PORTFOLIO TÉCNICO

TRACK RAY

Madrid - Final nacional 2026

BASE TÉCNICA DEL PROYECTO

Al tratarse de nuestro primer año en la competición, el principal reto al que nos enfrentamos es el desarrollo de un prototipo competitivo sin experiencia previa. Para ello, comenzamos por familiarizarnos con la normativa y con los conceptos aerodinámicos y físicos clave, necesarios para diseñar un vehículo acorde a nuestros objetivos: lograr el mayor impulso posible, con el menor rozamiento y resistencia aerodinámica.

Impulso y Dinámica de Lanzamiento

El rendimiento del vehículo en pista depende principalmente de la fase inicial de aceleración, gobernada por la **Segunda Ley de Newton** y **el principio de impulso y cantidad de movimiento:**

$$I = \Delta p = \int F dt = m\Delta v \rightarrow v_f = \frac{I}{m},$$

donde la fuerza de propulsión del cartucho de CO_2 debe vencer de forma inmediata la inercia del vehículo. Teniendo en cuenta estas premisas, los objetivos planteados han sido los siguientes:

- **Reducción de la Masa**: Conscientes de que el impulso proporcionado por el sistema de lanzamiento es una constante fija, la única vía para maximizar la aceleración es la reducción de la masa (a = F / m) al mínimo permitido por el reglamento (60g).
- **Inercia Rotacional**: Inicialmente se planteó también la reducción del momento de inercia (I) de los elementos móviles (ruedas y ejes). Sin embargo, siendo estos elementos estándar, no fue posible actuar en este punto.

Rozamiento

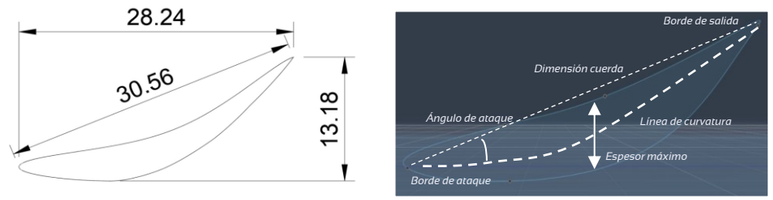
Uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos es la resistencia a la rodadura (F_r), es decir, la fuerza que se opone al movimiento debido al rozamiento en el sistema de ejes (ruedas, bujes y barras). Dicha fuerza se expresa como $F_r = \mu N$, donde μ es el coeficiente de rozamiento entre las superficies en contacto y N la fuerza normal que actúa sobre ellas. Para reducir F_r se han realizado las siguientes acciones:

- **Reducción de los puntos de contacto**, con un sistema de dos ejes que concentre el rozamiento en los bujes normativos.
- **Ajuste preciso del alojamiento de los bujes**, evitando contactos innecesarios entre la barra metálica y el chasis.
- **Decapado previo de las barras** mediante la aplicación de un compuesto antioxidante con el que eliminar irregularidades.
- **Minimización de la viscosidad dinámica en el arranque,** libricando bujes y barra con aceite de silicona, químicamente compatible con los materiales empleados y que añade una capa de protección frente a la oxidación en las barras metálicas.

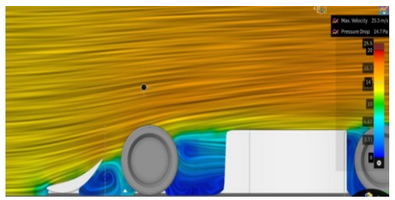
Aerodinámica

El tercer objetivo principal es **conseguir la menor resistencia aerodinámica o *drag*** (fuerza que frena el avance de un cuerpo a través de un fluido), para ello el prototipo debe cortar el aire con la menor resistencia.

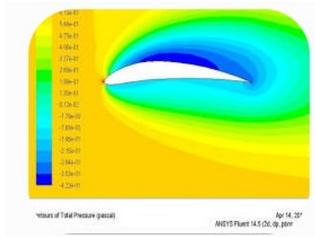
Como el circuito es en línea recta, lo que nos interesa principalmente es maximizar la velocidad punta del prototipo. Iniciamos el planteamiento a partir de un perfil NACA de asa simétrica de bajo ángulo, ya que aportan menos ***downforce*** o agarre (innecesario al no haber curvas) y también menos ***drag*** o resistencia aerodinámica, con el propósito de gestionar de forma eficiente el flujo turbulento de aire hacia las ruedas delanteras.



Detalle de nuestro perfil aerodinámico del alerón delantero



Detalle simulación CFD



Perfil NACA 6409

Sin embargo, al realizar las simulaciones en CFD del prototipo mediante el software Ansys, observamos como el uso de un perfil con el borde de salida ligeramente elevado ofrecía mejores resultados en ese punto. Por lo que finalmente hemos utilizado un perfil **NACA 6409**. Este perfil está invertido respecto a su uso aeronáutico tradicional y configurado con un ángulo de ataque elevado (como se ve en la cota de altura vertical de 13,18 mm). Esto hace que funcione como un deflector de alto rendimiento, optimizando el flujo de aire hacia la parte trasera del prototipo. De acuerdo a los datos proporcionados por el CFD, la reducción del drag una vez aplicado ese cambio fue de un 16.99 %.

Otro punto clave en la aerodinámica del prototipo es el **centro de masas (CoM),** punto donde se concentra todo el peso del prototipo: chasis, ejes. bujes, ruedas y cartucho de CO_2.

Para calcular este valor hemos empleado dos básculas de precisión y aplicado la fórmula $CoM = \frac{M_d}{M_d+M_t} xL$, donde M_d y M_t representan la masa (g) del eje delantero y trasero, respectivamente; y L es la distancia (mm) entre ejes (también conocida como *batalla*). El valor del *CoM* se estimará mediante dos vías complementarias: 1) el **software de simulación CFD *Ansys*** y 2) el **laminador *Orca Slicer*.** Estos valores se contrastarán con los valores experimentales finalmente obtenidos una vez manufacturado el prototipo para poder calibrar el error cometido y corregirlo en siguientes iteraciones.

Junto al CoM, el **centro de presiones aerodinámicas (CoP)** es el punto donde se concentran las fuerzas que el aire ejerce sobre el prototipo. Para garantizar la estabilidad direccional a alta velocidad, **el CoP debe situarse por detrás del CoM**. Si estuviera delante, el empuje aerodinámico generaría un momento desestabilizador que levantaría el morro del prototipo. La geometría de los alerones se ha calibrado en CFD para asegurar esta configuración.

ÍNDICE

- Base técnica del proyecto
- Diseño inicial y modelado
- Primera iteración
- Segunda iteración
- Optimización y aprendizaje

DISEÑO INICIAL Y MODELADO

Una vez leída la normativa, trabajados los conceptos técnicos y establecidos nuestros tres objetivos principales, comenzamos el diseño del prototipo. Empezamos formándonos en las diferentes herramientas de diseño, para así poder trasladar nuestras ideas a nuestro primer modelo de prototipo.

CAD y recursos de diseño

Para poder ser capaces de diseñar el prototipo nos ayudamos de un programa CAD (*Computer Aided Design*). En nuestro caso, usamos el programa *Autodesk Fusion 360*, un programa fácil de usar, basado en la creación de bocetos en 2D (*sketch*) que posteriormente se trasladan a un formato 3D (*extrude*). Finalmente, se ha procedido al ensamblaje de los diferentes componentes (bujes, ruedas, halo y casco), uniéndolos con el cuerpo del prototipo mediante la herramienta *joint*.

Primer prototipo

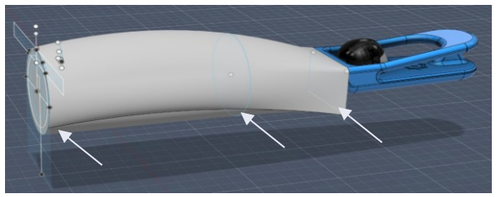
Nuestro primer prototipo, el ***TR-01 spec 1***, presentaba una silueta simple, muy parecida a un prototipo de Fórmula 1 actual y por tanto poco adecuada al formato de la competición. En las pruebas en CFD, el prototipo presentó una resistencia de 0,253N a una velocidad de 50 km/h. Con todo, tras el proceso de revisión y verificación, nos dimos cuenta además que presentaba parámetros fuera de normativa y que, por tanto, era necesaria una revisión profunda del mismo.



Ficha técnica
Modelo: **TR-01 spec 1**
Resistencia: **0,253N**
Peso: **Prototipo no fabricado**

Evolución del prototipo

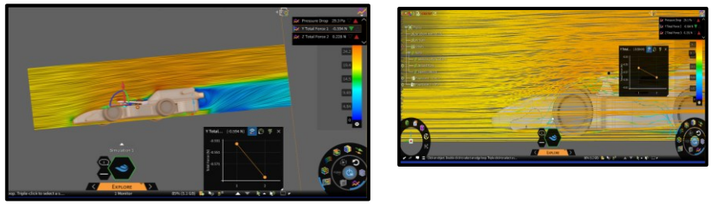
Tras evaluar el primer modelo y constatar sus limitaciones, iniciamos el diseño del ***TR-01 Spec 2*** con el objetivo de reducir al máximo el *drag*. Para lograrlo, implementamos tres mejoras clave en CAD: un alerón delantero elevado con *endplates* para desviar el aire contra las ruedas (efecto *outwash*), un chasis más alto que genera un canal de aire inferior (*underbody flow*), y un alojamiento para el cartucho diseñado mediante un *loft* de tres perfiles que suaviza las turbulencias traseras.



El retraso de los componentes oficiales nos obligó a improvisar unos bujes tipo tambor inspirados en la F1 con rodamientos integrados; aunque esto aumentó la masa, nos permitió rodar en los tests. Finalmente, el CFD validó el diseño con una resistencia de solo 0,175 N a 50 km/h.



Ficha técnica
Modelo: TR-01 spec 2
Resistencia: 0,175N
Peso: 204g



Simulaciones CFD TR-01 spec 2

Fabricación

Realizado el diseño y las simulaciones CFD, llegó el momento de fabricar el prototipo. Nos decantamos por la impresión 3D, ya que nos permitía controlar todo el proceso de fabricación y optimizarlo a conveniencia.

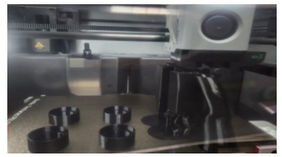
Para el primer prototipo utilizamos filamento **PETG** que combina la facilidad de impresión del PLA (material biodegradable muy fácil de imprimir, pero frágil) con la resistencia mecánica del ABS (conocido por ser el material con que se fabrica Lego) con un relleno (*infill*) del 33%. Al no tener experiencia previa del comportamiento del prototipo en pista, optamos por priorizar la resistencia frente a la eficiencia, de ahí que se optará por un valor de *infill* alto. El extrusor o motor de impresión y la cama se calentaron a los valores recomendados por el fabricante (235ºC y 70ºC), con la cámara de impresión cerrada y una altura de capa de 0.08 mm.

Se configuraron soportes en forma de árbol, lo cual facilitaba su extracción y nos permitía ser más sostenibles, minimizando el material desechado y el tiempo de impresión. Después de 7 horas, obtuvimos un primer prototipo, con una superficie pulida y orgánica que ayuda a reducir el rozamiento, aunque con un peso muy superior al mínimo establecido.



Bambulab Carbon X1

Detalles de la impresión





Soporte en árbol

Pruebas

Las pruebas de nuestro *TR-01 spec 2* las realizamos durante la jornada de pruebas oficiales en Campus Motor Anoia.

Escrutinio y pruebas en pista

Durante el escrutinio detectamos varios problemas: NO-GO-ZONE insuficiente, alerones delanteros demasiado bajos y alerón trasero no conforme a normativa. Sin embargo, el peso se reveló como el mayor problema: nuestro prototipo superaba los 3 s vs. ~ 1,5s del resto de equipos. Para solucionarlo, tendríamos que centrarnos en reducir la masa hasta 60 g, empleando nuevos materiales más ligeros y bajando el relleno (*infill*) a entre el 1% y el 5%.

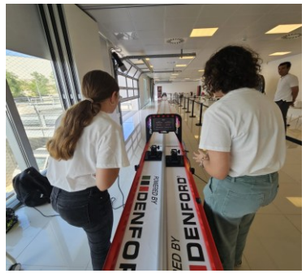
En pista surgió otro problema: el cartucho no encajaba. Pero lo resolvimos rápidamente limando la zona. También comprobamos que el tiempo de reacción era clave para mejorar el resultado final.





Líneas estratégicas de mejora

- Cumplimiento de normativa
- Reducción de peso: de 204 g al mínimo normativo de 60 g
- Tiempo de competición (incluyendo reacción): de 3 s a un objetivo ~1,5 s



PRIMERA ITERACIÓN

Con 204 g y 3 s en pista, la primera iteración tenía un objetivo claro: diseñar y manufacturar un segundo prototipo donde se corrigieron los incumplimientos de normativa y se rebajara su masa. Para poder replicar las pruebas realizadas durante la jornada de pruebas y poder así evaluar el rendimiento de nuestro prototipo, decidimos construir nuestra propia pista.

Cumplimiento de normativa

Para minimizar errores y asegurar el cumplimiento normativo, el diseño del *TR-02 spec 1* partió de los componentes estándar (NO-GO-ZONE, ejes, ruedas y halo), focalizando la optimización en la aerodinámica. El alerón delantero se rediseño con un perfil NACA de asa plana, optimizado mediante simulaciones CFD variando el ángulo de ataque. La configuración final fue un perfil NACA 6409 con ángulo de ataque elevado. El alerón trasero se simplificó a una única pieza, utilizando un perfil con borde de ataque fino y salida alineada para reducir turbulencia y mejorar el flujo. Los soportes del alerón delantero también se optimizaron para absorber mejor los impactos. Estos cambios permitieron que el prototipo cumpliera con la normativa aerodinámica, pero con un impacto en el *drag* (+35.42%).
Para paliar este efecto, se trabajó en el balance dinámico del prototipo, bajando y centrando el centro de masas (CoM) para minimizar así las inercias. Igualmente se ha calibrado la geometría de los alerones mediante simulaciones CFD, buscando situar el centro de presiones (CoP) por detrás del CoM. Esta configuración permite compensar el momento de elevación del empuje del cartucho de $C0_2$, mejorando la estabilidad direccional y reduciendo vibraciones y pérdidas por fricción.

Reducción de peso

Para reducir el peso del prototipo, realizamos un estudio de materiales para impresión 3D.

Filamento	Resistencia (Impacto)	Facilidad de Impresión	Densidad	Postprocesado
PLA-LW	Baja	Media	0.50 - 0.65 g/cm³	Excelente
PLA / PLA+	Baja / Media	Excelente	1.24 g/cm³	Buena
PETG	Media / Alta	Buena	1.27 g/cm³	Difícil
ABS / ASA	Alta	Media	1.07 g/cm³	Excelente
Nylon (PA)	Muy Alta	Difícil	1.08 g/cm³	Muy difícil

Después de evaluar las distintas opciones, elegimos PLA-LW (Lightweight) por su baja densidad y capacidad de postprocesado.

Para asegurar una correcta impresión, se incrementó la temperatura de la cama de los 55ºC indicados por el fabricante a 60ºC. También se redujo el flujo de impresión para favorecer la adhesión entre capas. Al tratarse de un material autoexpandido, se modificaron los parámetros de los árboles para aumentar su rigidez y a la vez minimizar el contacto con las superficies a las que debían ofrecer soporte.

Optimización de la resistencia

Aunque el PLA LW ofrecía una importante reducción de peso, existían dudas sobre su resistencia al impacto. Con el objetivo de incrementar la integridad estructural, se configuró la impresión aumentando el número de capas de 2 a 6 capas. Este ajuste generó un comportamiento mecánico superior al esperado, permitiendo reducir el *infill* al 5 % sin comprometer la integridad del prototipo. Como resultado, el prototipo alcanzó un peso final de 87 g, lo que supone una reducción del 57,35 % respecto al diseño inicial.



TR-02 spec 1 en PLA-LW



Manufacturación y montaje de prototipo

Una vez impreso el prototipo, se llevó a cabo un proceso de lijado y pulido con el que mejorar el acabado, reducir irregularidades y ajustarlo al diseño CAD. Algunos de los soportes quedaron adheridos, por lo que su retirada fue más lenta y laboriosa, requiriendo el uso de herramientas manuales (papel de lija, cuchillas de precisión,...). El ingeniero de fabricación verificó y certificó el uso de equipos de protección individual (EPIs), como guantes y gafas, durante el uso de herramientas en la fase de postprocesado. Finalmente, se montaron el resto de componentes, se ajustaron las dimensiones de la cavidad del cartucho y se lubricaron las piezas móviles.

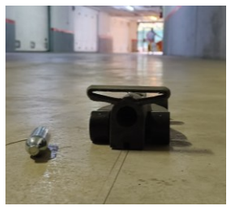






Ficha técnica
Modelo: **TR-02 spec 1**
Resistencia: **0,237N**
Peso: **87g**

Pruebas



Para validar el nuevo diseño, se improvisó un circuito de 24 m en un pasillo de parking, guiado con hilo de nailon. Las pruebas confirmaron la mejora del prototipo al registrar tiempos de entre 1,5 s y 1,7 s, reduciendo la marca anterior entre un 43 % y un 50%.

Conclusiones de las Segundas Pruebas

- **Peso vs. Resistencia**: la reducción de masa mejoró los tiempos en pista, sin un impacto apreciable en la resistencia estructural del prototipo.
- **Estabilidad**: se detectan desvíos en la trayectoria debido a las irregularidades del pavimento sobre el que se realizaron las pruebas.
- **Acabado superficial**: algunas leves imperfecciones en la carrocería del prototipo empeoraron el *drag* .

Acciones de Mejora Adoptadas

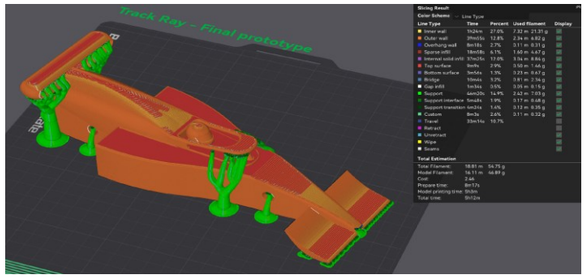
- **Optimización del prototipo**: reducción adicional de peso y postprocesado/lijado de las superficies exteriores.
- **Entorno de ensayos**: diseño y construcción de una pista experimental de características similares a las de la pista oficial, para maximizar la fiabilidad de las métricas obtenidas.

SEGUNDA ITERACIÓN

Afrontada una primera reducción en la masa del prototipo que nos permitió alcanzar tiempos competitivos (1.5-1.7 s), nos planteamos desarrollar un nuevo prototipo con el que acercarnos más al mínimo valor permitido (60 g) . Será nuestro prototipo *TR-02 spec 2*.

Fabricación: Reducción de peso

Tras analizar los resultados, calculamos que aún podíamos mejorar aproximadamente tres décimas reduciendo la masa del prototipo de los 87 g actuales a los 60 g mínimos. Para ello, trabajamos en la optimización de los parámetros de impresión, reduciendo el *infill* al 3% y estableciendo un patrón de relleno basado en giroide con el que conseguir una mayor rigidez estructural con el mínimo relleno. El grosor de las paredes se redujo a 4 capas y al altura de capa se aumentó a 0,20 mm para favorecer la resistencia del conjunto.



Layering del prototipo

El resultado fue el *TR- 02 spec 2*, un prototipo mucho más ligero donde la masa del cuerpo es de tan solo 41 g, lo que conlleva una masa total del conjunto (bujes, ejes y ruedas incluidos) de 65,89 g.





Ficha técnica
Modelo: **TR-02 spec 2**
Resistencia: **0,237N**
Peso: **65,89 g**

Fabricación: Refinamiento superficie

Durante las últimas pruebas, detectamos micro-rugosidades que podían afectar al rendimiento, por lo que consideramos mejorar el acabado mediante un pulido más intenso. Utilizamos cuchillas y lijas de diversos granos (P120, P400) para eliminar imperfecciones restantes, optimizando la superficie sin alterar el diseño.



Superficie irregular en el alerón trasero



Herramientas de pulido

Pruebas finales

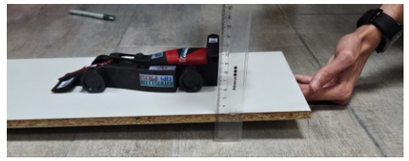
Procedemos a realizar una batería de pruebas con las que validar el prototipo.

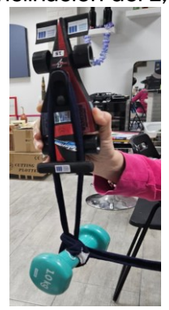
Test 1 : Dejara caer el prototipo por una pendiente del 10 % y llega al final. Realizamos la prueba en una tabla de 120 cm la que elevamos la parte más alta 12 cm para lograr una inclinación del 10 %.
Resultado: el prototipo se desliza sin problemas.



Test 2: Partiendo del prototipo en una superficie plana, ir levantando el prototipo hasta que empiece a moverse.
Resultado**:** el prototipo empieza a moverse en una inclinación del 2,08 % en una tabla de 120 cm.

Test 3: Pruebas de resistencia del halo.
Resultado: el halo supera las pruebas de esfuerzo.





Test 4: Pesaje del prototipo en décima de gramo (1 decimal).
Resultado: el peso final del prototipo es de 65,8 g.

Test 5: Cálculo del centro de masa (*CoM*) para saber si el prototipo está dinámicamente equilibrado. Con dos básculas calculamos:

Masa total. 65,89 g

Masa eje delantero: 28,77 g → 43,8 % del peso total

Masa eje trasero: 37,12 g → 56,2 % del peso total

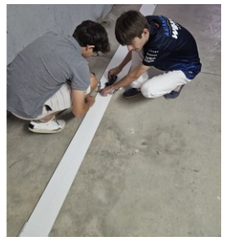
$x = \frac{M_{delantero}}{M_{total}} \, x \, L \rightarrow x = \frac{28{,}77\ g}{65{,}89\ g} \, x \, 12{,}174 \text{ cm} = \mathbf{5{,}32\ cm}$

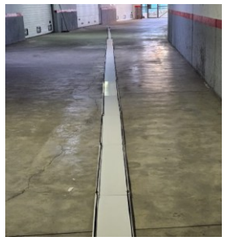
$x = L - \frac{M_{trasero}}{M_{total}} \, x \, L \rightarrow x = 12{,}174 \text{ cm} - \frac{37{,}12\ g}{65{,}89\ g} \, x \, 12{,}174 \text{ cm} = \mathbf{5{,}32\ cm}$

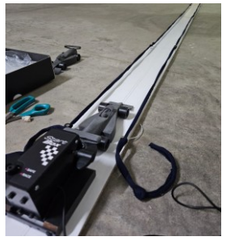


Con este cálculo verificamos que el prototipo está equilibrado, con un centro de masas bien posicionado, lo que favorece la estabilidad. El reparto de peso hacia atrás ayuda a soportar el empuje del cartucho de CO_2, evitando que el prototipo se eleve del morro y asegurando un comportamiento aerodinámico estable y recto.

Test 6: Pruebas en pista recreada. Desarrollamos una pista con madera obtenida del punto verde. Uniendo las tablas con tornillos le dimos continuidad a la pista. Además, empleamos hilo y tela para construir una valla de seguridad.







Estas últimas pruebas en nuestra pista recreada, nos permitieron validar los tiempos competitivos que habíamos obtenido en pruebas anteriores y certificar que el prototipo era apto para la competición.

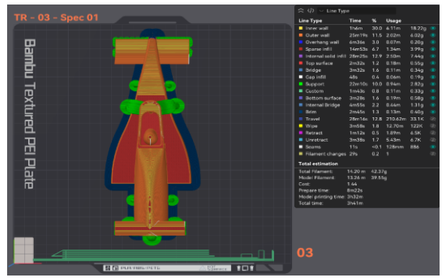
OPTIMIZACIÓN FINAL Y APRENDIZAJE

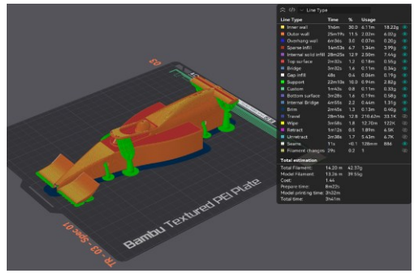
Tras ganar el pase a la final nacional, clasificándonos en tercera posición en las competición regional de Cataluña, nos pusimos a la tarea de optimizar aún más nuestro prototipo, en base a lo aprendido durante la competición y las valoraciones reportadas por los jueces de STEM Racing.

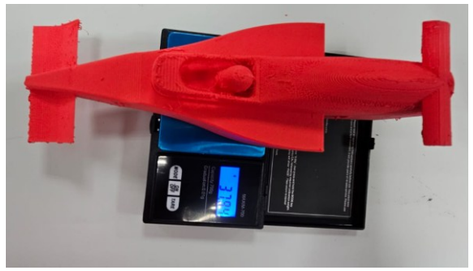
De regional a nacional

Para afrontar la competición nacional generamos un nuevo prototipo, el *TR-03*, con las siguientes modificaciones:

1.- Reducción de peso para ajustarnos a los 60 g. Ajustamos los parámetros de impresión en *Orca Slicer* generando un *infill* y número de capas por pared ,específicos por zona: alerón delantero, alerón trasero, cuerpo, halo y piloto. Esta nueva configuración nos ha permitido reducir la masa del prototipo a apenas unos 37,94 g.







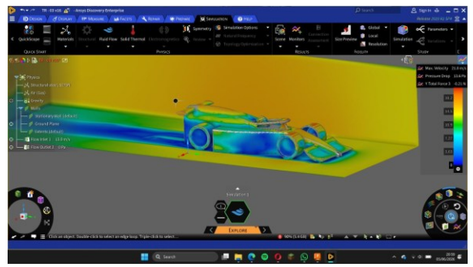
2.- Modificación de los siguientes elementos:

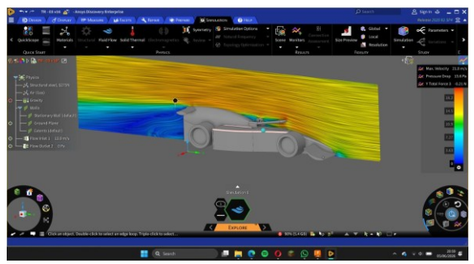
2.1.- Reposicionamiento del halo. Nuestro halo estaba ligeramente por encima del límite legal, por lo que procedimos a bajar 1 mm la altura del prototipo y elevamos las aperturas de los bujes 1 mm, logrando una altura final de 34,4 mm desde la hendidura del halo al suelo.

2.2.- El alerón delantero no estaba frente al centro de la línea de la rueda delantera en visión lateral. Para entrar en normativa, bajamos ligeramente el borde de salida de nuestro perfil NACA delantero.

3.- Rediseño del alerón trasero con el objetivo de mejorar la aerodinámica. Se eliminaron los soportes del alerón trasero y se redujo el perfil alar, con el objetivo de minimizar la generación de vórtices turbulentos en el borde de ataque y en la estructura de soporte de diseño anterior.







Simulaciones CFD del TR-03

Ficha técnica
Modelo: **TR-03**
Resistencia: **0,21N**
Peso: **60 g**



Nuevo perfil alar trasero

4.- Actualización de planos, renders y documentación técnica de acuerdo con los comentarios recibidos por parte de los jueces de la competición, enmarcados en la evaluación de los resultados obtenidos en el campeonato regional de Cataluña.

Conclusiones y aprendizaje final

Tras meses de aprendizaje, diseños, simulaciones, fabricaciones y pruebas, hemos llegado a las siguientes conclusiones finales:

1. **No hay aerodinámica sin ligereza**. Un prototipo de STEM Racing no se diseña pensando solamente en minimizar la resistencia al avance o alcanzar el peso mínimo, sino que se diseña abordando estos dos frentes a la vez. Un prototipo balanceado quizás no con la mejor aerodinámica ni el mejor peso pero, en el cómputo global, un monoplaza muy veloz.
2. **Dime de qué estás hecho y te diré lo rápido que eres**. Los materiales usados durante el proceso de fabricación son tan importantes como el propio diseño. Encontrar un material con baja densidad y alta resistencia es imprescindible para poder trasladar las bondades del diseño a prestaciones reales.
3. **Los fallos son esenciales para poder aprender.** Durante el desarrollo del proyecto hemos tenido que afrontar fracasos como el vivido el día de las pruebas oficiales. La motivación y perseverancia resultan imprescindibles en un proyecto como este, donde el esfuerzo no siempre se traduce en buenos resultados, pero cada reto vivido supone un aprendizaje.

Como enseñanza final nos quedamos con esta reflexión...



De la idea al prototipo final...
un proceso de mejora continua

Together we are faster



