

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMA
DE ADMISIÓN PARA MOTO DE
COMPETICIÓN "

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero - 2025

AUTOR: Francisco Molina Bañón

DIRECTOR/ES: Francisco J. Simón Portillo



ÍNDICE

RESUMEN	6
1. UMH Racing Team en MotoStudent VIII	6
1.1 MotoStudent International Competition	6
1.1.1 Presentación MotoStudent	6
1.1.2 Evaluación.....	7
1.1.3 Pruebas Fase MS2.....	9
1.2 Trayectoria UMH en MotoStudent	11
1.3 UMH Racing Team.....	12
1.3.1 Preámbulo UMH RT (MS VIII)	12
1.3.2 Estructura UMH RT (MS VIII)	12
1.3.3 Planificación y Objetivos UMH RT (MS VIII).....	13
1.3.4 Primera aproximación al prototipo UMH RT 8.0	14
1.3.5 Departamento de Motor & Electrónica	15
2. Introducción al motor y dimensión del proyecto	16
2.1 El motor de combustión interna alternativo.....	16
2.1.1 Introducción al motor de combustión interna alternativo	16
2.1.2 Descripción del motor de combustión interna alternativo	17
2.1.3 Clasificación de los motores de combustión interna alternativos	18
2.2 El motor de cuatro tiempos.....	20
2.2.1 Funcionamiento ideal del motor de cuatro tiempos	20
2.2.2 Funcionamiento real del motor de cuatro tiempos	23
2.2.3 Prestaciones del motor.....	24
2.3 Características del motor para categoría EFuel	25
2.4 Envergadura del proyecto.....	30
3. Motivación de los componentes propuestos	32
3.1 Preámbulo general	32
3.2 Toma de aire forzado o <i>Ram-air intake</i>	33
3.2.1 Preámbulo sobre aerodinámica	33
3.2.2 Función de la <i>Ram-air intake</i>	34
3.2.3 Orígenes de la <i>Ram-air intake</i>	35
3.2.3 Normativa Aplicable a la <i>Ram-air intake</i>	37
3.2.4 Desafíos para la integración de la <i>Ram-air intake</i>	37
3.2.4.1 Disposición del motor	37
3.2.4.2 Carenado	38
3.2.4.3 Pipa de dirección	38
3.2.4.4 Tubos de refuerzo de chasis	39
3.2.4.5 Depósito de combustible	39
3.2.4.6 Anchura total	40

3.3 Caja de remanso	40
3.3.1 Preámbulo aclaratorio / desambiguación.....	40
3.3.2 Función de la <i>airbox</i>	41
3.3.3 Normativa Aplicable a la <i>airbox</i>	42
3.3.4 Desafíos para la integración de la <i>airbox</i>	42
3.3.4.1 Disposición del motor	42
3.3.4.2 Depósito de combustible	43
3.3.4.3 Posición de pilotaje	45
3.4 Trompeta de admisión	45
3.4.1 Preámbulo sobre la trompeta de admisión	45
3.4.2 Orígenes	47
3.4.3 Normativa aplicable a la trompeta de admisión	48
3.4.4 Desafíos para la integración de la trompeta de admisión.....	48
4. Diseño	50
4.1 Preámbulo general sobre diseño	50
4.1.1 Carácter preliminar	50
4.1.2 División del proceso de diseño	50
4.1.3 Flujo iterativo del proceso de diseño	50
4.1.4 Criterios de diseño generales	52
4.2 Condiciones de contorno	53
4.2.1 Preámbulo sobre las condiciones de contorno.....	53
4.2.2 Propiedades del aire	53
4.2.3 Velocidad lineal y régimen de giro de referencia.....	54
4.2.3.1 Preámbulo cálculo velocidad de referencia.....	54
4.2.3.2 Fuerza motora	55
4.2.3.3 Resistencia aerodinámica	60
4.2.3.4 Resistencia a la rodadura	62
4.2.3.5 Resistencia por gravedad	63
4.2.3.6 Determinación de la velocidad de referencia para la optimización	63
4.2.4 Gasto másico y volumétrico de aire	65
4.2.4 Sobrepresión objetivo.....	66
4.2.4.1 Preámbulo sobre sobrepresión objetivo	66
4.2.4.2 Ensayo de Kawasaki ZX-9R	66
4.2.4.3 Sobrepresión objetivo	69
4.3 Predimensionamiento teórico	69
4.3.1 Predimensionamiento teórico del sistema de admisión dinámica	69
4.3.1.1 Preámbulo teórico sobre el sistema de admisión dinámica	69
4.3.1.2 Cálculo teórico cambio de sección del sistema de admisión dinámica	72
4.3.2 Predimensionamiento teórico de la caja de remanso.....	73
4.3.3 Predimensionamiento teórico de la trompeta de admisión.....	74

4.3.3.1 Preámbulo teórico sobre la trompeta de admisión	74
4.3.3.2 Longitud teórica del conducto de admisión	75
4.3.3.3 Longitud teórica frente a resultados empíricos	78
4.4 Diseño del sistema de admisión dinámica.....	79
4.4.1 Criterios de diseño del sistema de admisión dinámica.....	79
4.4.2 Alternativas diseño sistema de admisión dinámica.....	80
4.4.2.1 Alternativa 1 Integración con chasis.....	80
4.4.2.2 Alternativa 2 Depósito desplazado.....	82
4.4.2.3 Alternativa 3 Conductos directos.....	84
4.4.2.4 Alternativa 4 Conducto interno	86
4.4.2.5 Alternativa de diseño seleccionada	87
4.4.3 Detalles del diseño del sistema de admisión dinámica seleccionado.....	88
4.5 Diseño de la trompeta de admisión	90
4.5.1 Preámbulo diseño trompeta admisión	90
4.5.2 Criterios de diseño trompeta admisión	91
4.5.4 Geometría de la trompeta de admisión	92
4.6 Simulación y optimización	95
4.6.1 Preámbulo sobre simulación y optimización	95
4.6.2 Simulación y optimización del sistema de admisión dinámica	95
4.6.3 Simulación y optimización de la trompeta de admisión	100
5. Prototipado	104
5.1 Preámbulo prototipado	104
5.2 Prototipado por deposición de filamento fundido.....	105
5.3 Prototipado toma de aire forzado	106
5.4 Prototipado de las conducciones.....	107
5.5 Prototipado de la caja de remanso	107
5.6 Prototipado de la trompeta de admisión	107
6. Fabricación	108
6.1 Preámbulo fabricación.....	108
6.2 Criterios de fabricación	108
6.3 Fabricación de la toma de aire forzado	109
6.4 Fabricación de las conducciones.....	110
6.4.1 Fabricación de patrones.....	111
6.4.2 Fabricación de moldes de silicona	112
6.4.3 Fabricación de mandriles metálicos	112
6.4.4 Laminado de fibra de carbono sobre mandriles	113
6.4.5 Fusión de los mandriles metálicos	115
6.5 Fabricación de la caja de remanso (pasar a futuro)	116
6.5.1 Preámbulo fabricación de la caja de remanso	116
6.5.2 Fabricación del cuerpo de la caja de remanso	117

6.5.2.1 Fabricación del patrón del cuerpo	117
6.5.2.2 Laminado de fibra de carbono sobre el patrón	119
6.5.3 Fabricación de la tapa de la caja de remanso	121
6.5.4 Modificaciones sobre la caja de remanso y fabricación de accesorios	122
6.6. Fabricación de la trompeta de admisión	124
6.7. Ensamblaje del sistema de admisión.	126
7. Plan de implementación futura	128
7.1 Preámbulo respecto al plan de implementación futura	128
7.2 Prueba de resistencia térmica de la trompeta de admisión	128
7.3 Calibración de la centralita en banco de potencia	128
7.4 Prueba dinámica para la validación del sistema	129
7.2 Diseño y fabricación del sistema de escape	129
8. Conclusiones	130
BIBLIOGRAFÍA	132



RESUMEN

El presente trabajo surge del interés de aumentar la entrega del motor de combustión del prototipo con el que la UMH participará en la 8ª Edición de la competición MotoStudent. En consecuencia, se diseñará y estudiará un sistema de admisión dinámica. Se presenta el método de diseño de los componentes, evaluando alternativas, ajustándose a las restricciones específicas que pudieran afectarles, justificando el porqué de la elección, y presentado el método iterativo de optimización del diseño mediante simulación con herramientas CFD. Tras lo anterior, se planteará el método de fabricación de los componentes, y plan de implementación futura.

1. UMH Racing Team en MotoStudent VIII

1.1 MotoStudent International Competition

1.1.1 Presentación MotoStudent

MotoStudent International Competition es un desafío entre equipos universitarios a nivel internacional, en el que, desde 2009, los estudiantes deben aplicar todos los conocimientos adquiridos durante sus estudios universitarios en un proyecto real, diseñando, desarrollando y fabricando una auténtica moto de competición, la cual será evaluada y puesta a prueba en un evento final que se celebrará en las instalaciones de MotorLand Aragón, en la localidad turolense de Alcañiz. La octava edición de esta competición tendrá lugar durante tres semestres, en el período 2024-2025. A lo largo de la competición, los equipos irán cumpliendo una serie de pruebas e hitos para poder complementar la evaluación final.

Esta competición puede entenderse como un programa educativo avanzado que prepara a estudiantes de grado y posgrado en una variedad de campos relacionados con el sector de la movilidad, enfocándose en los profesionales que impulsarán el futuro de la innovación, desafiándolos con un proyecto de *motorsport* auténtico. A través de las diferentes fases en las que los equipos estarán involucrados, desarrollarán su talento en áreas como:

- Gestión de proyectos con conocimientos sobre aspectos económicos y objetivos de presupuesto, marketing, gestión de recursos, análisis y preparación de documentos, y competencia de hitos.
- Desarrollar un prototipo real bajo las reglas dadas, con un enfoque especial en el desarrollo del mercado y las bases del deporte motor.
- Competir, trabajar y colaborar dentro del equipo y con otros equipos universitarios de todo el mundo.

La Competición MotoStudent, [1] promovida por la Moto Engineering Foundation y TechnoPark MotorLand, ambas entidades conforman la Organización de la Competición, responsable de su desarrollo completo. La competición MotoStudent tiene dos categorías diferentes:

- La categoría MotoStudent EFuel se caracteriza por usar un motor de combustión interna como método de propulsión.
- La categoría MotoStudent Electric se caracteriza por usar un sistema 100% eléctrico como método de propulsión.

Cada categoría se desarrollará en paralelo e independientemente con su evaluación y puntuación correspondiente, así como las pruebas e hitos a cumplir a lo largo de la competición, incluyendo el Evento Final.



Ilustración 1 - Categorías de MotoStudent

1.1.2 Evaluación

Los proyectos y prototipos presentados serán juzgados y evaluados en una serie de diferentes pruebas, divididas en dos fases diferentes, llamadas MS1 y MS2.

La fase MS1 evalúa principalmente las habilidades de ingeniería y gestión de los equipos, enfatizando la ingeniosidad sobre los recursos. Ofrece a los estudiantes la oportunidad de aplicar sus conocimientos académicos en un entorno práctico y profesional, mostrando los desafíos y procedimientos involucrados en el desarrollo de un proyecto del mundo real, desde la concepción hasta la finalización.

La Fase MS2 consiste en una serie de pruebas destinadas a evaluar el comportamiento dinámico y el rendimiento del prototipo fabricado.

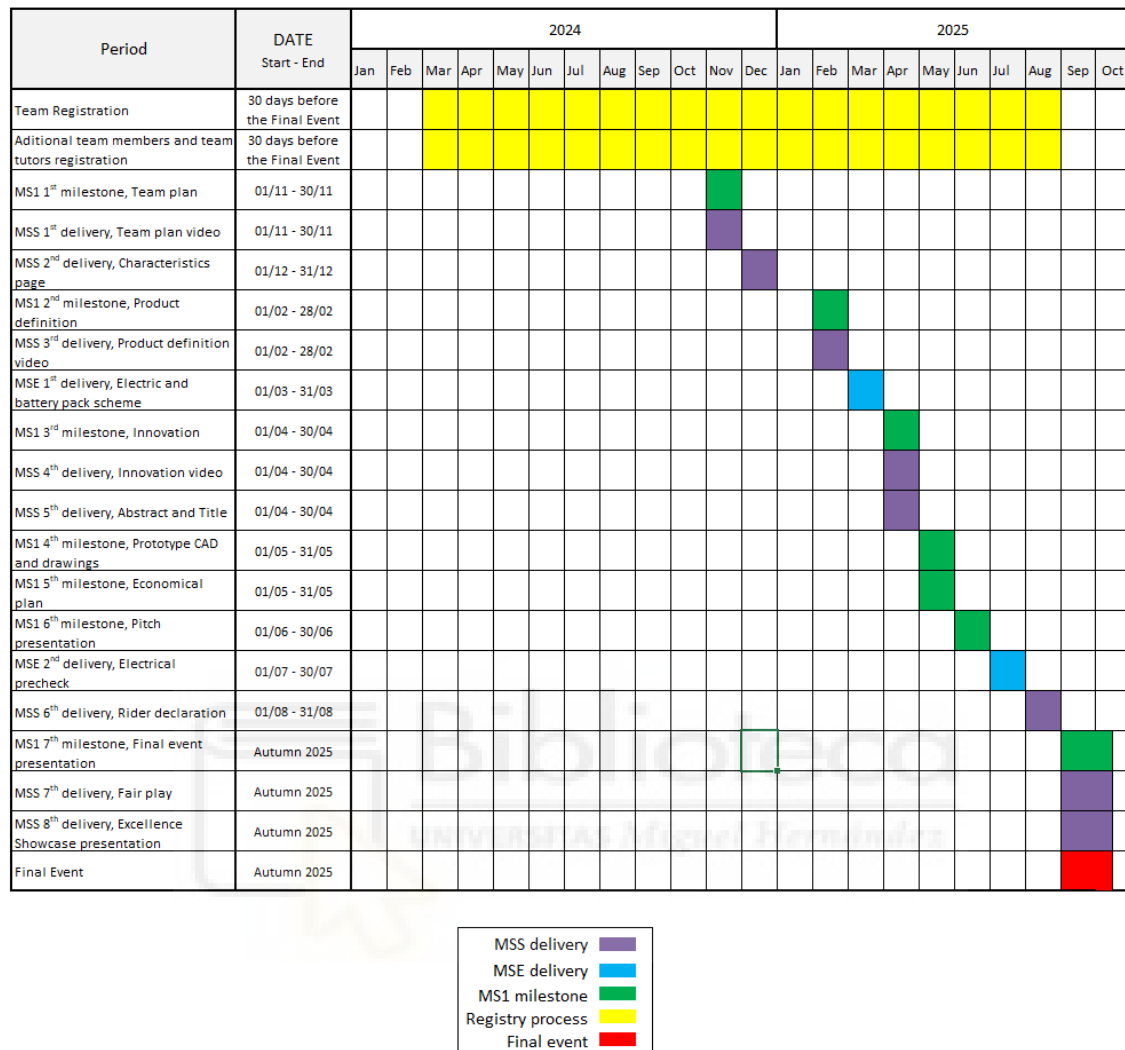


Gráfico 1 - Calendario de las diferentes pruebas evaluativas de MotoStudent

1.1.3 Pruebas Fase MS2

Debido a la naturaleza del proyecto relacionado con este trabajo de fin de grado, las pruebas dinámicas que conforman la Fase MS2 son de gran relevancia, por lo que se aborda en detalle su análisis. Cabe reseñar que el correcto desarrollo de la fase MS1 desembocará en un aumento inevitable en las posibilidades de conseguir un buen resultado en la fase MS2.

Una porción de las pruebas se realizará en circuitos con conos especificados por la organización, mientras que las restantes se llevarán a cabo durante las correspondientes sesiones, sobre el trazado FIM Grand Prix International de MotorLand Aragón.

Cada una de las sesiones sobre el trazado FIM se realizarán por categoría y quedarán divididas en:

- Dos sesiones de Práctica Libre de 20 minutos.
- Una sesión de Clasificación de 20 minutos.
- Una sesión de Calentamiento de 15 minutos.
- Una carrera de Play-Off de 6 vueltas.
- Una carrera Final de 9 vueltas para la categoría E-Fuel y 7 vueltas para la categoría Electric.

A continuación, se desglosan las pruebas que conformarán la Fase MS2:

1. Frenada: Determina la distancia necesaria para detener el prototipo por completo desde una velocidad mínima de 80 km/h.

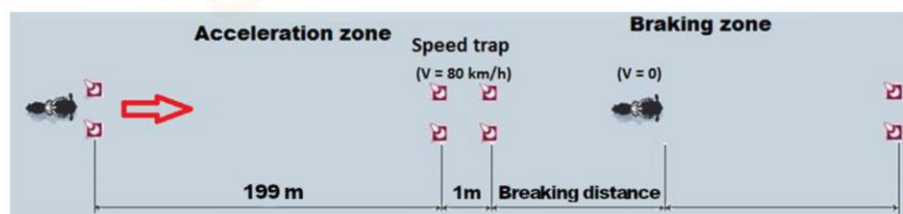


Ilustración 2 - Prueba de frenado

2. Gymkhana: Se trata de un pequeño circuito diseñado para evaluar la agilidad, aceleración y maniobrabilidad de los prototipos. Si se mueve o derriba un cono, o si el piloto o el prototipo pasan por el lado incorrecto de un cono, se aplicarán penalizaciones de tiempo.

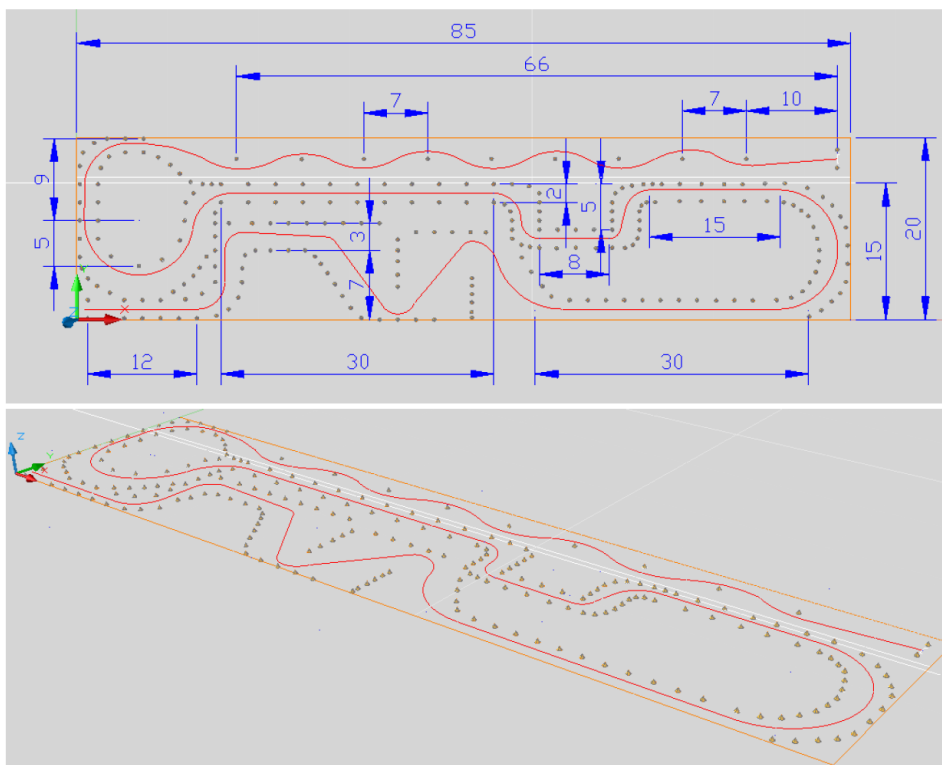


Ilustración 3 - Trazado de la Gymkhana

3. Aceleración: Implica recorrer 150m en línea recta para comprobar la velocidad máxima al final.

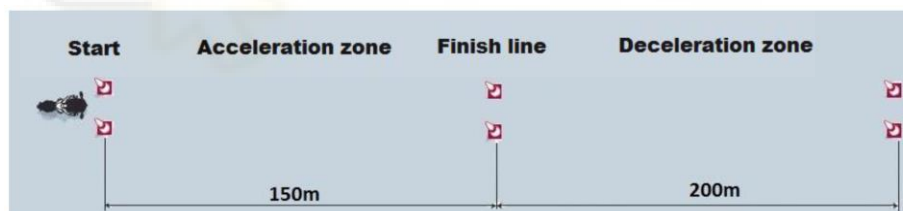


Ilustración 4 - Prueba de aceleración

4. Velocidad punta: Esta prueba registra la velocidad alcanzada en la trampa de velocidad durante la sesión de Práctica Libre 2.
5. Regularidad: Busca lograr la mayor regularidad de tiempo en el sector 2 del Circuito de Velocidad, tomando como referencia 3 vueltas de la sesión de calentamiento. El tiempo de regularidad se obtiene ordenando los tiempos del sector 2 y calculando la diferencia mínima entre el primer y el tercer tiempo, el segundo y el cuarto, y así sucesivamente. $\min(|x_n - x_{n+2}|)$.
6. *Pole position*: Se trata de obtener la vuelta más rápida en el circuito durante la sesión de Clasificación.

7. Mejor Vuelta de Carrera: Consiste en obtener la vuelta más rápida durante la carrera final, o en caso de no haber clasificado para ésta, durante la carrera de *play-off*.
8. Resultado de la Carrera: El resultado final de la carrera se determina a partir de los puestos obtenidos en la carrera final, seguido de los correspondientes a la carrera de *play-off*.

1.2 Trayectoria UMH en MotoStudent

Desde su debut en 2009, la Universidad Miguel Hernández ha demostrado ser un competidor a la altura de cualquier otro. A lo largo de los 15 años de experiencia y la formación de cuatro equipos —UMH Motor, UMH Moto Experience, y Proyecto Guepardo— la universidad ha acumulado logros y dejado su marca en la historia de la competición.

Entre sus mayores éxitos se destacan el título que el equipo UMH Moto Experience obtuvo al conseguir el primer puesto en la Fase MS2 en la tercera edición de la competición, del mismo modo que, el Proyecto Guepardo se alzó con el primer puesto en “*Petrol Innovation*” durante la cuarta edición.

Adicionalmente, en la cuarta edición, el Proyecto Guepardo continuó su racha de éxitos al conseguir la segunda mejor vuelta rápida, tener la tercera moto más ligera y alcanzar el cuarto puesto en la clasificación general. Estos logros no solo reflejan la destreza y dedicación de los equipos, sino también el espíritu de innovación y la excelencia técnica que caracterizan a la UMH, consolidándose como un rival digno de grandes equipos con mayores recursos y respaldo a su disposición, inspirando a futuras generaciones de ingenieros y entusiastas del motociclismo.



Ilustración 5 - Prototipo UMH Moto Experience

1.3 UMH Racing Team

1.3.1 Preámbulo UMH RT (MS VIII)

El equipo UMH Racing Team (de ahora en adelante UMH RT) se crea con motivo de la participación en la sexta edición de MotoStudent. Con la intención de participar en la categoría de combustión interna (EFuel) en la octava edición de la competición, la universidad vuelve a ensamblar al equipo, un grupo reducido de estudiantes de ingeniería mecánica, en el que se combina la experiencia de estudiantes de últimos años con el entusiasmo de estudiantes de primer año. Asimismo, el *team leader* será un veterano en la competición, llegando a haber participado en tres ediciones anteriores además de contar, al igual que el *team co-leader*, con experiencia profesional en el diseño y fabricación de motos participantes en el FIM JuniorGP World Championship, el hasta 2013 denominado Campeonato de España de Velocidad (CEV), siendo ésta la competición motociclística de velocidad internacional más importante después del Campeonato del Mundo de Motociclismo.

1.3.2 Estructura UMH RT (MS VIII)

Dado el reducido tamaño del equipo comparado, no sólo con otras universidades, sino con respecto a los formados desde la UMH en ediciones anteriores, los departamentos en los que se divide el equipo tendrán carácter multidisciplinar, es decir, las labores de sus integrantes no se limitarán a aquellas propias del departamento, pudiendo asumir responsabilidades propias de otros. Las sinergias resultantes podrán ser tremendamente beneficiosas, puesto que pocos o ningunos son los componentes propios de un departamento que no se verán condicionados o condicionarán aquellos característicos de otros.

En el momento de redacción de este documento, el equipo queda estructurado de la siguiente forma:

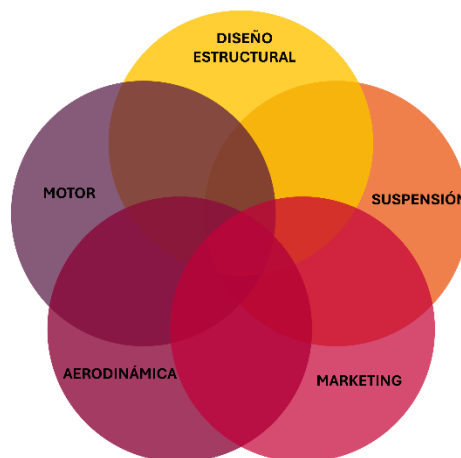


Ilustración 6 - Departamentos UMH RT

De igual modo, se contará con Sergio Gadea como piloto, sujeto a confirmación a la fecha de este documento. Gadea es un candidato idóneo, con experiencia en la categoría de 125 y Moto2, cuenta en su palmarés profesional con 18 pódiums totales, así como 3 victorias y 2 poles en el campeonato mundial de 125. Igual de importante, cumple los requisitos de la normativa de la organización en lo relativo a pilotos profesionales, en particular, el punto G.2.2.4, según el cual *«la participación de pilotos que hayan competido desde 2015 (inclusive) en cualquier competencia de Circuit Racing organizada por la FIM internacional, FIM Europa, FIM Asia, FIM Norteamérica, FIM Latinoamérica, FIM África, FIM Oceanía, o cualquier campeonato nacional principal no está permitida»*.

1.3.3 Planificación y Objetivos UMH RT (MS VIII)

No es extraño encontrar un conflicto entre la innovación tecnológica y el pragmatismo en esta competición, es decir, en ocasiones, propuestas rompedoras pueden traducirse en falta de fiabilidad a la hora de ponerlas en práctica en la pista. El UMH RT tampoco es inmune respecto a dicho fenómeno. Partiendo de lo anterior y en base a experiencias pasadas, y con el objetivo primordial de poder participar en todas las fases y pruebas de la competición, **se prioriza la efectividad y el pragmatismo, buscando el compromiso entre innovación y factibilidad** que garantice un rendimiento a la altura de los rivales sin sacrificar fiabilidad ni poder en riesgo la participación en las diferentes etapas de la competición. Cabe aclarar que, cuando se habla de fiabilidad no sólo se refiere al posible fallo de un componente, sino de la viabilidad de las diferentes soluciones técnicas que componen el proyecto. Un concepto avanzado carecerá de utilidad si su fabricación, instalación o funcionamiento pudiera poner aprietos el correcto desarrollo en las pruebas.

De forma equivalente, el prototipo sólo tendrá un rendimiento notable en las pruebas si el piloto se siente lo suficientemente cómodo extrayendo las prestaciones y llevándolo hasta sus límites. En consecuencia, garantizar una correcta posición de pilotaje será una máxima de cara al desarrollo de la fase MS2.

Por otro lado, la correcta planificación se considerará imperiosa. Por suerte, la organización impone una serie de estragas que componen la fase MS1 de la competición. Al margen de servir a la organización como modo de evaluación, servirá al equipo como hoja de ruta para el equipo, guiando a sus miembros en el desarrollo de las diferentes etapas que constituirán un proyecto de tal magnitud.

1.3.4 Primera aproximación al prototipo UMH RT 8.0

El nombre provisional con el que se ha bautizado al prototipo que participará en la categoría EFuel de la edición VIII de la MotoStudent es “UMH RT 8.0”, pues éste será el octavo prototipo con el que la UMH participará en la competición. Como se anotará en diversas ocasiones a lo largo de este trabajo de fin de grado, se recalca el carácter preliminar de las diferentes soluciones técnicas que se expongan, pues factores externos, como la capacidad de fabricación de proveedores, o internos, como las soluciones adoptadas por otros departamentos, pueden condicionar la solución final que se aplicará al prototipo.

No obstante, por el momento puede concretarse el tipo de chasis, un chasis multitubular de acero de la familia 41XX, microaleados, de alta resistencia y de baja aleación con cromo y molibdeno, comúnmente conocido como CRMO o Chromoly. Según esta configuración de chasis, se anclará el motor por la parte superior con numerosos tubos de sección recta, a diferencia de las clásicas estructuras de tipo cuna, aumentando considerablemente la rigidez de la estructura, sin que ello represente un mayor peso. Esta estructura es considerada una de las alternativas más efectivas para motocicletas de altas prestaciones, siendo también frecuente en la competición de MotoStudent. El esquema de suspensiones contará con horquilla telescópica en el eje delantero y basculante en el trasero. El motor será anclado por su parte trasera directamente al chasis sin necesidad de cuna, siendo necesario diseñar los soportes delanteros del chasis. De acuerdo con todo lo anterior, se aproximará la masa del prototipo final de 95 kg.

La configuración expuesta es una de las más populares en prototipos participantes en categorías equivalentes al MotoStudent. Se tendrá como estándar la clase Moto3, con la que se compartirá una de las especificaciones con mayor impacto en las prestaciones, la cilindrada, siendo ésta 250 cm³. En cierto modo, el prototipo UMH RT 8.0 tendrá como referencia a aquel desarrollado por KTM.



Ilustración 7 - KTM RC 250 GP [1]

1.3.5 Departamento de Motor & Electrónica

En el momento de asignar los departamentos a los diferentes miembros que componen el equipo, se tuvieron en cuenta no sólo las aptitudes, sino las preferencias personales, así como los campos en los que se pudiera contar con cierta experiencia. Seguramente no sean pocos los estudiantes de ingeniería mecánica que compartan el interés por los motores de combustión que se plasma en este documento, siendo dicho interés el principal motivo por el que se asume la responsabilidad de encargarse del departamento de *“Motor y Electrónica”*. Los conocimientos adquiridos durante los sucesivos cursos del grado y las herramientas empleadas en las sesiones prácticas de las asignaturas permitirán afrontar el reto de optimizar la unidad de potencia del prototipo. No obstante, y como se detallará en los correspondientes puntos, el reglamento será muy poco laxo en lo que a al apartado de la unidad motriz se refiere, haciendo esta misión aún más exigente.



2. Introducción al motor y dimensión del proyecto

2.1 El motor de combustión interna alternativo

2.1.1 Introducción al motor de combustión interna alternativo

En base a la futura participación del UMH RT en la categoría **EFuel** de la 8ª Edición de la competición MotoStudent, se procederá a introducir el motor de combustión interna alternativo (MCIA).

En primer lugar, se introducirá la **máquina de fluido**, siendo esta el conjunto de elementos mecánicos que permitirá el intercambio de energía mecánica con el exterior gracias a la variación de la energía disponible en el fluido que la atraviesa. Por noma general, esa transferencia se realizará a través de un eje. El concepto popular de los motores de combustión interna casa con la descripción anterior, entendiendo que el fluido en cuestión será el gas resultante de la mezcla de aire y combustible vaporizado, mezcla que será encendida desembocando en un proceso de combustión. Las máquinas de fluido podrán ser clasificados según varios criterios.

Según el **sentido del intercambio de energía**, se tratará de una máquina motora o generadora, dependiendo de si el fluido aporta energía al exterior (motora) o, por el contrario, la recibe (generadora). Conforme a su principio de funcionamiento, el cual se detallará más adelante, los MCIA podrán ser considerados máquinas **motoras-generadoras**, pues en primer lugar se empleará energía mecánica para elevar el nivel energético del gas para, tras la combustión del mismo, aprovechar la energía resultante para mover el mecanismo que constituye al motor, permitiendo su aprovechamiento en forma de energía mecánica. Cabe aclarar que, en el caso de los motores, este balance ha de ser positivo, la energía aportada es menor que la extraída mecánicamente. Sirviendo de contraste, las máquinas de vapor, predecesoras directas de los MCIA, serían consideradas máquinas motoras, pues al fluido (vapor) se le dotaba de un estado energético elevado en las calderas, previa entrada a la máquina. Por tanto y aunque pudiera llevar a confusión, los MCIA no deberán ser considerados técnicamente únicamente como motores, hecho al que no se volverá a hacer referencia en el presente documento por falta de trascendencia y fuente de ambigüedades.

Paralelamente, las máquinas de fluidos podrán clasificarse según la **circulación del fluido** en su interior. Se podrá identificar como una máquina de **desplazamiento positivo o volumétrica** cuando pueda estudiarse la evolución de un volumen concreto en su transcurso a través de la máquina, como será el caso de los MCIA. Por otra parte, se considerará turbomáquina cuando el intercambio de energía se realizará sobre un flujo continuo y a través de un rotor, como será el caso de las turbinas empleadas en aviación.

Finalmente, dependiendo del **grado de compresibilidad** del fluido que las atraviesa, se diferenciará entre máquinas hidráulicas o térmicas. Cuando pueda asumirse que el fluido en

cuestión tendrá densidad constante y, en consecuencia, será incompresible, se denominará máquina hidráulica, como pudiera ser el caso de una bomba de aceite. Por el contrario, si el fluido experimentase variaciones en su densidad y temperatura, se tratará de una **máquina térmica**, en la que las variaciones de energía por unidad de masa de fluido serán superiores, llegando a aprovecharse la energía asociada a cambios de fase.

De acuerdo con lo anterior, se podrá decir que un MCIA será una máquina térmica volumétrica generadora-motora.

Sin embargo, pudiera surgir duda respecto a la justificación del adjetivo "alternativo" pues el uso de éste no se fundamenta en el hecho de ser los MCIA una alternativa a los tradicionales motores de vapor, sino que debe su nombre al tipo de movimiento de sus elementos mecánicos, pues el gas será comprimido por un émbolo en el interior de un cilindro, para después impulsar a éste último tras el proceso de combustión, repitiendo el proceso con cada ciclo, resultando en movimientos alternativos de subida y bajada del émbolo. Frente a este tipo de motor, se encentrarán por ejemplo los motores Wankel, en el que las funciones del pistón serán realizadas por un rotor.

2.1.2 Descripción del motor de combustión interna alternativo

Un motor de combustión interna alternativo estará compuesto de una serie de elementos que conformarán un mecanismo conocido como biela manivela. A nivel fundamental, se tendrá un cilindro en cuyo interior se encontrará un émbolo o pistón que se desplaza dentro de este según su eje vertical. Por otra parte, se encontrará el cigüeñal el cual será encargado de transmitir movimiento circular al eje de salida. En consecuencia, la biela será el componente que unirá a ambos, de forma que la relación entre ésta y los codos del cigüeñal permitirán convertir el movimiento vertical del pistón en movimiento circular.

Aunque los anteriores serán considerados como los componentes base del motor, habrá otros también fundamentales para su funcionamiento. Las válvulas serán las encargadas de abrir y cerrar el acceso al interior del cilindro. Éstas serán operadas por el árbol de levas a través de balancines o directamente mediante taqués. Este árbol girará de forma sincronizada con el cigüeñal a través de una correa o cadena, conformando lo que se conocerá como distribución.

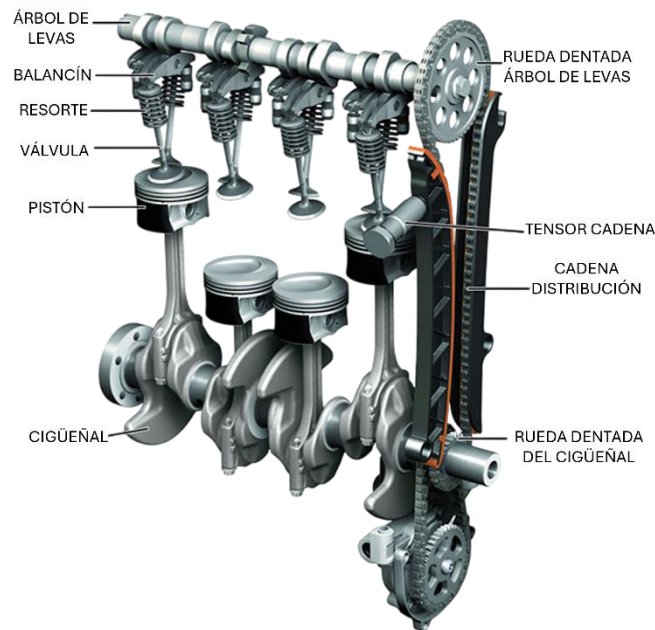


Ilustración 8 - Componentes de un MCI

2.1.3 Clasificación de los motores de combustión interna alternativos

A su vez, los motores de combustión interna podrán verse clasificados según sus principales características.

En primer lugar, según el **número de carreras** necesarias para completar un ciclo termodinámico, se podrá diferenciar entre motores de dos tiempos (2T) o cuatro tiempos (4T). Según el primero de éstos, el pistón realizará dos carreras, de forma que necesitará una única vuelta de cigüeñal para completar el ciclo. Por otro lado, el motor de 4T necesitará un total de cuatro carreras y, por tanto, dos vueltas de cigüeñal, para completarlo.

Dada la naturaleza del presente documento, cabe mencionar el hecho de que las motos es una de las últimas aplicaciones remanentes del motor de 2T, por su alta densidad energética, entendiendo por ésta, la potencia entregada en función del tamaño del motor, así como su sencillez mecánica y ligero peso. El empleo de motores 2T suele verse restringido a motos de pequeña cilindrada o aquellas propias de competiciones como el Motocross. No obstante, y de acuerdo con lo que indicará más adelante, la atención recaerá sobre los **motores de 4T**.

Por otra parte, los MCI también podrán ser clasificados según proceso de **encendido de la mezcla** que desencadena el proceso de combustión. Por un lado, estarán los motores de encendido provocado (MEP), que reciben su nombre por el hecho de recurrirse a un componente específico para encender la mezcla, la bujía, que producirá una chispa que prenderá la mezcla. A estos motores MEP se les conoce comúnmente como motores "de gasolina" pues este combustible es con diferencia el más empleado en éstos. Sin embargo, un MEP pudiera conservar el mismo principio de funcionamiento en el caso de emplear etanol u otro combustible compatible. Por el contrario, se encuentran los motores de encendido por

compresión, en los que la mezcla es comprimida hasta tal punto que la alta presión y temperatura provocan que la mezcla se prenda por sí misma, sin la participación de elementos como la bujía. Suele referirse a los motores MEC como “diésel”, aludiendo al ciclo termodinámico que éstos siguen, empleando normalmente gasóleo como combustible. Cabe señalar el método según el cual se regulará la entrega de los motores MEP y MEC, siendo la variación de carga de los MEP cuantitativa, es decir, regulando la cantidad de mezcla que entra en el cilindro, mientras que en los MEC se variará el grado de carga cualitativamente, modificando la proporción de aire y combustible o dosado. El dosado se mantendrá relativamente constante en los MEC, siendo éste próximo a la relación estequiométrica ideal de 14.7:1. Salvo excepciones aisladas, los motores empleados en las motos serán **motores de encendido provocado**, comparativamente más ligeros y energéticamente densos.

Finalmente, y, aunque no se trate de una de las principales características de los MCIA, sí tendrá gran importancia la clasificación según la **presión de admisión**, es decir, la presión a la cual se produce el llenado del cilindro durante el descenso del pistón. De acuerdo con este criterio se podrán dividir en motores atmosféricos y de motores sobrealimentados.

En el caso de los **motores atmosféricos o naturalmente aspirados**, serán aquellos en los que la presión en la sección de entrada a los puertos de admisión sea aproximadamente igual a la ambiente. Por lo tanto, existirá una dependencia entre la entrega del motor y las condiciones del ambiente, principalmente, una relación inversamente proporcional a la altura respecto al nivel del mar, pues conforme ésta aumente, se reducirá la presión ambiente y con ello, la presión de admisión. Este efecto es más que conocido en competiciones como el *Rally Dakar* donde las extensas etapas presentan desniveles significativos que condicionarán el rendimiento de los motores, en especial aquellos naturalmente aspirados.

Por otro lado, los motores también podrán contar con dispositivos que impliquen un aumento en la presión de admisión, fenómeno conocido como sobrealimentación o inducción forzada. Uno de los ejemplos más comunes de los dispositivos en cuestión serán los compresores o supercargadores (del inglés *supercharger*), según el cual, se empleará una correa conectada al cigüeñal para extraer una porción de potencia del motor con la que impulsar un compresor, que forzará la entrada de aire en el motor. Otro dispositivo incluso más popular serán los turbocompresores, turbogrupos o simplemente turbos, en los que el compresor es impulsado por una turbina movida por los gases de escape, de forma que, en lugar de extraer una fracción de potencia del motor, se aprovechará la energía remanente en los productos de combustión para generar la sobrepresión en la admisión.

La práctica totalidad de motos de calle cuentan con aspiración atmosférica, pues el empleo de sistemas de inducción forzada resultará frecuentemente incompatible, ya que un aumento radical en la presión de admisión debe conllevar el empleo de componentes internos más resistentes y con ello, un aumento de peso significativo incompatible con la naturaleza liviana de las motos. Al mismo tiempo, la sobrealimentación implicará un incremento drástico en las cifras de par motor, lo que pudiera comprometer la tracción de la única rueda trasera. Por

estos motivos será más frecuente encontrar estos tipos de admisión en turismos o vehículos industriales. No obstante, ha habido excepciones como la BMW Type 255 “Kompressor” de 1939, la Honda CX650 Turbo de 1983 o la Kawasaki H2 de 2019, siendo ésta capaz de desarrollar 228 caballos y alcanzar velocidades superiores a los 320.

2.2 El motor de cuatro tiempos

2.2.1 Funcionamiento ideal del motor de cuatro tiempos

El motor de cuatro tiempos recibirá su nombre por necesitar cuatro fases o tiempos para completar el ciclo, requiriendo dos vueltas de cigüeñal para ello. Estas fases coincidirán con las carreras realizadas por el pistón en el interior del cilindro, desde la posición superior, próxima a la culata, y la inferior, junto al cigüeñal, puntos donde el pistón se detendrá y cambiará el sentido de su avance. Por este motivo, dichas posiciones recibirán el nombre punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI). La biela será la encargada de conectar el pistón con el codo del cigüeñal, conformando un mecanismo biela-manivela según el cual se transformará el movimiento alternativo del pistón en movimiento rotativo, es decir, se convertirá la fuerza lineal en **par motor** aprovechable para hacer girar las ruedas, impulsando al vehículo.

Primer tiempo o **Admisión**:

Comienza cuando el pistón se encuentra en PMI, instante en el que se abrirán las válvulas de admisión, dejando paso a la mezcla de aire y combustible. Cabe mencionar que, en el caso de motores con inyección indirecta, el combustible se mezcla con el aire de admisión previa entrada al cilindro, mientras que, en aquellos equipados con inyección directa, se realizará una vez éste ya se encuentre en el interior del cilindro. De ahora en adelante, se prestará atención a la inyección indirecta, pues es, como se comentará más adelante, aquella con la que contará el prototipo de competición.

Cuando el cigüeñal ha recorrido 90 grados, el pistón estará en la mitad de su primera carrera descendente. En este momento la fase de admisión se está efectuando y el efecto que hace entrar la mezcla en el interior del cilindro es el vacío dejado tras de sí por el pistón al bajar. Este tiempo continuará hasta alcanzar el PMS, momento en que el cigüeñal habrá completado media vuelta y se cerrarán las válvulas de admisión.

Segundo tiempo o **Compresión:**

Partiendo del PMS y con todas las válvulas cerradas, el pistón comenzará su primera carrera ascendente, de acuerdo con la cual irá comprimiendo la mezcla admitida en el cilindro, proceso que requerirá de un consumo notable de potencia. Esto provocará un aumento en la temperatura y presión de dicha mezcla, llegando a sus valores máximos al alcanzar el PMI. La conocida como relación de compresión vendrá determinada por las dimensiones de los componentes internos y será directamente proporcional al rendimiento del motor. En el caso de los motores MEP, como el que atañe a este documento, el combustible deberá mostrar la suficiente resistencia a tales condiciones como para evitar su ignición involuntaria o autoencendido. Esta característica de los combustibles se conocerá como octanaje, valor que, la de la normativa, quedará fijado en 102 octanos, cifra propia de competiciones frente a los comunes 95 o 98.

Tercer tiempo o **Expansión:**

Con el pistón en el PMI, la bujía encenderá la mezcla al producir una chispa mediante una descarga eléctrica de alto voltaje que atraviesa el espacio entre sus electrodos. La combustión liberará la energía química del combustible, resultando en una expansión violenta de los gases producto que impulsará al pistón hacia el PMI, constituyendo la carrera de potencia, la única en la que el motor entregará potencia.

Cuarto tiempo o **Escape:**

A partir del PMI y con el objeto de renovar la carga para el siguiente ciclo, se abrirán las válvulas de escape. Esto permitirá que el pistón empuje a los gases producto de la combustión para que abandonen el cilindro. Esta fase terminará cuando se vuelva a alcanzar el PMI, de forma que pueda comenzar la admisión del siguiente ciclo.

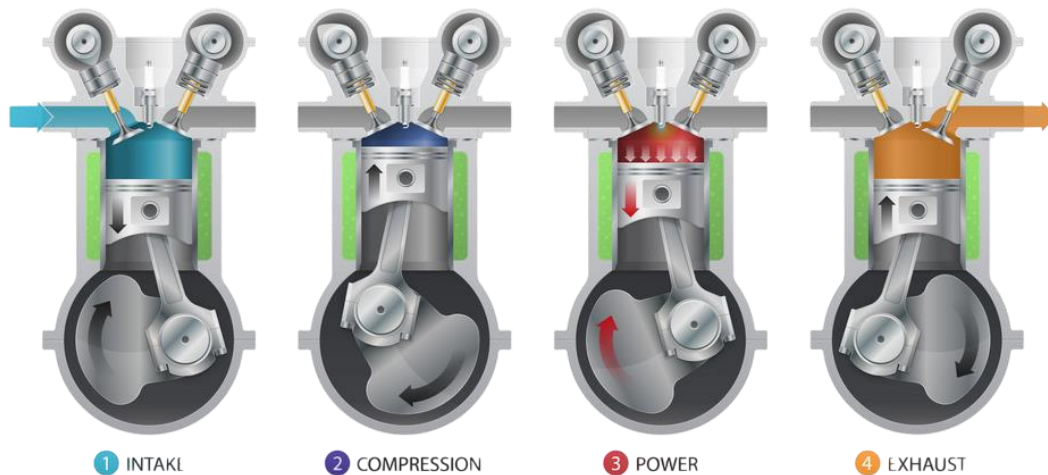


Ilustración 9 - Fases de un motor de 4 Tiempos

Hasta el momento, se ha hecho mención al funcionamiento de un único cilindro, sin embargo, los motores podrán contar con múltiples cilindros. El motivo del desarrollo de los motores pluricilíndricos es la división del trabajo entre varios pistones de menor tamaño, según lo cual, se tendrán pistones y bielas de menores dimensiones y, por tanto, menor peso, permitiendo aumentar notablemente el régimen de giro máximo al que podrá funcionar el motor sin que los efectos de la inercia comprometan su integridad. Además, los pulsos resultantes de las combustiones serán menores y estarán distribuidos según el orden de encendido de los cilindros, aportando al motor un comportamiento más suave y regular. No obstante, los motores pluricilíndricos supondrán un aumento en el coste y peso total del conjunto, pues, dependiendo de la configuración, podrán presentar dobles bancada y culata, como sucederá en la disposición en V. Por noma general el empleo de motores monocilíndricos se restringirá a cilindradas iguales o menores de 250 cm³, como será el caso del motor empleado en el prototipo de competición.

2.2.2 Funcionamiento real del motor de cuatro tiempos

No obstante, el ciclo teórico anteriormente descrito no se ajustará con el comportamiento real una vez se hayan superado regímenes de giros muy bajos, pues la presencia de velocidades elevadas en las corrientes de la mezcla y productos de escape provocará efectos de inercia y fricción que deberán ser tenidos en cuenta para modificar las fases en busca de optimizar el llenado y vaciado del cilindro:

AAE-Avance de la apertura del escape. Ángulo respecto al PMI en que se adelanta la apertura de la válvula de escape, desechando una mínima fracción de la fase final de la fase de expansión, desencadenando en un primer escape súbito debido a la significativa diferencia de presiones entre aquella presente en el colector de escape y la remanente en el interior del cilindro.

AAA-Avance de la apertura de admisión. Ángulo respecto PMI en el que comienza

la apertura de la citada válvula, aumentando el lapso disponible para que la mezcla venza las inercias e inicie su marcha hacia el interior del cilindro.

AE - Avance del encendido. Ángulo respecto al PMI en el que se adelantará la chispa de la bujía en base al tiempo necesario para iniciar y propagar el foco de llama. Este valor deberá aumentar al tiempo que lo hace la velocidad de giro del motor, al mismo tiempo que se velará por prevenir el autoencendido de la mezcla, lo cual podrá tener consecuencias catastróficas, pues el inicio la expansión de gases se adelantaría, intentando empujar el cilindro hacia abajo mientras este continuase ascendiendo.

RCE- Retraso en el cierre del escape. Ángulo según el cual se alarga el tiempo que las válvulas de escape permanecerán abiertas, aprovechando la inercia de la corriente de escape generada por el AAE y el empuje del pistón.

RCA- Retraso en el cierre de la admisión. De forma equivalente al RCE, ángulo según el cual aumentará el tiempo que las válvulas de admisión permanecerán abiertas aprovechando la inercia de la corriente de admisión en busca de un mejor llenado del cilindro.

Como resultado de las anteriores modificaciones, las válvulas de admisión y escape se encontrarán parcialmente abiertas al mismo tiempo, de modo que la entrada adelantada de la mezcla fresca empuje de los gases producto de la combustión, mejorando así el proceso de renovación de carga. Con el fin de evitar el choque del pistón con las válvulas se podrán labrar rebajes en la superficie del mismo al mismo tiempo que se condicionará el perfil de las levas que accionan las válvulas.

A continuación, se expondrá el diagrama de distribución en el que se representarán los respectivos ángulos de avance y retraso de apertura y cierre de válvulas según se sucederán las fases de **admisión**, **compresión**, **expansión** y **escape**:

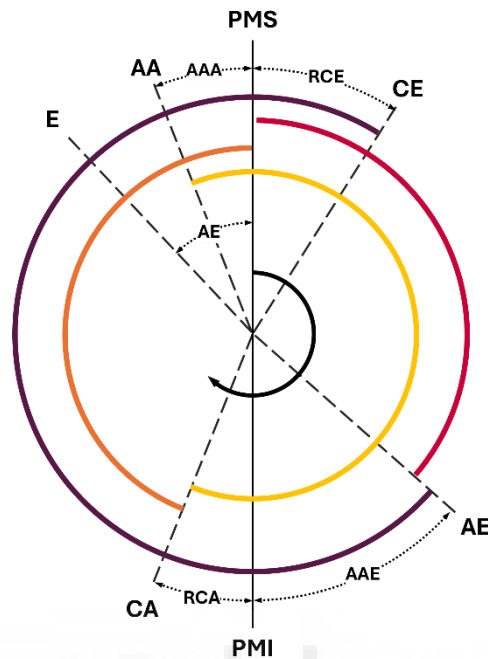


Ilustración 10 - Diagrama de distribución

2.2.3 Prestaciones del motor

El volumen de mezcla que entrará en el cilindro será proporcional a la cantidad de oxígeno y, por tanto, combustible potencial, y con ello, los esfuerzos transmitidos al cigüeñal para el aprovechamiento en forma de potencia mecánica.

La distancia o longitud existente entre la posición más elevada del pistón y la más baja recibirá el nombre de carrera. El diámetro del pistón se le denominará será prácticamente igual que el del cilindro, salvo por la presencia de una holgura mínima que permita el deslizamiento relativo del pistón respecto a las camisas o paredes del cilindro. La relación entre ambas magnitudes dotará al cilindro de una sección rectangular y en función de la cual se podrá hablar de cilindros "cuadrados" cuando diámetro y carrera coinciden, "de carrera larga" cuando la carrera es mayor que el diámetro y, por el contrario, si el diámetro es mayor, será de tipo "supercuadrado", muy corriente en aquellos casos destinados a la competición y los modelos deportivos, por admitir con comodidad elevados regímenes de giro, dada la menor velocidad media del pistón al tener éste que recorrer una menor distancia. La inmensa mayoría de motores de altas prestaciones presentan este último tipo de geometría, permitiéndoles alcanzar altos regímenes de giro.

Al volumen confeccionado por el diámetro y carrera se le denominará cilindrada y será la especificación técnica del motor que mayor impacto tendrá sobre la entrega de prestaciones, llegando a emplearse como criterio según el cual clasificar a las motos de competición.

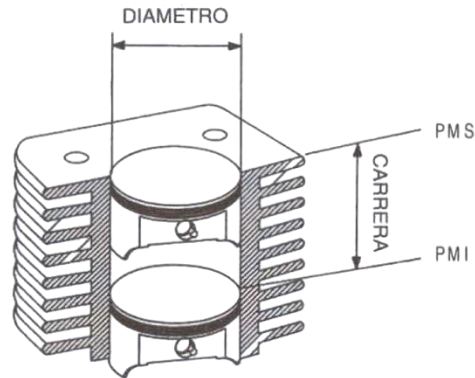


Ilustración 11 - Dimensiones del cilindro

La potencia de un motor es el producto de dos factores: par motor y régimen de giro.

$$P = N \cdot n$$

P potencia [-]
 N par motor [-]
 n régimen de giro

Un motor ideal se caracterizaría porque sus explosiones provocarían el mismo par motor a cualquier régimen, con lo que la potencia sería entonces estrictamente proporcional al número de vueltas. Sin embargo, en la práctica, el par motor variará sensiblemente a lo largo de toda la gama de revoluciones. Son precisamente las diferencias en la forma de entregar el par de los motores lo que caracterizará su comportamiento.

2.3 Características del motor para categoría EFuel

Las dos categorías que existen en la competición MotoStudent según la unidad motriz, EFuel y Electric, tienen respectivas secciones dedicadas en el reglamento. Para este proyecto y, puesto que el UMH Racing Team participará en la categoría de combustión interna, se analizará la Sección C del reglamento *MS2425 VIII MotoStudent International Competition (Rev. 10/2024)*. Esta sección abarca todas las restricciones y especificaciones técnicas necesarias para participar en la categoría EFuel, incluyendo aspectos del motor, sistemas de admisión y escape, refrigeración, suministro de combustible, lubricación y la instalación eléctrica.

Incluido en la inscripción a la competición, la organización suministra, a todos los equipos participantes en la categoría E-Fuel, un mismo motor de combustión que, De acuerdo con lo especificado en el punto C.1.1.1 de la normativa, *«Los equipos deben devolver el motor a la organización al final de la edición si la Organización lo considera necesario, en las mismas condiciones en que fue entregado a los equipos»*. Además, y como ya se han mencionado anteriormente, según el punto C.1.2 del reglamento, este motor viene provisto de una serie de sellos que servirá a la organización para comprobar que no se hayan modificado ninguno de los componentes internos del mismo, en consecuencia, será prioritario no dañar los sellos pues serán estrictamente revisados en la etapa de escrutinio previa al desarrollo de las pruebas de la fase MS2.

El motor suministrado será de la marca KTM, colaborador oficial de la competición, firma austriaca de renombre, conocida por sus motos de alto rendimiento, principalmente en categorías todoterreno. No obstante, participa en las diferentes categorías del mundial de MotoGP, contando en su palmarés con éxitos como 5 títulos mundiales en la clase de Moto3, 3 títulos mundiales en Moto2 y 6 victorias en la categoría reina, MotoGP.

La unidad motriz específica provista por la organización provendrá de la **KTM 250SX-F**, una motocicleta de motocross con motor de 250 cm³ de cilindrada montado en chasis tubular de doble cuna fabricado en acero. Las competiciones de motocross, consistentes en carreras sobre circuitos tierra cerrados y llenos de obstáculos, son inherentemente exigentes sobre la mecánica, sin embargo, los esfuerzos a los que se someterá el motor en las pruebas de velocidad en circuito de asfalto podrán suponer incluso un desafío mayor. Esto coincide con las estrictas labores de mantenimiento fijados por el fabricante.



Ilustración 12 - KTM 250 SX-F

Éste es un motor monocilíndrico de encendido provocado y 4 tiempos, con distribución mediante doble árbol de levas y 4 válvulas en culata. El cilindro tiene un volumen de 250 cm³, con un diámetro de 81 mm y carrera de 48.5 mm, convirtiéndolo en un cilindro súper-cuadrado. La relación de compresión de 14.5:1 y el máximo régimen de giro, 14000 rpm. Cuenta con refrigeración líquida y lubricación por cárter húmedo, estando sendas bombas integradas en el propio bloque. Aparejado al motor se encuentra a una caja de cambio de 5 velocidades.

Anotar que, montado en el puerto de admisión, el motor será entregado con un cuerpo de acelerador Keihin de 44 mm de diámetro. Este dispositivo alojará la válvula mariposa encargada de regular cuantitativamente el grado de carga de acuerdo con el principio de funcionamiento del motor de encendido provocado. Además de dicho mecanismo, cuenta con un inyector, sensor de posición del acelerador, un sensor de presión absoluta de admisión y una válvula reguladora del ralentí. Por tanto, será correcto referirse a este componente como cuerpo de inyección, ya que en él se alojará el inyector encargado de suministrar el combustible según dictará la electrónica.

En base a esto último, cabe recalcar que la gestión electrónica del motor recaerá sobre la unidad de control electrónico (ECU), comúnmente conocida como centralita, sobre la cual la normativa estipula que *«Solo se permite el uso de la Unidad de ECU del motor publicada ... por la Organización MotoStudent»*

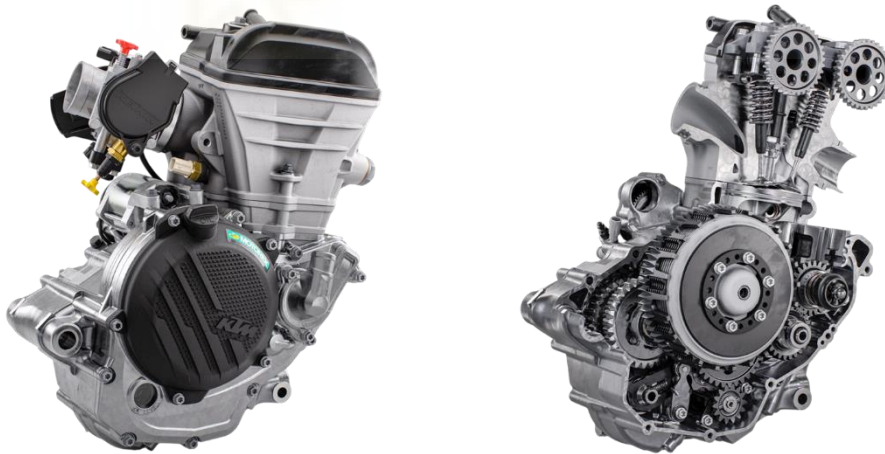


Ilustración 13 - Motor KTM 250 SX-F

Las cifras máximas de potencia y par motor serán de vital importancia para aproximar el comportamiento en recta del prototipo y, en base a esto, optimizar los diseños de las soluciones técnicas que se expondrán en este trabajo, asegurando así un rendimiento óptimo en situaciones de aceleración. No obstante, no se han aportado cifras exactas por parte de la organización ni el fabricante. A nivel oficial, únicamente se ha encontrado una referencia a una potencia aproximada de «más de 47 CV» declarada por el fabricante [2].

En consecuencia, se han explorado fuentes no oficiales, pues son varias las revistas y portales web que han podido realizar sus propias mediciones en un dinamómetro, también conocido como *dyno*, o banco de potencia. El tipo más común es el banco de rodillos, en los que se colocan las ruedas del vehículo sobre unos rodillos que generan resistencia sobre las ruedas motrices, mientras el motor opera a lo largo de su rango de revoluciones. La mencionada resistencia suele ser generada a través de un freno, razón por la que es común en zonas anglosajonas como Reino Unido o Estados Unidos emplear la unidad *brake horse power* para referirse a la potencia. Conociendo el régimen de giro del motor, la velocidad de rotación y dimensiones de las ruedas motrices, y midiendo la cantidad de resistencia que el motor puede superar, se deduce el par motor y calcula la potencia para cada punto del rango de funcionamiento. Se emplearán los datos publicados por Dirt Rider Magazine [3], un portal que da cobertura al todo tipo de motocicletas todoterreno, efectuando sus propias mediciones, incluyendo pruebas en su propio dinamómetro.

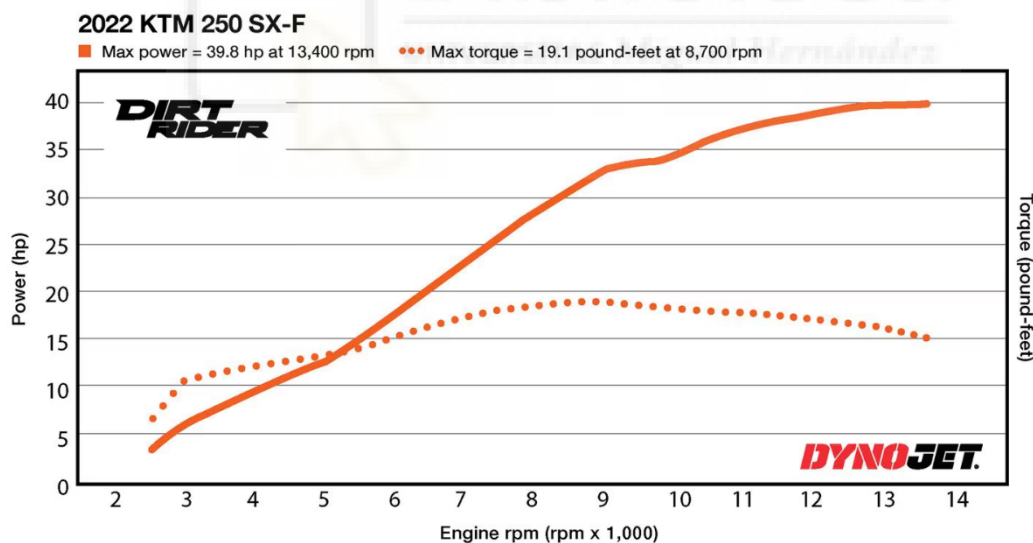


Gráfico 2 - Curva de potencia y par motor KTM 250 SX-F

$$P_{max} = 39.8 \text{ hp} \equiv 39.8 \text{ hp} \cdot \frac{745.7 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \approx 296.78 \text{ W}$$

$$N_{max} = 19.1 \text{ lb} \cdot \text{ft} \equiv 19.1 \text{ lb} \cdot \text{ft} \cdot \frac{1.356 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ lb} \cdot \text{ft}} \approx 25.9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Respecto a las medidas experimentales potencia y par máximos, cabe hacer la siguiente puntualización. Los valores obtenidos dependen de cada unidad, fabricante y tipo de banco de potencia, llegando a ser incluso más relevante la comparación de éstos con los correspondientes a otras motos que la propia magnitud. No obstante, los bancos son sometidos a calibraciones periódicas para reducir dichas diferencias. De hecho, varias fuentes coincidieron en publicar valores muy similares. Por tanto, las cifras reflejadas se considerarán una referencia adecuada además de permitir establecer un orden de magnitud en base al cual se realizarán los diseños.

Asimismo, es importante considerar que, al tomar el banco de pruebas las medidas en la rueda motriz participan las pérdidas correspondientes a la transmisión. Para calcular cuáles serían los valores en el eje de salida del motor, la práctica más habitual es dividir los datos medidos entre coeficientes que representen dichas pérdidas. Puesto que el rendimiento es una característica propia de cada transmisión, se emplean coeficientes representativos, entre el 10-15%. Sin embargo, no se considerará que este hecho comprometa la validez de las cifras obtenidas, siendo coincidentes con las publicadas por diferentes portales (ref. web).

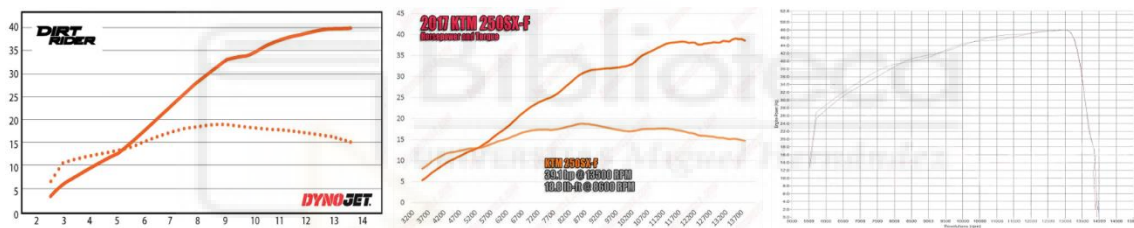


Gráfico 3 - Comparativa de pruebas KTM 250 SX-F [4]

2.4 Envergadura del proyecto

Un paso fundamental para conseguir implementar cualquier mejora en la práctica será concretar la envergadura del proyecto y especificar los campos y componentes en los que se va a trabajar. Nuevamente, se ha de recordar el aspecto preliminar de las diferentes soluciones que se presentarán en este documento, siendo susceptibles de verse modificadas antes posibles infortunios que pudieran surgir durante el desarrollo del prototipo, e incluso, por la intención de acomodar soluciones propias de otros departamentos, como pudiera ser el carenado, componente cuyo diseño será responsabilidad del departamento de aerodinámica, pero cuya implementación puede condicionar el rendimiento del motor, por ejemplo, alterando la ubicación de la toma de aire.

En la búsqueda de un aumento en la entrega del motor pueden adoptarse un número de enfoques relativamente limitado. En primer lugar, aportar una mayor cantidad de oxígeno, y con ésta, la cuantía de combustible, de forma que se libere más energía con la combustión, traduciéndose en un incremento en el par transmitido al cigüeñal durante la carrera de expansión. De lo anterior se deduce la necesidad de calibrar la electrónica, ajustando la inyección de combustible con el fin de conservar el dosado óptimo. También se puede recurrir a la modificación de los componentes internos, ya sea para sustituirlos por otros más resistentes, o por aquellos que permitirían variar alguna de las especificaciones del motor que tuvieran impacto sobre el desarrollo de potencia, como puede ser un aumento de la cilindrada o el incremento de la relación de compresión. Finalmente, de forma análoga a la entrada de aire, puede optimizarse el sistema de escape de forma que se mejore la evacuación de los gases de escape producto de la combustión.

Sin embargo, por beneficioso que resultara la implementación de un diseño de escape que promueva el vaciado eficiente de la cámara de combustión, dada la naturaleza del proyecto, la del desarrollo de un prototipo único de competición, se podrán dar complicaciones de tolerancias y ajuste entre los componentes diseñados, de modo que condicionar el diseño y fabricación del escape al montaje final de la moto será una práctica altamente recomendable.

Del mismo modo, no podrá realizarse la calibración de la unidad de control electrónico del motor, conocida comúnmente como centralita, hasta el momento en el que se disponga del prototipo completamente fabricado y ensamblado, listo para ser probado en un banco de potencia y, por tanto, cuente con todos los componentes implicados en el proceso de optimización del motor. Puesto que la redacción de este documento y su posterior defensa es muy anterior a dicho momento, la calibración de la centralita queda igualmente descartada. No obstante, ambas tareas quedan reflejadas en el apartado 7 “Plan de Implementación futura”.

Asimismo, quedan descartadas las ganancias de prestaciones relacionadas con modificaciones de los componentes internos, como aumento de la cilindrada, aumento de relación de compresión, aumento de alzada de válvulas, o aumento de cruce de válvulas. Esto se basa en el sellado del motor conforme lo reflejado en la sección C.1.2 de la normativa, según la cual *«El motor proporcionado por la Organización estará sellado y está estrictamente prohibido manipularlo. Cualquier sello roto o dañado será motivo para declarar una no conformidad técnica.»*.

En consecuencia, el tramo de admisión, encargado de captar el aire de admisión y conducirlo hasta los puertos de entrada al del motor, previa mezcla con el combustible inyectado se convertirá en el principal campo de estudio de este trabajo de fin de grado. Este será un sistema de admisión dinámica constituido por los siguientes componentes a evaluar:

- **Toma de aire forzado o *Ram-air intake*.**
- **Caja de remanso o *Air-box*.**
- **Trompeta de admisión o *runner*.**

Conviene anotar que el empleo de términos en inglés no aceptados parte de la intención de aclarar posibles ambigüedades, pues suelen encontrarse inconsistencias en las traducciones, desvirtuando la definición del componente.



3. Motivación de los componentes propuestos

3.1 Preámbulo general

Una vez definida la envergadura del presente trabajo de fin de grado se procederá a justificar la implementación de los diferentes componentes que constituirán el sistema de admisión.

A las cifras desarrolladas por el motor en su aplicación original, cabrá esperar un aumento relativamente notable en éstas, pues tras el estudio del emplazamiento y configuración del sistema de admisión de la KTM 250 SX-F, se podrá concluir que las restricciones presentes en el mismo son significativas.

Motivado por el uso que se les da a las motos de motocross, como es el caso de la KTM, la toma de aire y su correspondiente filtro se emplazan en la zona debajo del asiento. Pese a ser ésta la configuración idónea para ese tipo de motos, pues se utilizan cajas de filtro, la entrada de aire se realizará en uno de los puntos más altos y recogidos, para evitar la entrada de agua o la entrada de barro y polvo cuando se circula por la tierra, conllevará compromisos dado el reducido volumen de la caja de remanso y con éste las limitaciones en el tamaño de la trompeta de admisión que se quisiera aplicar. En consecuencia, de querer buscar ganancias en la entrega de un motor, es en estas ocasiones donde más se podrá ganar.



Gráfico 4 - Sistema de admisión original de la KTM 250 SX-F

3.2 Toma de aire forzado o *Ram-air intake*

3.2.1 Preámbulo sobre aerodinámica

El uso de las tomas de aire forzado es el resultado de aplicar principios aerodinámicos al sistema de admisión. La aerodinámica tan sólo se remonta al siglo XVII. La evolución de ciencia ha jugado un papel clave en el diseño de vehículos, gracias a la popularización de los túneles de vientos la década de 1970, la generalización de herramientas CFD o dinámica de fluidos computacional en los 90 y los avances en ciencia de materiales, así como el diseño asistido por ordenador o CAD con el comienzo de siglo.

El desarrollo alcanzado en el ámbito de la aerodinámica ha sido tal que las competiciones muestran una tendencia progresivamente más restrictiva respecto al uso de elementos y efectos aerodinámicos. Al mismo tiempo, la conciencia medioambiental impulsa la implementación de algunos de estos avances en los vehículos de calle buscando la reducción de gasto de combustible.

Respecto a las motos de competición, hasta los años 50 no se emplearon ningún tipo de solución con fines aerodinámicos. Fue al final de la década se produjo una revolución en este departamento, buscando reducir al máximo la fricción con el aire, empleando carenados que llegaban a cubrir el frontal completamente. Aunque este enfoque ofrecía una mejora sustancial en las rectas, provocaba que las motos fuesen vulnerables al viento cruzado, además de empeorar el comportamiento tanto en adelantamientos como en el paso por curva. Por motivos de seguridad, este tipo de soluciones fueron prohibidas. Los carenados fueron aerodinámicamente conservadores hasta 2016 donde se comenzaron a implementar alerones y aletines en la categoría de Moto GP.



Ilustración 14 - Evolución de los carenados de competición

Del mismo modo, las diferentes soluciones aerodinámicas aplicadas en los prototipos de competición se han abierto paso hasta llegar a las motos de calle de alto rendimiento en pos de aumentar sus prestaciones y manejo.



Ilustración 15 - BMW M 1000 RR 2025

3.2.2 Función de la *Ram-air intake*

El aire de admisión se obtiene del ambiente a través de una apertura o conducto. Las tomas de aire forzado o *ram-air*, se caracterizan por ubicar dicha toma de aire en un punto de alta presión dinámica, es decir, aquel en la velocidad del fluido, el aire en este caso, sea elevada. De forma colateral, las regiones en las que el aire tiene mayor velocidad suelen coincidir con aquellas en las que su temperatura es menor, permitiendo que la temperatura de admisión sea reducida aumentando la densidad del aire y, con ésta, la cantidad de oxígeno disponible para el proceso de combustión.

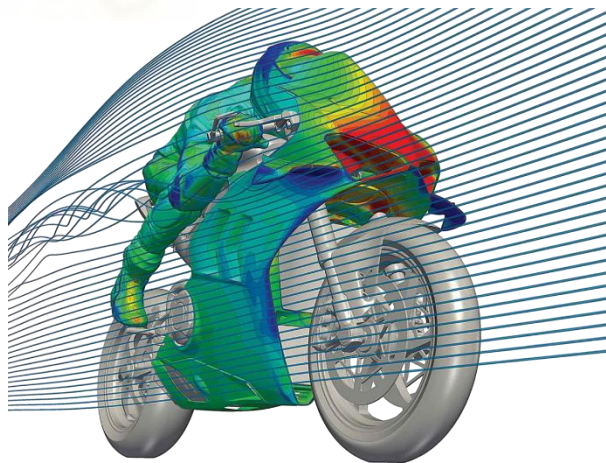


Ilustración 16 - Ejemplo de líneas de corriente

La implementación de este tipo de tomas de aire puede encontrarse en multitud de aplicaciones. De acuerdo con el contexto del presente documento, en el ámbito del *motorsport* ha resultado en la silueta característica de los monoplazas de fórmula 1, dónde la cúpula tras el piloto no sólo sirve de arco de seguridad en caso de vuelco, sino de alojamiento para la toma de aire.



Ilustración 17 - Ram-air intake del Lotus T128 [5]

3.2.3 Orígenes de la *Ram-air intake*

Ejemplos del conocimiento sobre el efecto *Ram* pueden remontarse hasta la década de 1920, como cuando la firma Rolls-Royce fabricaba motores para hidroaviones que competían en el Trofeo Schneider. Durante estas carreras se producían explosiones en los conductos de admisión. Este fenómeno se justifica en el empobrecimiento de la mezcla, debido a un exceso de aire. Dicho empobrecimiento provocaba que el foco de llama no pudiese propagarse, resultando en combustiones incompletas, que detonaban en los puertos de admisión al abrirse las válvulas de admisión y encontrarse con la nueva carga. Este fenómeno se justifica por las altas velocidades alcanzadas, sin reducción de la presión ambiente, pues los hidroaviones circulaban a nivel del mar y, al empleo de carburadores tradicionales, los cuales no eran capaces de ajustar automáticamente el dosado. Por tanto, aumentaba la cantidad de aire disponible para el motor hasta que ésta resultaba excesiva respecto a la cantidad de combustible proporcionado por el carburador.

Respecto a las primeras aplicaciones de sistemas de admisión en motocicletas, cabe destacar su introducción en la categoría reina del campeonato mundial a finales de la década de 1980 y principios de los 90, cuando en esta categoría todavía se empleaban motores de 2 tiempos y 500 cm³ de cilindrada. La configuración más común y que todavía se emplea en la actualidad puede rastrearse hasta la Honda NSR500 de 2001.



Ilustración 18 - Honda NSR500 2001 junto a Honda RC213V 2025



Ilustración 19 - Detalle de la toma de aire Honda RC213V 2024

Como es costumbre, las soluciones desarrolladas en competición acaban aplicándose a los vehículos de calle. En la década de los 90, la firma Kawasaki fue pionera en la implantación de sistema de admisión dinámica [6] en busca de ganancias de potencia. A pesar del escepticismo inicial, la gran mayoría de motos de calle de altas prestaciones cuentan con este tipo de admisión.

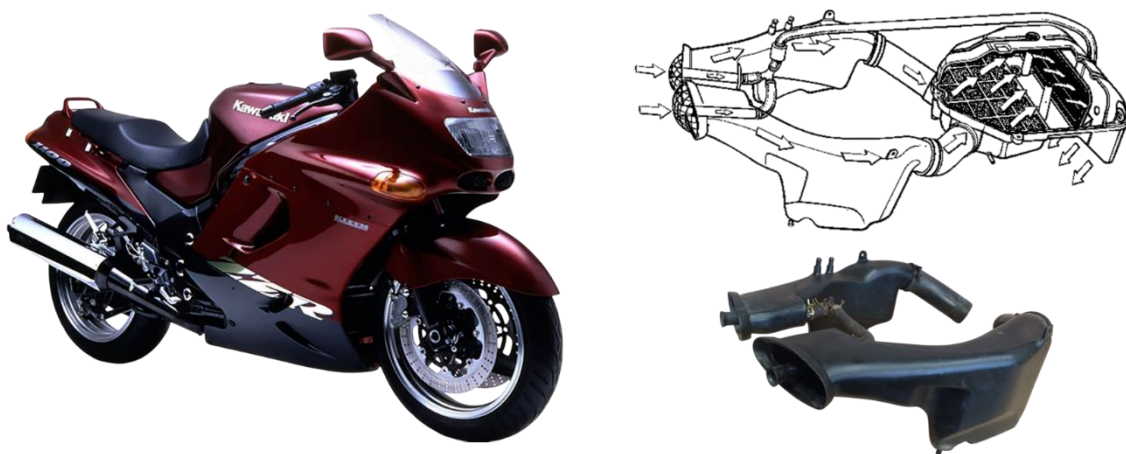


Ilustración 20 - Kawasaki ZZR 1100 1993 y su sistema de admisión dinámica

La práctica totalidad de motos de calle cuentan con aspiración atmosférica, pues el empleo de sistemas de inducción forzada resulta incompatible, ya que un aumento radical en la presión de admisión debe conllevar el empleo de componentes internos más resistentes y con ello, un aumento de peso notable incompatible con la naturaleza liviana de las motos. Por lo tanto, diseñar e implementar un sistema de admisión *ram-air* es una de las alternativas más efectivas para conseguir un incremento significativo en la presión a la que aspira el motor.

Conviene anotar que las geometrías de las tomas de aire suelen presentar forma ovalada, en el intento de abarcar la mayor parte de la región del carenado en el que la presión dinámica sea máxima, mientras que se evita interferencias con otros componentes como la pipa de dirección o la araña del carenado, motivo por el cual las tomas de aire pueden extenderse más a lo ancho que a lo alto, resultando en la característica geometría ovalada.

3.2.3 Normativa Aplicable a la *Ram-air intake*.

En el reglamento MS2425, aunque no se haga una referencia directa a un sistema tipo Ram-air, sí se alude a sus efectos en el punto C.2.3.1:

«Se prohíbe el uso de sistemas de "turbo" para aumentar la presión del gas en la admisión. Solo se permite hacer uso de la aerodinámica del movimiento del vehículo mediante tomas de aire.»

Por lo tanto, la implementación de tomas de aire forzado está recogida y amparada por la normativa de la competición.

3.2.4 Desafíos para la integración de la *Ram-air intake*

3.2.4.1 Disposición del motor

La disposición del motor viene fijada desde la dirección del UMH RT, buscando no dificultar las labores del departamento de chasis, por ejemplo, a la hora de diseñar los soportes del motor. Según esta disposición convencional, el puerto de escape estará orientado hacia el frontal de la moto, mientras que el de admisión lo estará hacia la trasera. Tal y como se comentará en el apartado 4. Diseño, se buscará un camino directo, reduciendo el número de codos en las conducciones, que puedan generar pérdidas y reduzcan la efectividad del sistema. El hecho de poder emplazar el motor en el sentido opuesto permitiría diseñar una conducción más corta y directa, además de mantener toda la admisión en la parte de la moto más expuesta a aire fresco. No obstante, la disposición convencional no sólo compromete las canalizaciones, sino que podrían limitar el volumen de la caja de remanso y las temperaturas en su interior.

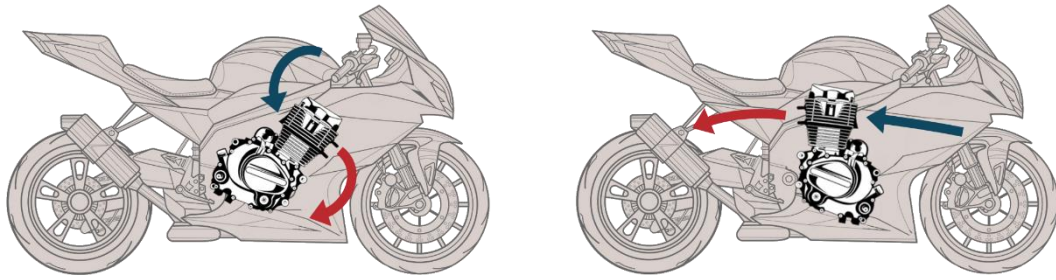


Ilustración 21 - Comparativa entre disposición de motor convencional (izq.) frente alternativa (dcha.)

3.2.4.2 Carenado

A fecha de redacción de este trabajo, el equipo tiene la intención de emplear un carenado único. Éste será el resultado de, partiendo de un carenado comercial, escanearlo en 3D, modelar mejoras, analizarlas e implementarlas sobre el mismo. Una de las ventajas de esta propuesta, será el poder dimensionar la toma de aire sin contar con restricciones desde otro departamento. Sin embargo, recordando el carácter preliminar de los diseños que se expondrán, se partirá de un carenado convencional, el cual ya contará con una apertura que actúe como toma de aire.

3.2.4.3 Pipa de dirección

La pipa de dirección es el cilindro donde se aloja el eje de dirección que permite que las barras de la horquilla de suspensión delantera, y por tanto la rueda delantera, puedan girar. La pipa de dirección suele encontrarse labrada en propio chasis de la motocicleta, como es el caso del chasis multitubular que se empleará en la próxima edición de MotoStudent.

Puesto que ésta se encontrará en el plano central de la moto supone uno de los mayores de obstáculos para la canalización del aire recogido en la toma del frontal del carenado. Como se verá en apartado 4. Diseño, puede esquivarse la pipa de varias formas, pero, en cualquier caso, será fuente de pérdidas inevitable.

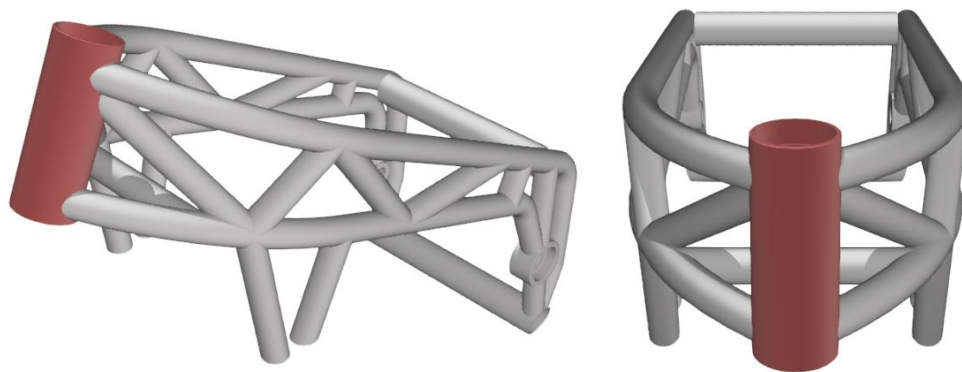


Ilustración 22 - Pipa de dirección

3.2.4.4 Tubos de refuerzo de chasis

En el caso de un chasis multitubular se puede diferenciar entre tubos principales y tubos secundarios o de refuerzo. Tal y como cabría presuponer, la diferencia entre ellos radica en los esfuerzos a los que serán sometidos, derivando en el uso de mayores diámetros en el caso de los principales frente a los empleados en los tubos de refuerzo. Esquivar los tubos principales no supondrá gran problema, mientras que no sucederá lo mismo con los de refuerzo, pues estos se sueldan a los anteriores conformando una celosía que ofrecerá secciones de paso para las canalizaciones de admisión relativamente reducidas. Estrangular el caudal de admisión es altamente perjudicial, efecto que se analizará más adelante.

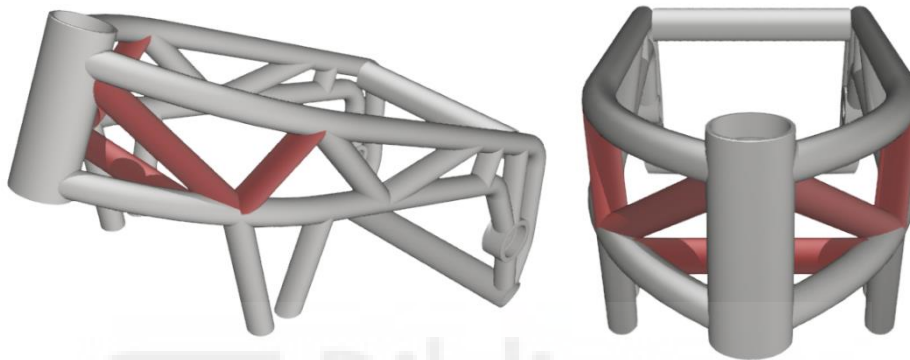


Ilustración 23 - Tubos de refuerzo

3.2.4.5 Depósito de combustible

Partiendo de un emplazamiento convencional del motor, el puerto de admisión de éste estará en la parte superior del mismo. Del mismo modo, el depósito de combustible suele colocarse en la parte superior del chasis. De esta manera, el espacio comprendido entre la parte superior del motor y el depósito es reducido, siendo esta zona donde se alojará la caja de remanso. En consecuencia, el depósito se convertirá en un nuevo que las canalizaciones deben sortear.

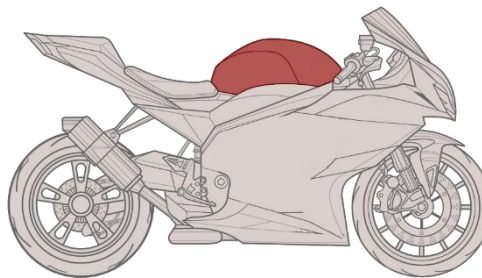


Ilustración 24 - Ejemplo de depósito de geometría y ubicación convencional

En consecuencia, el equipo evaluará adquirir un depósito de combustible cuya geometría permitirá maximizar el espacio disponible para la caja de remanso. Se buscarán depósitos comerciales que cuenten con el certificado exigido por la normativa o se procederá a la fabricación de un depósito metálico de diseño propio, siempre en aras de conseguir una integración óptima de los componentes involucrados.

3.2.4.6 Anchura total

En base a lo reflejado en apartado 1.3.3, la comodidad del piloto será una máxima de cara al desarrollo de la fase MS2. Anteriores prototipos han podido resultar excesivamente anchos para el piloto. Aunque esa dimensión está principalmente conectada con el diseño del chasis, otros elementos como el cargando o las canalizaciones de la admisión pueden desembocar en una posición de pilotaje incómodo que perjudique el tiempo por vuelta, tirando por tierra cualquier mejora de prestaciones que estos dispositivos llevaran aparejada. Asimismo, un aumento en cualquiera de las dimensiones principales del prototipo podrá verse traducido en el incremento de la resistencia aerodinámica al aumentar la superficie frontal.

3.3 Caja de remanso

3.3.1 Preámbulo aclaratorio / desambiguación

Como sucede con otros muchos componentes mecánicos, existen un gran número de nombres con el que se puede hacer referencia a este dispositivo: caja de remanso, caja de filtro, caja de admisión, *plenum*, *airbox*. Aunque hay lugar para los matices que diferencian cada uno, con frecuencia se usan indistintamente. En el presente trabajo, se emplearán al anglicismo *airbox* por su carácter general, y caja de remanso o *plenum*, pues destaca la naturaleza de su implementación en el prototipo de competición.

Asimismo, podrá resultar ambiguo diferenciar entre el fin del *ram-air* y el inicio de la caja de remanso. En el caso del presente documento, se entenderá que la *ram-air intake* abarca desde la toma de aire, hasta la entrada de la caja de remanso, y ésta última estará constituida por el recinto que le sucede y conecta con el puerto de admisión.

3.3.2 Función de la *airbox*.

Una entrada de aire directa a la admisión, resultado de implementar una toma de aire forzado, es especialmente beneficiosa si se diseña una *airbox* exprofeso, de forma que un ensanchamiento de la sección de paso de la conducción ralentice la corriente, transformando de presión dinámica del aire en presión estática. Con el aumento de ésta última, se generará un mayor diferencial de presiones entre el puerto de admisión y la cámara de combustión, provocando un llenado más efectivo del cilindro, elevando la presencia de oxígeno en éste, de forma que se podrá inyectar una mayor cantidad de combustible, resultando en una combustión superior y el consecuente incremento de par transmitido al cigüeñal durante la fase expansión.

De igual modo, la caja de remanso o cámara de tranquilización se encarga de disminuir la turbulencia del aire de admisión, Para evitar que la masa de aire que entra en el cuerpo de inyección esté compuesta por corrientes de aire con diferentes velocidades, lo que produciría un llenado heterogéneo y parcial. En el caso de motores pluricilíndricos, también velará por una distribución uniforme de entre los cilindros. Aunque el empleo de corrientes, conocidas como *swirl* y *tumble*, permite un mejor mezclado del combustible con el aire de admisión, exige simulaciones y ensayos propios de los grandes fabricantes de motores térmicos, además de frecuentemente requerir válvulas específicas que provoquen dichas corrientes, algo prohibido por la normativa, conforme al apartado C.2.2.1, según el cual «Solo se permite una mariposa o un sistema mecánico equivalente, que debe ser activado únicamente por medios mecánicos (por ejemplo, cable) manejados por el piloto. Se podría implementar un baipás para controlar la velocidad de ralentí del motor.»

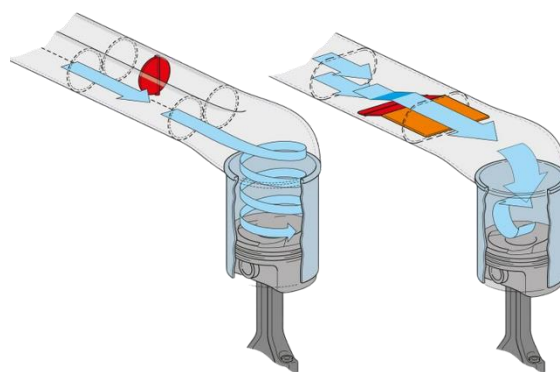


Ilustración 25 - Empleo de válvulas para generar swirl (izq.) y tumble (dcha.)

Conviene señalar como el impacto del volumen y geometría de las *air-box* es notablemente superior en los motores atmosféricos respecto a aquellos sobrealimentados. Servirá de ejemplo de este fenómeno la diferencia en volumen de la caja de remanso del Ferrari 458 (atmosférico) comparado con la presente en su sucesor, el 488 GTB (biturbo).

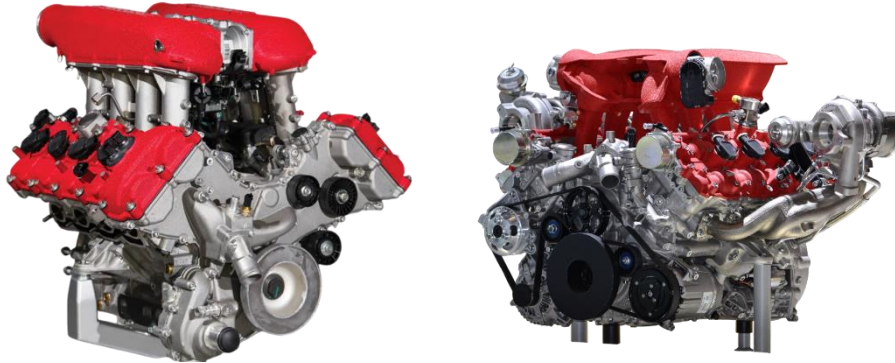


Ilustración 26 - Comparativa entre cajas de remanso de los Ferrari 458 (izq.) y 488 GTB (dcha.)

3.3.3 Normativa Aplicable a la *airbox*.

El reglamento MS2425 cuenta con una subsección dedicada a la caja de remanso o *air-box*. Ésta es la correspondiente al apartado «C.2.4 Caja de aire y filtrado de aire»

«El diseño de la caja de aire es libre, excepto por las reglas establecidas a continuación. La caja de aire con filtro de aire es obligatoria. La caja de aire debe tener un volumen mínimo de 2,4 litros. El filtro de aire es de libre elección y debe filtrar partículas con un diámetro mínimo de 1 mm.»

Cabe destacar que el reglamento obliga a implementar una caja de remanso. No sería suficiente con la instalación de una tobera de admisión y su correspondiente filtro.

3.3.4 Desafíos para la integración de la *airbox*

3.3.4.1 Disposición del motor

Nuevamente, la disposición convencional del motor, según la cual el puerto de escape queda próximo al frontal de la moto, será fuente de restricciones, pues espacio disponible para la caja de remanso, al tener que encontrarse ésta en el interior del chasis, quedará confinada por el propio motor, el depósito de combustible, el asiento y subchasis trasero, y el esquema de suspensión del basculante trasero. Además, la zona descrita es una de las más calientes, lo que provoca la indeseable absorción de calor por parte de la *airbox*. Esto podrá reducir la densidad del aire de admisión, disminuyendo así la cantidad de oxígeno disponible para el motor.

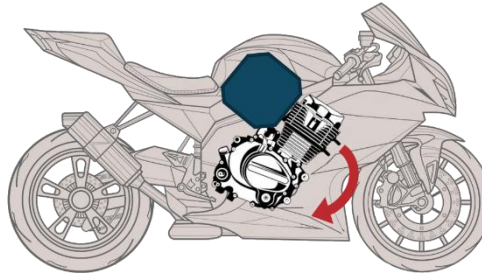


Ilustración 27 - Volumen disponible para la caja de remanso según disposición convencional del motor

De recurrir a la disposición alternativa, en la que el puerto de admisión sería el más cercano a la parte delantera de la moto, se dispondría de mucho más espacio para poder albergar una caja de remanso de mayor volumen. Esto sería posible gracias al hecho de tratarse de un motor de cilindrada y potencia reducida, en el que los requisitos de refrigeración se satisfacen con un radiador de dimensiones relativamente modestas, no entrando en conflicto de espacio con la *airbox*. Asimismo, el contacto directo con aire fresco garantizaría una menor temperatura en el interior de ésta, extrayendo calor por conducción y convección, aumentando la densidad del aire de admisión y la consecuente ganancia de prestaciones.

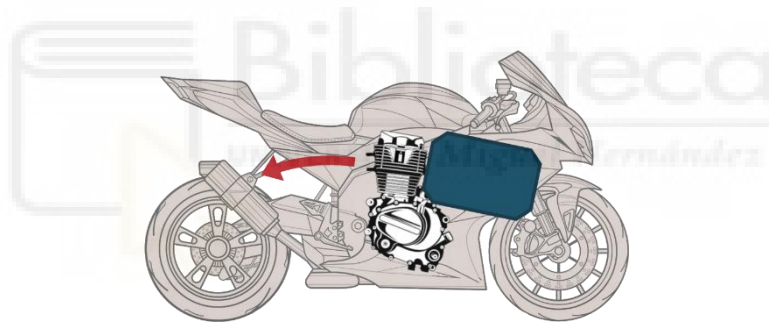


Ilustración 28 - Volumen disponible para la caja de remanso según disposición alternativa del motor

3.3.4.2 Depósito de combustible

Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, el depósito constituirá uno de los componentes que más contribuirá en la limitación del volumen disponible para la caja de remanso. Esto seguiría suponiendo un obstáculo a evaluar detenidamente, aun si se recurriese a la disposición alternativa del motor. En cualquier caso, el depósito debe encontrarse en una zona elevada y próxima al centro longitudinal de la moto, para garantizar el correcto cebado de la bomba de combustible al mismo tiempo que no se aumenta innecesariamente el momento polar de inercia, al dejar elementos relativamente pesados “colgando” por delante o detrás del centro de gravedad.

El apartado C.3.1.3 del reglamento estipula que “En caso de tanques de combustible “no metálicos” ... es obligatoria la instalación de una segunda vejiga interna homologada adicional. Si los tanques no metálicos tienen aprobación FIM/CE ... la vejiga interna no es obligatoria ... Los tanques de combustible de plástico de motocicletas de producción homologadas también se aceptarán sin necesidad de usar una vejiga de combustible. Cualquier modificación en el tanque de combustible de plástico original o en la vejiga de combustible anulará la homologación/certificación.”. En base a esto, el equipo evaluará adquirir un depósito comercial que cuenten con el certificado exigido o procederá a la fabricación de un depósito metálico de diseño propio, de forma que, para cualquiera de dichas alternativas, se maximice el volumen de la caja de remanso.



Ilustración 29 -Depósito comercial (negro) junto a air-box (naranja) en KTM RC250R

Una alternativa innovadora sería emplear algún elemento estructural hueco como depósito de combustible. Esta solución no solo sería intrínsecamente desafiante en la puesta en práctica, sino que no se debería considerar siquiera al tratarse de un chasis multitubular. Sería digna de evaluación en el caso de emplearse un chasis de doble viga, en el que el volumen interior de los perfiles de aluminio que conforman el chasis sería suficiente en magnitud y relativamente viable para su aplicación, sin dejar de ser una apuesta arriesgada que seguiría confrontándose con el principio expresado en el punto 1.3.3, en el que la efectividad y el pragmatismo deben ser máximas a seguir. Esta solución tan poco convencional se llegó al mercado comercial en la Buell XB9.



Ilustración 30 - Buell XB9

3.3.4.3 Posición de pilotaje

Al igual que en el apartado correspondiente a la *ram-air intake*, es imperioso destacar lo reflejado en apartado 1.3.3, es decir, la comodidad del piloto es fundamental para obtener un buen resultado en la fase MS2. En caso de elevar demasiado a altura del asiento para alojar una *airbox* de mayor tamaño, el piloto podría tener la sensación de estar siendo empujado hacia el frontal de la moto, de forma que cualquier pequeña mejora en el rendimiento del motor se vería aún más empequeñecida al perjudicar gravemente la conducción.

3.4 Trompeta de admisión

3.4.1 Preámbulo sobre la trompeta de admisión

Paralelamente a la implementación de sistemas de admisión dinámica, una práctica frecuente en el intento de aumentar la entrega de potencia es el sintonizado de admisión, especialmente en motores atmosféricos como el que se empleará en el prototipo de competición.

La apertura de las válvulas de admisión coincidirá (teóricamente) con el descenso del pistón, que provocará una depresión por la que se aspirará la mezcla fresca de aire y combustible. Cuando las válvulas se cierran, la corriente de aire tendrá cierta inercia y chocará con el dorso de éstas, provocando una onda de expansión que se propagará hacia la sección de salida del conducto de admisión.

Cuando dicha onda llegue a la entrada de la tobera y quiera continuar hacia el interior de la caja de remanso, se reflejará parcialmente, en esta ocasión como una onda de compresión en sentido opuesto, dirigiéndose hacia las válvulas de nuevo.

Si consigue sincronizar la llegada de la anterior onda con la fase de apertura de las válvulas de admisión, se provocará un efecto “sobrealimentador” que forzará la entrada adicional de aire, aumentando el rendimiento volumétrico al mejorar el llenado del cilindro. Este efecto ocurrirá a ciertos regímenes de giro del motor, determinados por la geometría de la admisión, lo que dará lugar a “picos de sintonización”.

Por noma general, se entiende que el pico de sintonizado se desplazará sobre el rango de revoluciones de forma inversamente proporcional a la longitud del conducto, es decir, cuanto menor sea su longitud, mayor será el régimen de giro al que se alcanzará el sintonizado. Este fenómeno podrá comprometer la elasticidad de los motores, en particular, aquellos destinados a vehículos de calle. Es por esta razón que se existen motores con conductos de admisión de longitud variable, variando ésta en función del punto de funcionamiento, normalmente por etapas, aunque también hay ejemplos de sistemas de variación continua. Si es posible modificar la longitud de estos conductos mientras el motor atraviesa su rango de revoluciones, se puede obtener este beneficio a lo largo de un amplio abanico de velocidades de giro.

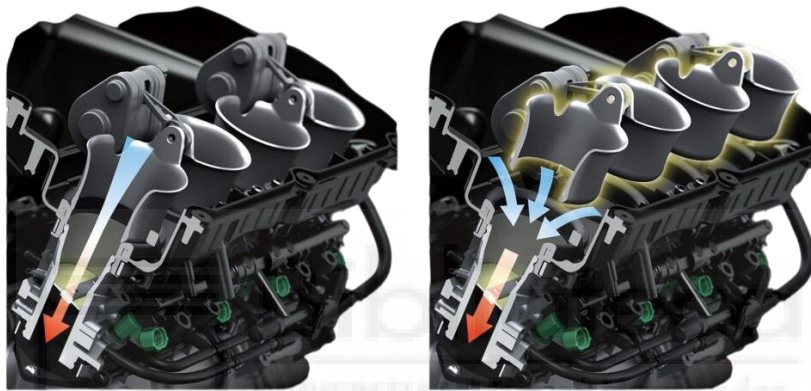


Ilustración 31 - Sistema VAI de la Kawasaki Ninja ZX-10RR CG

Conviene reseñar que el sintonizado constituye la base del diseño de los sistemas de escape empleados en motores de 2 tiempos, jugando un papel fundamental en la extracción de gases de escape, pues estos motores no siguen un ciclo que cuente con una etapa específica para este fin. Además, al contar con un estrechamiento en su sección final, se limita la cantidad de mezcla fresca que pudiera escapar al escape durante el proceso de barrido de los gases de combustión.

3.4.2 Orígenes

El conocimiento sobre el impacto de la longitud de los conductos de admisión sobre el rendimiento del motor puede remontarse hasta las primeras aplicaciones de motores en competición. Sin embargo, su estudio fue principalmente empírico, evaluando los efectos directamente en base a las prestaciones del vehículo analizado. Respecto a la geometría característica, por la cual se suele referir a la tobera de admisión como trompeta, fue producto de la implementación de turbinas en la aviación frente a los motores de cilindros tradicionales, pues la entrada de aire se convirtió en un factor muy sensible en el funcionamiento de las turbinas. Estos diseños fueron recogidos y aplicados a los vehículos terrestres y tuvieron una notable presencia en la escena de vehículos modificados en la década de 1950.

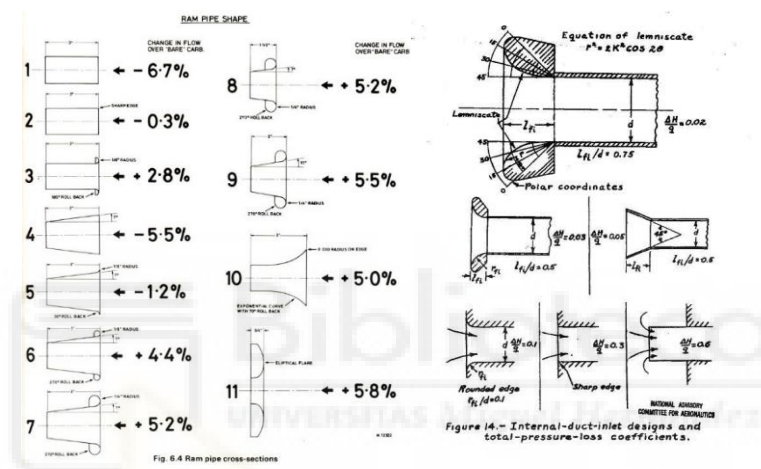


Ilustración 32 - Ejemplos de guías tradicionales de diseño [6]

En el caso de los automóviles modernos, equipados mayoritariamente con motores turboalimentados, la relevancia de las trompetas de admisión ha empequeñecido significativamente, aunque, en el caso de las motos y en base al hecho de contar con motores atmosféricos, siguen siendo un componente para tener en alta consideración, especialmente en aquella de altas prestaciones, dónde los regímenes de giro son muy elevados exigiendo mayor precisión en la elección de la longitud y geometría de la trompeta de admisión.

3.4.3 Normativa aplicable a la trompeta de admisión

No obstante, el prototipo sujeto del presente documento será sometido a pruebas en circuito, en las que su motor estará girando a altas revoluciones en todo momento, motivo por el cual se perdería la ventaja de adaptar activamente la longitud del conducto de admisión, aun estando su uso aparado por la normativa en el punto C.2.1.2 y según el cual *«Se permite la instalación de dispositivos móviles en el sistema de admisión antes de las válvulas de admisión de la cámara de combustión, con el único propósito de modificar la longitud del conducto de admisión»*. Sin embargo, sí se buscará encontrar aquella longitud de la trompeta de admisión que maximice la ganancia en prestaciones bajo las condiciones de contorno específicas que se establecerán en el punto 4.2.

3.4.4 Desafíos para la integración de la trompeta de admisión

De acuerdo con lo anotado en el punto 2.3.2, la organización entregará el motor ya provisto de cuerpo de acelerador. Éste será el empleado por el UMH RT a pesar de que el reglamento contemple la posibilidad de emplear otro dispositivo equivalente e, incluso, el uso de carburador. La razón detrás de esta decisión es el pragmatismo, este componente ha sido testado y no se asumirán riesgos innecesarios.

No obstante, el uso del cuerpo de acelerador implicará que su geometría jugará un papel fundamental en el desarrollo de la trompeta, ya sea porque su longitud se tendrá en cuenta de cara al diseño, o por el perfil troncocónico de su sección de paso. La trompeta diseñada se acoplará sobre la sección de entrada del cuerpo de inyección y éste se encontrará parcialmente introducido en la caja de remanso, dejando la parte media e inferior fuera de la *airbox*, permitiendo su acceso y así su manipulación y mantenimiento.

Asimismo, y a diferencia de lo expuesto anteriormente respecto a los componentes del sistema de admisión ya presentados, habrá un único factor limitante de cara al desarrollo e implementación de la trompeta de admisión y éste será el espacio, ya que la disposición del motor, el empleo del cuerpo de acelerador suministrado y el volumen de la caja de remanso, podrá dificultar el diseño y funcionamiento del componente.



4. Diseño

4.1 Preámbulo general sobre diseño

4.1.1 Carácter preliminar

Tal y como se ha mencionado en varias secciones de este documento, es crucial destacar el carácter preliminar de las diversas soluciones técnicas. Factores externos, como la capacidad de fabricación de los proveedores, así como factores internos, tales como las decisiones adoptadas por otros departamentos, pueden influir en la solución final que se implementará en el prototipo. A pesar de ello se propondrán diseños que se ajustan a las exigencias y restricciones presentes en el momento de redacción de este trabajo y que cumplan con los criterios y objetivos que se detallarán a continuación.

4.1.2 División del proceso de diseño

La división en dos secciones para las labores de diseño se justifica debido a la naturaleza y funciones distintas de los componentes involucrados. Por un lado, el conjunto *ram-air airbox* se centrará en buscar una solución óptima que capte y conduzca eficientemente el aire de admisión para aumentar la presión estática del mismo y quedar a disposición del motor y éste pueda realizar la fase de aspiración a mayor presión que la atmosférica. Por otro lado, el diseño de la trompeta de admisión se enfocará en un análisis de la geometría y las características acústicas para aprovechar las ganancias por resonancia.

Aunque ambas soluciones tengan el objetivo de aumentar el rendimiento volumétrico el motor y, en consecuencia, mejorar el llenado del cilindro, las bases teóricas y los respectivos cálculos serán abordados de forma independiente.

4.1.3 Flujo iterativo del proceso de diseño

Las diferentes características que conforman el diseño de los componentes objeto de este trabajo de fin de grado no son arbitrarias. Deben ser el producto de aplicar los conocimientos adquiridos a través de las múltiples asignaturas cursadas. El proceso o flujo de diseño que se seguirá queda definido a continuación.

Los objetivos y criterios de diseño constituirán la base del diseño, enmarcarán la finalidad de las soluciones técnicas expuestas y guiarán el desarrollo de las mismas. Del mismo modo, las condiciones de contorno definen la situación para la que se optimizará el diseño y que pueden venir impuestas o ser deducidas en base a cálculos y/o expectativas.

Con lo anterior se podrá afrontar el predimensionado teórico de los dispositivos, es decir, una primera aproximación a las dimensiones de éstos derivadas de la aplicación de cálculos teóricos en los que se asumen una serie de hipótesis y compromisos. A éste predimensionado se le han de añadir las restricciones de integración con el resto de los componentes del prototipo.

Entonces se podrá realizar la primera iteración del modelo mediante herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), en particular para este proyecto se empleará AutoDesk Inventor, una potente herramienta para el desarrollo de modelos 3D, simulaciones y documentación técnica, permitiendo el diseño y evaluación de todo tipo de componentes, desde piezas sencillas hasta ensamblajes complejos.

Una vez realizado el diseño, se comprobará su funcionalidad gracias a simulaciones realizadas con programas de fluidodinámica computacional (CFD), mediante las cuales se pueden resolver ecuaciones complejas que describen el flujo de fluidos y el comportamiento aerodinámico, aplicadas gracias al proceso de mallado, que permitirá obtener resultados precisos y detallados al subdividir el dominio de análisis en pequeñas celdas. Estas simulaciones permitirán predecir y analizar la distribución de presiones y velocidades del flujo a través de los componentes modelados, asegurando que el diseño cumpla con los valores objetivos.

Al tratarse de la primera simulación, la exigencia de esta no debe ser elevada, ya que no se busca optimizar sino garantizar que se cumplen los objetivos iniciales. Por tanto, el mallado no será muy fino para así reducir el coste computacional, permitiendo una evaluación general de la funcionalidad del diseño sin excesiva demanda de recursos ni tiempo. De no ser así, se volverá al modelado en busca de satisfacer dichos objetivos y su consecuente simulación. En consecuencia, este ciclo se repetirá hasta que los objetivos queden cubiertos.

Una vez cubiertos los objetivos se comprobará si alguno de los criterios queda pendiente. El intento de cumplir los criterios se traducirá en un proceso de optimización, mediante simulaciones con mallado más preciso. Ceñirse a los criterios podrá derivar en la vuelta al proceso de modelado, en el que realizar modificaciones, y éstas seguirán teniendo que ser nuevamente verificadas. Cuando la ganancia en satisfacción tras la iteración sea lo suficientemente pequeña como para poder asumirse como poco relevante, se asumirá que el modelo de la correspondiente iteración como el definitivo.

Aunque quedará fuera del alcance de este estudio, se propondrá, en el capítulo 6, se propondrá la verificación del sistema y evaluación del sistema, mediante la implementación de sensores, que aporten lecturas de las correspondientes variables involucrados y/o evaluadas en el proceso de diseño.

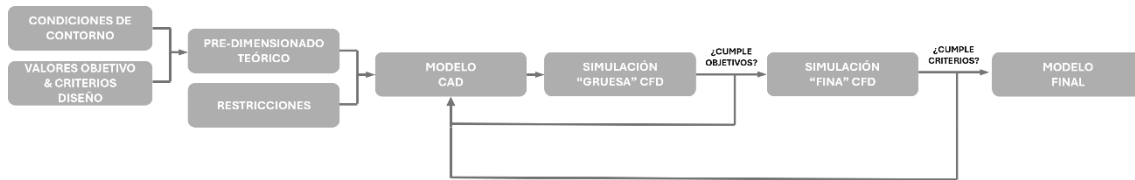


Gráfico 5 - Flujo iterativo del proceso de diseño

4.1.4 Criterios de diseño generales

Los criterios de diseño actuarán como estándares de referencia y guías esenciales en el desarrollo de los diseños. Definirán los aspectos fundamentales que deberán considerarse para asegurar que todos los componentes diseñados cumplan con los requisitos y objetivos planteados.

Pese a haberse separado el diseño en dos bloques independientes, los siguientes criterios serán aplicables a todo el proyecto de manera uniforme. Estos criterios, ya introducidos brevemente en el punto 1.3.3, garantizarán la cohesión e integración de todos los componentes del diseño dentro del desarrollo del prototipo final. Estos criterios serán:

- Priorizar **la efectividad y el pragmatismo, buscando el compromiso entre innovación y factibilidad** que garantice un rendimiento a la altura de los rivales sin sacrificar fiabilidad ni poder en riesgo la participación en las diferentes etapas de la competición.
- No comprometer la posición de conducción, la comodidad del piloto es una máxima para el correcto desarrollo de la fase MS2.
- Garantizar la viabilidad de puesta de implementación del diseño, recordando que las geometrías deben ser relativamente sencillas en aras de facilitar su fabricación, llegando a permitir la total independencia de terceros a nivel de herramientas y/o servicios.
- Limitar el impacto y compromisos que las soluciones adoptadas pudieran tener en las labores asociadas a otros departamentos, como el departamento de diseño estructural o el departamento de aerodinámica.

4.2 Condiciones de contorno

4.2.1 Preámbulo sobre las condiciones de contorno

El diseño del sistema de admisión no será fortuito, sino el resultado de un proceso de estudio y optimización para unas circunstancias concretas. Sirviendo de ejemplo, cuando los motores se encuentran aparejados a cajas de cambios convencionales, no funcionan a un régimen de giro constante, sino que, para una misma marcha, varían su régimen de giro en función de la velocidad. En consecuencia, el diseño de la admisión se optimizará para un determinado rango de revoluciones. Este fenómeno es especialmente notable en vehículos de calle, en los que los abanicos de velocidades al que circulan y las revoluciones a las que su motor gira son relativamente amplios.

No obstante, durante la competición, el prototipo será llevado a sus límites, por lo tanto, su rendimiento a bajas revoluciones o a bajos grados de carga se vuelven despreciables en la práctica, y, por tanto, tenerlos presentes en el proceso de optimización supondría un error.

Asimismo, la velocidad del prototipo tendrá un impacto notable en la entrega del motor, pues el aumento en la presión de admisión asociada al sistema evaluado en el presente documento se fundamentará en las presiones dinámicas elevadas propias de circular a elevadas velocidades.

A continuación, se expondrán las diferentes variables que jugarán papel en el correcto funcionamiento del sistema de admisión de aire forzado y, por tanto, en su proceso de diseño y optimización.

4.2.2 Propiedades del aire

En primer lugar, se tendrán presentes las condiciones climatológicas que tendrán un impacto en las propiedades del aire ambiente. Las pruebas dinámicas y prácticas propias de la fase MS2 se desarrollarán en el denominado “*Final Event*” de la prueba que se darán lugar a largo del 18 y 19 de octubre de 2025 en el circuito MotorLand Aragón, en la provincia turolense de Alcañiz. Según el horario publicado por la organización para ediciones anteriores, las pruebas tuvieron lugar entre las 8 y 15 horas. Cabe esperar que el horario para la edición VIII sea similar. De acuerdo con las páginas web de Agencia Estatal de Meteorología y el satélite *Meteosat*, las condiciones climatológicas durante los días y franjas horarias en se espera darán lugar las pruebas, fueron aproximadamente las siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} P = 1019.2 \text{ hPa} \\ T = 20^\circ\text{C} \\ H_r = 60\% \end{array} \right\} \rightarrow \rho_{\text{aire}} = \frac{P_d}{R_d \cdot T} + \frac{P_v}{R_v \cdot T} \approx 1.2044 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4.2.3 Velocidad lineal y régimen de giro de referencia

4.2.3.1 Preámbulo cálculo velocidad de referencia

Las características de este tipo de sistema de admisión, ya presentadas en el apartado 3.2, están inherentemente relacionadas con velocidades elevadas, a las que la presión dinámica en el frontal de la moto es lo suficientemente elevada como para poder traducirse en un aumento sustancial de la presión estática en el interior de la caja de remanso. De lo anterior se extrae que el sistema de admisión deberá optimizarse para velocidades altas, aquellas en las que este sistema permitirá obtener una mejora en la entrega del motor.

Cabe esperar que las velocidades más elevadas se alcancen en las dos rectas que tiene el trazado. Sin embargo, la variación de ésta no será lineal, pues la aceleración no será constante, pues las fuerzas que actúan sobre la moto tampoco lo serán, en consecuencia, el prototipo no permanecerá la misma fracción de tiempo a todas las velocidades. Por lo tanto, será esencial identificar las velocidades predominantes en las rectas, y acorde con esto, se fijará una velocidad a la que optimizar el sistema, de forma que las ganancias en prestaciones puedan ser aprovechadas durante el mayor lapso.

Con el objetivo de aproximar las velocidades que se alcanzarán en recta, se planteará una ecuación de la aceleración en función de la velocidad. Para ello se aplicará la segunda ley de Newton, según la cual, la aceleración de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo. En consecuencia, se procederá a analizar las fuerzas a las que estará sometido el prototipo. Anotar que el estudio se simplificará como unidimensional, estudiando los esfuerzos que tienen lugar en el plano longitudinal del prototipo y transmitiendo la aplicación de estos a la rueda motriz, obviando momentos o transferencias de carga, pues este cálculo aproximado pretenderá dar orden de magnitud de las velocidades alcanzadas, no obtener una cifra exacta.

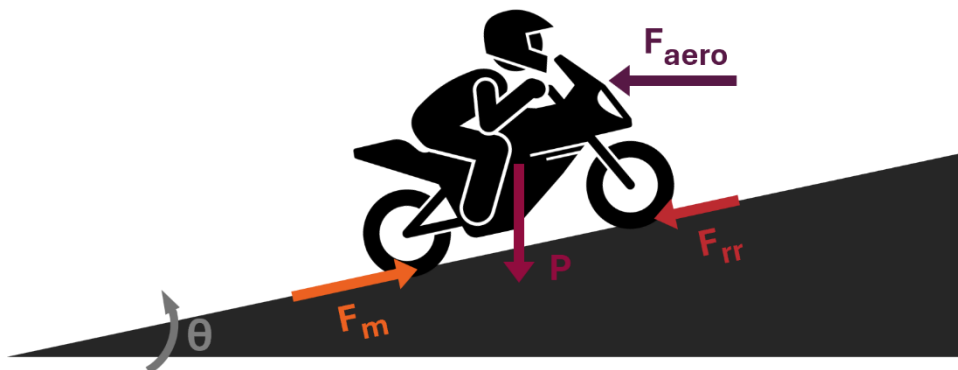


Ilustración 33 - Esquema de fuerzas

4.2.3.2 Fuerza motora

La fuerza motora será la resultante de transferir el par desarrollado por el motor a la rueda trasera, habiendo sido amplificado por la desmultiplicación total resultante de la relación de cambio correspondiente a la transmisión. La transferencia de potencia a través de los engranajes, así como mediante la cadena no es un proceso ideal, conllevando pérdidas que serán reflejadas mediante la aproximación del rendimiento de transmisión a 10 %. Finalmente, dicho par se traducirá en una fuerza lineal sobre el asfalto de acuerdo con el radio del neumático trasero. Procede puntualizar que se empleará la hipótesis de no deslizamiento, es decir, no existe velocidad relativa entre el punto de contacto del neumático y el asfalto, una hipótesis válida superada la fase inicial de la aceleración, donde la rueda motora podrá patinar en busca de tracción.

Conforme a lo ya brevemente mencionado en el preámbulo, el régimen de giro al que estará sometido el motor en la mayor parte del desarrollo de la fase MS2 es próximo al máximo. Y lo mismo sucede con el grado de carga, pues la apertura parcial del acelerador se convierte en una mera transición entre la su apertura total en rectas y cierre completo en frenadas, no obstante, controlar esta transición requiere la maestría propia del piloto, que procurará acelerar al máximo y cuanto antes sin provocar patinajes excesivos que perjudiquen el tiempo por vuelta o supongan un riesgo de caída. Por lo tanto, procederá deducir en qué rango de régimen de giro operará el motor.

En competición, durante las aceleraciones, la velocidad de giro aumentará hasta llegar al límite determinado por la electrónica del motor, de acuerdo con el criterio del fabricante y fijado por la normativa en 14000 rpm, punto en el que la centralita retrasará el encendido de la mezcla e incluso se podrá interrumpir la inyección del combustible, en busca de impedir que el motor gire por encima de dicho límite, reduciendo su entrega de potencia hasta volver a un régimen de giro por debajo de un umbral. En el intento de extraer las máximas prestaciones del motor, los pilotos retrasan subir de marcha hasta llegar a dicho umbral, ya que pasar a la siguiente relación provocará una reducción en la aceleración, pues, la siguiente relación de cambios tendrá una menor desmultiplicación y por tanto una reducción del par que llega a la rueda motriz en aras de permitir a la moto alcanzar una mayor velocidad que en la marcha previamente seleccionada. La reducción de par anterior será superior a aquella reflejada en la curva de entrega del motor. En consecuencia, serán las relaciones de cambio las que determinarán el salto de revoluciones que se dará con cada subida de marcha.

Estas relaciones vienen fijadas por la caja de cambios que, como suele ser común en las motos, vendrá ensamblada con el mismo motor, llegando a compartir el mismo aceite. Conforme a lo especificado en la sección C.7.2 de la normativa MS2425, «*La caja de cambios original está integrada en el motor ... No se puede reemplazar ni modificar la caja de cambios original*», por lo tanto, los engranajes no pueden ser modificados, siendo únicamente de libre elección la conocida como “relación final”, derivada de la relación entre el piñón y corona de la cadena. De acuerdo con los datos del fabricante, y tomando como ejemplo de relación final 16:35, la empleada por el UMH RT en la edición anterior, se obtienen las siguientes relaciones de cambio totales:

$$R_t = R_0 \cdot R_i \cdot R_F$$

R_t relación de cambio total [-]

R_0 relación de cambio primaria [-]

R_i relación de cambio para marcha i [-], $i \in \{ \mathbb{N} \}$
 $\{ (1,5) \}$

R_F relación de cambio secundaria o final [-]

			Relación Cambio	Relación Total
Relación primaria	24	72	3	
1ª Marcha	13	32	2.46	16.15
2ª Marcha	16	32	2	13.12
3ª Marcha	17	28	1.65	10.81
4ª Marcha	19	26	1.37	8.98
5ª Marcha	21	25	1.19	7.81
Relación final	16	35	2.19	

La organización fija las medidas de las llantas del mismo modo que Bridgestone se convierte en el único proveedor de neumáticos. Las dimensiones del neumático delantero son 90/580 R 17 y del trasero 120/600 R 17. Puesto que el par motor es transmitido a la rueda trasera a través de la cadena, serán las dimensiones de éste, en particular, su radio, las que permitan transformar su velocidad angular en velocidad línea. Puesto que el formato del código empleado en los neumáticos es el siguiente: ancho sección (mm) / diámetro (mm) R Diámetro llanta (“), el radio de la rueda trasera será de 300 mm.

Gracias a la información anteriormente expuesta se podrá elaborar una gráfica en la que se represente la velocidad lineal del prototipo cuando su motor gira recorriendo todo su abanico de revoluciones, siendo éste el comprendido entre ralentí de 2250 rpm y el corte de inyección de 14000 rpm. Cada relación de cambio quedará representada con un color diferente.

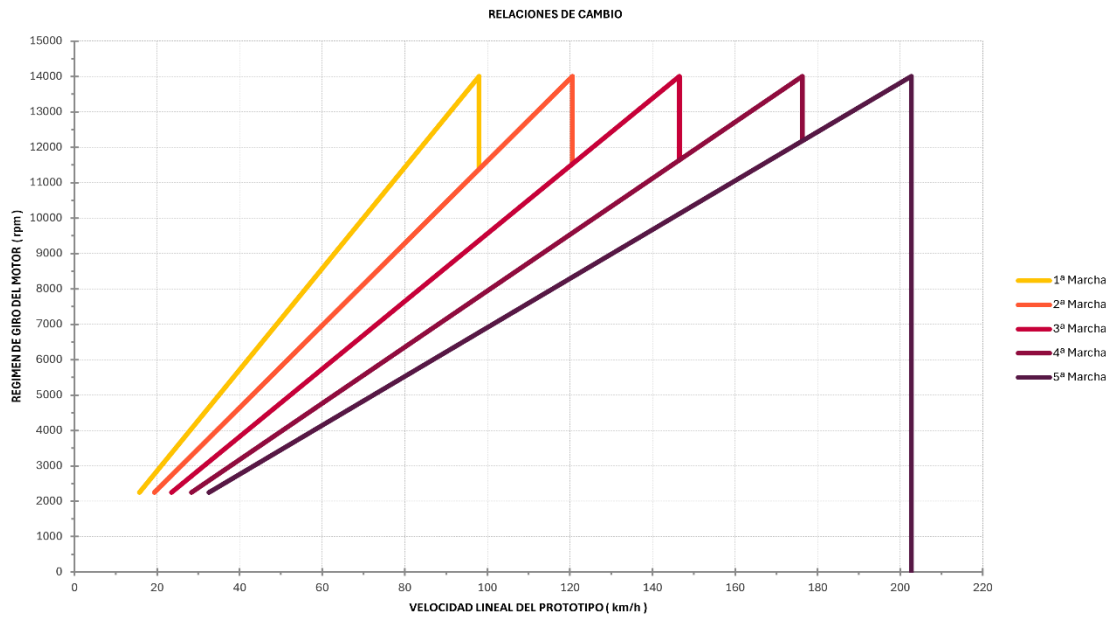


Gráfico 6 - Velocidad lineal según relación de cambio

A lo anterior se le sumará el cálculo de la caída del régimen de giro que experimentará el motor después de cada cambio de marchas, para, de esta forma, concretar el rango de revoluciones a las que trabajará el motor durante el desarrollo de las pruebas correspondientes a la fase MS2. Dicho cálculo es posible gracias a la siguiente fórmula:

$$n_i = n_{i-1} \cdot \frac{R_{i-1}}{R_i}$$

n_i régimen de giro en marcha i [rpm]

n_{i-1} régimen de giro en marcha anterior [rpm]

R_i relación de cambio para marcha i [-]

R_{i-1} relación de cambio para marcha anterior [-]

	Relación Cambio		rpm tras cambio	
1ª Marcha	13	32	2.46	-
2ª Marcha	16	32	2	11375
3ª Marcha	17	28	1.65	11529
4ª Marcha	19	26	1.37	11632
5ª Marcha	21	25	1.19	12179

De acuerdo con lo anterior, se concluirá que el motor del prototipo, una vez supere la primera relación de cambio, no girará por debajo de 11375 rpm, siendo el rango de trabajo el comprendido entre dicho régimen de giro y el límite fijado en 14000 rpm. En consecuencia, se fijarán las **13000 rpm como velocidad de giro de referencia** para el proceso de diseño y posterior optimización.

Con el objetivo de contar con la máxima información, se modelará la entra de par del motor para un abanico más amplio, desde las 7000 rpm hasta el límite de giro, pues el par máximo de 25.9 Nm se alcanza a las 8700 rpm, convirtiéndolo en un motor relativamente elástico, con 5300 rpm entre puntos de par y potencia máximos. El modelado será posible a través de una estimación polinómica de sexto grado, en la que el valor de $R^2 \approx 1$, validando el correcto ajuste de la ecuación.

No obstante, los datos de par máximo no se extraerán directamente del ensayo en dinamómetro expuesto en el punto 2.3, sino que éstos se modificarán para representar las pérdidas de transmisión junto con un aumento esperado del 3% en la entrega del motor, dato que se deducirá más adelante en el punto 4.2.4.3.

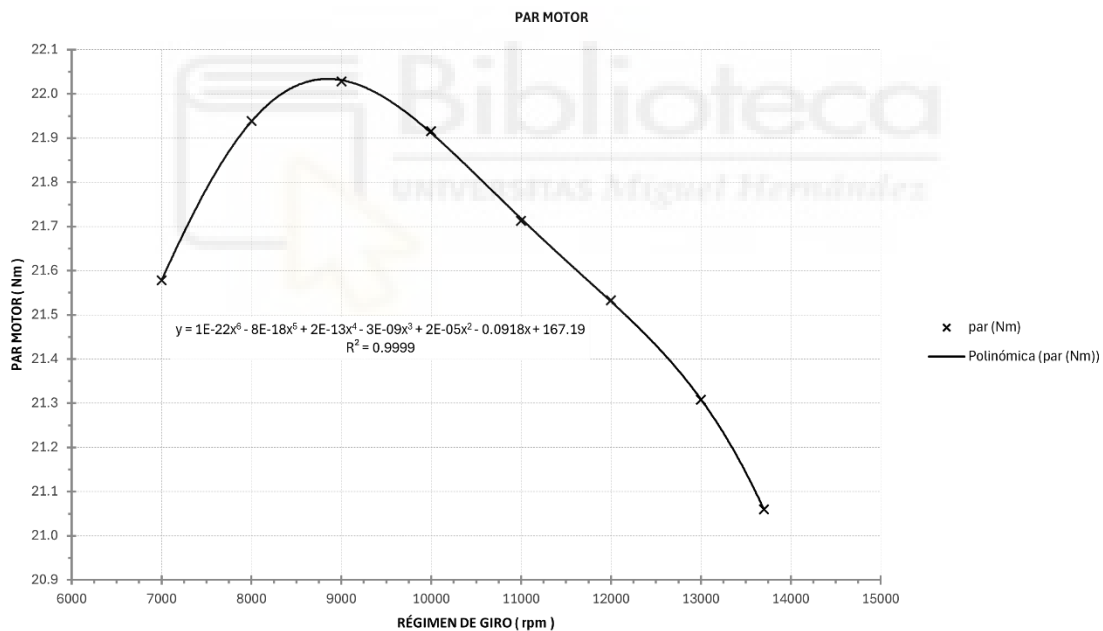


Gráfico 7 - Modelado de la entrega de par motor

$$N(n) = (1.133 \cdot 10^{-22}) \cdot n^6 - (7.659 \cdot 10^{-18}) \cdot n^5 + (2.100 \cdot 10^{-13}) \cdot n^4 - (2.985 \cdot 10^{-9}) \cdot n^3 + (2.310 \cdot 10^{-5}) \cdot n^2 - 0.0918 \cdot n + 167.188$$

N par motor [Nm]

n régimen de giro [rpm]

En base a lo mostrado en este apartado se procederá a representar la fuerza lineal aplicada a la rueda trasera para la 2ª, 3ª, 4ª y 5ª marcha, ya que, tal y como se ha comentado anteriormente, no se evaluará la aceleración inicial, correspondiente a la 1ª velocidad.

$$F_{m_i}(n) = N(n) \cdot R_0 \cdot R_i \cdot R_F \cdot (0.5 \cdot D_{r.m.})^{-1}$$

F_{m_i} fuerza motriz sobre para marcha i [rpm]
 $N(n)$ par motor en función de rpm [Nm]
 R_0 relación de cambio primaria [-]
 R_i relación de cambio para marcha i [-], $i \in \begin{cases} \mathbb{N} \\ (2,5) \end{cases}$
 R_F relación de cambio secundaria o final [-]
 $D_{r.m.}$ diámetro de la rueda motriz [m]

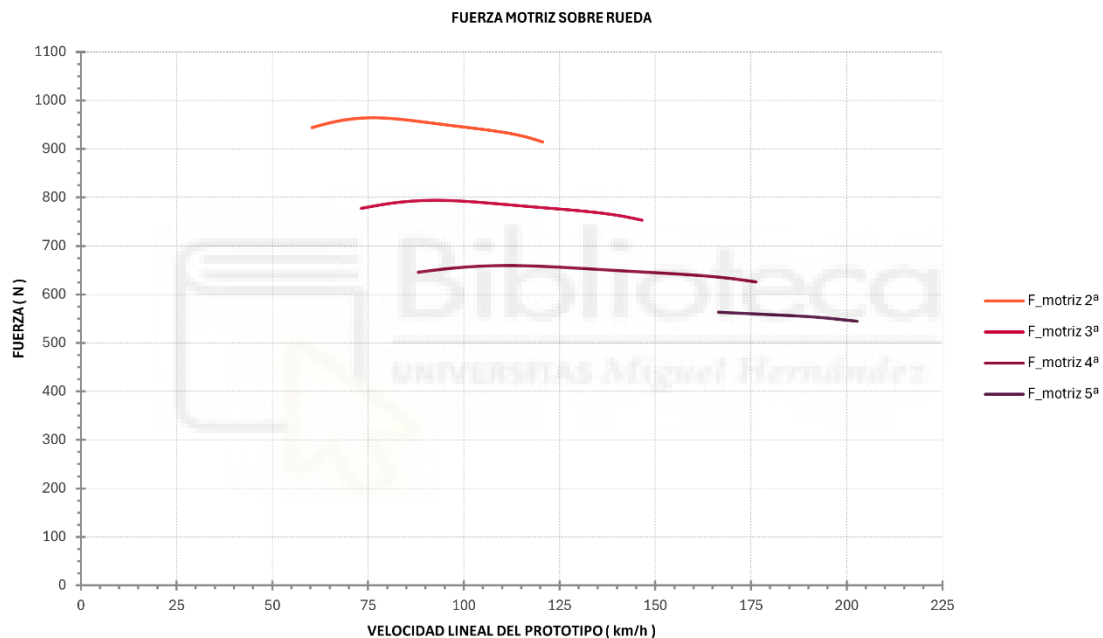


Gráfico 8 - Fuerza motriz aplicada sobre rueda

4.2.3.3 Resistencia aerodinámica

La principal oposición que el prototipo encontrará respecto al aumento de su velocidad será la resistencia aerodinámica, también conocida como fuerza de arrastre o directamente a través del anglicismo *drag*. Este fenómeno será especialmente relevante en las rectas, pues la fuerza de resistencia aerodinámica evolucionará según el cuadrado de la velocidad. Este principio se regirá por la fórmula:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_x \cdot v^2$$

F_{aero} fuerza de resistencia aerodinámica [N]

ρ densidad del fluido [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

A_f área frontal [-]

C_x coeficiente de resistencia aerodinámico [-]

v velocidad del cuerpo [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

El área frontal A_f es la superficie del prototipo que enfrenta directamente el flujo de aire. Cuanto mayor sea el área frontal, mayor será la resistencia aerodinámica, ya que la corriente de aire se encontrará con un obstáculo mayor. Este es el principal motivo por el cual los motoristas adoptan una postura agachada en las rectas, tratando de cubrir su cuerpo con el carenado para minimizar el área frontal y, en consecuencia, reducir la resistencia aerodinámica.

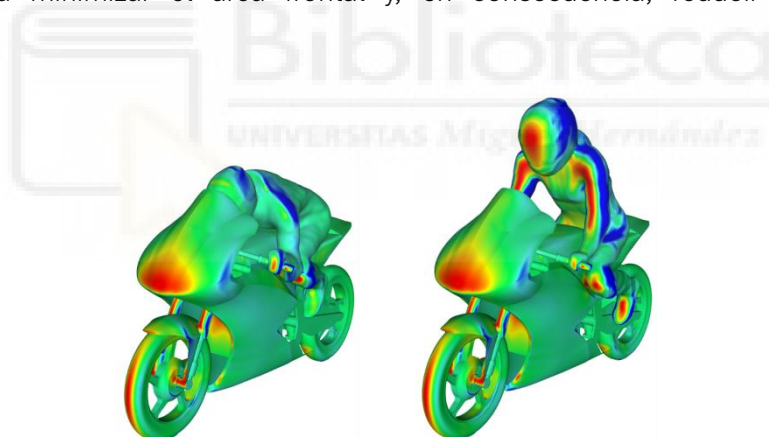


Ilustración 34 - Comparativa de perfil de presiones según posición de pilotaje

El coeficiente de resistencia aerodinámica, C_x , representa la eficiencia aerodinámica del prototipo. Este coeficiente es una medida adimensional que refleja como la forma y el diseño de un cuerpo influyen en la resistencia aerodinámica. Un C_x menor indica un diseño más aerodinámico, que reduce la fuerza de arrastre. El drag, se manifiesta como una presión negativa en la parte trasera del prototipo, creando una región de vacío que frena el movimiento, razón por la cual es frecuente observar cómo, cuando los motoristas llevan prendas como camisas o camisetas, éstas se levantan cuando circulan a alta velocidad.

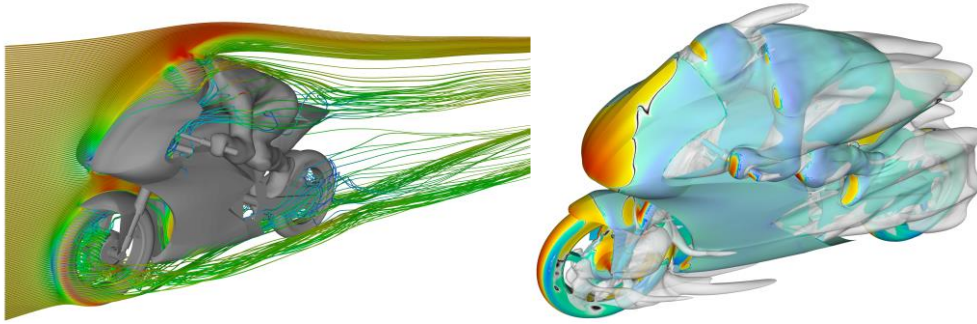


Ilustración 35 - Representación del perfil de velocidades (izq.) y perfil de presiones (dcha.)

Los valores relativos a los efectos aerodinámicos que se utilizarán son extraídos de un estudio fluidodinámico de la posición del piloto [7] sobre un prototipo participante en MotoStudent:

$$\left. \begin{aligned} F_{aero} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_x \cdot v^2 \\ \rho_{aire} &\approx 1.2044 \frac{kg}{m^3} \\ A_f &= 0.49 m^2 \\ C_x &= 0.38678 \end{aligned} \right\} \rightarrow F_{aero}(v) \approx 0,1141 \cdot v^2$$

F_{aero} fuerza de resistencia aerodinámica [N]

v velocidad lineal del prototipo [$m \cdot s^{-1}$]

Ajustando la ecuación anterior para velocidades expresadas en km/h, se podrá representar la fuerza de resistencia aerodinámica en función de la velocidad lineal del prototipo.

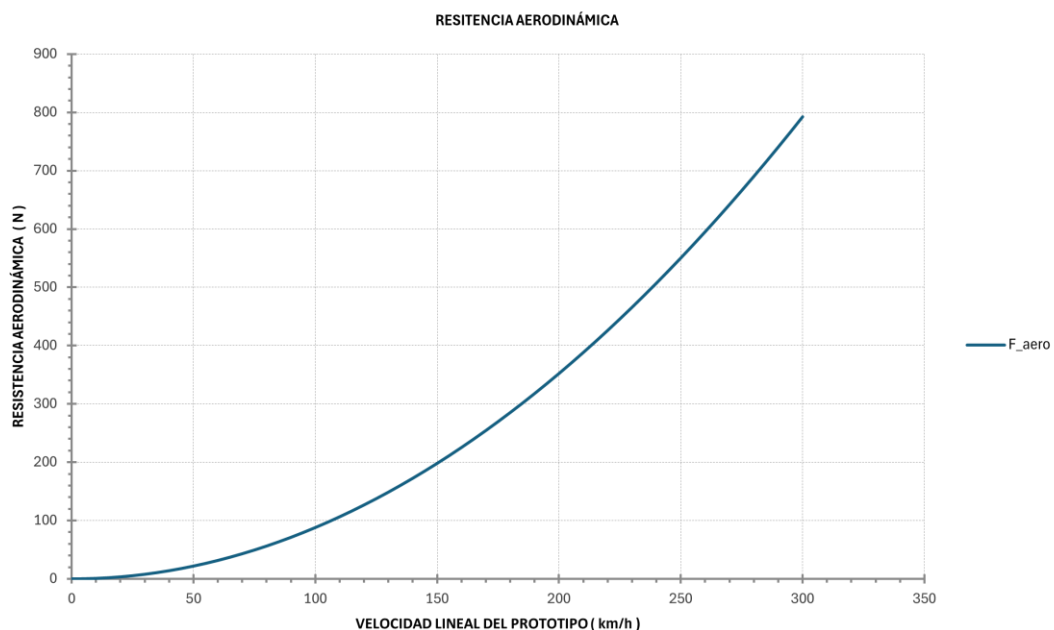


Gráfico 9 - Resistencia aerodinámica en función de la velocidad

4.2.3.4 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es el fenómeno según el cual, la deformación de los neumáticos al girar sobre el asfalto, así como a la fricción interna dentro del propio material del neumático se oponen al giro del mismo y por lo tanto al avance de la moto. Aunque esta faceta del comportamiento de las ruedas es perjudicial para el rendimiento del prototipo, está estrechamente ligado con su capacidad de agarre, suponiendo un desafío, espacialmente, en vehículos de uso cotidiano, donde la eficiencia energética juega un papel cada vez más relevante.

El cálculo de esta resistencia se puede aproximar asumiendo que la fricción es proporcional a la reacción normal del asfalto, así como al coeficiente de fricción. En las condiciones descritas, la reacción normal corresponde al peso del conjunto prototipo y piloto, siendo éstos próximos a 90 y 75 kg respectivamente, pues, en el momento de redacción de este documento no se dispone del prototipo finalizado, por lo que se emplean los valores de ediciones anteriores. Se descartan los efectos aerodinámicos del plano vertical, es decir, la sustentación y la carga aerodinámica, siendo ésta comúnmente conocida por el anglicismo *downforce*.

Del mismo modo, el cálculo se completa empleando el dato de coeficiente de fricción 0.2 [8]. Cabe destacar que según las circunstancias en la que se encuentre el neumático, como las cargas que se ejercen sobre éste y el grado de deslizamiento, el coeficiente puede llegar a aumentar hasta valores de 1.25. No obstante, se trata de una motocicleta de potencia relativamente modesta, encarando una recta, por tanto, sin problemas para la tracción, manteniendo un contacto adecuado con la superficie para transmitir la fuerza del motor al asfalto, por tanto, la hipótesis del coeficiente correspondiente a la rodadura se considerará adecuada.

Por tanto, esta aproximación resultará en un valor constante e independiente de la velocidad. No obstante, esto no será cierto en la práctica, pues a medida que aumenta la velocidad, los neumáticos giran más rápido, incrementando las pérdidas de energía. Esto es fácilmente comprobable si se compara la temperatura de los neumáticos de un vehículo después de haber circulado altas velocidades frente a aquellos que no.

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot N = \mu_{rr} \cdot m_c \cdot g$$

F_{rr} fuerza de resistencia a la rodadura [N]
 μ_{rr} coeficiente de fricción [-]
 N reacción normal del terreno [N]
 m_c masa del conjunto prototipo y piloto [kg]
 g aceleración de la gravedad [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot N = \mu_{rr} \cdot m_c \cdot g = 0.02 \cdot (95 + 65) \cdot 9.81 = 31.392 \text{ N}$$

4.2.3.5 Resistencia por gravedad

La resistencia por gravedad resultante de circular en una pendiente será despreciada, ya que las rectas del trazado serán consideradas lo suficientemente planas como para descartar cualquier componente relacionada con el peso del prototipo, incluso en el caso de que se trate de una pendiente negativa, lo que contribuiría de favorablemente su avance.

$$F_g = m_c \cdot g \cdot \sin \theta$$

F_g fuerza de resistencia por gravedad [N]
 m_c masa del conjunto prototipo y piloto [kg]
 g aceleración de la gravedad [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
 θ ángulo de inclinación del terreno [rad]

$$\left. \begin{array}{l} F_g = m_c \cdot g \cdot \sin \theta \\ \theta \approx 0 \end{array} \right\} \rightarrow F_g \approx 0$$

4.2.3.6 Determinación de la velocidad de referencia para la optimización

Finalmente, una vez expuestas todas las fuerzas que pudieran intervenir en la aproximación de la velocidad del prototipo, se procederá a aplicar la segunda ley de Newton:

$$a = \frac{\sum F}{m_c} = \frac{F_{motriz\ i} - (F_{aero} + F_{rr} + F_g)}{m_{prototipo} + m_{piloto}}$$

Con el fin de aportar una visión general, se divide el valor de la aceleración entre la aceleración de la gravedad, obteniendo así una representación de las g 's de aceleración sobre el prototipo referenciada al eje secundario de la gráfica.

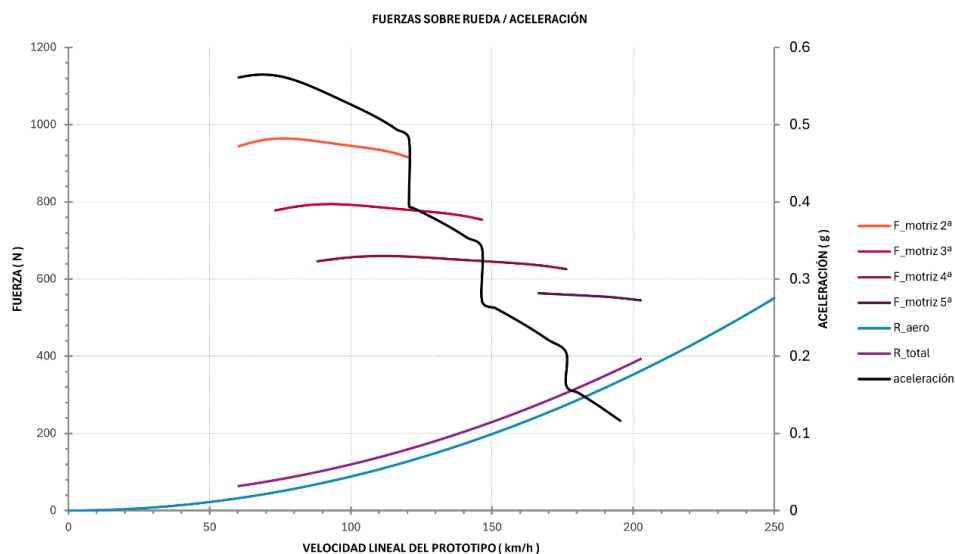


Gráfico 10 - Conjunto de fuerzas y aceleración

Del gráfico anterior puede concluirse que la velocidad máxima del prototipo podría estar limitada por la cadena cinemática a 202.67 km/h, pues la fuerza motora cuando el motor alcanza su límite de giro sigue siendo notablemente superior a la resistencia aerodinámica. Aun teniendo en cuenta el hecho de que lo calculado representa una aproximación y no podrá asumirse tal comportamiento en pista, se propondrá el **cambio de la relación final original de 16:35 por otra de 16:31**, aumentando la velocidad máxima alcanzable a 220.65 km/h. No obstante, pudiera darse que el piloto agote las rectas antes de llegar a dicha velocidad. Paralelamente, la organización ha publicado las velocidades puntas obtenidas en la fase MS2 de ediciones anteriores, y en rara ocasión los prototipos se han acercado a tal cifra. En consecuencia, se mantendrá la relación original para fijar la velocidad lineal de referencia para el diseño del sistema de admisión.

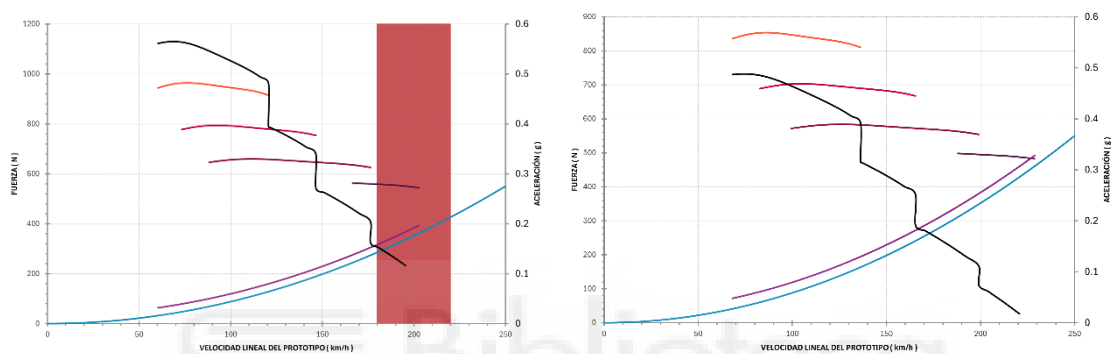


Gráfico 11 - Comparativa entre relación final 16:35 (izq.) y 16:31 (dcha.)

Volviendo al gráfico, puede observarse como la aceleración se reducirá drásticamente al engranar la quinta y última marcha, esto es debido tanto a la menor desmultiplicación de dicha relación de cambio como por la resistencia aerodinámica en virtud de la evolución cuadrática de ésta. Para cuando el piloto seleccione la quinta marcha, el prototipo tendrá una velocidad de 176.32 km/h. Teniendo en cuenta lo anterior y dado que la aceleración será reducida, el prototipo se desplazará a una velocidad cercana a los 180 km/h durante mayor fracción de tiempo. Por lo tanto, se tomarán los **180 km/h como velocidad referencia para el diseño del sistema de admisión**, maximizando el lapso en el que se aprovecharán las ganancias en la entrega del motor resultantes de la implementación del diseño en cuestión.

Cabe señalar que, a dicha velocidad y según las relaciones de cambio expuestas, el motor girará a 12434 rpm en quinta velocidad, sin embargo, a 170 km/h, poco antes de la subida de cuarta a quinta, el motor estará girando a 13500 rpm, dando una media entre ambas de aproximadamente 13000 rpm, coincidiendo con el régimen de giro fijado como referencia para el proceso de optimización.

4.2.4 Gasto másico y volumétrico de aire

El gasto másico de aire determinará la cantidad de aire que entra en el motor por unidad de tiempo y afectará directamente a la entrega de potencia del mismo. La capacidad de un motor para aspirar aire adecuadamente será fundamental para su desempeño, principalmente, a un régimen de giro tan elevado como el fijado en el apartado 4.2.3.2, de 13000 revoluciones por minuto.

Tal y como se ha comentado en el punto 2.2.4, el llenado real del cilindro en un motor distará del ideal definido por teoría, debido diversos factores, como resistencia al flujo de aire a través de los conductos de admisión, los diseños puertos de admisión, número y tamaño de las válvulas, o la inercia de la corriente del aire, especialmente a las revoluciones tan altas como las mencionadas.

Como se ha comentado anteriormente, el rendimiento volumétrico representa el grado de eficacia en el llenado del cilindro y se define como la relación entre el volumen de aire realmente aspirado y el volumen teórico que debería aspirar. Un rendimiento volumétrico del 100% significaría un llenado ideal, pero en la práctica, este valor suele ser menor debido a las razones mencionadas anteriormente.

La adaptación de sistemas de admisión dinámica como el que se diseñará en este trabajo de fin de grado buscará mejorar el rendimiento volumétrico incrementando la presión del aire a la entrada del motor, permitiendo un mejor llenado y con ello una mayor cantidad de aire en el cilindro, aumentando la masa de oxígeno disponible para la combustión y, en consecuencia, la potencia desarrollada por el motor.

Los valores de rendimiento volumétrico varían según el régimen de giro del motor, pues las conducciones de la admisión están optimizadas para un rango específico que, en el caso de los motores de vehículos de calle, suele ser lo más amplio posible haciendo al motor más versátil, mientras que en los motores de competición el rango a optimizar suele ser aquel cercano al límite de giro, dónde se maximiza la entrega de potencia. Una cifra orientativa del rendimiento volumétrico correspondiente a un motor de moto de corte deportivo rondará 0.88.

La implementación del sistema *ram-air* así junto con la instalación de una trompeta de longitud optimizada, aumentará la entrega de potencia, siendo dicho incremento esperado de un 3 %, dato que se comentará en el punto 4.2.4.3. Puesto que se aplicará la hipótesis de que el resto de los rendimientos del motor se mantienen constantes tras la instalación, se supondrá que tal ganancia de potencia recae exclusivamente sobre el incremento de **rendimiento volumétrico**, por lo que se considerará que éste será **igual a 1**.

En consecuencia, se procederá a determinar el gasto másico de aire cuando el motor trabaja a plena carga a un régimen de giro de 13000 rpm, así como el caudal que atravesará las válvulas de admisión

$$r_c = \frac{V_T}{V_{c.c.}} = \frac{V_d + V_{c.c.}}{V_{c.c.}} \rightarrow V_{c.c.} = \frac{V_d}{(r_c - 1)} = \frac{250}{13.5} \rightarrow V_T = V_d + V_{c.c.} \approx 268.52 \text{ cm}^3$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{m}_a = \eta_v \cdot \left(\frac{n}{i} \cdot \rho_a \cdot V_T \right) \\ \eta_v \approx 1 \\ n = 13000 \text{ rpm} \cong 216.67 \text{ rps} \\ i = [4 T] = 2 \\ \rho_a \approx 1.2044 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ V_T = 268.52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} \dot{m}_a \approx 3.504 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \\ Q_{adm} = \dot{m}_a \cdot \rho_a \end{array}$$

$$\rightarrow \boxed{Q_{adm} \approx 4.220 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

4.2.4 Sobrepresión objetivo

4.2.4.1 Preámbulo sobre sobrepresión objetivo

Una vez establecidas las condiciones de contorno, que enmarcan la situación para la cual se diseñará el sistema de admisión expuesto en este trabajo, se procederá a fijar un valor de sobrepresión objetivo, es decir, se determinará el aumento de presión que se espera conseguir en el interior de la caja de remanso, de modo que éste constituya la referencia que guíe y críbe el proceso de optimización de los diseños y sus simulaciones.

4.2.4.2 Ensayo de Kawasaki ZX-9R

Se considerarán como una valiosa referencia empírica los datos publicados en el artículo de la revista Sport Rider [9], en el cual se examina la eficacia del sistema de admisión de aire forzado de la Kawasaki ZX-9R. A través de pruebas en un dinamómetro y mediciones en carretera, se busca determinar cuánto aumenta la potencia del motor debido a este sistema a distintas velocidades, gracias a la medida de la presión en el interior de la caja de remanso. Cabe mencionar que Kawasaki, de acuerdo con lo ya comentado en el punto 3.2.3, fue pionera en la implementación de este tipo de sistemas en motores de motocicleta a principios de la década de los 90, innovación que generó cierto excepticismo entre los contemporáneos, lo que motivó la redacción del mencionado artículo.



Ilustración 36 - Kawasaki ZX-9R 1995

En una primera fase, se llevaron a cabo pruebas en dinamómetro, utilizándose un ventilador diseñado exprofeso para simular el flujo de aire a alta presión hacia la caja de remanso de la motocicleta. Durante la prueba, además de registrar la potencia desarrollada en el dinamómetro, se midió la presión generada en la caja de aire utilizando un manómetro.

Inicialmente, sin presurizar el sistema ram-air, la ZX-9R alcanzó una potencia de 123 bhp en el dinamómetro, creando una línea de referencia. Posteriormente, se acopló el ventilador anteriormente descrito y se ajustó para conseguir, al ralentí, incrementos de la presión en el interior de la caja de remanso de 10mbar, 20mbar y 30mbar, registrando los respectivos incrementos en la potencia desarrollada por el motor. Para una sobrepresión de 30mb, el motor alcanzó un máximo de 131 bhp, lo que representa un aumento de 8 bhp sobre la potencia de referencia. Se determinó que cada incremento de 10mb en la presión de entrada resultó en un aumento aproximado de 2.6 bhp, es decir, un incremento del 2.11 % respecto a la potencia de referencia.

Para la segunda fase del experimento, se buscó determinar las presiones reales generadas en el sistema de admisión de la Kawasaki ZX-9R durante la conducción a distintas velocidades, midiendo nuevamente la presión en el interior de la airbox, y relacionarlas así con los resultados obtenidos en el dinamómetro.

Ya durante el trayecto desde la instalación del dinamómetro hasta la pista de pruebas, se observaron resultados reveladores: a 70 mph, el manómetro mostraba una sobrepresión de 8mb. En la pista, se permitió a la ZX-9R alcanzar su máxima velocidad, registrando la sobrepresión en relación con la velocidad. Los resultados mostraron que, a 70 mph, la sobrepresión era de 8mb, aumentando progresivamente hasta 26mb a 140 mph y superando los 30mb a 150 mph.

El análisis de estos datos reveló que los efectos del sistema ram-air aumentan en proporción al cuadrado de la velocidad, coincidente con las ecuaciones teóricas. Se proyectó que, a una velocidad real de 167 mph, la sobrepresión en la caja de aire alcanzaría los 44mb o más.

Estos hallazgos confirmaron que el sistema ram-air proporciona un aumento significativo de potencia en condiciones reales de carretera cuando se alcanzan velocidades elevadas.

Haciendo la conversión de unidades, se obtiene la siguiente gráfica, en la que figura una línea de tendencia polinómica de grado 2, con un valor del parámetro $R^2 \approx 1$, indicando que existe una buena correlación entre los datos del ensayo y la ecuación reflejada en el gráfico.

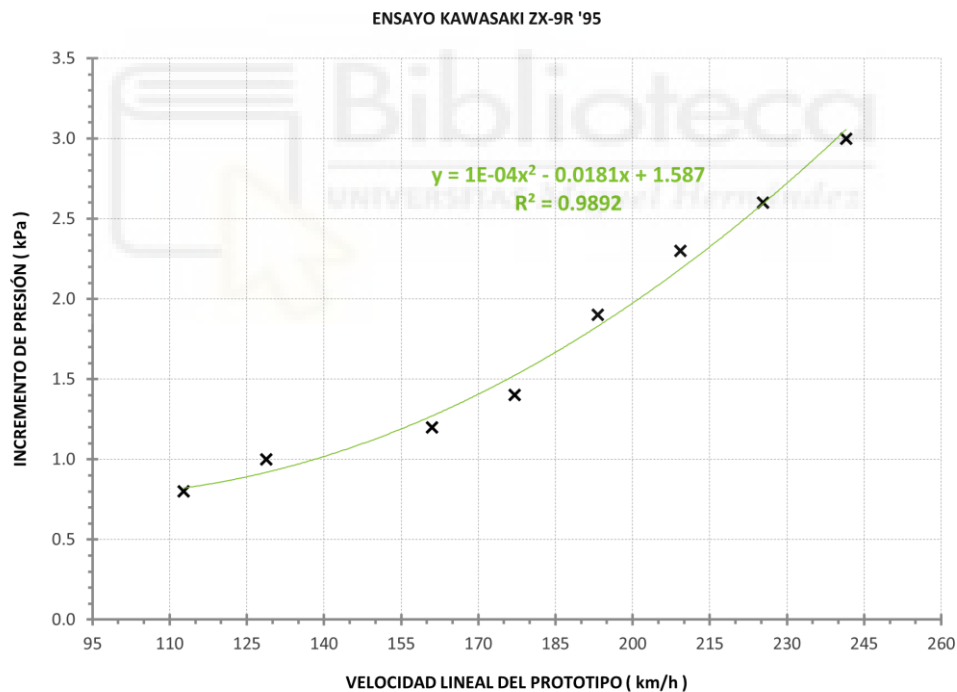


Gráfico 12 - Ensayo de sistema ram-air de la Kawasaki ZX-9R

4.2.4.3 Sobrepresión objetivo

De acuerdo con lo establecido en el punto 4.2.3, se optimizará el sistema de admisión para una velocidad de 180 km/h. De la ecuación estimada a partir de los datos obtenidos por Sport Rider, se extrae una sobrepresión de 1.569 kPa para esta velocidad. No obstante, el sistema desarrollado por Kawasaki no tiene un diseño arbitrario, sino que es resultado de décadas de experiencias, multitud de horas de ensayo y una notable inversión humana y económica. Desde el equipo de UMH RT se buscará un valor algo más modesto que siga suponiendo un desafío a la altura del espíritu propio de la competición MotoStudent. En consecuencia, se opta por fijar un valor de sobrepresión objetivo de 1.4 kPa, aproximadamente un 90 % del alcanzado por Kawasaki, lo que podrá suponer una ganancia de potencia del orden del 3 %.

4.3 Predimensionamiento teórico

4.3.1 Predimensionamiento teórico del sistema de admisión dinámica

4.3.1.1 Preámbulo teórico sobre el sistema de admisión dinámica

De acuerdo con lo introducido en puntos anteriores, gracias al aumento de sección entre la toma de aire forzado y la caja de remanso se transformará la presión dinámica en presión estática de modo que el motor realizará la fase de aspiración a una presión superior a la atmosférica. Para el cálculo que permitirá el predimensionamiento teórico, el cual será el punto de partida de los diseños, se recurrirá a los principios de la fluidomecánica. Entre los recursos fluidodinámicos disponibles, uno de los más populares y utilizados es la denominada ecuación de Bernoulli.

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cdot ds + \frac{dp}{\rho} + V \cdot dV + g \cdot dz = 0$$

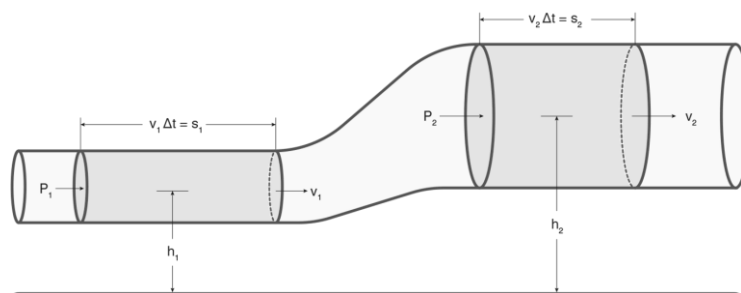


Ilustración 37 - Esquema de tubería para aplicación de la ecuación de Bernoulli

Esta ecuación parte de aplicar el principio de conservación de masa a una línea de corriente que atraviesa un volumen de control sin fricción. La ecuación de Bernoulli es ampliamente utilizada, pero se debe tener cuidado con sus restricciones. Todos los fluidos son viscosos y, por lo tanto, todos los flujos tienen fricción en cierta medida. Para usar la ecuación de Bernoulli correctamente, se debe confinar a regiones del flujo que sean casi sin fricción.

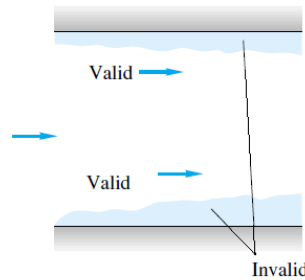


Ilustración 38 - Regiones de aplicación de la ecuación de Bernoulli

Esta es la ecuación de Bernoulli para un flujo no estacionario y sin fricción a lo largo de una línea de corriente. Está en forma diferencial y puede ser integrada entre dos puntos cualesquiera 1 y 2 en la línea de corriente:

$$\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} \cdot ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1) = 0$$

Aplicando las hipótesis de flujo estacionario, no variando el volumen respecto al tiempo, y flujo incompresible, siendo la densidad constante, se llega a la expresión más común de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot V_1^2 + g \cdot z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot V_2^2 + g \cdot z_2 = cte$$

No obstante, y como se ha mencionado previamente, esta ecuación surge de la aplicación de restricciones significativas. A continuación, se detallarán las restricciones impuestas [11], así como las justificaciones para su aplicación en el sistema evaluado en este proyecto. Esto permitirá utilizar la ecuación para llevar a cabo el predimensionamiento teórico del cambio de sección entre la entrada y el cuerpo de la caja de remanso.

Flujo estacionario: una suposición común aplicable a muchos flujos, en la cual las propiedades del fluido en un punto específico dado no cambiarán con el tiempo. Esto significa que la velocidad, presión, densidad y otras propiedades del fluido permanecerán constantes en ese punto a lo largo del tiempo.

Flujo sin fricción: será muy restrictivo, ya que las paredes sólidas introducirán efectos de fricción que no serán despreciables. En la práctica, es difícil encontrar sistemas donde la fricción sea completamente nula. Sin embargo, esta suposición será útil en regiones donde los efectos de la fricción sean mínimos, como las regiones de los conductos que estarán alejadas de las paredes.

Flujo a lo largo de una única línea de corriente: diferentes líneas de corriente pueden tener diferentes “constantes de Bernoulli”, $w_0 = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz$, dependiendo de las condiciones de flujo.

Trabajo nulo: no habrá ningún dispositivo mecánico en el interior de la admisión que extraiga ni, principalmente, aporte energía al fluido en forma de trabajo, como podría ser el caso de compresores o turbos, prohibidos según la normativa.

Calor nulo: Condición de proceso adiabático, por la que no existirá transferencia de calor entre el sistema y su entorno, sin la adición o pérdida de calor. Esta condición es frecuentemente aplicable en procesos rápidos o en sistemas aislados térmicamente, como el que acogerá este documento.

Flujo incompresible: Hipótesis clave para aplicar de la ecuación de Bernoulli sobre el flujo de admisión. A diferencia de los líquidos, los gases son compresibles, es decir, pueden variar su densidad. No obstante, se puede asumir que, aun tratándose de un gas, como el aire de admisión, el flujo tendrá un comportamiento incompresible a velocidades reducidas. El criterio para determinar este comportamiento será fijado por el número de Mach, una magnitud adimensional que representa la relación entre la velocidad del flujo y la velocidad del sonido en el mismo medio. En general, si el número de Mach es menor a 0.3, se considerará que el flujo es incompresible. En consecuencia, éste se evaluará en el caso más desfavorable, la velocidad máxima alcanzada según la cadena cinemática:

$$\left. \begin{aligned} Ma &= \frac{V}{a} \\ V \leq V_{max} &= [4.2.3.2] = 202.67 \frac{km}{h} \equiv 56.30 \frac{m}{s} \\ a &\approx 343.2 \frac{m}{s} \end{aligned} \right\} Ma = \frac{56.30}{343.2} \approx 0.164 \rightarrow \boxed{Ma < 0.3}$$

→ $\boxed{\rho = cte}$

4.3.1.2 Cálculo teórico cambio de sección del sistema de admisión dinámica

En el punto anterior se ha probado que se puede aplicar la ecuación de Bernoulli, por lo tanto, se procederá a emplearla para deducir el aumento de sección en la admisión para conseguir el incremento de presión estática deseado en la caja de remanso.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \xrightarrow{\times \rho} p_1 + 0.5 \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + 0.5 \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2) \xrightarrow{z_1 \approx z_2} \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \\ \left. \begin{array}{l} Q_i = V_i \cdot A_i \\ Q_1 = Q_2 \end{array} \right\} \rightarrow V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \rightarrow V_2 = V_1 \cdot \frac{A_1}{A_2} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot \left[V_1^2 - \left(V_1 \cdot \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot \left[V_1^2 - V_1^2 \cdot \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] = \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \rightarrow \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 = 1 - \frac{2\Delta p}{\rho \cdot V_1^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{A_2}{A_1} = \left(1 - \frac{2\Delta p}{\rho \cdot V_1^2} \right)^{-0.5} \\ \Delta p = [4.2.4] = 1.40 \text{ kPa} \\ V_1 \approx V_\infty = [4.2.3.6] = 180 \frac{\text{km}}{\text{h}} \equiv 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \rho = [Ma \ll 0.3] = \rho_\infty = [4.2.2] = 1.204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{array} \right\} \rightarrow \boxed{\frac{A_2}{A_1}} = + \left(1 - \frac{2 \cdot 1.40 \cdot 10^3}{1.204 \cdot 50^2} \right)^{-0.5} \boxed{\approx 3.786}$$

4.3.2 Predimensionamiento teórico de la caja de remanso

Un estudio publicado por Len Hamilton sobre los efectos del volumen de la caja de admisión [12] en el rendimiento de motore, concluyó que, si dicho volumen es superior al barrido por el cilindro del motor, éste entregará cifras máximas de potencia y par motor superiores. Para probar esta hipótesis, se realizaron ensayos variando el tamaño de la caja de remanso de 2 a 10 veces el volumen barrido por el cilindro, en un rango de 3000 a 12500 RPM. Para ello se empleó una caja de remanso fabricada exprofeso, cuyas paredes podían ajustarse, variando el volumen de ésta entre ensayos.

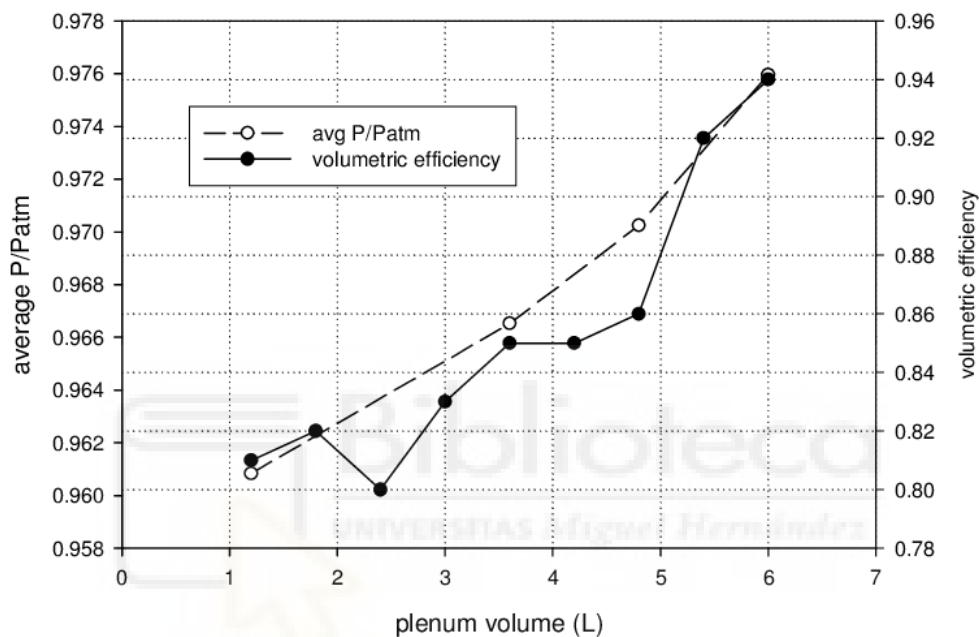


Gráfico 13 - Rendimiento volumétrico según el volumen de la caja de remanso

Este estudio casa con los requisitos de la normativa referentes al volumen de la *airbox*, según los cuales «La caja de aire debe tener un volumen mínimo de 2,4 litros», comparado con el volumen de barrido del cilindro, comúnmente denominado, cilindrada (250 cm³), se tiene que la caja de remanso deberá tener un volumen mínimo igual 960% de la cilindrada.

Por el contrario, es común encontrar que los equipos optan por implementar en sus prototipos de competición *plenums* del máximo tamaño posible. Sirva de ejemplo los 5 litros de volumen de la caja de remanso de la Honda NSF250R, una moto con la misma cilindrada que la del prototipo objeto de estudio de este documento.

Por el contrario, es común observar la tendencia de los equipos de competición a implementar *plenums* del mayor tamaño posible en sus prototipos. Un ejemplo ilustrativo de esta práctica es la caja de remanso con un volumen de 5 litros utilizada en la Honda NSF250R [13], una motocicleta cuya cilindrada es idéntica a la del prototipo objeto de estudio en este documento, dotando al *plenum*, de un volumen igual al 2000 % de la cilindrada.



Ilustración 39 - Honda NSF250R y su caja de remanso

En base a lo anteriormente expuesto, se buscará conseguir el máximo volumen de la caja de remanso teniendo como valor mínimo el fijado por la normativa:

$$V_{plenum} \geq 2.4 \text{ l}$$

4.3.3 Predimensionamiento teórico de la trompeta de admisión

4.3.3.1 Preámbulo teórico sobre la trompeta de admisión

En el apartado anterior se ha aplicado la hipótesis de flujo incompresible, y su validez para la aproximación del cambio de sección en el sistema de admisión ha sido justificada. Sin embargo, la naturaleza de los fenómenos evaluados en este apartado obligará a prescindir de dicha hipótesis, pues los cálculos que se realizarán se basan en la **compresibilidad del aire** de admisión, reflejada en el comportamiento elástico del mismo.

Numerosos estudios iniciales han investigado el impacto de la variación de la geometría de los conductos de admisión en la sintonización de la admisión. En 1924, Matthews y Gardiner observaron que un tubo de succión largo conectado al puerto de admisión aumentaba la presión de compresión en un motor diésel monocilíndrico. En 1938, Morse y otros, desarrollaron un método sencillo para predecir la sintonización de la admisión basándose en el comportamiento acústico lineal del conducto de admisión. En 1945, Kastner estudió el efecto de la sintonización de la admisión en diversas longitudes y diámetros de los conductos primarios, proponiendo un "período natural" óptimo del conducto de admisión. En 1958, Downing investigó los efectos de la longitud y diámetro de los conductos primarios en un

motor de seis cilindros, encontrando que los picos de sintonización se desplazaban hacia velocidades más bajas a medida que aumentaba la longitud. Posteriormente, Engelman y sus colaboradores desarrollaron una herramienta de predicción basada en un **resonador Helmholtz**. En 1968, Thompson validó el enfoque de Engelman, investigando diversas configuraciones de conductos.

En los siguientes apartados se seguirá la **ecuación de Engelman** [14] para el cálculo de la longitud de la trompeta de admisión que maximice la ganancia en prestaciones del motor, comparando los resultados correspondientes y confrontándolos con valores obtenidos en ensayos reales.

4.3.3.2 Longitud teórica del conducto de admisión

Tal y como se ha especificado, se utilizará el cuerpo de acelerador suministrado por la organización. Este dispositivo incluye el mecanismo de la válvula mariposa, el cual se encargará de regular cuantitativamente el grado de carga. Este dispositivo se acoplará al puerto de admisión del motor, de modo que será sobre éste donde se instale la trompeta. En consecuencia, para el cálculo de la longitud total del conducto de admisión, se entenderá por éste el tracto que recorre el dorso de las válvulas de admisión, el puerto de admisión, y la trompeta a diseñar.



Ilustración 40 - Representación de la longitud total del conducto de admisión

Como se ha introducido brevemente, Engelman y sus colaboradores desarrollaron una herramienta de predicción de la sintonización de la admisión basada en un resonador de Helmholtz agrupado; modelaron la admisión y el cilindro considerando el aire en el cilindro como un resorte sin inercia y el aire en el conducto de admisión como una masa sin compresibilidad. Se predice que el pico de sintonización ocurre cuando la frecuencia resonante del sistema Helmholtz es aproximadamente el doble de la frecuencia del pistón. Este método proporciona una herramienta sencilla que se empleará para calcular la ubicación de un único pico de sintonización de admisión:

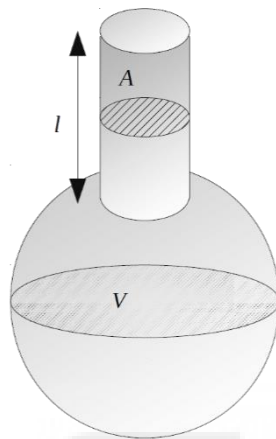


Ilustración 41 - Resonador de Helmholtz [15]

$$f = \frac{c}{K} \sqrt{\frac{A}{l \cdot V_{eff}}} \rightarrow l = \frac{A}{V_{eff}} \left(\frac{c}{f \cdot K} \right)^2 \left. \vphantom{\frac{A}{V_{eff}}} \right\} \\ V_{eff} = \frac{V_d \cdot (r_c + 1)}{2 \cdot (r_c - 1)} \\ \rightarrow l = \frac{2A \cdot (r_c - 1)}{V_d \cdot (r_c + 1)} \left(\frac{c}{f \cdot K} \right)^2$$

Para adaptar la ecuación al funcionamiento de un motor como el estudiado en el presente documento se evalúa el volumen efectivo, entiendo por éste, el volumen del cilindro cuando su pistón se encuentra a la mayor velocidad, en el punto medio de la carrera. Convendrá señalar que la constante K ajusta la ecuación para reflejar la duración de la apertura de la válvula de admisión. Dado que esta duración dependerá del perfil del árbol de levas, el valor de la constante podrá variar entre diferentes motores. Sin embargo, para los fines de este estudio, se adoptará el valor más comúnmente utilizado en la aplicación de esta fórmula $K = 2.1$.

$$l = \frac{2A \cdot (r_c - 1)}{V_d + (r_c + 1)} \left(\frac{c}{f \cdot K} \right)^2 [SI]$$

r_c relación de compresión [-]
 A sección de paso efectiva [m^2]
 c velocidad del sonido [$m \cdot s^{-1}$]
 V_d volumen desplazado [m^3]
 f régimen de giro [Hz]
 K factor $K = (2.0, 2.5) = 2.1$ [-]

De acuerdo con lo fijado en el punto 4.2.3, el sistema de admisión se optimizará para un régimen de giro de 13000 rpm. La sección de paso será aproximada a aquella presente en el cuerpo del acelerador, con diámetro de 44 mm. Con esta información, se procederá a representar la longitud de la trompeta teórica frente al régimen de giro del motor.

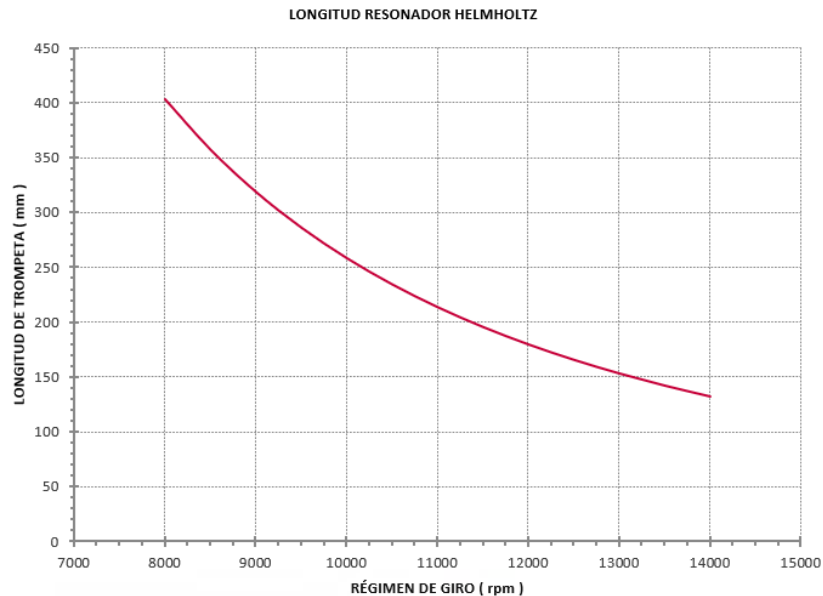


Gráfico 14 - Longitud de sintonizado según régimen de giro

Al introducir esta cifra en la ecuación anterior, se obtendrá una **longitud de trompeta de 15.27 cm**, un valor acorde con los que suelen encontrarse en motocicletas de altas prestaciones cuyos motores giran a alto régimen en busca de maximizar la entrega de potencia, cuyos conductos de admisión suelen presentar longitudes comprendidas entre los 15 y 18 cm. Por lo tanto, se dará por válido esta longitud de trompeta y será empleada en el diseño del modelo CAD.

$$l = \frac{2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot (44 \cdot 10^{-3}) \right) \cdot (14.5 - 1)}{(250 \cdot 10^{-6}) + (14.5 + 1)} \left(\frac{343.2}{13000 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 2.1} \right)^2 \approx 0.1527 \text{ m} \rightarrow \boxed{l = 15.27 \text{ cm}}$$

4.3.3.3 Longitud teórica frente a resultados empíricos

El estudio de la longitud de las trompetas de admisión es una práctica común en diversas competiciones universitarias. En particular, se analizará el estudio realizado por el equipo RIT Formula SAE Racing Team [16], mediante el cual el Instituto de Tecnología de Rochester participa en la competición Formula SAE, una competición internacional para estudiantes de ingeniería que diseñan, construyen y compiten con monoplasas tipo fórmula.

Este estudio examina la entrega de potencia y par de un motor tetracilíndrico, medidas en un banco de potencia, al instalar trompetas o runners de hasta cinco longitudes diferentes. Los resultados muestran la presencia de varios picos de sintonización, producto del aumento del rendimiento volumétrico correspondiente a las diferentes ocasiones en las que la onda reflejada regresa cuando la válvula de admisión está abierta.

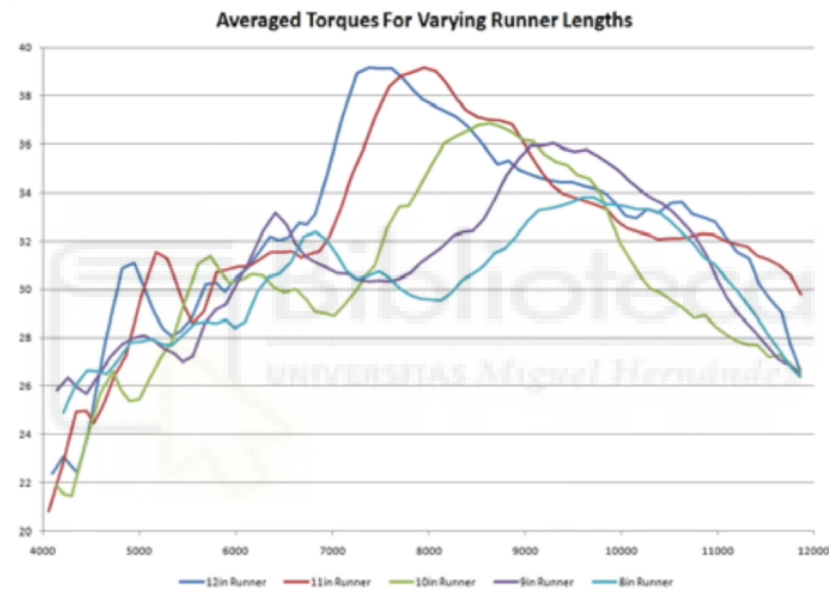


Gráfico 15 - Ensayo de sintonizado con banco de potencia

Sin embargo, la ecuación de Engelman, basada en el resonador de Helmholtz, solo permite predecir un único pico de sintonización. Por esta razón, este enfoque es considerado algo limitado. A pesar de ello, servirá como base para el diseño y, de acuerdo con el método de fabricación que se detallará en el punto 6.6, se podrán desarrollar trompetas con longitudes ligeramente diferentes. Esto permitirá evaluar las ganancias de potencia correspondientes a su instalación cuando el prototipo sea sometido a la calibración en banco de potencia, como se propondrá en el apartado 7 del presente documento.

4.4 Diseño del sistema de admisión dinámica

4.4.1 Criterios de diseño del sistema de admisión dinámica

Dados los valores objetivos y las condiciones de contorno para las cuales se optimizará el diseño, se definirán una serie de criterios de diseño que guíen en el desarrollo del sistema de admisión cumpliendo las expectativas y compromisos acordados.

- Localizar la toma de aire forzada en el punto de mayor presión dinámica.
- Dimensionar la toma de aire forzada de forma que cubra el área con la mayor presión dinámica.
- Evitar cambios de sección innecesarios, entendiendo por éstos, aquellos que no contribuyan al funcionamiento deseado, como es el caso de estrechamientos, fuente de fricciones y consecuente disipación de energía.
- Evitar cambios de dirección en los conductos de admisión hasta alcanzar el interior de la *airbox*.
- Priorizar rutas de admisión que eviten la proximidad con las zonas de altas temperaturas, de forma que la densidad del aire sea la máxima posible y, en consecuencia, la cantidad de oxígeno disponible para la quema de combustible.
- Minimizar las turbulencias en el interior de la *airbox*.
- Evitar desprendimiento de capa límite.
- Maximizar el volumen interior de la *airbox* para garantizar que cumpla la función de caja de remanso, calmando corrientes que pudieran resultar en un llenado irregular del cilindro.
- Permitir la integración de un sistema de filtrado de acuerdo con el punto C.2.4 de la normativa MS2425, de forma que retenga e impida el paso de partículas de diámetro equivalente superiores a 1 mm.
- Segmentar el volumen de la *airbox* de forma que facilite su futura fabricación y permita el acceso a su interior para realizar labores tales como la sustitución del filtro de aire o manipulación del cuerpo de inyección.
- Garantizar la estanqueidad del conjunto, evitando fugas que desechen las ganancias en prestaciones derivadas de implementar este sistema de admisión.

- Garantizar el aislamiento térmico del conjunto sin recurrir a espesores de paredes excesivos que dificulten la integración del sistema en el prototipo final ni supongan una masa excesiva.
- Tener en consideración aquellos métodos de fabricación que resulten en un buen acabado superficial interior, reduciendo la fricción del flujo de aire con las paredes, y su compatibilidad con los diseños desarrollados.
- Evitar la presencia de líneas de corriente directas entre la *airbox* y la tobera de admisión que supusiese un baipás del remanso.
- Garantizar la correcta colocación del cuerpo de inyección en el interior de la *airbox*, asegurando su adecuado funcionamiento y dejando las conexiones y componentes reemplazables y/o susceptibles de mantenimiento.

4.4.2 Alternativas diseño sistema de admisión dinámica.

En este apartado se presentarán y analizarán varias alternativas de diseño, destacando sus características, ventajas y limitaciones. Cada alternativa será evaluada en función de su capacidad para ceñirse a los criterios de diseño establecidos, así como su viabilidad técnica. A través de este análisis, se pretende proporcionar una visión integral de las opciones disponibles y facilitar la selección del diseño a implementar.

En este apartado se presentarán las diferentes alternativas para el diseño del sistema de admisión, destacando sus respectivas características, ventajas y limitaciones. Una vez expuestas, se justificará la selección del diseño elegido para ser implementado en el prototipo de competición.

4.4.2.1 Alternativa 1 | Integración con chasis

La propuesta de diseño que se describirá a continuación podrá ser considerada como la más vanguardista de las que se presentarán en este documento. Este diseño pretende integrar las conducciones del sistema de admisión dentro del propio chasis. Los tubos de refuerzo del chasis son sustituidos por perfiles de fibra de carbono que harán las funciones de conducciones desde las tomas de aire en el frontal del carenado hasta la caja de remanso. De esta forma, parte del sistema de admisión se convertiría en elemento estructural, soportando los esfuerzos propios de los tubos de refuerzo, resultando en un chasis híbrido, mezcla entre uno tubular y otro de doble viga.

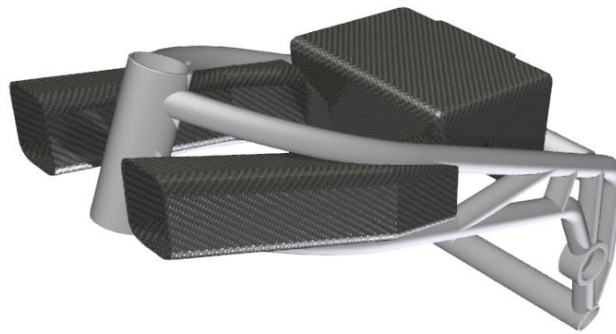


Ilustración 42 - Alternativa 1 Integración con chasis

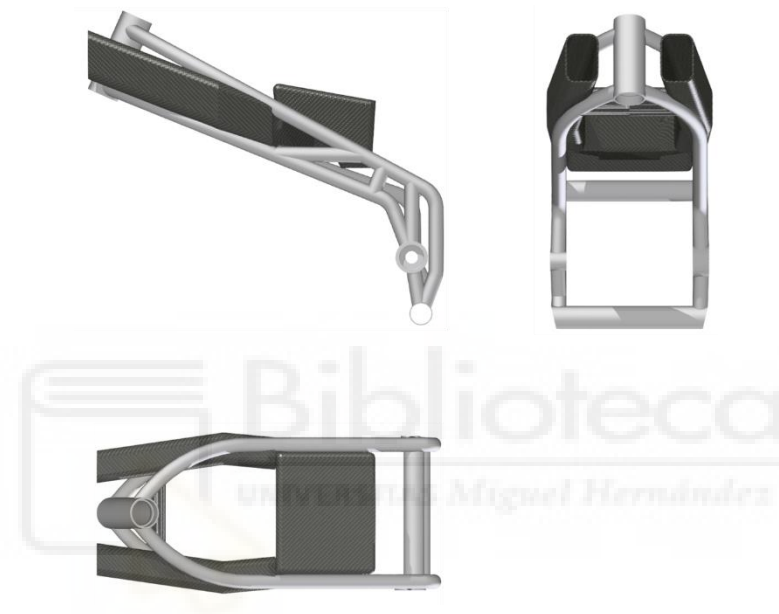


Ilustración 43 – Vistas de la Alternativa 1

Con esta solución se conseguirá reducir la masa del prototipo, al sustituir los tubos de refuerzo de acero por ligeros perfiles de fibra de carbono, constituyendo éstos conducciones relativamente directas con curvaturas muy reducidas. Además, este diseño permitirá conservar una configuración convencional del resto de componentes, como el depósito de combustible o las dimensiones del carenado, además de preservar la comodidad del piloto, tanto por su posición de pilotaje como por la disposición de la araña (explicar qué es). Incluso la caja de remanso quedará en posición convencional confinada entre el puerto de admisión, del depósito de combustible y las barras del chasis responsables de recibir los anclajes del esquema de suspensión trasera, integración que le permitirá un volumen de razonable.

Por el contrario, aplicar esta solución colocará una carga considerable sobre el proceso de fabricación de las conducciones, pues, al soportar esfuerzos mecánicos, no habrá lugar para fallos o irregularidades propias de piezas elaboradas por estudiantes con escasa experiencia práctica en el campo. Del mismo modo, complicará la relación con el fabricante encargado de doblar y soldar los tubos del chasis, pues, durante sus labores deberá contar con los perfiles de fibra de carbono e instalarlos entre los tubos superior e inferior. En base a esto, las tolerancias dimensionales deberán ser mínimas, de forma que los esfuerzos puedan transmitirse correctamente desde los tubos a los perfiles y viceversa, por lo que se recurrirá al empleo de adhesivos de altas prestaciones para unir sólidamente las conducciones al chasis, quedando la responsabilidad de la aplicación sobre el operario encargado del doblado de tubos.

4.4.2.2 Alternativa 2 | Depósito desplazado

No mucho menos innovador que el diseño anterior, la segunda propuesta consistirá en emplazar la caja de remanso en el espacio comúnmente reservado para el depósito de combustible, relocalizando a éste en la parte trasera del chasis, debajo de la zona de asiento del piloto, punto de anclaje del subchasis trasero. El aire será captado por una toma instalada en el frontal del prototipo, por debajo de la tija inferior de la horquilla de suspensión delantera, y será conducido por una canalización desde esta toma hasta la caja de remanso, pasando por detrás de la pipa de dirección.



Ilustración 44 - Alternativa 2 Depósito desplazado

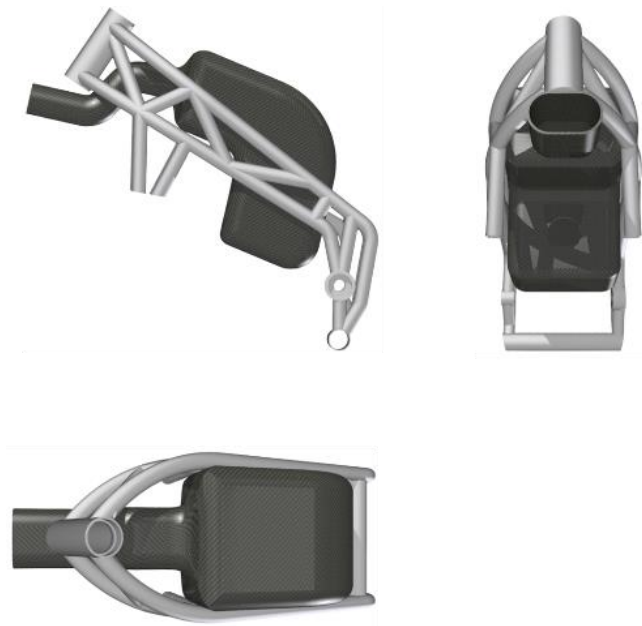


Ilustración 45 - Vistas de la Alternativa 2

Gracias a esta configuración, la caja de remanso tendrá un por lo que ésta podrá tener un volumen excepcional dadas las dimensiones de este tipo de prototipos, llevando consigo un aumento notable de la presión estática en su interior. Asimismo, la posición elevada y distancia significativa respecto al sistema de escape, permitirá mantener una temperatura del aire de admisión reducida, aumentando la densidad de éste, y así, la cantidad de oxígeno disponible para la combustión.

Dada la ubicación atípica del depósito, se fabricará uno metálico que pueda ser soldado a los tubos del chasis, actuando como elemento estructural, eliminando la necesidad de tubos de refuerzo transversales en la parte superior trasera del chasis.

No obstante, la necesidad de colocar la conducción de aire por detrás de la pipa de dirección generará curvas pronunciadas que podrán provocar desprendimientos de la capa límite, es decir, el aire de admisión no puede seguir el perfil marcado por la conducción, originando regiones turbulentas con presiones negativas. Aunque el principal desafío radicará en la integración con el trabajo de otros departamentos, cuyas soluciones técnicas podrían resultar incompatibles con esta alternativa de diseño o dificultar su desarrollo.

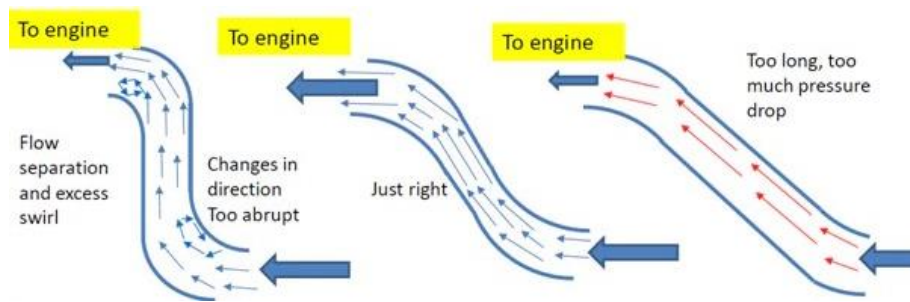


Ilustración 46 - Representación de efectos de curvatura en conductos

4.4.2.3 Alternativa 3 | Conductos directos

A raíz del diseño del punto previo, se buscará una alternativa en la que se reduzcan las curvas en la conducción de aire y siendo el transporte de éste hasta la caja de remanso lo más directo posible, reduciendo las pérdidas en el proceso. Dada la localización del puerto de admisión, los principales obstáculos en el intento de diseñar una conducción directa serán la pipa de dirección y los tubos de refuerzo del frontal del chasis.

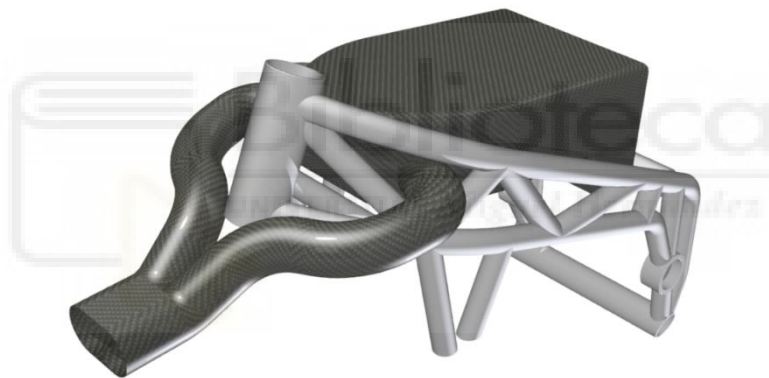


Ilustración 47 - Alternativa 3 Conductos directos

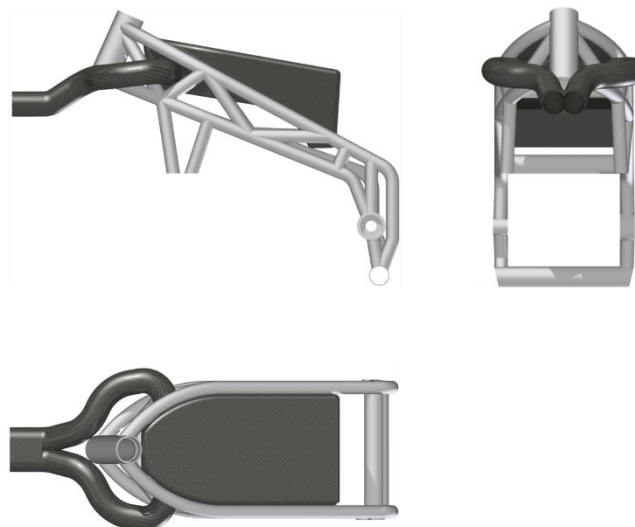


Ilustración 48 - Vistas de la Alternativa 3

En consecuencia, se diseñarán un par de conducciones que, partiendo de una única toma de aire labrada en el frontal del carenado, eludan la pipa de dirección y atraviesen el plano formado por los tubos de refuerzo del chasis. De esta forma, las conducciones, generarán un tracto directo a la caja de remanso y con sección constante, no sólo reduciendo la longitud de dicho tramo, sino garantizando que la temperatura del aire de admisión se mantiene próxima a la del ambiente y con la menor pérdida de energía. El volumen disponible para la caja de remanso será superior al definido en la alternativa 1, quedando a caballo entre dicha alternativa y la número 2.

El diseño expuesto condicionará la selección, modificación o fabricación del depósito de combustible. Este hecho casa con lo comentado en el punto 3.1.4.5, donde se anotó la intención del equipo de evaluar el uso de un depósito de geometría y disposición alternativa a la convencional. Existen alternativas comerciales con geometrías que se ajustarán a esta propuesta. El volumen de gasolina consumido será relativamente reducido, pues, incluso en la carrera final correspondiente a la última prueba de la fase MS2, la motocicleta no recorrerá más de 10 vueltas seguidas. De acuerdo con lo comentado en el punto 1.3.4, los prototipos participantes en esta competición son próximos a aquellos que participan en la categoría de Moto3, en la que las carreras tienen entre 18 y 23 vueltas, por lo tanto, cualquier depósito pensado para ser instalado en una de estas motos alojará un volumen de gasolina muy superior al exigido por la prueba. Cabe destacar que la normativa es muy estricta en lo referente a los depósitos no metálicos, lo que se tendrá muy presente en la elección, pudiendo recurrir a la fabricación de un depósito metálico de diseño propio. Procede destacar que en el diseño de la caja de remanso se ha contemplado la posibilidad de implementar un depósito relativamente convencional, pues también habrá alternativas comerciales en las que la parte inferior del depósito presenta una curvatura convexa en aras de aumentar el espacio disponible para este tipo de sistemas de admisión.

No obstante, esta alternativa implicará la implementación de dos conductos de admisión, lo que obligará a diseñar una toma de aire forzado con *splitter* que bifurcará la corriente hacia cada canal, así como supondrá una mayor inversión de tiempo y recursos para la fabricación de las conducciones. Asimismo, los canales presentarán cambios de dirección moderados, al tener que sortear la pipa de admisión y los tubos de refuerzo del chasis, lo que reducirá la eficiencia del conducto.

4.4.2.4 Alternativa 4 | Conducto interno

Dada la complejidad inherente a las soluciones propuestas en los apartados anteriores, se planteará una alternativa que represente el criterio de diseño "Priorizar la efectividad y el pragmatismo, buscando el compromiso entre innovación y factibilidad ". Conforme a este criterio, se diseñará una toma de aire análoga a la presentada en la alternativa 2, ubicada en la parte frontal, por debajo de la tija inferior de la horquilla de suspensión delantera e independiente del carenado. Dicha toma de aire estará conectada a una conducción de sección ovalada que transportará el aire hasta la caja de remanso, flanqueando el motor.



Ilustración 49 - Alternativa 4 Conducto interno

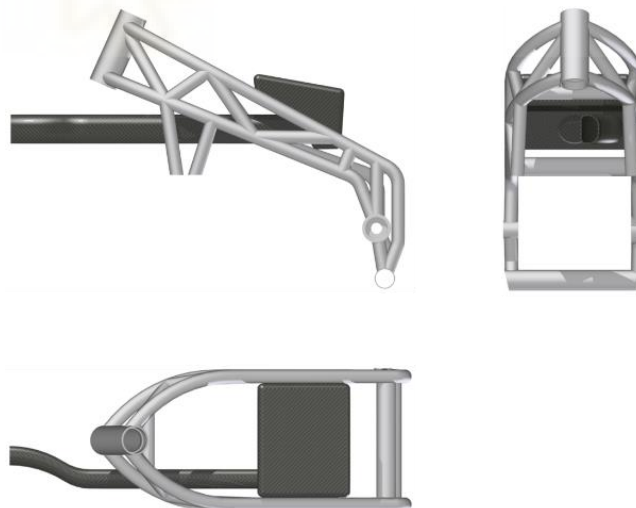


Ilustración 50 - Vistas de la alternativa 4

Esta alternativa asegura una integración plena y sencilla, sin interferir con otros componentes como el chasis o el depósito de combustible, aprovechando así el espacio disponible sin necesidad de reubicar o modificar elemento alguno. Además, el diseño de la caja de remanso seguirá en la línea de la alternativa 1.

No obstante, esta solución implicará una sección del conducto de admisión será relativamente reducida, dada la necesidad de encajarla entre el flanco del motor y el interior del chasis. Adicionalmente, esta ubicación la expone a altas temperaturas, ya que se encontrará muy próxima al sistema de escape. Esto tendrá como consecuencia una disminución de la densidad del aire de admisión, reduciendo así la cantidad de oxígeno disponible para el proceso de combustión.

4.4.2.5 Alternativa de diseño seleccionada

Las alternativas propuestas en la sección anterior representan el resultado de un exhaustivo proceso de evaluación y creatividad. Cada una de ellas exhibe una serie de ventajas e inconvenientes específicos. No obstante, el diseño que se implantará sobre el sistema de admisión será el correspondiente a la alternativa 3.

Esta selección se debe a su equilibrio entre efectividad y pragmatismo, ya que garantizará un rendimiento competitivo sin comprometer la viabilidad del proyecto. Este diseño supondrá un aumento en la entrega de potencia, crucial para el desarrollo de la fase MS2. Además, respetará la posición de conducción del piloto, manteniendo su comodidad y favoreciendo su rendimiento durante las pruebas.

La geometría del diseño permitirá que su fabricación recaiga sobre el equipo UMH RT, lo que promoverá la independencia del mismo en términos de herramientas y servicios, sin recurrir a terceros. Asimismo, la alternativa 3 reducirá las interferencias con los departamentos de diseño, lo que permitirá que este sistema trabaje en sinergia con el resto del prototipo.

De esta manera, la elección responde a una consideración meticulosa de la efectividad, comodidad del piloto, viabilidad de implementación e impacto en otros departamentos, asegurando un diseño de admisión que cumple con los requisitos necesarios para competir al más alto nivel.

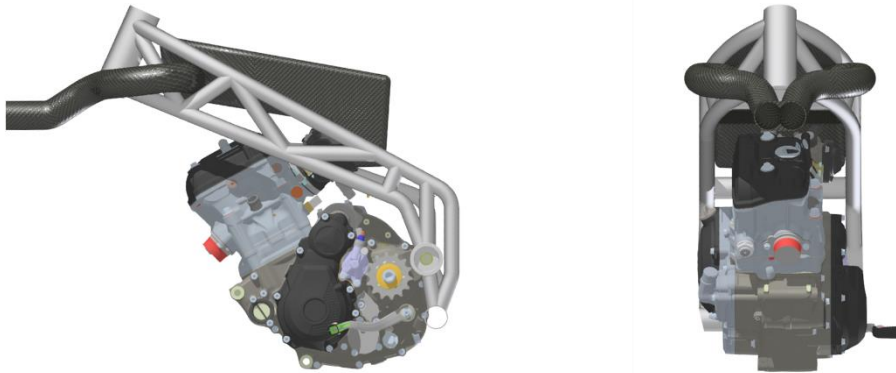


Ilustración 51 - Sistema de admisión dinámica seleccionado

4.4.3 Detalles del diseño del sistema de admisión dinámica seleccionado

Recurriendo nuevamente al estudio fluidodinámico, observará la superficie del carenado donde se tendrá la mayor presión dinámica. Como cabía esperar, esta área se encontrará en el extremo frontal del carenado, donde el prototipo se encontrará con el aire que tendrá, en el caso del análisis que se realizará en el presente trabajo, una velocidad relativa de 180 km/h.

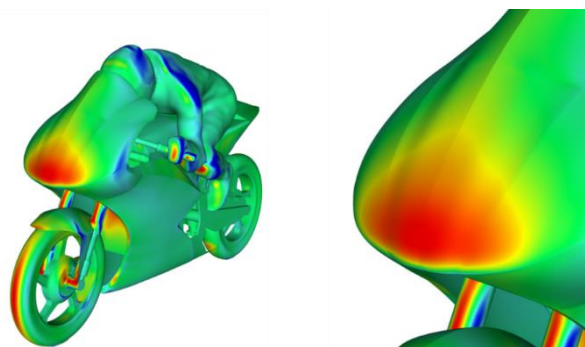


Ilustración 52 - Detalle del carenado en la zona de mayor presión dinámica

Esa región cubre una superficie aproximada de 4700 mm². Esta cifra coincide con la correspondiente a la toma de aire presente en el carenado del que dispondrá el UMH RT, siendo ésta 4235 mm². Dicho carenado será una réplica del empleado por KTM en la categoría Moto3 del Campeonato Mundial de Motociclismo. Dados los recursos y conocimientos de la marca austriaca, se asumirá que la configuración de la toma de aire en el carenado no es arbitraria, sino resultado de estudio en profundidad con herramientas CFD e incluso prueba en el túnel de viento.



Ilustración 53 - Detalle de la toma de aire

Cabe recordar la intención del equipo de, partiendo de un carenado comercial, modificarlo, resultando en otro único y adaptado al prototipo y sus fines en la competición. Estas mejoras pudieran incluir el rediseño de la toma de aire, no obstante, dicha área representará el punto de partida para el cálculo de la sección mínima de la caja de remanso con la que conseguir el aumento de presión estática deseado.

De acuerdo con la relación de secciones calculada en el punto 4.3.1.2, será posible determinar la sección de paso de la caja de remanso al introducir en dicha relación el área de la toma de aire presente en el carenado.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{A_2}{A_1} \approx 3.786 \rightarrow A_2 = 3.786 \cdot A_1 \\ A_1 = 4235 \text{ mm}^2 \end{array} \right\} \rightarrow A_2 \approx 16033 \text{ mm}^2$$

En base al área obtenida se procederá a comprobar el valor de la sección interior de la caja de remanso del modelo CAD correspondiente a la alternativa de diseño seleccionada. En base a este diseño la sección será relativamente constante a lo largo de la longitud de la *airbox* y tendrá un valor aproximado de

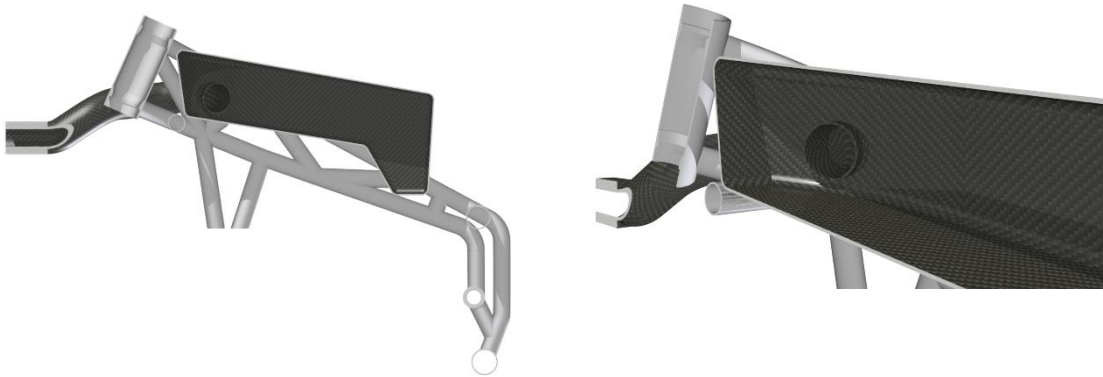


Ilustración 54 - Detalles del cambio de sección

4.5 Diseño de la trompeta de admisión

4.5.1 Preámbulo diseño trompeta admisión

Como se ha comentado anteriormente, el cuerpo del acelerador se ubicará parcialmente en el interior de la caja de remanso. Esto se realiza con el objetivo de aumentar el volumen de la caja y, al mismo tiempo, integrarlo con el cuerpo del acelerador. Sin embargo, la entrada de aire desde el interior de la caja no se efectuará directamente a través de la sección de entrada del cuerpo de inyección, sino mediante la instalación de una trompeta de admisión, consideradas como el método predilecto para la entrada de un fluido en comparación con los conductos rectos convencionales, extendiéndose su aplicación a múltiples campos más allá de los motores.

4.5.2 Criterios de diseño trompeta admisión

De forma análoga al apartado 4.2, se establecerán los criterios de diseño que confeccionen las pautas y guías para el diseño de la trompeta de admisión.

- Ajustar la longitud total del conducto de admisión, entiendo por éste, el puerto de admisión, el cuerpo de acelerador, y la trompeta instalada tras éste, procurando coincida con la longitud teórica calculada en el apartado 4.3.,
- Evitar que la sección de entrada a la trompeta se encuentre muy próxima a las paredes de la caja de remanso, pues podría restringir la entrada de aire y/o provocar turbulencias en ésta.
- Conservar el perfil troncocónico definido en el interior del cuerpo de acelerador debido al estrechamiento progresivo de su sección de paso. Este fenómeno es muy común y se ha documentado en numerosos estudios que evalúan la utilizar tal geometría [17]
- Minimizar el efecto vena contracta, que se definirá más adelante y por el cual se produciría el estrechamiento del caudal de admisión efectivo.
- Asegurar que el volumen de aire existente entre el dorso de las válvulas de admisión y la sección de entrada de la trompeta de admisión sea igual o superior al volumen interior del cilindro, promoviendo así un llenado óptimo al disponer de todo el volumen necesario para la combustión inmediatamente detrás de las válvulas.

4.5.4 Geometría de la trompeta de admisión

Las trompetas de admisión, o *bellmouths*, término que evoca la similitud de su geometría con el cuerpo de una campana, se fundamentan en el principio de adherencia del fluido a las paredes del conducto que atraviesa. El tránsito del aire presente en la caja de remanso hacia el puerto de admisión, a través del cuerpo del acelerador, implica una aceleración del este fluido debido al estrechamiento de la sección de paso del caudal. La trompeta de admisión permitirá que esta transición sea gradual, reduciendo el efecto del fenómeno conocido como vena contracta. Dicho fenómeno se produce cuando el aire no puede seguir un cambio abrupto en la dirección o en la sección de paso, provocando desprendimiento de la capa límite y la consiguiente pérdida de presión y turbulencias asociadas.

Según lo estudiado por Blair y Cahoon, [18] se investigaron los tres perfiles de trompeta de admisión más populares con el fin de determinar cuál de éstas es la geometría óptima. Estos tres perfiles son: el perfil simple, el perfil redondeado y el perfil elíptico. Los resultados indicaron que el perfil elíptico es el que ofrecerá los mejores resultados. Por lo tanto, la geometría de la trompeta de admisión será de perfil elíptico, ajustándose al espacio disponible y las dimensiones calculadas en el punto 4.2.5.3.2, mejorando así el flujo de aire en la superficie de entrada al cuerpo del acelerador.

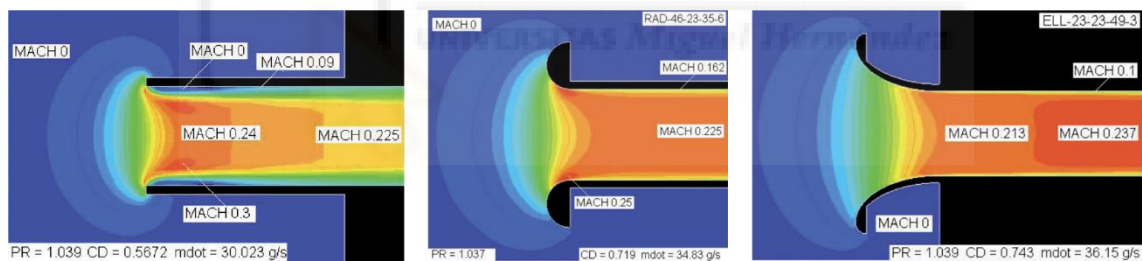


Ilustración 55 - Comparativa de simulaciones de diferentes perfiles de toberas de admisión

El perfil elíptico que se empleará en el diseño de la trompeta de admisión será el resultante de aplicar las guías marcadas por Hoffmann [19] combinada con aquellas marcadas por la ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) [20] para el diseño de toberas de radio largo.

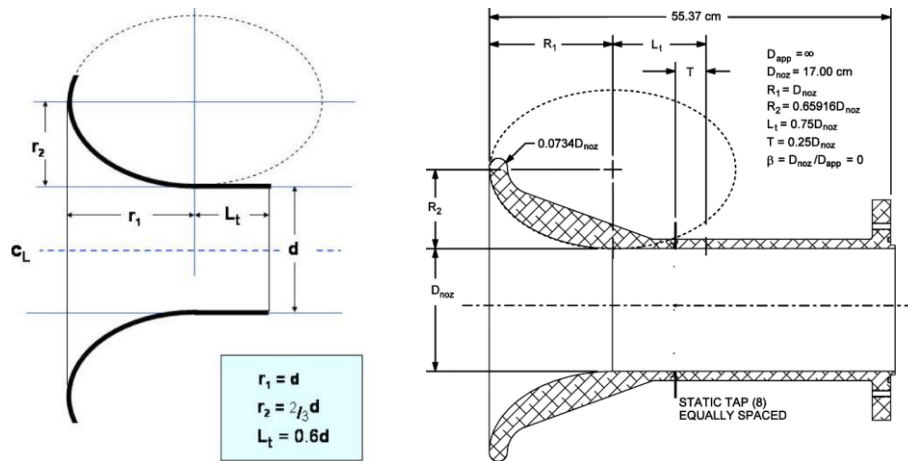


Ilustración 56 - Guía de perfil elíptico de Hoffmann (izq.) y ASME (dcha.)

Debe recordarse el hecho de que para la elaboración del modelo CAD se tendrá en cuenta las longitudes del cuerpo de acelerador y puerto de admisión, de forma que éstas juntos con la trompeta instalada en la sección de entrada al cuerpo de acelerador, supondrán una longitud total del conducto igual a la calculada en el punto 4.3.3.2 siguiendo la fórmula teórica de Engelman basada en el resonador de Helmholtz. Las secciones de paso del cuerpo y puerto se modelizarán mediante un perfil troncocónico empleando sus respectivas secciones. De igual modo, y con la intención de ayudar a la visualización del componente final, se ha añadido la junta de goma mediante la que el cuerpo de inyección se acoplará al puerto de admisión.





Ilustración 57 - Representaciones de la trompeta de admisión diseñada

Al ensamblar la trompeta diseñada con el resto de los componentes del sistema de admisión, se concluirá que el espacio disponible para ésta es bastante reducido, pudiendo llegar a resultar estridente la relación de tamaños entre componentes. No obstante, esto se justificará en base a la escasa altura de la caja de remanso en el intento de permitir el empleo de un depósito de combustible relativamente convencional.



Ilustración 58 - Sección del ensamblaje del sistema de admisión dinámica y la trompeta

4.6 Simulación y optimización

4.6.1 Preámbulo sobre simulación y optimización

Para el estudio fluido mecánico del sistema de admisión dinámica se empleará el software Ansys Fluent mientras que para el correspondiente a la trompeta de admisión se usará Autodesk CFD. El motivo detrás de esta decisión será reducir el gasto computacional innecesario, reservando las simulaciones más complejas para el sistema ram-air. En primera instancia se probará a emplear CFD para la simulación de ambos componentes, sin embargo, la falta de resultados concluyentes motivará el empleo de Ansys.

4.6.2 Simulación y optimización del sistema de admisión dinámica

Para la correcta ejecución de la simulación se modificará el modelo del sistema admisión, eliminando las operaciones de vaciado, pues el enfoque que se tomará será el de emplear el modelo macizo como un recinto de aire, para lo que se seleccionará los cuerpos que lo componen y se les aplicará la condición de fluido y seleccionará aire como su material. De esta forma, se estudiará la evolución de éste al atravesar el recinto constituido por la superficie del sistema de admisión. No obstante, al cuerpo correspondiente a la trompeta se le deberá de aplicar la condición de sólido y se le aplicará ABS como material.

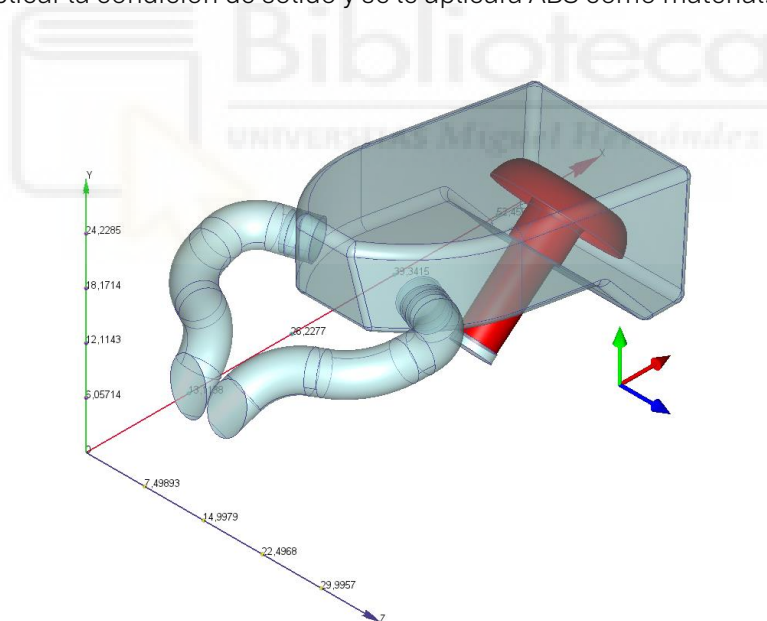


Ilustración 59 - Asignación de materiales en Autodesk CFD

A continuación, se aplicarán las condiciones de contorno de la simulación. Para ello, se seleccionarán las superficies correspondientes a las secciones de entrada de cada una de las conducciones y se les aplicarán las condiciones de velocidad 180 km/h y presión 101325 Pa. De acuerdo con esto, se simulará la velocidad relativa del aire ambiente cuando el prototipo circule a la velocidad de referencia fijada en el punto 4.2.3.6.

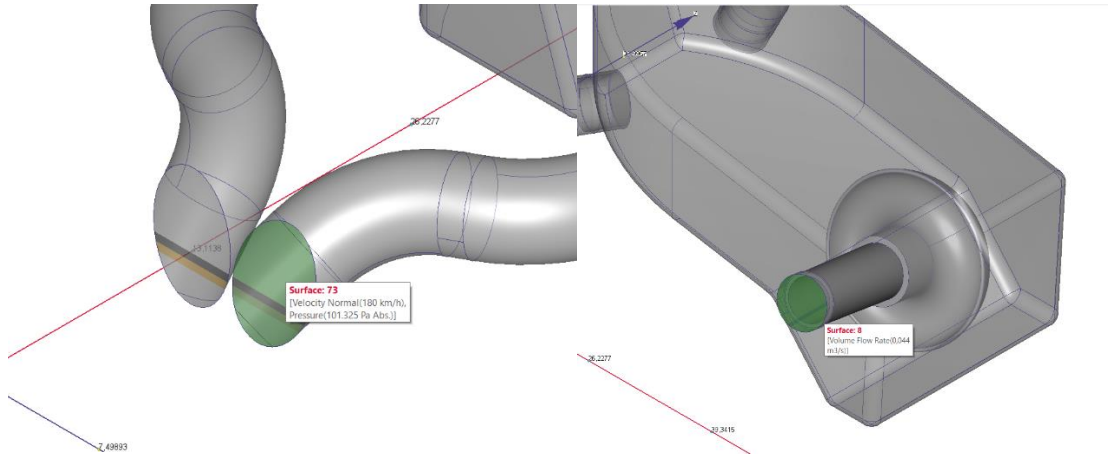


Ilustración 60 - Asignación de condiciones de contorno en Autodesk CFD

Dada la relativa complejidad geométrica del sistema de admisión se empleará la opción de mallado automatizado, según la cual, será el propio programa el que ajuste la configuración del mismo con el fin de garantizar una simulación libre de fallos.

Por último, se seleccionará el número de iteraciones, según el cual se resolverán las ecuaciones fluido mecánicas pertinentes tantas veces como se especifique buscando que el sistema converja en una solución. Dependiendo de la complejidad del diseño, el número de iteraciones recomendable podrá variar significativamente. Se podrá considerar que la solución converge cuando el valor residual de las diferentes variables evaluadas se vuelva estable. Esto será posible gracias a la gráfica de convergencia. Para la simulación inicial se fijará un valor de 400 iteraciones.

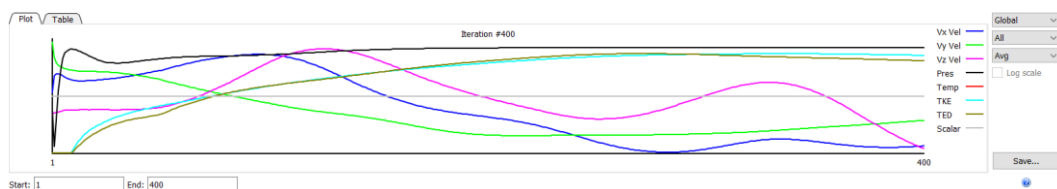


Ilustración 61 - Valores residuales tras simulación en Autodesk CFD

Cabe recordar que con la simulación se pretende comprobar si la presión estática en el interior de la caja de remanso es igual a la resultante de sumar a la presión ambiente la sobrepresión objetivo especificada en el punto 4.2.4.3. Asimismo, se analizarán las corrientes, en busca de aquellas que pudieran llegar directamente a la trompeta de admisión, provocando un llenado irregular del cilindro. No menos importante, se estudiarán el efecto de las curvaturas presentes en las conducciones que conectarán la toma de aire con la caja de remanso.

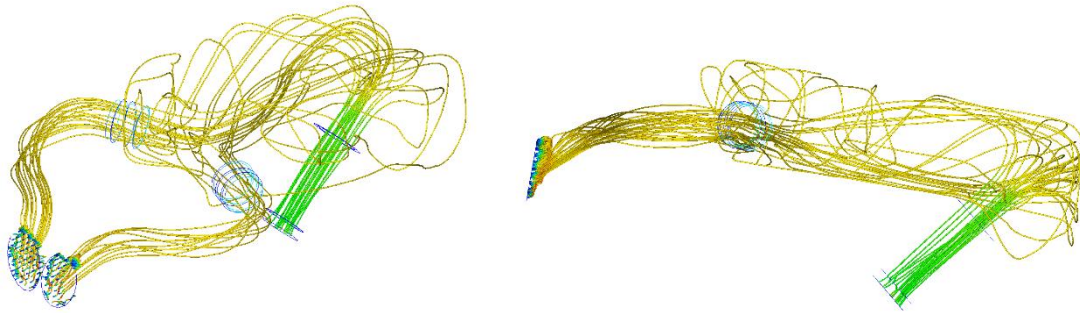


Ilustración 62 - Líneas de corriente según simulación en Autodesk CFD

En base a los resultados mostrados, resultando la información obtenida insuficiente, ya fuese por limitaciones de la herramienta o por error en el uso de la misma, se realizará una nueva simulación empleando Ansys Fluent, considerado uno de los softwares de referencia.

En primer lugar, se importará la geometría, tras lo cual se concluirá la necesidad de simplificar la geometría, eliminando el perfil de la trompeta de admisión. En base a esto, la efectividad de la trompeta será analizada de forma paralela. Se importará la nueva geometría y asignarán nombre a las caras correspondientes a las tomas frontales y a la salida de la trompeta. Una vez realizada tal modificación sobre el modelo CAD, el mallado se completará seleccionando la preferencia CFD pues la malla será simulada en el módulo Fluent. Se comprobará el grado de calidad según el parámetro ortogonal < 0.1 .

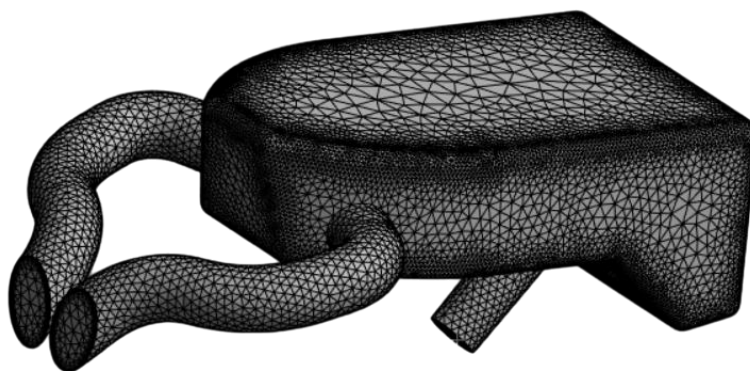


Ilustración 63 - Mallado de Ram-air en Ansys

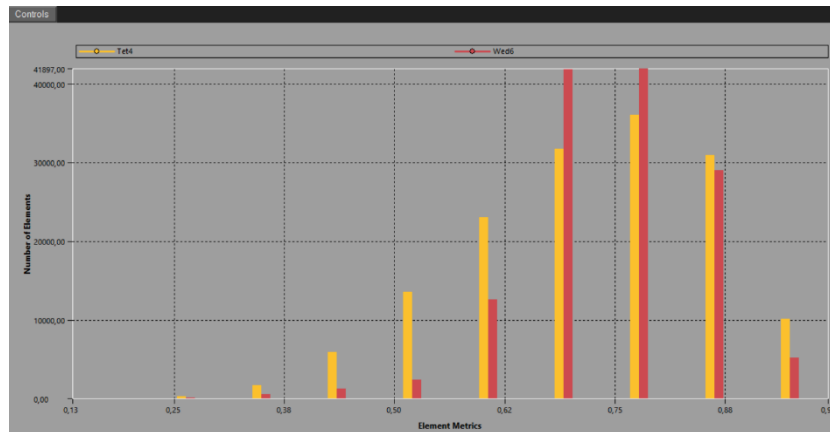


Gráfico 16 - Verificación del mallado en Ansys

A continuación, se seleccionarán el material, aire en esta ocasión, y las condiciones de contorno, según las cuales se fijará la velocidad de entrada a las tomas en 50 m/s igual a la velocidad de referencia para la optimización. Una práctica común a la hora de evaluar este tipo de sistemas es establecer una presión constante en la sección de salida. Tras esto, se iniciará la simulación.

Según lo mostrado en las soluciones de Ansys, se observan una serie de deficiencias en el diseño según muestran las líneas de corriente, entre las que destaca la generación de retrocesos en las secciones de entrada a la caja de remanso. Este fenómeno frenará la entrada del aire, reduciendo la efectividad del sistema. Sin embargo, el escaso espacio disponible entre los tubos de refuerzo impide una orientación o geometría alternativa.

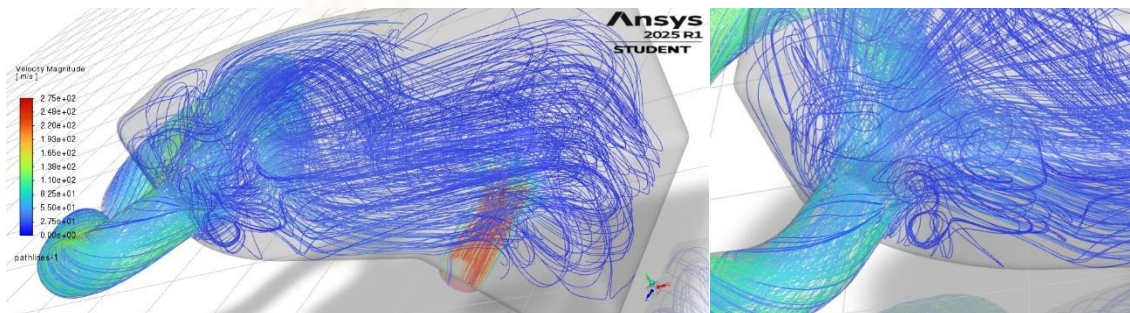


Ilustración 64 - Recirculación en secciones de entrada a la air-box

Sin embargo, al mostrar las líneas en función del tiempo, según esto las líneas se vuelven más claras y cálidas conforme avanza el tiempo, se podrá asumir que no habrá una corriente directa que llegue a la trompeta de admisión. Esto quedará justificado por el volumen de la caja de remanso y su sección de paso, capaces de frenar la entrada de aire, y por la localización de la sección de entrada a la trompeta, encontrándose ésta a una cota diferente a aquellas de entrada a la caja de remanso.

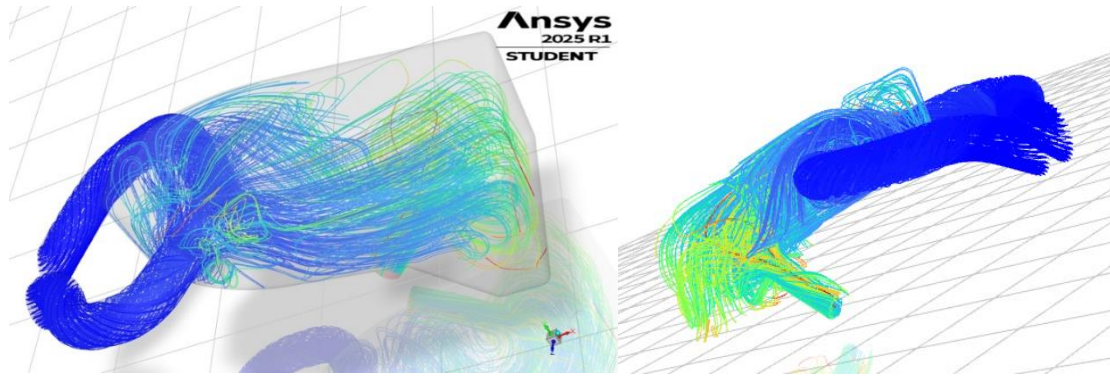


Ilustración 65 - Líneas de corriente en función del tiempo

Aunque no ha podido obtenerse ningún dato preciso sobre la presión en el interior de la caja de remanso que valide el diseño del conjunto, se podrá apreciar como los vectores de velocidad reducirán drásticamente su módulo en cuanto abandonan las conducciones de entrada. Cabrá esperar que, asociada a tal reducción, se producirá un aumento notable de la presión que promueva un mejor llenado del cilindro, algo que quedará pendiente de probar de acuerdo con el plan de implementación futura definido en el apartado 7.

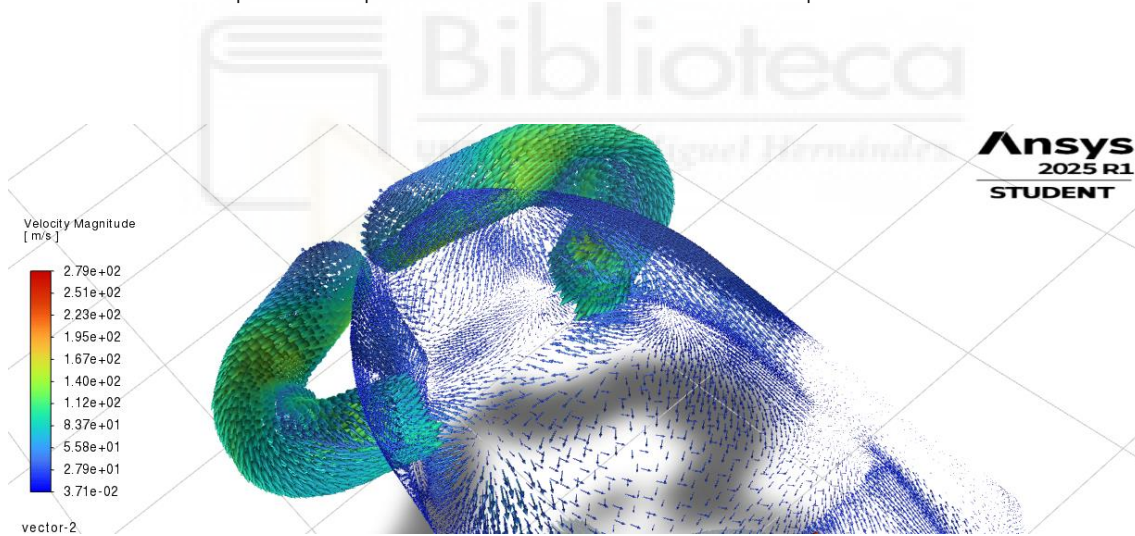


Ilustración 66 - Reducción en módulo de vectores velocidad

4.6.3 Simulación y optimización de la trompeta de admisión

Pesa al hecho de formar parte del mismo conjunto que el resto de las piezas que componen el sistema de admisión presentado en este documento, se podrá evaluar de forma independiente la eficiencia de la geometría de la trompeta de admisión.

Con el fin de evaluar el diseño de la trompeta, se realizarán simulaciones empleando el programa Autodesk CFD. La elección de éste se fundamenta en la compatibilidad con Inventor, el programa empleado para en la fase de diseño. Además, Autodesk CFD es una herramienta capaz y cuenta con una interfaz intuitiva, al mismo tiempo que encuentra a la disponibilidad de cualquier alumno matriculado en la UMH.

Para ello se empleará un método similar al utilizado en el apartado anterior, salvo que, en esta ocasión, se fijará un valor de presión igual a la presión ideal, siendo esta la resultante de sumar la presión ambiente con la sobrepresión objetivo, indicada en el punto 4.2.4. De esta forma, tal valor de presión uniforme representará la idoneidad del diseño de los demás componentes, permitiendo aislar la evaluación del diseño de la trompeta. De nuevo, se aplicará un caudal de salida del cuerpo de admisión igual al correspondiente al gasto másico de aire por parte del motor. Para la simulación inicial se empleará el diseño ya presentado en el punto 4.6.3.

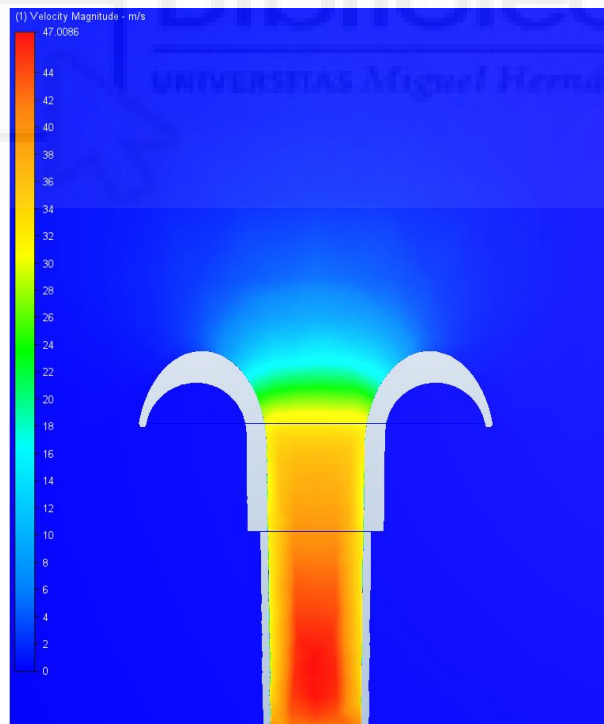


Ilustración 67 - Gradiente de velocidades según simulación del perfil diseñado

De acuerdo con las gráficas resultado de la simulación de la trompeta, se observa que para la geometría original se obtiene una velocidad máxima del aire de 47.0086 m/s. Esto representa un estrechamiento significativo de la corriente, pues, en un caso ideal, la velocidad sería la correspondiente a la división del caudal por la sección de salida (40.922 m/s). Dicho fenómeno corresponde con el conocido como **vena contracta**, según el cual se producirá un estrechamiento debido a la incapacidad del aire para seguir el perfil de forma eficiente, desprendiéndose de las paredes, generando pérdidas y reduciéndose así la sección de paso efectiva del caudal, y el aumento de la velocidad asociado a ésta. En consecuencia, se evaluarán geometrías alternativas de acuerdo con las cuales se reduzcan los efectos mencionados.

$$\bar{v}_{adm} = \frac{Q_{adm}}{S_{adm}} = \frac{Q_{adm}}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot \phi_{adm}^2\right)} \approx 40.922 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

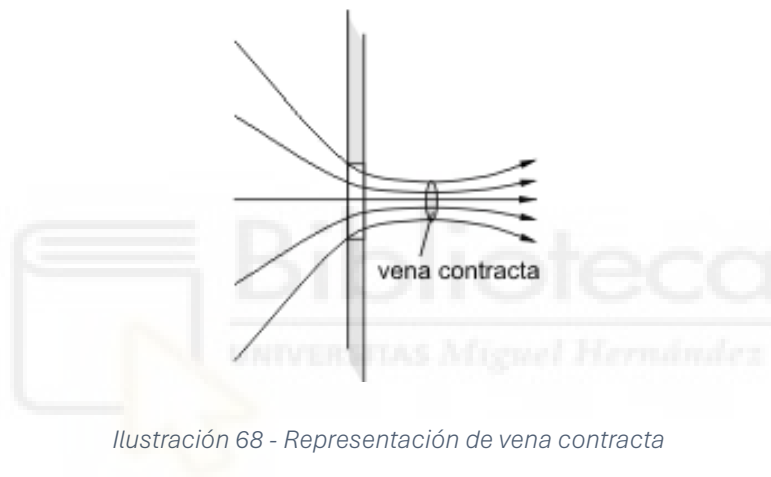


Ilustración 68 - Representación de vena contracta

Como ha podido apreciarse en el punto 4.5.4, las dimensiones de la trompeta no podrán variar en gran medida en base al limitado espacio remanente en dicha región de la caja de remanso. En consecuencia, en las geometrías alternativas para la optimización del diseño, se limitará el diámetro exterior máximo de la trompeta a 142 mm, al mismo tiempo que se mantendrá la longitud total del conducto de admisión conforme a lo calculado teóricamente en el punto 4.3.3.3, conservando así los beneficios del sintonizado de la admisión.

A continuación, se simularán las trompetas resultantes de aplicar 2 geometrías alternativas. La primera de éstas consistirá en un aumento del radio horizontal del perfil elíptico, aunque, debido a la limitación de espacio, dicho perfil no será completo. Respecto a la segunda geometría alternativa, se aumentará ligeramente el radio horizontal de la elipse mientras que se incrementará significativamente el radio vertical de la misma.

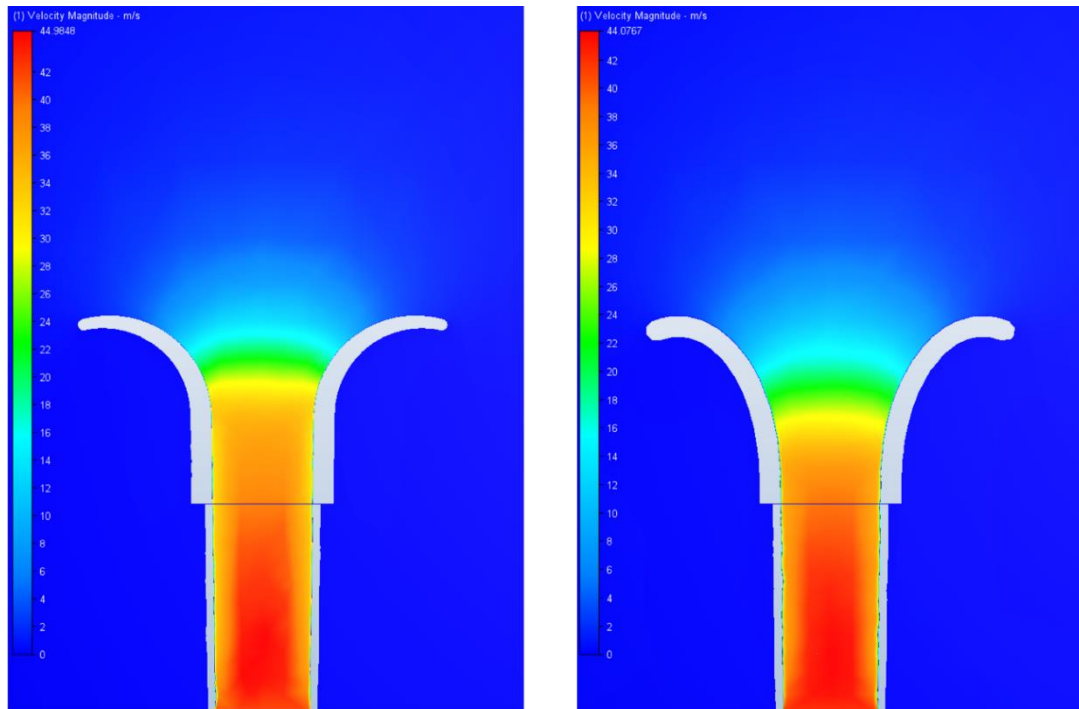


Ilustración 69 - Gradientes de velocidades correspondientes a los perfiles alternativos

En base a datos generados en estas nuevas simulaciones, las velocidades máximas del aire en ambas alternativas serán inferiores a la reflejada en la primera simulación. La diferencia queda justificada en el empleo de radios mayores que favorezcan la adherencia del aire a las paredes de la trompeta. Dichas velocidades serán 44.985 m/s para la primera geometría alternativa y 44.077 m/s para la segunda.

Con el fin de comparar las gráficas en conjunto, se ajustarán las escalas de velocidades de forma que todas las simulaciones compartan la misma. Por tanto, se ajustará el mínimo a 0 m/s y el máximo a 47 m/s, siendo este último el valor asociado a la velocidad máxima alcanzada en la primera simulación.

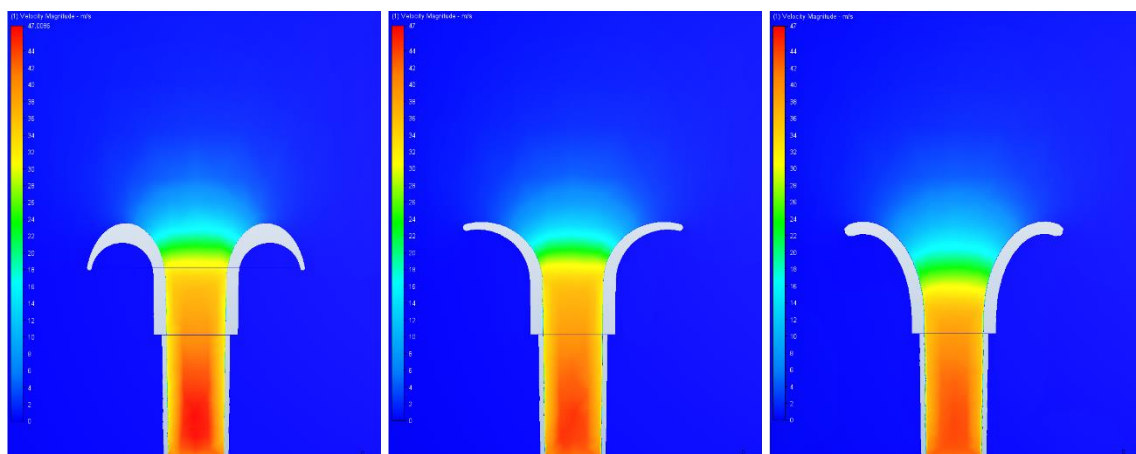


Ilustración 70 - Comparativa entre perfil original (izq.), elipse ensanchada (centro) y elipse alargada (dcha.)

Analizando esta nueva gráfica de conjunto, se puede apreciar un gradiente de velocidades más progresivo en el último de las geometrías, representando una transición más paulatina. A la anterior se añade la reducción de la región próxima a las paredes en la que se tienen velocidades relativamente reducidas, manifestando nuevamente, una reducción en el efecto vena contracta.

De acuerdo con lo comentado hasta el momento, se implementará una trompeta de admisión según el segundo diseño alternativo, sustituyendo al inicial.



Ilustración 71 - Trompeta optimizada siguiendo nuevo perfil elíptico alargado

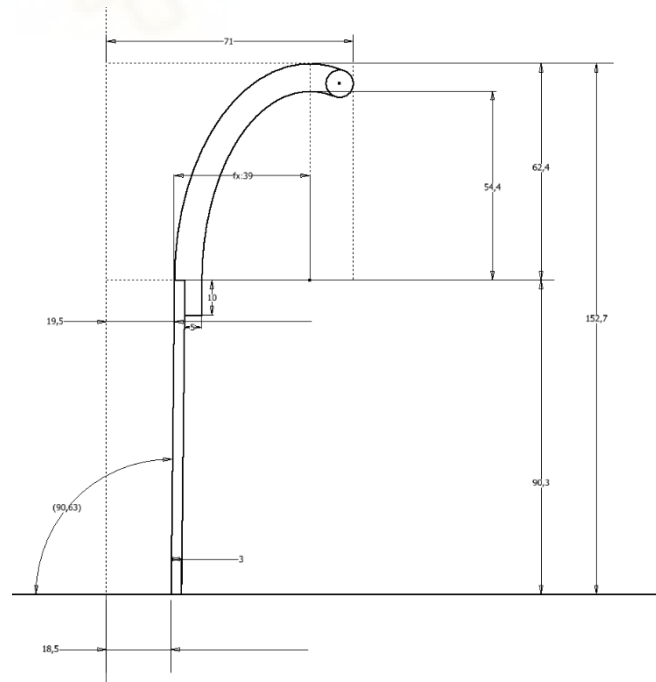


Ilustración 72 - Plano del nuevo perfil elíptico alargado

5. Prototipado

5.1 Preámbulo prototipado

Una vez determinado el diseño que componen las diferentes soluciones técnicas propuestas en este trabajo, se expondrán los métodos de prototipado que se emplearán. Con el fin de evitar ambigüedades, y a diferencia de capítulos anteriores, en adelante no se referirá a la motocicleta objeto de estudio en este proyecto como “prototipo”. (Describir qué es prototipado). (Principal función, comprobar compatibilidad dimensional que garantice la correcta integración con el resto de los elementos de la motocicleta.

La fase de prototipado tiene la función de crear una representación preliminar o un modelo funcional de los componentes desarrollados para probar y validar su diseño y características. En lo que a este trabajo respecta, la principal tarea del prototipado será comprobar la compatibilidad dimensional, garantizando que las piezas diseñadas se integrarán correctamente con el resto de los elementos de la motocicleta. De esta forma, esta etapa permitirá identificar posibles problemas de ajuste y ensamblaje antes de la fabricación final, para volver a la fase de diseño y realizar las correcciones que asegurarán así la compatibilidad y la funcionalidad de las piezas finales.



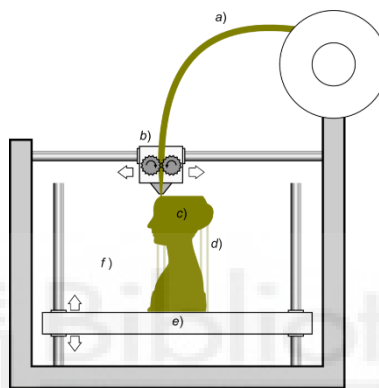
No obstante, cabe matizar que en esta etapa no se incluirá una validación de funcionalidad de los componentes de admisión. Esto se debe a que los métodos que se emplearán en la fase de prototipado pueden resultar en piezas que no cumplan con los requisitos necesarios para desarrollar su función, como pueden ser, la resistencia térmica o el acabado superficial. Desarrollar prototipos que cumpliesen con las especificaciones finales conllevaría una inversión de tiempo desmedida, ya fuese por el aumento en la precisión requerida en el proceso de prototipado y/o por las labores de post-procesado pertinentes para alcanzar dichos requisitos.

Además, para validar la funcionalidad de los componentes de la admisión, será necesario disponer de la motocicleta completa y lista para alcanzar altas velocidades, recordando la necesidad de una presión dinámica elevada en la región frontal del carenado para poder evaluar la mejora en el rendimiento del motor que estos componentes conllevan, algo que es imposible de conseguir en un banco de potencia convencional.

Finalmente, anotar la división del sistema es piezas que permitan una impresión eficiente y faciliten el ensamblaje del conjunto sobre la motocicleta.

5.2 Prototipado por deposición de filamento fundido

El sistema que se empleará para el prototipado será la impresión 3D de modelos CAD modificados para facilitar el ensamblaje y permitir una verificación dimensional rápida y fiable. El método más comúnmente asociado a la impresión 3D es el denominado FDM o FFF. Por un lado, FDM del inglés *Fused Deposition Modeling* o modelado por deposición fundida, es una tecnología patentada por Stratasys, empresa líder en el sector de la producción 3D y la manufactura aditiva. Frente a éste, el FFF, o *Fused Filament Fabrication*, es decir, fabricación por filamento fundido, es un término más amplio, utilizado para describir técnicas genéricas de impresión 3D. Ambos procesos suponen la fundición y deposición de filamento, capa por capa, para crear un objeto tridimensional, aunque en este proyecto se emplearán las referencias FFF, deposición de filamento fundido o, directamente, impresión 3D.



De acuerdo con la descripción esquemática del proceso de impresión 3D, un filamento "a)" de material plástico será suministrado a través de una boquilla calefactora móvil "b)" que lo fundirá y extruirá, depositándolo capa por capa en la forma deseada "c)". Una plataforma móvil llamada cama de impresión "e)" descenderá después de que cada capa sea depositada. Para este tipo de tecnología, se podrán necesitar soportes vertical adicionales "d)" para sostener las partes de la pieza que estén en voladizo.

Desde su popularización, este método ha revolucionado el prototipado, promoviendo la viabilidad de esta fase, democratizándola, para empresas y equipos con presupuestos ajustados, de acuerdo con sus ventajas inherentes y en base a las cuales se justificará la elección de este sistema de fabricación. En primer lugar, permitirá la creación rápida y económica de los modelos, permitiendo la mejora iterativa de los diseños, especialmente útil para realizar ajustes tras las pruebas iniciales de integración. No menos importante, la impresión 3D ofrecerá una gran flexibilidad de diseño, permitiendo la fabricación de geometrías complejas, tales como el *splitter* de la toma de aire, algo que sería complicado con métodos tradicionales. Además, el uso del FFF reducirá la dependencia de terceros, pues el equipo dispondrá de varias impresoras a su alcance, pudiendo realizar sus propios prototipos de manera interna y ágil.

Según este sistema de fabricación, se partirá de los modelos CAD de los componentes, los cuales serán sometidos a una serie de modificaciones y simplificaciones que posibiliten un montaje sencillo, pues las piezas impresas no tendrán que cumplir otra función que la de permitir la verificación e integridad dimensional. Estos modelos se convertirán en un formato compatible con la impresora 3D, donde se dividirán en capas horizontales delgadas, proceso denominado *slicer*. Una vez los archivos sean cargados en la impresora 3D, ésta calentará un filamento termoplástico hasta fundirlo y lo extruirá a través de una boquilla, depositando el material capa por capa sobre la cama de impresión. Cada capa se adherirá a la anterior, formando gradualmente las piezas de prototipado. Una vez completada cada impresión, los componentes impresos se retirarán de la cama de impresión y, si es necesario, se somete a un post-procesamiento, como la eliminación de soportes o el lijado, eliminando todo aquello que dificulte la compatibilidad y validación dimensional en la motocicleta.

Los filamentos utilizados en la impresión 3D son generalmente termoplásticos ya que tienen la propiedad de fundirse rápidamente a temperaturas moderadas. El filamento que se empleará durante todo el prototipado de los componentes de admisión será **ABS**, un material de reducido coste, ampliamente disponible, que permitirá configurar el proceso de impresión de forma que se disponga de los prototipos en un tiempo reducido y con la conformidad dimensional buscada. Además, a diferencia de otros filamentos incluso más populares y económicos como el PLA, el uso de ABS dotará a las piezas impresas de cierta ductilidad, propiedad idónea cuando se han de encajar componentes, evitando la aparición de grietas o la rotura de la pieza.

5.3 Prototipado toma de aire forzado

Dentro del conjunto *ram-air airbox*, el primer elemento a prototipar será la toma de aire forzado. Los desafíos de compatibilidad asociados a este componente radican en la necesidad de ajustarse a la apertura ya presente en el carenado y al mismo tiempo que servirá como punto de partida para la bifurcación de las conducciones, comúnmente conocido como *splitter*. Por lo tanto, el ajuste de este componente debe ser preciso, lo que implica que será la pieza que se prototipará con mayor precisión.

Del mismo modo, la toma de aire será el único componente de la admisión cuyo interior seguirá siendo representativo del componente final, mientras que en el resto se realizarán simplificaciones y/o se harán macizos. El motivo detrás de esta decisión es explorar la idea de realizar la pieza final empleando la impresión 3D, en base a la complejidad de su simetría y precisión del ajuste con el chasis tubular.

En cuanto al modelo CAD, solo se ensancharán las secciones finales donde la toma de aire se unirá por apriete con las conducciones que conectarán la toma de aire con la caja de remanso, para así facilitar el ensamblaje del conjunto.

5.4 Prototipado de las conducciones

El prototipo de las conducciones se unirá a la toma de aire por apriete, modificando el modelo de forma que las secciones frontales interiores se extruyan y pudiendo encajar dentro de las secciones de salida de la toma de aire, haciendo. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el interior de los prototipos se imprimirá empleando una estructura en panal de abeja, simulando que las piezas sean macizas, lo que les aportará cierta rigidez, principalmente de cara a poder soportar los esfuerzos propios de forzar el ajuste con otros componentes de la admisión. De forma similar a las modificaciones en el frontal de las piezas, se realizará sendas extrusiones en las secciones de salida de las canalizaciones para poder ser encajadas en el prototipo de la caja de remanso.

5.5 Prototipado de la caja de remanso

A diferencia de las conducciones, el interior de la caja de remanso se imprimirá parcialmente macizo, pues la parte superior de la misma se mantendrá fiel al componente final, siendo ésta hueca, para poder evaluar la instalación del filtro de admisión en su interior. Del mismo modo, el modelo para la impresión contará con la apertura correspondiente a la tapa superior de la caja de remanso que, en la pieza final, servirá para poder acceder al interior de la misma, para revisarlo y poder comprobar, mantener o sustituir el filtro de aire. El modelo CAD será modificado para incluir extrusiones negativas en las secciones de entrada, asegurando así el encaje con los prototipos de las canalizaciones. Además, se añadirá una extrusión negativa en la sección de salida, que conectará la caja de remanso con el cuerpo del acelerador.

5.6 Prototipado de la trompeta de admisión

De forma similar al prototipado de la toma de aire forzado, la trompeta de admisión se imprimirá empleando una configuración de mayor precisión, pues no se descartará este método para la fabricación de la pieza final. El ajuste de este prototipo con el cuerpo de acelerador se realizará mediante apriete, de ahí la necesidad de aumentar la precisión de impresión. No sólo será este el único ajuste, pues, de acuerdo con el diseño final, la trompeta tendrá que ajustarse a la sección de salida de la caja de remanso, dejando la parte media e inferior del cuerpo de acelerador fuera de la *airbox*, permitiendo su acceso y así su manipulación y mantenimiento.

6. Fabricación

6.1 Preámbulo fabricación

La fabricación constituirá la etapa final del desarrollo de las soluciones técnicas expuestas en el presente trabajo, previa al ensamblaje de todos los componentes que integran la motocicleta que participará en la edición VIII de la competición MotoStudent. En base a la apuesta por la innovación tecnológica que esta competición representa, se optará por sistemas de fabricación vanguardistas, sin comprometer los principios establecidos por el equipo UMH RT, según los cuales, no se comprometerá la viabilidad del proyecto y las soluciones implícitas en éste.

6.2 Criterios de fabricación

De forma equivalente a lo presentado en el punto 4.1.4 dentro del capítulo de diseño, los métodos de producción a aplicar deben seguir una serie de criterios de fabricación para asegurar la calidad, eficacia y fiabilidad del componente final:

- Priorizar un buen **acabado superficial interior**, reduciendo la rugosidad, de modo que se reduzcan las fricciones entre el aire y las paredes de los conductos que constituyen dicho sistema.
- Garantizar cierto **aislamiento térmico** de forma que las fuentes de calor, como el propio motor, no aumenten excesivamente la temperatura del aire de admisión, reduciendo la densidad de este y por tanto la entrega del motor.
- **Reducir la masa** del conjunto de admisión, evitando añadir peso innecesario en la región superior del chasis, de forma que no se eleve el centro de gravedad de la motocicleta.
- Conseguir un **correcto ajuste** entre las diferentes piezas que conforman el sistema, de manera que se garantice la ausencia de fugas que reduzcan las ganancias de implementar el sistema de admisión diseñado.
- Asegurar la **estabilidad térmica** de las piezas, conservando su forma y función a pesar de estar expuestas a temperaturas relativamente elevadas.
- Avalar la **integridad estructural** de los componentes, evitando daños o roturas durante el ensamblaje o mantenimiento del sistema. No obstante, las piezas no serán empleadas como elemento estructural, por lo que no serán sometidas a esfuerzos significativos.
- Permitir la **autonomía** del equipo para la fabricación de los componentes de la admisión, implementando métodos accesibles que no requieran la intervención de profesionales o proveedores externos ni el uso de utillajes altamente especializados o costosos.

6.3 Fabricación de la toma de aire forzado

La geometría de la toma de aire es la más compleja de las diseñadas, puesto que contará en su parte frontal con un *spliter* que bifurcará la corriente en el intento de eludir la pipa de dirección. Aun no siendo la única alternativa, este componente se fabricará mediante **deposición de filamento fundido** en base a las siguientes justificaciones:

- La alta complejidad geométrica.
- La presencia de la corriente de aire fresco que la atraviesa, garantizando la estabilidad térmica del filamento termoplástico empleado.
- La ausencia de esfuerzos mecánicos que comprometan la integridad de la estructura.
- La posibilidad de fabricar varias piezas como repuesto ante daños o roturas, siendo el componente más expuesto del sistema de admisión.

Al igual que en el proceso de prototipado, se empleará filamento ABS, por las mismas razones, recayendo especial peso en el grado de ductilidad con el que contará la pieza final, algo que será esencial para el correcto encaje de esta toma con las conducciones, sin que ello suponga riesgo de quebrado o rotura.

Se ha de destacar la importancia que tendrán las labores de **post-procesado**, pues el acabado superficial obtenido tras la impresión 3D no cumple con el criterio de diseño según el cual se debe reducir la rugosidad de las paredes internas de las conducciones. En consecuencia, se lijaron las paredes interiores empleando en primer lugar papel 240 grit. Los residuos de lijado se retiraron empleando papel sin pelusa empapado en alcohol isopropílico.

Tras esta primera fase de lijado, el interior de la toma de aire está listo para recibir 2 capas de resina de epoxi para recubrimientos, mezclada con generador de película que rellene las irregularidades propias de la impresión 3D remanentes tras el primer lijado.

Una vez la resina haya curado, se procederá a refinar la superficie para conseguir una rugosidad ínfima, para lo que se lijó en húmedo con papel progresivamente más fino, desde 800 grit hasta 1200 grit. Habiendo retirado los restos del lijado de nuevo con alcohol isopropílico, la superficie se pulió empleando un compuesto de corte compatible con resinas compuestas, aplicándolo mediante una toalla de microfibra para pulimentos.

Anotar que, dada la complejidad geométrica de la pieza, el empleo de pulidoras mecánicas queda descartado, pues, aun existiendo modelos de tamaño suficientemente reducido como para acceder a los canales internos de la toma de aire, el equipo no tendrá acceso a tal equipo ni contemplará adquirirlo, pues el pulido manual producirá un acabado aceptable a expensas de implicar una mayor inversión de tiempo.

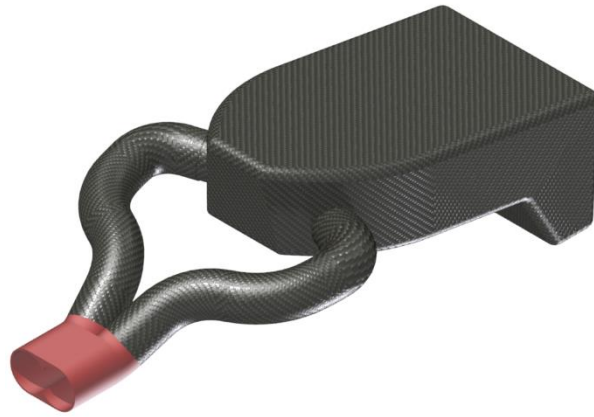


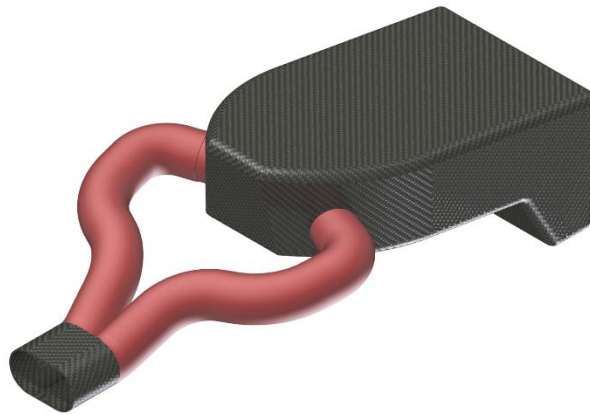
Ilustración 73 - Toma de aire forzado

6.4 Fabricación de las conducciones

En el caso de la geometría de las conducciones, éstas serán mucho más sencillas, sin embargo, obtener un buen acabado superficial debe ser imperativo. Para la fabricación de esta pieza se empleará un método poco convencional, el empleo de fibra de carbono preimpregnada sobre un patrón metálico elaborado en aleación con baja temperatura de fusión y conformado mediante moldes de silicona, constituyendo un proceso de núcleo perdido. La justificación de este método quedará fundada en las siguientes razones:

- Excelente acabado superficial, reduciendo la fricción entre aire y las paredes mientras atraviesa las canalizaciones en dirección a la caja de remanso.
- Alto aislamiento térmico de la fibra de carbono, encontrándose las conducciones próximas a la culata y escape del motor, la zona más caliente de la moto.
- Presencia de curvas en las canalizaciones, dificultando la extracción de mandriles y forzando a la segmentación del tubo.
- Capacidad de producir un radio suave en la sección de entrada a la *airbox*, reduciendo pérdidas fluidodinámicas.

En el caso de emplear fibra de carbono siguiendo un proceso más convencional, habría supuesto el diseño de un molde partido en el que se emplearía una bolsa de vacío interior. Aunque un método muy eficaz para la fabricación de piezas huecas, el mejor acabado superficial se tendría en el exterior, en las regiones en contacto con el molde, mientras que la bolsa interior provocaría irregularidades en las áreas donde la rugosidad deberá ser mínima.

*Ilustración 74 - Conducciones*

6.4.1 Fabricación de patrones

En primer lugar, se imprimirán en 3D los patrones que constituyen el interior de las conducciones, teniendo en cuenta la reducción de volumen correspondiente al espesor de las fibras. Puesto que se emplearán 2 capas de fibra de carbono X-Preg XC130, una base de 450 g/m^2 y otra superficial de 210 g/m^2 , se calcula un grosor de 0.7 mm , aproximándose a 1 mm para compensar posibles defectos en el proceso de compactación. Las características de este tipo de refuerzos se detallarán más adelante.

Una vez impresos los modelos, serán tratadas para aportarles un acabado superficial de baja rugosidad, mediante el lijado con papel 240 grit, seguido de 400 grit y finalizando con papel 800. Cabe destacar que las imperfecciones presentes en el exterior de los modelos serán transmitidas al molde. La construcción del molde se realizará en silicona, utilizando barreras que se imprimirán igualmente en 3D. Una de las principales ventajas de emplear FFF es permitir que el modelo y el molde encajen y no existan movimientos relativos entre ambos. Las barreras se diseñarán de forma que las paredes de silicona tengan un grosor de aproximadamente 20 mm para dotarle de la rigidez suficiente para soportar el peso del mandril metálico. Para garantizar la estanqueidad de los moldes se empleará cera de fileteado en los bordes de las barreras impresas.

*Ilustración 75 - Patrón interior de las conducciones*

6.4.2 Fabricación de moldes de silicona

Para este proceso, se empleará silicona RTV (*Room Temperature Vulcanization*) de curado por adición, reproducción dimensional y baja contracción, que sea capaz de soportar temperaturas superiores a 250°C, muy por encima del punto de fusión de la aleación del mandril. La silicona será mezclada con su catalizador y, se desgasificará removiendo a conciencia antes de verterla en el molde lo que garantizará una mezcla homogénea, minimizando la presencia de aire atrapado. Una vez vertida, se dejará curar durante 24 horas antes de dividir el molde y extraer el patrón. Los cortes con los que se segmentará el molde serán irregulares, facilitando su realineación posterior, y podrán realizarse fácilmente con cúter.



Ilustración 76 - Fabricación del molde de silicona de las conducciones

6.4.3 Fabricación de mandriles metálicos

El mandril metálico se realizará mediante fundición LM95, aleación de alta pureza de bismuto, estaño y plomo. Este material se caracteriza por tener un punto de fusión y solidificación extremadamente preciso de 95°C al que debe su nombre. Además, durante su cambio de estado, muestra una baja contracción, de aproximadamente -1.5%, manteniéndose fiel a las dimensiones del modelo. Aunque libre de cadmio, al contener plomo, elemento altamente tóxico, se emplearán guantes siempre que se entre en contacto con este compuesto y las herramientas y utillajes que intervendrán en el proceso. A pesar de tener un precio relativamente alto, (comercializado aproximadamente a 30€/kg), pueden reutilizarse indefinidamente en procesos de núcleo perdido, permitiendo al equipo amortizar la inversión al poder implementar este método para la fabricación de otros componentes en futuras ediciones de MotoStudent. El volumen de metal que se necesitará se calcula fácilmente gracias al haber partido de un modelo CAD, mientras que su masa se determinará multiplicando dicho volumen por la densidad del metal, aunque, para garantizar la correcta fundición, se empleará un como mínimo 5% más de material.

Debido al peso del metal, se generará una presión significativa sobre los moldes durante el proceso de fundición, lo que puede provocar la separación de las juntas y causar fugas. Para evitarlo, es necesario mantener los moldes firmemente sujetos, por lo que se emplean bridas de plástico distribuidas a intervalos regulares a lo largo de éstos para evitar que se deformen mientras se llenan. Aunque la aleación LM95 tiene un punto de fusión de 95 °C, la fundición se realiza a 130 °C para asegurar que el metal fluya correctamente y rellene todos los detalles del molde. Aunque la aleación contiene plomo, las temperaturas no serán lo suficientemente altas como para generar vapores peligrosos, por lo que su manejo será seguro con las precauciones adecuadas, sin necesitar sistemas de extracción de gases.



Ilustración 77 - Colada de la aleación LM95 para obtener mandril metálico

6.4.4 Laminado de fibra de carbono sobre mandriles

Después de la colada, los mandriles metálicos enfriados serán extraídos de los moldes de silicona, no requiriendo agente desmoldante previo debido a sus propiedades inherentemente antiadherentes. Se eliminan los residuos de fundición de los mandriles antes de proceder con el laminado de la fibra de carbono. Para obtener un acabado interior óptimo, se empleará un agente desmoldante de alcohol polivinílico o PVA, aplicando una capa uniforme y espesa de este compuesto con brocha, y dejándose secar aproximadamente 30 minutos.

Para el laminado, se utiliza fibra de carbono preimpregnada. Este tipo de material consiste en refuerzos de fibra de carbono con preimpregnados en resina sin curar, que permanece adhesiva a temperatura ambiente lo que facilitará la aplicación y eliminará los problemas de infiltración de resina propios del método conocido como aplicación húmeda, en el que las fibras y la resina se aplican por separado. No obstante, el uso de fibra preimpregnada obliga al uso de horno, puesto que la resina tiene una temperatura de activación mayor para poder mantenerse adhesiva en condiciones ambiente. Afortunadamente, los compañeros del Dátil UMH Team, proyecto por el que la universidad participa en el *Shell ECO Marathon*, fabricaron en su momento un horno específicamente para estos menesteres. Conviene señalar la importancia de conservar las fibras preimpregnadas siguiendo las especificaciones del fabricante, lo que suele traducirse en preservarlas en cámaras frigoríficas, congelándolas hasta -18°C , evitando la activación involuntaria de la resina.

En particular, para la fabricación de las canalizaciones se emplearán refuerzos X-Preg XC130, con base de epoxi y capaz de soportar temperaturas de trabajo de 130°C como su nombre indica. De acuerdo con lo mencionado previamente, se emplearán 2 capas de fibra, una base de 450 g/m^2 y otra superficial de 210 g/m^2 . Las fibras de estos refuerzos tendrán formato de tejido en Sarga, un patrón diagonal que asemeja el comportamiento del material a uno isotrópico, siendo éste aquel en el que las propiedades mecánicas son uniformes en todas las direcciones. Si los componentes fueran estructurales, se emplearían capas unidireccionales, en la dirección del esfuerzo mecánico o intercalando sus direcciones (0° , 45° y 90°) si se quisiera aproximar comportamiento isotrópico. No obstante, el sistema de admisión no se considerará un elemento estructural, justificando el empleo de 2 capas en la necesidad de mitigar posibles imperfecciones o deficiencias durante el proceso de fabricación, velando por la fiabilidad de los componentes finales.

Se obtendrán plantillas utilizando cinta de carroceros sobre el mandril metálico para así poder transferir su superficie a la lámina de fibra de carbono extendida y así ser recortada para crear los patrones superior e inferior. Será importante contar con un sobrante de fibra en los bordes de uno de los patrones para que exista un solape que cubrirá la unión entre los recortes. Previo horneado, se utilizará cinta retráctil para compactar la geometría, quedando asegurada con cinta adhesiva. El curado inicial se realizará a 80 °C durante 16 horas. Tras esta primera fase de curado, se retirará la cinta retráctil. Aunque la resina aún no habrá alcanzado su curado final, la estructura será estable.



Ilustración 78 - Laminado de la fibra de carbono sobre mandril metálico

6.4.5 Fusión de los mandriles metálicos

A continuación, se aumentará progresivamente la temperatura del horno hasta los 130 °C, para así derretir y extraer el núcleo metálico fundido, posicionando las piezas de manera que el metal pueda drenar en un recipiente y así reutilizarse. Será crucial incrementar la temperatura gradualmente para evitar el reblandecimiento excesivo de la resina.

Una vez derretido el núcleo, se obtendrán las piezas huecas extremadamente ligeras. Puesto que se le aplicará PVA como desmoldante, los residuos metálicos que pudieran quedar en el interior se eliminarán fácilmente con un baño en agua y un ligero cepillado.

Siguiendo el proceso de fabricación descrito, cada una de las conducciones de admisión tendrá una masa de tan solo unos pocos gramos y una superficie interna lisa, ideal para garantizar un flujo de aire óptimo.



Ilustración 79 - Fusión del mandril para obtener conducción final

6.5 Fabricación de la caja de remanso (pasar a futuro)

6.5.1 Preámbulo fabricación de la caja de remanso

De acuerdo con el diseño de la caja de remanso presentado en el punto 4.4.3, el componente en cuestión consistirá en un recinto que incluye secciones de entrada conectadas a las conducciones procedentes de la toma de aire forzado, una sección de salida que lo conecta con la trompeta de admisión y una tapa superior que permite acceder al interior de la caja para efectuar labores de inspección y mantenimiento. En consecuencia, el proceso de fabricación consistirá en la elaboración del cuerpo de la airbox, post-procesado del mismo, y fabricación de la tapa, para finalizar con una serie de modificaciones y creación de accesorios.

Nuevamente, se caja de remanso será fabricada empleando laminación de fibra de carbono preimpregnada, confiriendo a este componente una masa reducida de forma que el centro de gravedad no se vea elevado, al mismo tiempo que garantizará cierto grado de aislamiento térmico, previniendo el aumento de temperatura del aire de admisión, evitando que se reduzca la densidad de éste. Dadas las ventajas de los componentes, este método podrá ser considerado como relativamente rentable, pues, si se lleva a la práctica adecuadamente, el coste de materias primas y herramientas será comedido.

Sin embargo, el proceso de fabricación que se describirá a continuación tendrá un enfoque más convencional, siendo viable su ejecución en base a la dificultad moderada del proceso. La naturaleza artesanal de este tipo de manufactura la hará ideal para proyectos como el expuesto en el presente trabajo de fin de grado, simultáneamente, la implementación de dichos procesos es inviable a grandes escalas por las mismas razones.

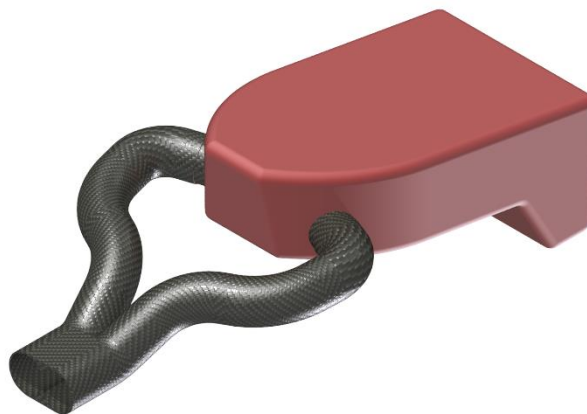


Ilustración 80 - Caja de remanso

6.5.2 Fabricación del cuerpo de la caja de remanso

La fabricación del cuerpo de la *airbox* se realizará a través del laminado de fibra de carbono sobre un patrón construido exprofeso que representará el volumen del interior de la caja de remanso. El cuerpo será modificado para contar con las secciones de entrada de las conducciones y la sección de salida a la tobera de admisión. Asimismo, se adherirá el labio sobre el que colocar el filtro de aire. Finalmente se fabricará la tapa de la *airbox* de nuevo mediante el laminado de fibra de carbono sobre un patrón, en esta ocasión, obtenido por impresión 3D.

6.5.2.1 Fabricación del patrón del cuerpo

El proceso comenzará con la creación de un patrón, que contará con la forma exacta del interior de la caja de remanso final. Existen alternativas a la hora de elaborar un patrón, desde el tallado manualmente hasta el mecanizado CNC con fresadoras de cinco o seis ejes. Partiendo de un proceso de esculpido sobre espuma, la fabricación de la *airbox* se empleará un enfoque híbrido basado en la creación de perfiles de sección por impresión 3D a partir de su modelo CAD, de forma que trabajar manualmente sobre la espuma sólo requiera especial atención en aquellas regiones que presenten radios, mientras que las secciones servirán como guía además de conformar un armazón interno y hueco.

En el caso de patrones relativamente grandes, mecanizar desde un bloque sólido de espuma podrá ser costoso y requerir de especial destreza, por lo que este enfoque de perfiles y relleno de espuma resultará más eficiente y efectivo. El modelo CAD será dividido en secciones que se imprimirán en 3D. Puesto que estas secciones serán pegadas mediante adhesivo para conformar un armazón hueco.

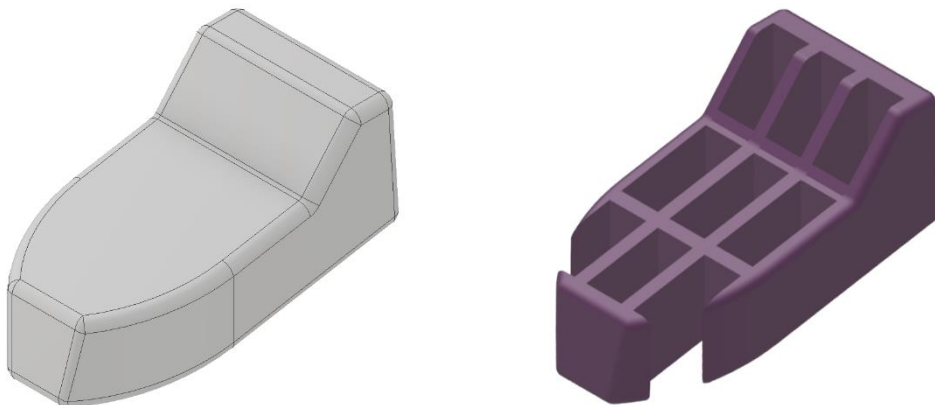


Ilustración 81 - Impresión 3D de armazón a partir de modelo CAD

Los espacios presentes en el armazón serán rellenados con espuma de poliuretano de alta densidad, adherida con pegamento de poliuretano expandible. Dicha espuma será más resistente y permitirá un labrado más preciso que las de menor densidad, aunque requerirá una mayor inversión de tiempo en los procesos de corte y lijado. Tras el curado del pegamento, la espuma se recortará con una sierra manual a modo de desbastado, generando una primera aproximación a la geometría de la pieza, para ser posteriormente lijada a mano cuidadosamente y así aportarle la forma final. Para mantener la precisión en los radios largos, se usará un bloque de lijado alargado, lo que permitirá seguir las referencias de los perfiles y lograr curvas uniformes. Si en este punto, el patrón presentase huecos o grietas, éstos se rellenarán con masilla, como la empleada en la corrección de carrocerías, la cual se dejará secar para ser posteriormente nivelada mediante lijado.

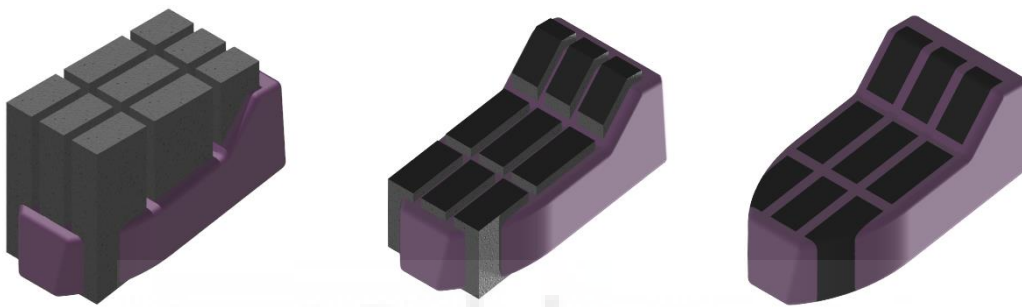


Ilustración 82 - Rellenado de espuma y posterior recorte y lijado del patrón de air-box

Se aplicará una imprimación de poliéster de alto espesor, mezclada con catalizador y se aplicará con brocha procurando obtener una cobertura lisa y homogénea. Curará durante 6 horas, y tras esto, se lijará empleando una lijadora de doble acción con papel 240 grit para eliminar imperfecciones. Se identificarán y corregirán defectos con masilla antes de aplicar una segunda capa de imprimación. Una vez aplicada y curada esta segunda capa, se empleará nuevamente la lijadora, con papel progresivamente más fino, desde 240 hasta 1200 grit, consiguiendo una superficie completamente lisa y uniforme.

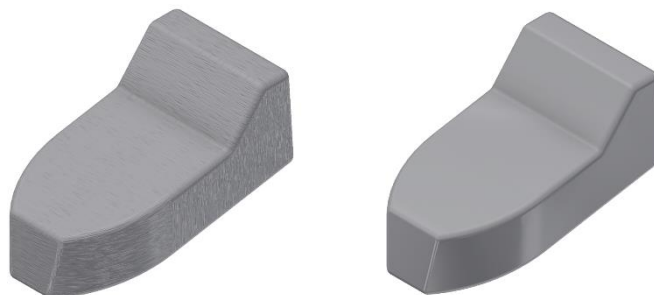


Ilustración 83 - Aplicación de imprimación sobre patrón de air-box

Puesto que el patrón deberá tener un acabado lo más liso posible, pues éste se transferirá a la fibra laminada, se aplicará una capa de barniz con base de poliéster catalizado, que se podrá aplicar mediante brocha, dado que este barniz autonivela correctamente. Después de 12 horas de curado, la capa de brillo estará lista para ser acabada mediante su lijado y pulido.

El acabado final se comenzará con una lijadora y papel de lija de 400 grit para eliminar imperfecciones y rugosidades de la superficie. A continuación, se empleará 800 grit y posteriormente a lijado manual en húmedo con 1200 y 1500 grit, asegurándose de limpiar bien entre cada cambio de grano con alcohol isopropílico para evitar arañazos profundos que dañasen el acabado.

El pulido se realizará con el compuesto de corte diseñado para resinas compuestas. En el intento de no adquirir herramientas prescindibles, se empleará la lijadora a modo de pulidora, acoplado a ésta una almohadilla de espuma específica para tal fin. Finalmente, la superficie pulida quedará lista para el laminado de la fibra.



Ilustración 84 - Barnizado y pulido final del patrón de air-box

6.5.2.2 Laminado de fibra de carbono sobre el patrón

De forma similar al proceso de fabricación de las conducciones, se tendrá un patrón sobre el cual se laminará fibra de carbono *prepreg* X-Preg XC130, con base de epoxi y capaz de soportar temperaturas de trabajo de 130°C. Se extraerán un total de 2 plantillas, una tomada de las caras longitudinales y otra de las caras laterales de los laterales, para en base a éstas recortar las láminas, de forma que las capas se superpondrán en la parte de inferior de la caja de remanso, aquella más próxima al motor y en la que se acoplará la trompeta de admisión.

El patrón recibirá la aplicación de desmoldante PVA que facilitará el proceso de desmoldado, tras lo cual se laminarán 2 capas de fibra, una base de 450 g/m² y otra superficial de 210 g/m², recordando la usencia de transmisión de esfuerzos mecánicos al sistema de admisión. Será importante asegurarse de consolidar bien en las esquinas, lo cual se podrá lograr con pequeñas herramientas específicas para la manipulación de fibras preimpregnadas. Las geometrías más complejas se podrán acomodar mediante cortes y secciones superpuestas.

Para la compactación, se empleará embolsado al vacío, proceso que consiste en envolver el material con una bolsa y extraer el aire para crear una presión negativa gracias a una bomba de vacío, equipo que estará a disposición del equipo, heredado de ediciones anteriores. Esto ayudará a consolidar las capas de fibra, eliminando burbujas de aire y asegurando un laminado uniforme y de alta calidad.

En primer lugar, se aplicará una película desmoldante FEP (*Fluorinated Ethylene Propylene*) no perforada, que se despegará fácilmente del componente curado y minimizando las marcas que pudiera dejar. A continuación, se formará una bolsa con la película de embolsado de nylon, colocando una capa de material de drenaje bajo la boquilla conectora de la bolsa. Para este caso, se decide no extender el *breather* sobre el componente para obtener un acabado más liso en el laminado. La bolsa se cerrará y sellará para permitir la extracción del aire hasta el vacío.

El proceso de curación ya ha sido descrito en el punto 6.4, y consistirá en una fase inicial a 80 grados durante 16 horas. Tras la curación inicial, la caja de remanso se retirará del horno y retirará la bolsa de vacío. Se continuará con el ciclo de post-curado X-Preg, que terminará a 130 °C.

Las acciones del desmoldeante PVA y la película FEP, junto con la geometría de la caja de remanso, garantizarán una extracción del patrón sencilla, recurriendo al uso delicado de cuñas a lo largo del perímetro para una separación inicial de las paredes. El patrón podrá terminar de extraerse por gravedad o tirando de éste mientras se sujeta la caja de remanso. El acabado resultante podrá tener un cierto velo propio del remanente de desmoldeante, que será eliminado fácilmente mediante un pulido con compuesto de corte compatible con resinas compuestas.

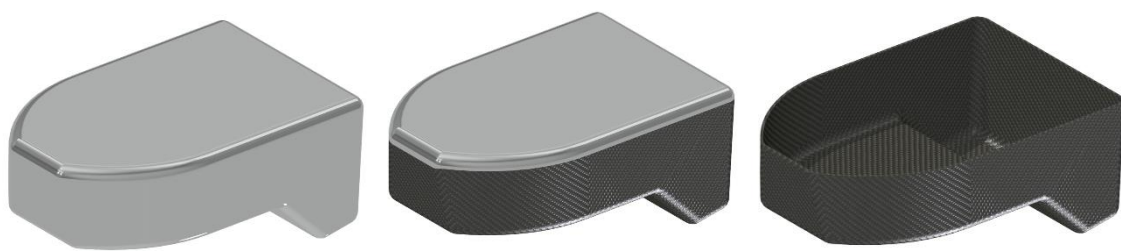


Ilustración 85 - Laminado de fibra de carbono sobre patrón air-box

6.5.3 Fabricación de la tapa de la caja de remanso

El proceso según el cual se fabricará la tapa de remanso será nuevamente similar a los descritos anteriormente. Partiendo del modelo CAD original, se realizarán modificaciones para extender los bordes inferiores 10mm y darles un ángulo de desmolde de 5°. Posteriormente, se combinará el modelo sobre una superficie horizontal, dejando sobrante de 150 mm alrededor del perímetro de la pieza, generando así un nuevo volumen sólido que constituirá el patrón que se imprimirá en 3D y sobre el que se realizará el laminado. El uso de la tecnología FFF será ideal para esta aplicación. Debido a la necesidad de asegurar la estanqueidad entre el cuerpo de la caja de remanso y su tapa, podrá ser necesario realizar ajustes en el modelo CAD y la configuración de la impresión. Este proceso iterativo de ajustes solo será viable mediante el uso de la impresión 3D.

El patrón deberá ser lijado a mano con papel de 240 y 400 grit. Finalmente, se aplicarán 4 capas iniciales de sellante en spray para patrones, para, una vez curadas durante 2 horas, nivelar la superficie con papel de lija de 1200 grit. Una vez se tenga una superficie lisa, se aplicarán otras 4 capas usando un paño sin pelusa, dejando 20 minutos entre aplicaciones. El curado final será de 8 horas a temperatura ambiente. Tras esto, el patrón será pulido con compuesto para resinas compuestas y estará listo para recibir la aplicación de desmoldeante.

Una vez más, para el laminado se empleará 2 capas de fibra de carbono *prepreg* X-Preg XC130, de 450 y 210 g/m², previa aplicación del desmoldante, siendo estas capas recortadas gracias a la extracción de plantillas sobre el patrón, y su aplicación se hará asegurándose de consolidar bien en las esquinas, lo cual se puede lograr con herramientas habituales en el empleo de este tipo de refuerzos. Las geometrías más complejas se podrán acomodar mediante cortes y secciones superpuestas. Una vez laminada la fibra, ésta se compactará por embolsado al vacío, aplicando una película desmoldeante FEP no perforada, y creando una bolsa con la película de embolsado de nylon.



Ilustración 86 - Impresión 3D del patrón, postprocesado de éste y laminación de fibra de carbono

De igual modo, el curado inicial se hará a 80°C durante 16 horas, tras el cual se extraerá la tapa gracias a la acción del desmoldeante y con la ayuda de cuñas. Transcurrido lo anterior, se extraerá la pieza y procederá con el post-curado se realizará aumentando paulatinamente la temperatura hasta 130°C.



Ilustración 87 - Tapa de la air-box

6.5.4 Modificaciones sobre la caja de remanso y fabricación de accesorios

Para poder realizar el ensamblaje del conjunto de admisión se **practicarán aperturas** correspondientes a las secciones de entrada de las conducciones a la caja de remanso, así como la sección de salida de la misma para conectar con el cuerpo del acelerador. Estos recortes se realizarán mediante mini amoladora o *dremel*, permitiendo realizar cortes limpios y precisos sobre materiales resistentes como la fibra de carbono.

Se diseñarán y fabricarán acoples o juntas específicamente para sellar herméticamente las secciones labradas, evitando cualquier fuga de aire y asegurando un rendimiento óptimo del sistema. El diseño se condicionará a las piezas fabricadas finales, de modo que se tengan en cuenta las variaciones dimensionales resultantes respecto a los modelos CAD originales. Estas piezas se elaborarán mediante FFF empleando filamento ABS, que, dada su naturaleza flexible, lo convierte en ideal para esta aplicación.

Con el fin de alojar el filtro de aire en el interior de la caja de remanso, se fabricará un labio o borde adaptado a dicho filtro, el cual será posteriormente pegado de manera segura a las paredes interiores. Esta adición garantizará que el filtro esté bien asentado y funcione eficientemente, proporcionando una barrera efectiva contra partículas y cumpliendo así los requisitos fijados por la normativa. El labio se obtendrá mediante el recorte de dos planchas de fibra de carbono prefabricada de 1mm de espesor, de forma que el filtro quede encajado entre estas dos planchas. Una vez más, el corte se realizará empleando *dremel*.

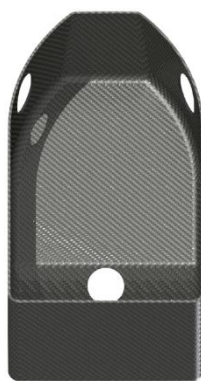


Ilustración 88- Post-procesado del cuerpo de air-box

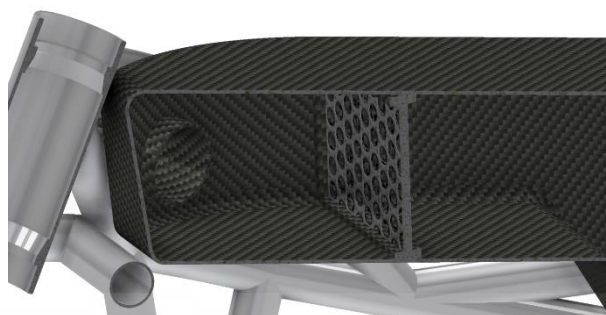


Ilustración 89 - Detalle del filtro en interior de caja de remanso

6.6. Fabricación de la trompeta de admisión

Para la fabricación de la trompeta de admisión, se recurrirá nuevamente a la impresión 3D debido a la necesidad de obtener una geometría compleja difícil de conseguir por otros medios. Aunque esta pieza impresa en 3D podrán ser susceptibles a daños por calor dada la proximidad a la culata del motor, esta tecnología permitirá fabricar recambios de forma económica y eficiente. Además, este método facilitará la creación de trompetas de diferentes longitudes, lo cual será crucial para validar los cálculos y ajustes necesarios según propuesto en los próximos puntos 7.3 y 7.4.

El filamento que se empleará será nuevamente ABS. Sin embargo, en esta ocasión, el uso de este planteará un desafío térmico, mientras que en la fabricación de la toma de aire no supondrá ningún compromiso. Esto se basa en el emplazamiento de la trompeta, acoplada por apriete al cuerpo de inyección, y éste al puerto de admisión del motor, lo que favorecerá la transmisión de calor por conducción entre estos componentes. Igualmente, el carenado restringirá, con fines aerodinámicos, la presencia de corrientes de convección en la zona donde se ubicará el motor, por lo que las temperaturas en dicha área podrán ser elevadas.

No obstante, el filamento ABS será capaz de soportar temperaturas de hasta 60°C una vez impresa la pieza. En el caso de verse superadas esas cifras, no sólo podría comprometerse la robustez de este componente, sino que también lo estaría el funcionamiento del motor, pues tales temperaturas de admisión pueden limitar en gran medida el rendimiento del mismo. En consecuencia, no se esperará que la trompeta sea expuesta a temperaturas que pudiesen dañarla. Asimismo, dada la naturaleza del proceso de fabricación propuesto, quedará la posibilidad de fabricar una nueva trompeta o contar con recambios sin suponer esto una gran demora o inversión.

Puesto que esta pieza se empleará en la moto ensamblada se seleccionará una configuración de la impresora que priorizará la calidad del acabado frente al tiempo de impresión. Para ello se fijará un espesor de capa de tan sólo 0.2 mm y una velocidad de impresión de 20 mm/s. Del mismo modo, se seleccionará una densidad de relleno del 100%, para dotar de cierta rigidez a la pieza y evitar deformaciones y/o grietas. Adicionalmente, cabe reseñar que se emplearán las temperaturas de impresión que especifique el fabricante del filamento concreto que se adquiera, pudiendo estar en el orden de los 230 °C.

En el empleo de FFF se suele anteponer el acabado superficial exterior pues es el que quedará visible a simple vista. En base a esto, en el caso de querer imprimir una pieza como la trompeta, se orientaría ésta de forma que su sección de entrada, la de mayor diámetro, quedase apoyada en cama de impresión, de forma que se redujese la necesidad de soportes verticales. Sin embargo, estos soportes seguirían siendo necesarios para sostener las capas interiores que quedasen en voladizo. Eliminar esos soportes interiores no sólo supondrían una inversión de tiempo y destreza, sino que comprometerían el acabado final de la superficie interior siendo ésta la más relevante de cara al correcto funcionamiento de la pieza.

Por tanto, se recurrirá a una orientación invertida respecto a la convencional, de modo que será la sección de menor radio, la correspondiente a la salida de la trompeta y entrada al puerto de admisión, la que se apoyará a la cama de impresión, en aras de conseguir un mejor acabado superficial interior inicial aun suponiendo esto la eliminación de un mayor número de soportes exteriores, pues el acabado de la superficie exterior no será igual de relevante.

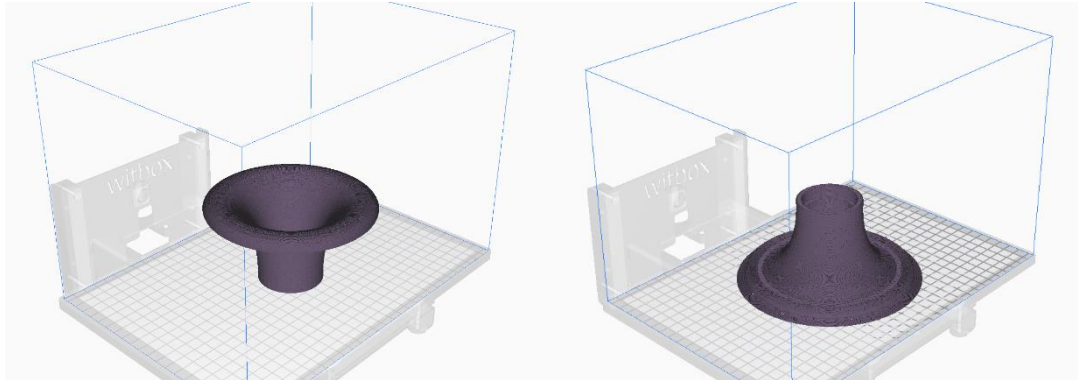


Ilustración 90 - Disposición impresión de trompeta elegida (izq.) frente a convencional (dcha.)

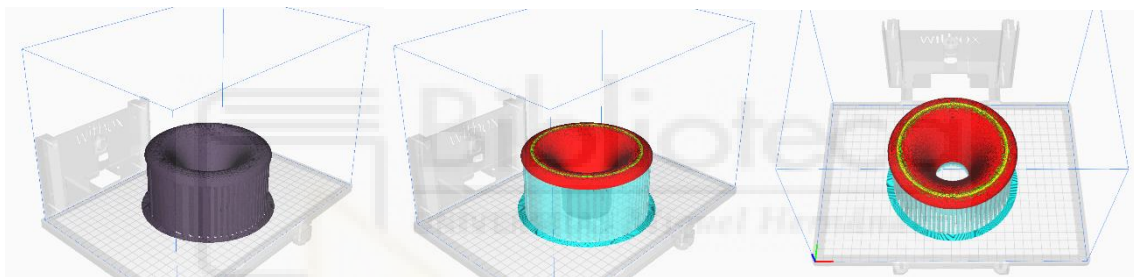


Ilustración 91 - Soportes necesarios sólo para superficie exterior trompeta

De forma equivalente a la fabricación de la toma de aire forzado, el post-procesado será ineludible ya que el acabado superficial propio de la impresión 3D no cumple con el criterio de diseño de reducción de rugosidad. Por lo tanto, se lijarán todas las superficies con papel de lija de 240 grit, para, posteriormente, recibir dos capas de resina epoxi para recubrimientos, creando una película que rellenará las irregularidades remanentes de la impresión 3D. Una vez curada la resina, se refinará la superficie para lograr una rugosidad mínima, lijándola en húmedo con papel de lija de grano progresivamente más fino, desde 800 hasta 1200. Los restos del lijado se eliminarán nuevamente con alcohol isopropílico, y la superficie se pulirá con un compuesto de corte compatible con resinas compuestas, aplicándolo con una toalla de microfibra.



Ilustración 92 - Trompeta final tras post-procesado

6.7. Ensamblaje del sistema de admisión.

La secuencia de ensamblaje de los diferentes componentes que constituirán el sistema de admisión presentado en este trabajo de fin de grado seguirá el siguiente orden:

1. Encajar y pegar toma de aire de aire forzado en el chasis, concretamente en sección en que ésta lo atraviesa, siendo la correspondiente a la región de la pipa de dirección y tubos de refuerzo de los chasis adyacentes.
2. Acopar la trompeta de admisión al cuerpo de la caja de remanso.
3. Ajustar por apriete la trompeta de admisión al cuerpo de acelerador, teniendo la precaución de dar soporte al cuerpo de acelerador ya montado en el motor.
4. Introducir conducciones de aire a través de sus correspondientes secciones perforadas en la caja de remanso.
5. Colocar juntas en las secciones de salida de las conducciones.
6. Ajustar por apriete las secciones de entrada de las conducciones a las secciones de salida de la toma de aire forzado.
7. Pegar las juntas de las secciones de salida de las conducciones al cuerpo de la caja de remanso.
8. Instalar el filtro de aire en el interior del cuerpo de la airbox.
9. Colocar y fijar la tapa superior de la caja de remanso.
10. Sellar todas las juntas con silicona resistente a altas temperaturas y vibraciones, previniendo fugas provocadas por la diferencia de presiones estáticas entre el interior y el exterior del sistema de admisión. En caso de ser necesario, estas juntas podrán ser seccionadas posteriormente con ayuda de cúter sin suponer mayor complicación.



7. Plan de implementación futura

7.1 Preámbulo respecto al plan de implementación futura

A lo largo del presente trabajo de fin de grado se ha hecho mención a este último apartado en el que se expondrán una serie de medidas y/o conclusiones a aplicar sobre el diseño, simulación, fabricación o implementación de los componentes que integrarán el sistema de admisión definido en este documento.

7.2 Prueba de resistencia térmica de la trompeta de admisión

En base al método empleado para la fabricación de este componente, la impresión 3D, se comprobará si la integridad de éste no se ve afectada al exponerse a altas temperaturas. Para ello se empleará la trompeta prototipada, elaborada con el fin de validar las dimensiones de acuerdo con lo reflejado en el apartado 6 del presente documento. Esta pieza será introducida en un horno, mientras la temperatura de su interior aumenta lentamente hasta los 60 °C, de forma que, en el caso de reblandecerse el material, tenga el tiempo suficiente como hacerlo. Si el resultado fuera satisfactorio, y a la rigidez de la pieza no se viese alterada significativamente, se volverá a colocar en el horno y se aumentará la temperatura en incrementos de 5 °C, extrayendo y evaluando nuevamente la pieza tras permanecer 15 minutos en el interior del éste, hasta dar con la temperatura a la cual el componente pudiera verse comprometido. Cabe recordar que, nunca se pretenderá someter a ningún componente del sistema de admisión a tales temperaturas, ya que temperaturas de admisión tan elevadas podrían comprometer el correcto rendimiento del motor y su fiabilidad.

7.3 Calibración de la centralita en banco de potencia

Tal y como se ha comentado anteriormente, la centralita queda restringida a la oficial, provista junto con el motor. Del mismo modo, sólo se permite el uso de los mapas preestablecidos, pudiendo ser modificados en la medida en la que el software oficial con licencia de usuario lo permita. De ninguna manera se podrá superar el régimen de giro fijado (14000 rpm). No obstante, cabe esperar que los propios mapas preestablecidos ajustará sus valores para acoger las ganancias derivadas de implementar el sistema de admisión. Esto podrá ser evaluado cuando, una vez ensamblado el prototipo de competición final, sea sometido a una prueba en banco de potencia. En el caso de obtener resultados que no satisfagan las expectativas y hagan sospechar las mejoras implementadas no están siendo completamente explotadas, se modificarán los mapas empleando el software y licencia proporcionadas por la organización, siguiendo lo establecido en el reglamento.

7.4 Prueba dinámica para la validación del sistema

Dada la naturaleza del sistema propuesto en presente documento, no se podrán juzgar los beneficios asociados al mismo hasta que el prototipo no pueda circular a velocidades elevadas, del orden de la aquella fijada como velocidad de referencia. Puesto que los bancos de potencia miden la entrega del motor mientras la moto se encuentra parada, pues sólo las ruedas girarán sobre los rodillos del banco, no se podrán ver reflejadas completamente las ganancias buscadas. Dependiendo de las instalaciones, se podrá contar con ventiladores que simulen una corriente de aire, sin embargo, el uso de éstos suele limitarse a garantizar el abastecimiento de aire de admisión fresco y proveer de corrientes para el enfriamiento por convección a través del radiador de la moto. En consecuencia, habrá que esperar hasta poder emplear *data loggers* en pista que registren la presión estática en el interior de la caja de remanso gracias a la instalación de un sensor para tal menester.

7.2 Diseño y fabricación del sistema de escape

De forma equivalente al sintonizado de admisión, se diseñará un sistema de escape de sección y longitud tal que se optimice la evacuación de gases de escape. Un enfoque de diseño muy popular es el de emplear un tubo de sección creciente, de forma que en cada sección sea más ancha que la anterior, conformándole una geometría troncocónica, y con una longitud que, al igual que se comentó respecto a la trompeta para la fase de admisión, se produzca el sintonizado de escape. Como ya se ha comentado en el punto 2.4, tanto el diseño como la fabricación se condicionarán al montaje final de la moto. De esta forma, se evitará interferencias y roces con otros componentes, al igual que se procurará alejar el tubo de aquellas zonas vulnerables y componentes cuyo desempeño pudiera verse comprometido por la proximidad a las altas temperaturas. La implementación de un sistema de escape optimizado será el complemento idóneo para la admisión tipo *ram-air*, combinación que permitirá maximizar la potencia desarrollada por el motor.

8. Conclusiones

La elaboración del presente trabajo de fin de grado ha llevado consigo una labor de investigación significativa. En lugar de recurrir a conocimientos populares o intentar justificar empleando el sentido común, se ha buscado la raíz de las diferentes propuestas y magnitudes objetivo. En consecuencia, se ha establecido un orden de magnitud en lo referente al diseño de admisiones basandolo en estudio y ensayos técnicos.

Buscar el balance entre innovación y seguridad ha supuesto un desafío propio de aquellos que se presentarán en el desempeño de las labores de ingeniero mecánico.

Sin embargo, la naturaleza del proyecto ha marcada los diseños con un caracter preliminar, restándole importancia a la optimización por menorizada, pues podría resultar en una inversión de tiempo y energía totalmente infructuosa. No obstante, el aprendizaje queda latente, y ha supuesto una oportunidad de aplicar los conocimientos e inquietudes adquiridos a lo largo del grado cursado.





BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. I. Competition, MS2425 MotoStudent Regulations rev2.0, 2024.
- [2] «<https://press.ktm.com/>,» [En línea].
- [3] «[ktm.com](https://www.ktm.com/es-es/models/motocross/4-tiempos/2025-ktm-250-sx-f.html),» [En línea]. Available: <https://www.ktm.com/es-es/models/motocross/4-tiempos/2025-ktm-250-sx-f.html>.
- [4] «[dirtrider.com](https://www.dirtrider.com/story/tests/ktm-250-sx-f-dyno-test-2022/),» [En línea]. Available: <https://www.dirtrider.com/story/tests/ktm-250-sx-f-dyno-test-2022/>.
- [5] «[dirtbikes.com](https://www.dirtbikes.com/2017-ktm-250-sx-f-ride-review/),» [En línea]. Available: <https://www.dirtbikes.com/2017-ktm-250-sx-f-ride-review/>.
- [6] G. Piola, Formula 1 2010-2011. Technical analysis, GiorgioNADAEditore, 2011.
- [7] K. Cameron, «New For '93 / Ram-Air Induction,» *Cycle World*, pp. 36-37, Diciembre 1993.
- [8] D. Vizard, How to tune the A-series engine, Haynes Publishing UK, 1999.
- [9] K. Wiński y A. Piechna, «“Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle”,» *Energies*, nº 15.5920.10.3390, 2022.
- [10] V. Cossalter, Motorcycle Dynamics, Lulu.com, 2006.
- [11] J. Doran, «RAM AIR. What's it worth?». *Sport Rider*.
- [12] F. M. White, Fluid Mechanics, McGraw Hill Higher Education, 1998.
- [13] L. Hamilton, «Modeling the Effects of Intake Plenum Volume on the Performance of a Small Naturally Aspirated Restricted Engine,» nº 10.1115/ICEF2010-35023, 2010.
- [14] L. M. R. C. Honda R&D Co., «Honda NSF 250 R,» de *Dossier de prensa*, 2011.
- [15] K. Engelmann, «Design of a tuned intake manifold,» *ASME-Publication*, 1973.
- [16] C. & M. A. & S. O. & P. E. & B. A. & P. M. & R. L. & C. F. Argerich, «Empowering Design Based on Hybrid Twin™: Application to Acoustic Resonators,» *Designs*, vol. 4, nº 10.3390/designs4040044, 2020.

- [17] O. Kursten, «RIT FORMULA SAE RACING VARIABLE INTAKE,» *Multi-Disciplinary Senior Design Conference*.
- [18] A. S. K. D. M. V. Mariucci, «Effect of Primary Intake Runner Tapers and Bellmouths on the Performance of a Single Cylinder Engine,» *SAE TECHNICAL*, 2007.
- [19] W. M. G. P. B. Cahoon, «Design of an Intake Bellmouth.,» *Measurement*, 2012.
- [20] K. A. Hoffmann, *Computational Fluid Dynamics*, S.T.C, 2000.
- [21] D. O. Davis, «CFD Validation Experiment of a Mach 2.5 Axisymmetric Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction,» de *Joint Fluids Engineering Conference*, Seoul, Korea, 2015.

