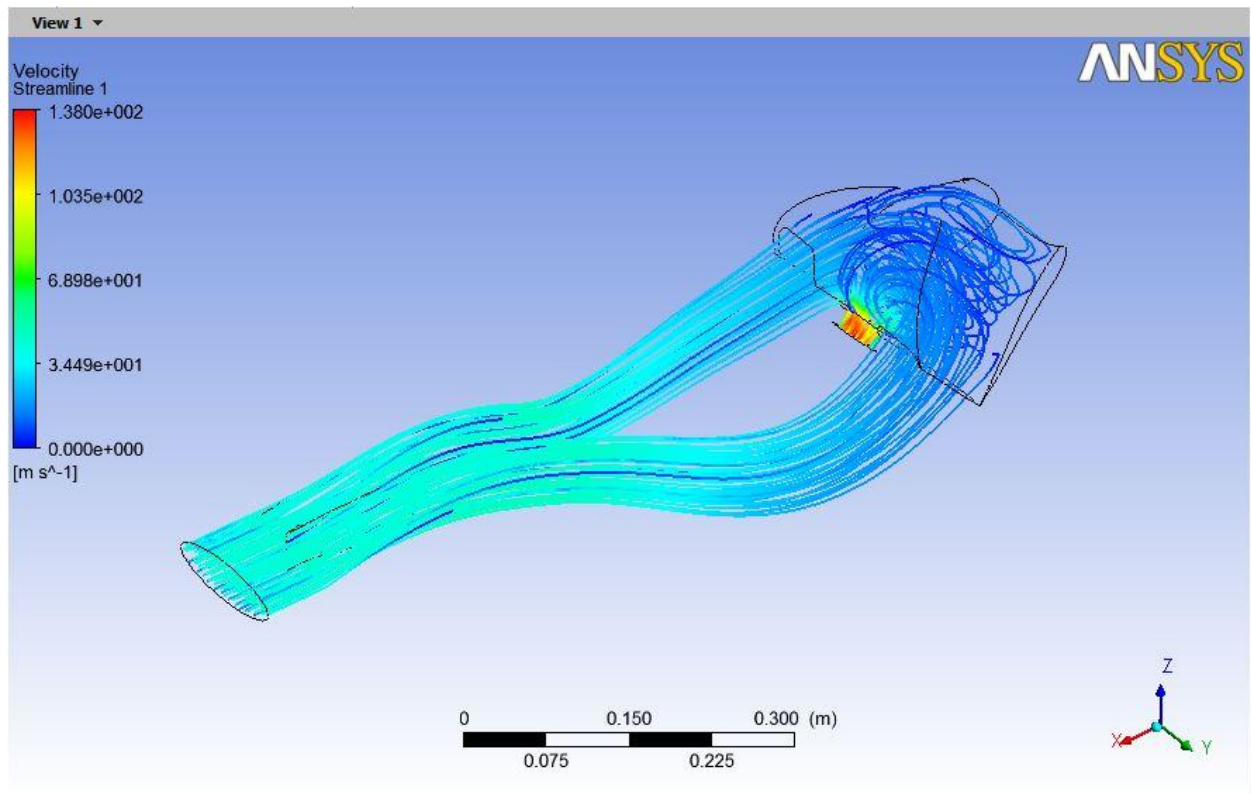


Figura 8-7: Trayectoria del flujo

Como se ha mencionado, debidos a problemas geométricos y dinámicos se ha precisado la disminución del área de salida del Ram-Air, lo que conlleva una disminución de la ganancia de presión y, por consiguiente, una disminución de la potencia aportada a la motocicleta. El cambio propuesto permite calcular la nueva ganancia de presión a través de la ecuación (19):

$$\frac{A_e}{A_s} \sim 0,57 \quad (32)$$

$$\Delta p \sim 1000 \text{ Pa} \quad (33)$$

Una vez conocida la distribución de velocidades, es el momento de hablar del gradiente de presiones del sistema estudio. En la Figura 8-8: Distribución de presiones globales puede observarse la distribución de presiones globales en un plano interior del Airbox. En dicha figura, es inevitable observar que no existe apenas variación de presión a lo largo del conducto. Sin embargo, esta apreciación no es del todo correcta. La herramienta de cálculo adecúa los ejes de identificación con un orden entre el valor máximo encontrado y el mínimo. Al existir gran diferencia entre el valor máximo de presión (ubicado en la caja de remanso) y el

mínimo (a la salida de nuestro sistema), la variación dentro de los conductos es menor, por lo que la identificación de colores los toma como iguales. En la Figura 8-9: Distribución local de presiones se ha representado el gradiente de presiones locales, usando como valores máximos el obtenido en la caja de remanso y el menor el obtenido a la entrada del conducto. En dicha figura puede observarse de manera más precisa cómo es la distribución de presiones a lo largo del sistema.

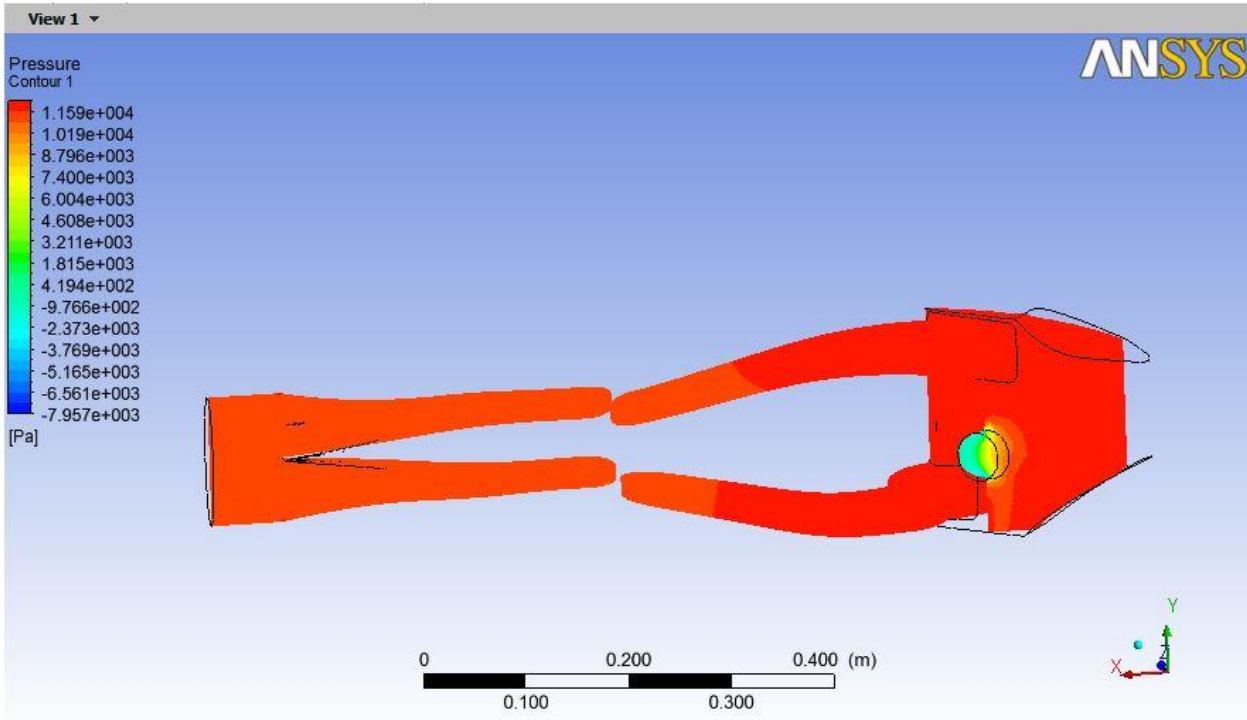


Figura 8-8: Distribución de presiones globales

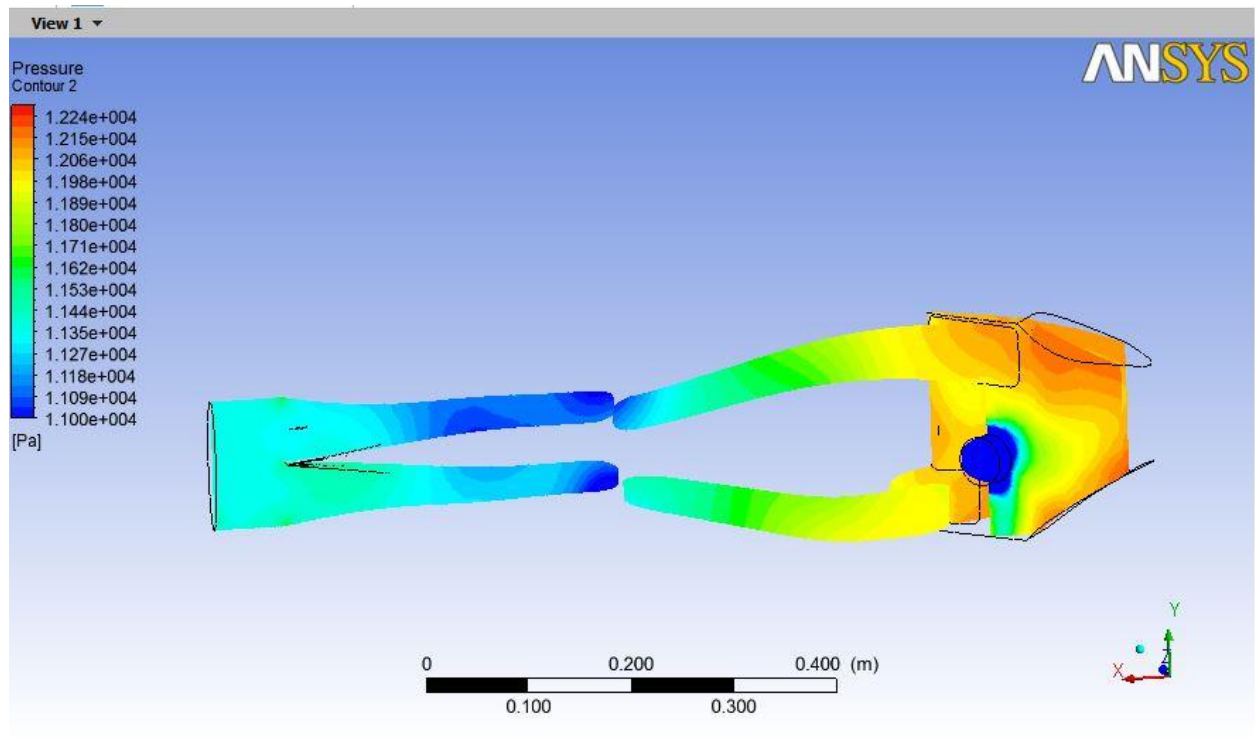


Figura 8-9: Distribución local de presiones

Cabe destacar de la figura anterior el decrecimiento de la presión al inicio de los conductos. Este efecto se produce debido a que el área de paso a través del chasis es menor que el de la propia entrada del sistema estudio, produciendo un ligero aumento de la velocidad y su correspondiente disminución de la presión estática. Este tipo de tobera es la conocida como convergente-divergente, ya que busca un aumento de la velocidad al principio del sistema, para después provocar su disminución y aprovechar mejor el efecto Ram.

Obtenida la distribución de presiones se puede calcular la ganancia de presión obtenida, situándose ésta en un valor:

$$\Delta p \sim 902 \text{ Pa} \quad (34)$$

Dicho valor está cerca del calculado teóricamente, por lo que se tomará el diseño como bueno y se seguirá con su proceso de fabricación.

9 DISEÑO FINAL

Llegados a este punto, existe un sistema que cumple, en mayor medida, con todas las restricciones geométricas, además de obtener buenos resultados en el estudio fluido-dinámico del apartado anterior. En la Figura 9-1: Volumen de control definitivo se puede apreciar el prototipo en el cual se ha estado realizando cada ensayo y cada modificación, sin embargo, lo que se aprecia en dicha figura dista de ser la pieza a incluir en el prototipo. En la Figura 9-1: Volumen de control definitivo lo que puede apreciarse es el volumen de control por donde puede circular el flujo de aire estimado, por lo que la pieza que se precisa fabricar debe envolver dicho volumen para que, de esta manera, lo que atraviese a la pieza estudio coincida con el valor de volumen y áreas calculados en los apartados precedentes.

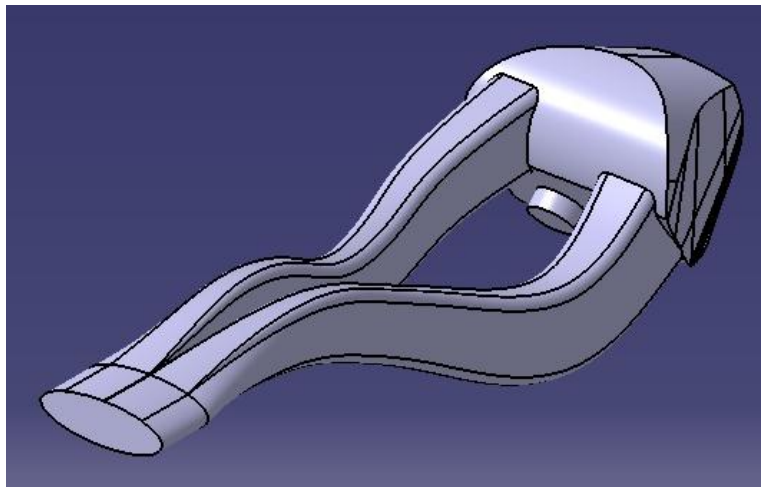


Figura 9-1: Volumen de control definitivo

Para seguir avanzando en el proceso de construcción de nuestro sistema estudio es necesario conocer el material del que se fabricará el prototipo, ya que dependiendo de esto se precisará un espesor u otro de capa, traduciéndose en un mayor o menor tamaño del prototipo. Para el caso que se desarrollará en este documento, el material utilizado será la fibra de carbono. Este compuesto es comúnmente utilizado en el mundo de la competición, ya que es un material cuya relación resistencia mecánica-peso es muy elevada, es decir, es un material capaz de resistir elevadas cargas pero su peso es muy reducido, características objetivo en el mundo de la competición. En la actualidad, la fibra de carbono no se usa exclusivamente para elementos aerodinámicos, sino que también se ha realizado estudios como piezas estructurales dentro de una motocicleta (como por ejemplo el chasis o el basculante).

La fibra de carbono es un elemento compuesto, en el que fibras de carbono entrelazadas unidas mediante la adición de una resina, la cual produce la rigidez del conjunto, se unen para formar un elemento compuesto, no llegando a un milímetro de espesor por cada capa. La pieza estudio es un elemento el cual no se encuentra bajo las acciones de esfuerzos externos, ya que únicamente está apoyado en sus dos extremos y la vibración del motor es el único agente externo que produce cargas. Dichas cargas poseen un valor máximo de fuerza muy reducido y una frecuencia de acción muy elevada, por lo que se puede deducir que no sufrirá aparentes cargas. Todo esto nos lleva a que con el uso de dos capas de dicho material sería suficiente para garantizar la integridad del sistema. Un número mayor de capas innecesarias produce un aumento en el peso total del sistema, lo que contradice con lo buscado en un prototipo de competición (búsqueda de reducción de peso para maximizar la potencia).

Conocidos todos estos datos se puede proceder al diseño final del sistema estudio. En el caso de este documento se ha decidido la división del sistema en cuatro partes perfectamente diferenciadas, como puede

verse en la Figura 9-2: Explosionado del diseño final: la pieza en color rojo y verde representan la caja de remanso o Airbox (parte superior e inferior respectivamente), el elemento amarillo lo constituyen los conductos de entrada o Ram-Air y, finalmente, la pieza azul representa la trompeta de admisión.

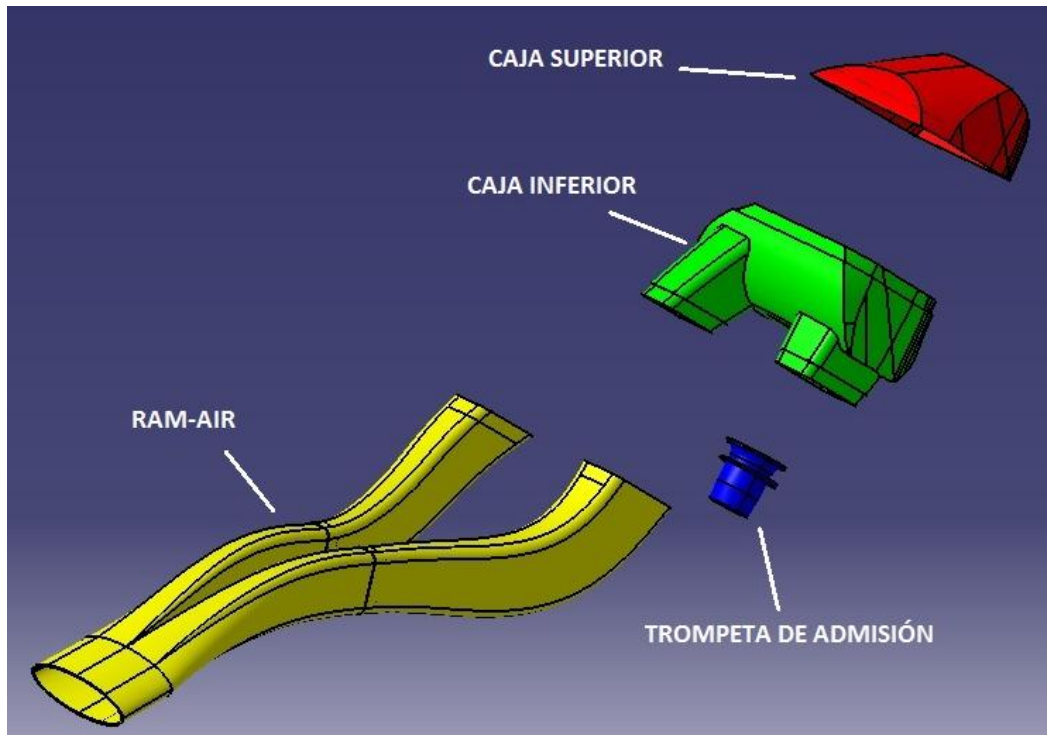


Figura 9-2: Explosionado del diseño final.

La trompeta de admisión se inserta en la caja inferior desde el interior de la misma mediante uniones atornilladas. El hecho de separar esta pieza de la caja de remanso es con el fin de poder realizar ajustes en la altura de dicha pieza, permitiendo un mejor acondicionamiento y estanqueidad del conjunto dentro de la motocicleta. Además de la necesidad de tener que introducir la trompeta de la admisión por el interior del Airbox, otra razón para separar los dos compartimentos de la caja es para poder colocar el filtro de aire impuesto por el Reglamento de la competición. Esto impide que partículas de gran tamaño se introduzcan en el interior del motor, hecho que si llegara a producirse podría provocar el colapso del mismo.

En cuanto al método de unión entre las distintas partes del sistema no se usará un único método, pues cada parte posee una estructura determinada a la que le conviene un determinado tipo de unión, garantizando de esta manera un mejor acoplamiento y una mejora de la estanqueidad del conjunto, elementos indispensables para una pieza de este tipo. La unión entre el Ram-Air y la caja inferior se realiza mediante una conexión macho-hembra bajo presión, dejando entre ambas piezas una junta que garantiza la estanqueidad en la unión. Respecto a la trompeta de admisión, como se ha dicho antes, la conexión será atornillada, para permitir un fácil intercambio entre posibles alturas de dicha pieza además de proporcionar una resistencia mayor, característica necesaria debido a la proximidad con el motor (elemento que provoca la mayor parte de las vibraciones que recibirá el sistema estudio). En cuanto a la conexión entre ambas partes de la caja, se precisa una unión rápida que garantice la estanqueidad, ya que para poder acceder tanto al filtro como a la trompeta de admisión, se precisa que la unión no sea mediante presión, por lo que se opta por una unión con un tornillo y una junta alrededor de las caras de la misma.



Figura 9-3: Montaje del prototipo en la motocicleta.

En la Figura 9-3: Montaje del prototipo en la motocicleta. se puede comprobar el montaje final de un prototipo de la pieza fabricado mediante la actualmente muy utilizada impresión 3D, con el fin de comprobar realmente las incompatibilidades geométricas y probar su correcto funcionamiento.

10 FABRICACIÓN

El proceso de fabricación tiene un gran peso en cuanto a piezas de competición se trata, pues se necesitan características que ayuden a mejorar la potencia del prototipo en su conjunto sin renunciar a aspectos como la resistencia o el bajo peso. Como se ha explicado en capítulos anteriores, un material muy utilizado en la ingeniería de competición desde hace varios años y hasta la fecha es la fibra de carbono. Este material es un material compuesto, es decir, adquiere las mejores propiedades de dos elementos distintos, características que no se conseguirían con los materiales originales. Los materiales compuestos suelen estar formados por una matriz y por fibras. La primera de ellas tiene carácter continuo y actúa como transmisora de cargas, además de proteger y dar cohesión al material. Es la encargada de aportar las propiedades física y químicas. Por otro lado están las fibras o fase reforzante, encargadas de aportar las propiedades mecánicas al conjunto. Son un medio discontinuo ya que se disponen forma de líneas o fibras. En el caso de la fibra de carbono, las fibras estarían formadas por hilos de carbono en forma de hebra entrelazados generalmente a 90° (es la disposición más general, pudiéndose colocar de otras maneras para conseguir una mayor resistencia hacia una determinada dirección) y por una matriz de resina epoxi, la cual otorga a la fibra la consistencia necesaria y la protección que precisa. El resultado es un material de alta resistencia (llegando a triplicar la resistencia del acero) y de baja densidad, lo que repercute en un menor peso, por lo que tendríamos un material con una gran resistencia y poco peso, resultando idóneo para el mundo de la competición.

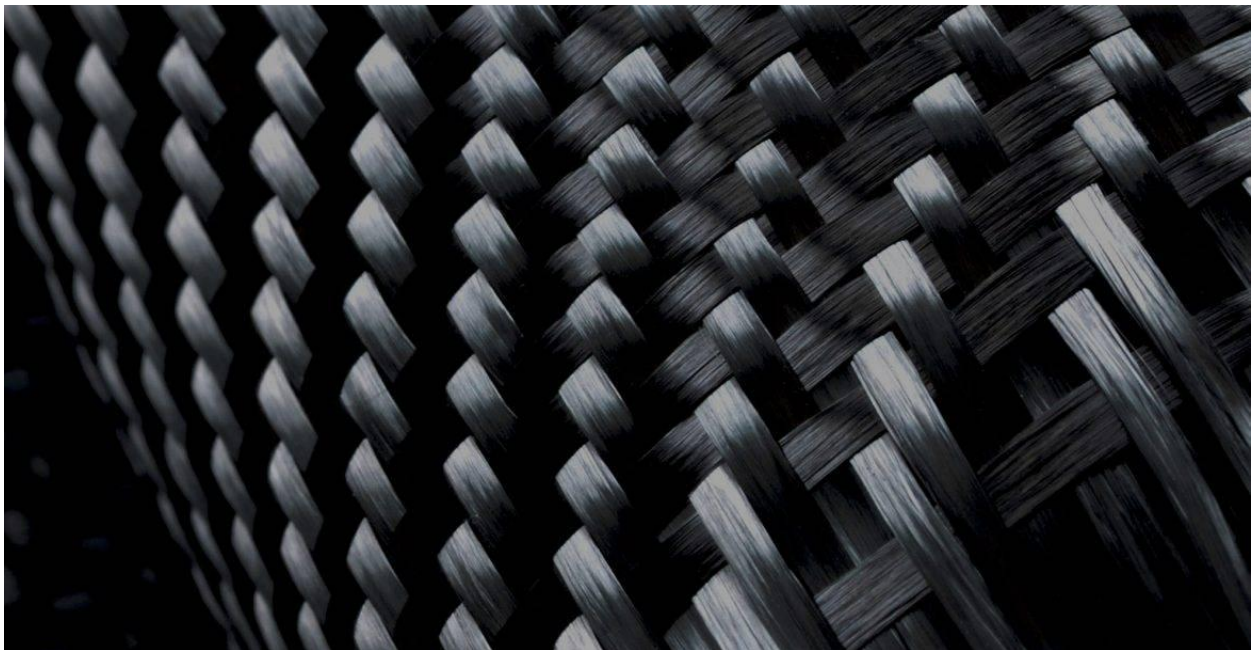


Figura 10-1: Fibra de carbono

La obtención de fibra de carbono se puede hacer a través de diferentes tipos de métodos. En el presente documento se utilizará un método que se lleva usando desde hace unos años atrás: el método por infusión en vacío. Este método innovador a "molde cerrado" es un proceso que consiste en la succión mediante una bomba de vacío de una resina epoxi para garantizar una mejor adherencia a la malla de fibra. Capas de fibras de carbono alternadas con capas de resina e introducidas junto al molde en el interior de una bolsa es lo necesario para realizar este método de fabricación. En la Figura 10-2: Esquema método por infusión en vacío y en la Figura 10-3: Ejemplo real del método por infusión en vacío se puede observar el método por infusión en vacío mediante un esquema y su puesta en marcha en la realidad respectivamente:

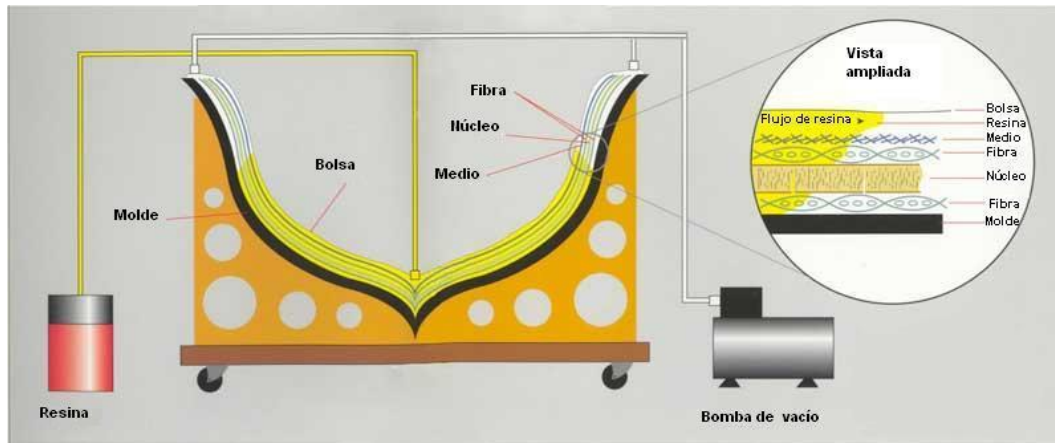


Figura 10-2: Esquema método por infusión en vacío



Figura 10-3: Ejemplo real del método por infusión en vacío

Mediante el empleo de este tipo de método de fabricación en fibra de carbono se le dota a la pieza estudio una mejora en sus propiedades. El método por infusión en vacío reduce la cantidad de resina a utilizar debido a que al ser una bomba de vacío la encargada de succionar la resina, ésta eliminará toda la resina que se producía en exceso mediante otros métodos. Esto provoca que la pieza obtenida por dicho método reduzca considerablemente su peso y espesor, aspecto que actúa del mismo modo en la densidad del producto, dotando de una mejor relación resistencia/peso. Además de lo anterior, mediante el método por infusión en vacío la pieza adquiere un mejor acabado superficial y, al ser un proceso rápido, también provocaría un aumento de la producción si se produjera la fabricación en serie [18].

Todas estas características hacen del método por infusión en vacío el ideal para la fabricación de un Ram-Air como el recogido en este documento.

Decidido el método de fabricación a utilizar, se continúa con los moldes necesarios para llevar a cabo dicho proceso. En el caso que recoge este documento, se ha decidido la realización de 6 moldes en madera,

correspondientes a dos de ellos para la fabricación de los conductores de entrada, dos más para cada parte de la caja respectivamente, y los dos últimos para la fabricación de las trompetas. El hecho de utilizar dos moldes para los conductos de entrada y otros dos para las trompetas, radica en la forma que los caracteriza. Al ser piezas cerradas y con curvaturas irregulares no permitiría la extracción del molde tras su producción, por lo que la forma más sencilla de solventar dicho problema es a través de la fabricación de las piezas en dos partes y proceder a su unión una vez confeccionadas.

El uso de la madera como molde para la obtención de las piezas anteriormente dichas, radica principalmente en el aspecto económico. La madera es un material que no va a producir deformaciones tras la aplicación de vacío, por lo que resulta el material idóneo para el uso como molde. Como puede verse en la de la pasada 4ª Edición de *US-Racing*, secciones de 3mm de espesor en madera y tras un lijado para eliminar cualquier posible discontinuidad en la superficie daría lugar a los moldes buscados.



Figura 10-4: Molde 4ª Edición *US-Racing*

Tras el proceso de fabricación sólo quedaría la incorporación del prototipo a la motocicleta (Figura 10-5: Montaje final), llegándose así al final del proceso de diseñar, estudiar y fabricar un sistema Ram-Air para la participación en la competición internacional *Motostudent*.



Figura 10-5: Montaje final

11 CONCLUSIONES

Los sistemas Ram-Air son una buena manera de sacarle potencia al motor, sin embargo no es una tarea fácil. La necesidad de realizar procesos iterativos hasta alcanzar una solución viable puede resultar ser un camino largo y tedioso, puesto que cualquier pequeña modificación, ya sea en la trayectoria del flujo o en la relación de áreas, puede provocar la aparición de pérdidas de carga como son los reflujos o el desprendimiento de la capa límite. Dichos efectos, como hemos visto a lo largo del presente trabajo, son indeseables ya que producen una disminución de la ganancia de presión y, por consiguiente, una menor ganancia de potencia por parte del motor.

En el caso aquí recogido, las dificultades geométricas presentes en el prototipo global han mermado de forma considerable la posibilidad de elaborar un dispositivo capaz de producir mayores ganancias de presión. Sin embargo, teniendo en cuenta el poco espacio disponible, las ganancias obtenidas en el modelo final son más que satisfactorias. Cualquier pequeña modificación del modelo desemboca en unos resultados menos óptimos que los obtenidos en el modelo final, por lo que una forma de mejora del diseño aquí estudiado sería la posibilidad de modificar la geometría del resto de elementos de la motocicleta. Aunque para el modelo de la presente edición se ha avanzado en cuanto al aprovechamiento de unos orificios en el frente del chasis, el espacio requerido por el depósito de combustible ha imposibilitado un mejor aprovechamiento de las relaciones de áreas calculadas.

Cabe destacar que uno de los problemas encontrados en este trabajo ha sido la imposibilidad de variación de la entrada del conducto del Ram-Air, pues venía impuesta por el carenado de la motocicleta. Las distintas posibles formas de entrada dan unas características u otras al flujo que lo atraviesa, pudiendo mantener el área de entrada el mismo valor y, por consiguiente, la relación de áreas obtenida de la ecuación (19). Esto nos abre el abanico de posibles soluciones dependiendo del área de entrada del sistema, por lo que un estudio de cómo afecta la forma del conducto de entrada al flujo de aire sea un camino a tener en cuenta en futuros diseños del sistema estudiado.

Otro aspecto destacable dentro del presente documento es el relacionado con la longitud obtenida a través de las ecuaciones de resonancia. Inicialmente, el resultado obtenido resultó ser excesivamente largo para cualquier motocicleta de similares características a la estudiada. Tras disminuir dicha longitud a la cuarta parte, la meta de longitud seguía resultando difícil de alcanzar, ya que al ser el espacio disponible excesivamente pequeño y la imposibilidad de desplazar el motor y la entrada de aire según la conveniencia, no ha existido demasiado margen de maniobra, por lo que se ha intentado adaptar a dicha longitud lo máximo permitido. Esto nos lleva a que la obtención de dicha distancia resulta difícil de implementar en los prototipos, no llegando a ser imposible si se permitiera la modificación de las disposiciones del resto de elemento del prototipo.

En relación a la última etapa del desarrollo del sistema estudio (la fabricación), debemos hacer hincapié en el tipo de molde empleado. Por motivos económicos, los moldes de la motocicleta en cuestión se realizan en madera DM. Este aglomerado permite realizar el diseño estudiado en este trabajo, necesitando posteriormente un proceso de lijado para conseguir que la superficie de contacto sea lo más uniforme posible. Este proceso requiere gran cantidad de trabajo por lo que un aspecto mejorable en cuanto a la fabricación de la pieza es la utilización de materiales plásticos extruidos mediante impresora 3D, dado que la pieza obtenida mediante este proceso posee un gran acabado superficial sin necesidad de lijado posterior.

A diferencia de ediciones anteriores, se ha incorporado un prototipo de la pieza estudio fabricado a través de métodos de fabricación aditiva, por lo que podría llegar a utilizarse como moldes para la fabricación en fibra de carbono, como se ha estipulado anteriormente.

Finalmente, un aspecto interesante como posible mejora del proyecto sería el estudio de otros materiales más resistentes y con menor peso que la fibra de carbono, como podría ser el Keblar o cualquier otro material por estudiar.

REFERENCIAS

- [1] Usrengineering.com, «Us-Racing 2018,» <http://www.usrengineering.com/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2018].
- [2] Motostudent.com, «Motostudent 2018». <http://www.motostudent.com/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2018].
- [3] "Diseño, estudio y fabricación de un sistema Ram-Air para una Moto3" por Rafael Ángel Carbajo Moraira.
- [4] Real Academia Española, <<Motocicleta>> <http://dle.rae.es/?id=PwKxWOu> . [Último acceso: 30 Diciembre 2018].
- [5] Real Academia Española, <<Automóvil>>. <http://dle.rae.es/?id=4Tpk0J8> . [Último acceso: 30 Diciembre 2018].
- [6] Beevoz.com, <<Historia de la motocicleta: orígenes, evolución y tipos>>. <http://www.beevoz.com/2015/04/08/historia-de-la-motocicleta-origenes-evolucion-y-tipos/> . [Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [7] Totalmotorcycle.com, «The History and Future of Motorcycles and motorcycling - From 1885 to the Future. Electric, Gas, Diesel, Hybrid Motorcycles,». <http://www.totalmotorcycle.com/future.htm#1800s>. [Último acceso: 30 Diciembre 2018].
- [8] Motogp.com, <<Historia>>. <http://www.motogp.com/es/Inside+MotoGP/Historia> [Último acceso: 30 Diciembre 2018].
- [9] Pasión Motos Club, <<Motociclismo de velocidad>>:
<https://pasionmotosclub.blogspot.com.es/2015/09/motociclismo-de-velocidad.html> [Último acceso: 30 Diciembre 2018].
- [10] Motociclismo.es <<Sistema aerodinámico Ram-Air: funcionamiento>>:
<http://www.motociclismo.es/noticias/industria/articulo/el-ram-air> [Último acceso: 2 Enero 2019].
- [11] Full Mecánica <<Efecto Ram>>: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/e/374-efecto-ram> [Último acceso: 2 Enero 2019].
- [12] Heisler Heinz, Advanced engine technology, 1st. Ed., Great Britain, Society of Automotive Engineers, 1995.
- [13] Diego Vinicio Díaz Sinche, Jose Ignacio Hurtado Matute, Paúl Andrés Molina Campoverde y Jose Fernando Valarezo Ordoñez, Diseño, construcción e implementación del colector de admisión para el motor de combustión interna Yamaha FZR 600cc para la competencia Fórmula SAE. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, 2014.
- [14] Carmen Fernández Pastor, Estudio de la frecuencia crítica del Air-Box perteneciente a Moto2. Proyecto fin de carrera (Ingeniería Técnica Industrial), Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [15] Motogp.com, <<Gran Premio Movistar de Aragón>>. <http://www.motogp.com/es/evento/Aragon> [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [16] Antonio Colchado Argumedo, Diseño de un múltiple de admisión para un vehículo prototipo Fórmula SAE. Proyecto fin de carrera (Ingeniería Mecánica), Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [17] Gerardo Herce Gil de Muro y Pedro M^a Diéguez Elizondo, Sistema de admisión, refrigeración y escape en una moto de combustión. Proyecto fin de carrera (Ingeniero Técnico Industrial de México), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2012.

[18] Innovacomposites.com, <<Procesos de fabricación de los materiales compuestos>>
http://www.innovacomposite.com/es/procesos_composite/infusion [Último acceso: 29 Septiembre 2016].