



Formula Student como laboratorio de innovación docente: optimización biomecánica de la posición de conducción

Marc Rueda Capdevila¹, Rosa Pàmies-Vilà¹, Lluïsa Jordi Nebot¹, Joan Puig-Ortiz¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya.
rosa.pamies@upc.edu; lluisa.jordi@upc.edu; joan.puig@upc.edu

Formula Student es una competición internacional que promueve el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) al desafiar a estudiantes de ingeniería a diseñar, fabricar y competir con monoplazas de estilo Fórmula 1 desarrollados integralmente por ellos. Este programa educativo está orientado al desarrollo de habilidades prácticas en ingeniería, gestión de proyectos y trabajo en equipo y proporciona a los estudiantes una experiencia integral en el diseño y fabricación de vehículos de alto rendimiento. Los equipos deben cumplir con estrictas normativas técnicas y de seguridad. En la competición deben superar tanto pruebas dinámicas en pista como pruebas estáticas; estas últimas consisten en evaluaciones de diseño, costos y estrategia comercial y se desarrollan frente a jueces que poseen una amplia experiencia en la industria de la automoción.

El equipo BCNeMotorsport de la Universitat Politècnica de Catalunya está integrado mayoritariamente por estudiantes de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona y de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona y es la evolución del equipo ETSEIB-Motorsport, primer equipo español que participó en la competición Formula Student y que no ha dejado de hacerlo desde el año 2008.

A partir de observaciones de pilotos y jueces, se identificaron deficiencias ergonómicas en vehículos de temporadas anteriores. Para intentar solucionar estas deficiencias, y aprovechando el rediseño de la geometría para el modelo CAT17, se realizó un análisis biomecánico de la posición de conducción de los pilotos. Este análisis se llevó a cabo en un prototipo de madera que permite configurar distintas posiciones de conducción de forma rápida, ajustando: la altura, distancia, inclinación y rotación máxima del volante; el ángulo del asiento; la altura y distancia de los pedales; y el ángulo de salida de las piernas. Para capturar los datos biomecánicos, se utilizaron 16 cámaras infrarrojas que registraron la posición de 31 marcadores colocados en el cuerpo de los pilotos. En el estudio participaron tres pilotos que realizaron movimientos esenciales de conducción, como giros de volante y activación de los pedales.

Los datos obtenidos se procesaron con el software OpenSim y permitieron analizar la evolución de la posición del centro de gravedad del piloto en cada configuración del prototipo. Se seleccionó la configuración que reduce la altura del centro de gravedad del piloto y que lo acerca lo máximo posible al suelo para mejorar la estabilidad y el rendimiento del vehículo en pista. Finalmente, se rediseñaron elementos clave, como el asiento, los pedales, el volante y la geometría del monocasco y se logró una posición de conducción adaptable a las distintas características físicas de los pilotos que conducirán el vehículo durante esta temporada.

Este trabajo refleja no solo una mejora tangible en el diseño del vehículo, sino también el valor del ABP como herramienta formativa en ingeniería, al integrar de forma práctica y colaborativa la adquisición de competencias técnicas y transversales en un entorno de alta exigencia.

1. Introducción

La competición Formula Student representa un desafío multidisciplinario en el ámbito de la ingeniería, proporcionando a los estudiantes una oportunidad única para desarrollar habilidades prácticas en diseño, fabricación y análisis de vehículos de alto rendimiento. Formula Student, que se inició en 1981 en Estados Unidos, se ha convertido en una competición internacional que reta a equipos universitarios a diseñar, fabricar y competir con monoplazas tipo fórmula uno. Con eventos actualmente en Europa, Asia y Australia, esta competición es un referente en innovación educativa y tecnológica, especialmente relevante en la formación de futuros ingenieros [1-2].

La competición se estructura en dos grandes categorías —vehículos eléctricos y de combustión— y contempla tanto versiones conducidas manualmente como autónomas. La evaluación de los equipos participantes se basa en una combinación de pruebas dinámicas y estáticas. Las pruebas dinámicas incluyen: *Acceleration* (medir la aceleración en una recta de 75 m), *Skidpad* (estabilidad en curvas), *Autocross* (agilidad en un circuito técnico), *Endurance* (fiabilidad en una carrera de resistencia) y *Efficiency* (consumo y rendimiento energético). Estas pruebas evalúan el rendimiento y las capacidades del vehículo en pista. Por otro lado, las pruebas estáticas (*Business Plan*, *Cost and Manufacturing* y *Engineering Design*) requieren que los equipos justifiquen sus decisiones de diseño, fabricación y costes ante expertos en el tema. Es importante destacar que Formula Student no es simplemente una competición de velocidad. El éxito se basa en un equilibrio entre el rendimiento del vehículo, el diseño conceptual y la viabilidad financiera del proyecto. En este sentido, se convierte también en una herramienta pedagógica de primer nivel.

Más allá de su componente competitivo, Formula Student destaca por su valor pedagógico, ya que representa un ejemplo paradigmático de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP). Esta metodología activa sitúa al estudiante en el centro del proceso formativo y lo enfrenta a situaciones reales que requieren aplicar conocimientos multidisciplinarios, trabajar en equipo, tomar decisiones fundamentadas y gestionar recursos con criterio técnico y económico [3]. Según Kjellberg et al., el ABP no solo permite adquirir competencias técnicas avanzadas, sino también desarrollar habilidades clave como el pensamiento crítico, la resolución de problemas o la comunicación efectiva, todas ellas fundamentales en el ejercicio profesional de la ingeniería [4].

En este marco, la participación en Formula Student transforma el aula en un laboratorio real de innovación, donde teoría y práctica se entrelazan y los estudiantes experimentan dinámicas propias del entorno profesional. La necesidad de cumplir con normativas técnicas, justificar decisiones de diseño o colaborar con patrocinadores externos aporta una dimensión adicional de realismo que enriquece el aprendizaje y motiva al alumnado.

Desde 2008, el equipo BCNeMotorsport de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), perteneciente a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ha desarrollado y perfeccionado sus monoplazas con una filosofía de mejora continua. Cada nueva temporada representa una iteración más en un proceso de innovación aplicada, en el que se integran avances en materiales, sistemas de propulsión, dinámica vehicular y ergonomía.

Este trabajo se centra en la optimización de la posición de conducción del modelo CAT17, el monoplaza eléctrico diseñado por el equipo para la temporada 2024-2025. La posición de conducción es un elemento crítico en el diseño de vehículos de competición, ya que afecta directamente al confort, la seguridad, el rendimiento dinámico y la experiencia del piloto [5-9]. A partir de observaciones de temporadas anteriores y de comentarios de pilotos y jueces, el equipo identificó deficiencias ergonómicas que comprometían tanto la comodidad del piloto como el rendimiento del vehículo. La mejora de la posición de conducción busca optimizar la estabilidad del monoplaza, garantizar la comodidad del piloto y cumplir con los requisitos normativos de la competición, teniendo en cuenta la adaptabilidad a diferentes proporciones corporales [10-11].

El objetivo del presente estudio es integrar principios de ergonomía y biomecánica en el rediseño del habitáculo, garantizando su adaptabilidad a diferentes morfologías corporales y favoreciendo una posición baja del centro de gravedad para mejorar la estabilidad del vehículo. En este contexto, se detalla la metodología utilizada para optimizar la posición de conducción y se presentan los resultados obtenidos, con la voluntad de contribuir tanto al avance en el diseño de monoplazas eléctricos competitivos como al fortalecimiento de la formación en ingeniería mediante enfoques educativos activos y contextualizados como el ABP.

2. Materiales y métodos

2.1 Requerimientos técnicos del reglamento

El diseño del monoplaza con chasis tipo monocasco debe cumplir con las directrices del reglamento FSG2024, que establece requisitos específicos para garantizar la seguridad y ergonomía del piloto. Entre estos, se definen las dimensiones mínimas de la apertura de acceso y la correcta disposición del espacio destinado al piloto dentro del chasis (*cockpit*). Asimismo, el reglamento considera un modelo de referencia basado en las dimensiones del

percentil 95 de la población masculina (*Percy*), para asegurar que un piloto con estas proporciones pueda maniobrar cómodamente y de manera segura dentro del vehículo.

Todos los controles del monoplaza deben ser accesibles y operables desde el interior del *cockpit* sin que ninguna parte del piloto (manos, brazos o codos) salga del mismo. Además, el piloto debe disponer de una visibilidad adecuada tanto al frente como a los lados del vehículo, manteniendo un campo de visión mínimo de 100° a cada lado al girar la cabeza. En cuanto a la salida de emergencia, todos los pilotos deben ser capaces de abandonar el vehículo en menos de 5 s con la equipación completa puesta, partiendo de la posición de conducción con las manos en el volante y finalizando cuando ambos pies tocan el suelo. La normativa distingue dos posiciones de conducción: la erguida, con un ángulo menor de 30° entre el respaldo del asiento y la vertical, y la reclinada, con un ángulo superior a 30° . Finalmente, se establece que la parte superior del volante no debe superar la altura del punto más alto de la estructura de protección frontal, independientemente de su ángulo, para garantizar una visibilidad y seguridad adecuadas.

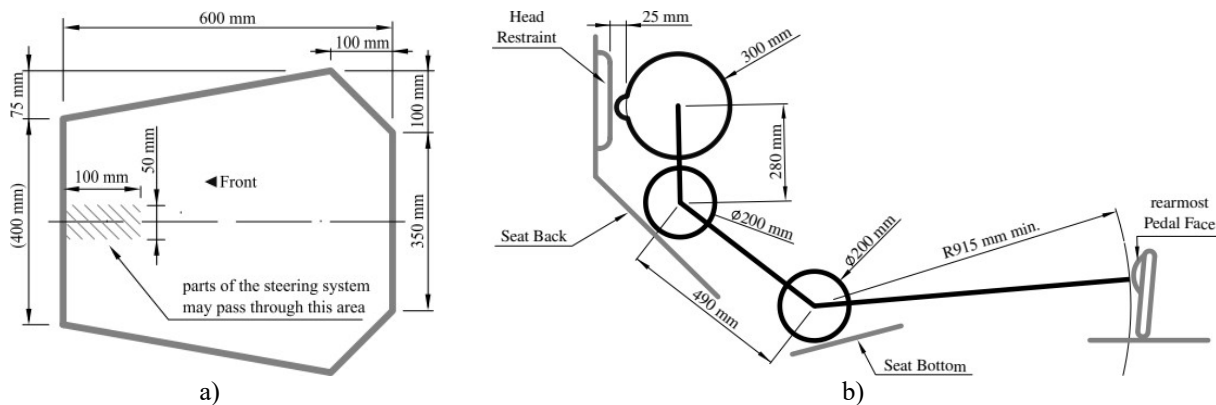


Figura 1: a) Plantilla de la apertura del *cockpit*, b) Dimensiones del *Percy*. Fuente: reglamento FSG2024.

2.2 Análisis de la configuración de vehículos de ediciones anteriores

El modelo CAT17 representa una evolución respecto a las versiones utilizadas en los últimos años. Antes de su desarrollo, ha sido fundamental analizar los errores en el diseño de la posición de conducción de las tres generaciones previas con el objetivo de evitar su repetición y establecer mejoras específicas. Para ello, los pilotos de la temporada 2022-2023 evaluaron diversos aspectos ergonómicos del modelo CAT16 mediante una encuesta estructurada (Figura 2a), utilizando una escala de valoración de -1 a 1 . Los resultados obtenidos (Figura 2b) permitieron identificar los aspectos que requerían ajustes prioritarios en el diseño.

Entre los factores peor valorados se encuentran la proximidad del volante y el ángulo de salida de las piernas (Figura 2b). A partir de estos resultados, se priorizó la revisión de estos aspectos mediante un enfoque iterativo que permitiera explorar diferentes configuraciones de la posición de conducción. Para ello, se utilizó un prototipo de madera configurable (*Goula*), diseñado para simular diversas posiciones ajustando el volante, el asiento y los pedales (Figura 3a). Los pilotos evaluaron estas configuraciones con el fin de determinar la disposición más ergonómica y confortable.

Para determinar la posición de conducción óptima, se siguió un proceso iterativo basado en la evaluación sistemática de diferentes configuraciones por parte de los pilotos de la temporada 2023-2024. Inicialmente, se analizaron las valoraciones del modelo anterior mediante cuestionarios cualitativos, lo que permitió identificar los aspectos peor valorados, como la proximidad del volante o el ángulo de salida de las piernas. A partir de esta información, se diseñaron distintas combinaciones de parámetros (ángulo del respaldo, altura y distancia del volante, posición de la pedalera, etc.) empleando un prototipo ergonómico ajustable, denominado "Goula". Cada configuración fue probada por los pilotos (Figura 3b), que puntuaron su comodidad en distintos aspectos en una escala del -2 al 2 . Tras el análisis iterativo, se identificaron dos configuraciones óptimas (Figura 4), adecuadas para pilotos con diferentes estaturas y complejones. La elección de solo dos posiciones finales se realizó con el objetivo de simplificar el procedimiento de captura en el laboratorio de biomecánica y garantizar una implementación eficiente en el diseño final del CAT17.

ASIENTO			
Inclinación del asiento	☐	☐	☐
Campo de visión	☐	☐	☐
Forma del asiento	☐	☐	☐
Ángulo de salida de las piernas	☐	☐	☐
PEDALERÍA			
Ángulo del freno	☐	☐	☐
Ángulo del acelerador	☐	☐	☐
Distancia del freno	☐	☐	☐
Distancia del acelerador	☐	☐	☐
Rigidez del acelerador	☐	☐	☐
Rigidez del freno	☐	☐	☐
Amplitud del pedal	☐	☐	☐
VOLANTE			
Rigidez de la dirección	☐	☐	☐
Ángulo de recorrido	☐	☐	☐
Facilidad del <i>quick release</i>	☐	☐	☐
Interacción con la <i>dash</i>	☐	☐	☐
Agarre del volante	☐	☐	☐
Altura del volante	☐	☐	☐
Proximidad al volante	☐	☐	☐
HEAD RESTRAINT			
Posicionamiento	☐	☐	☐
CINTURONES			
Ajustabilidad	☐	☐	☐
Sensación de seguridad	☐	☐	☐
Ángulo de los <i>anti-submarines</i>	☐	☐	☐

a)

Valoración de [-1;1]		
Asiento	$\bar{X}$	σ
Inclinación del asiento	0,75 ± 0,43	
Campo de visión	0,75 ± 0,43	
Forma del asiento	0,75 ± 0,43	
Ángulo de salida de las piernas	-0,5 ± 0,5	
Pedalería		
Ángulo del freno	0,25 ± 0,43	
Ángulo del acelerador	0,75 ± 0,43	
Distancia del freno	0,75 ± 0,43	
Distancia del acelerador	0,75 ± 0,43	
Rigidez del acelerador	0,75 ± 0,43	
Rigidez del freno	0,5 ± 0,5	
Amplitud del pedal	0,75 ± 0,43	
Volante		
Rigidez de la dirección	0,75 ± 0,43	
Ángulo de recorrido	0,75 ± 0,43	
Facilidad del <i>quick release</i>	0,5 ± 0,5	
Interacción con la <i>dash</i>	-0,5 ± 0,5	
Agarre del volante	0,25 ± 0,43	
Altura del volante	1 ± 0	
Proximidad al volante	-0,75 ± 0,43	
Head restraint		
Posicionamiento	1 ± 0	
Cinturones		
Ajustabilidad	1 ± 0	
Sensación de seguridad	1 ± 0,43	
Ángulo de los <i>anti-submarines</i>	0,5 ± 0,5	

b)

Figura 2: Formularios de evaluación de los pilotos: a) Modelo CAT16, b) Valoraciones de la encuesta.

DISPOSICIÓN 1		
ASIENTO	Ángulo	43,5°
	Salida piernas	20°
		25°
		30°
		35°
VOLANTE	Visibilidad	Valoración (1-10)
	Ángulo de rotación	80
		90
		100
		110
	Distancia X	210mm
		230mm
		250mm
		270mm
	Inclinación	90°
PEDALERA		85°
		80°
	Distancia Y	position 4
		position 5
		position 6
PEDALERA	Altura	10,2 mm
	Posición del pedal	0
		1
		2
		3
		4

a)

b)

Figura 3: a) Prototipo de madera *Goula*, b) Posibles configuraciones de este.

Resultados			
	Configuración	A	B
ASIENTO	Ángulo	43,5°	
	Salida piernas	35°	
VOLANTE	Ángulo de rotación	90°	
	Distancia X (mm)	250	
	Inclinación	85°	
	Distancia Y	Posición 5	Posición 6
PEDALERA	Altura (mm)	10,2	
	Posición del pedal (mm)	840 - 1000	

Figura 4: Definición de las dos configuraciones a analizar.

2.3 Captura del movimiento en el laboratorio

Se llevó a cabo una captura del movimiento en el laboratorio de Ingeniería Biomecánica de la ETSEIB para analizar la postura y los movimientos de los pilotos en distintas configuraciones de conducción. Para ello, se empleó un sistema de 16 cámaras infrarrojas, registrando la posición de 33 marcadores colocados en el cuerpo de tres pilotos seleccionados (Figura 5). Los datos fueron posteriormente procesados en OpenSim (versión 4.3, Simbios, Stanford, CA) [12]. El peso y la altura de los pilotos que participaron en las grabaciones también se pueden ver en la Figura 5 y representan sujetos de distintas alturas: alta, media y baja.

El modelo biomecánico empleado fue una adaptación del 3D *Gait Model with Simple Arms* de [13], en el que se eliminaron los marcadores que quedaban ocultos por la estructura del prototipo y se añadieron nuevos en la parte frontal de la pelvis para mejorar la captura de datos. La cadera se modeló como una articulación esférica, permitiendo movimientos en los tres planos anatómicos, es decir, flexión-extensión, abducción-aducción y rotación interna-externa. Las rodillas y los tobillos se representaron como articulaciones con un solo grado de libertad, permitiendo la interacción entre el fémur y la tibia a través del movimiento de flexión-extensión. El tronco y la cabeza se modelaron como un único segmento rígido conectado a la pelvis mediante una articulación esférica, que permitía el movimiento global del torso sin necesidad de representar en detalle la columna vertebral. El hombro se representó como una articulación esférica, permitiendo la flexión-extensión, abducción-aducción y rotación del húmero respecto al tronco. El codo se modeló como una articulación restringida a la flexión-extensión del antebrazo sobre el brazo. La pronosupinación del antebrazo se representó mediante una articulación de un solo grado de libertad entre el radio y la ulna. Así, el modelo contó con un total de 16 grados de libertad en el tren inferior, de los cuales 6 describieron el movimiento de la pelvis y 5 correspondieron a cada pierna. En el tronco y tren superior, se definieron 13 grados de libertad, con 3 asignados a la articulación lumbar y 5 a cada brazo.



Figura 5: Marcadores utilizados para la captura del movimiento y masa y altura de los tres pilotos.

Durante el experimento, cada uno de los 3 pilotos realizó maniobras específicas dentro del prototipo configurable que incluían giros de 90° del volante en ambos sentidos y acciones de frenado y aceleración. La Figura 6 muestra un momento de estas capturas.

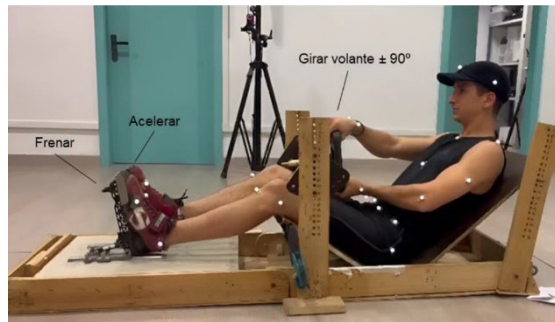


Figura 6: Piloto haciendo una captura en el laboratorio.

2.4 Análisis de los datos

El análisis de los datos capturados en OpenSim permitió evaluar la ergonomía y eficiencia de la posición de conducción en el monoplace. Se compararon las coordenadas del centro de gravedad en ambas configuraciones para determinar su impacto en la estabilidad. También se evaluó la posición del volante, asegurando que cumpliera con la normativa de seguridad y optimizara la comodidad del piloto.

Además, se analizó la trayectoria de la mano izquierda durante los giros, detectando diferencias significativas en la altura entre configuraciones. La visibilidad frontal fue otro aspecto clave y se verificó que el diseño ofreciera un campo de visión adecuado para todos los pilotos.

Finalmente, se revisó la ubicación de la pedalera para garantizar la comodidad y cumplimiento normativo, y se evaluó la ergonomía del *cockpit*, evitando interferencias del codo con la estructura del monocasco. Estos análisis permitieron seleccionar la configuración óptima para mejorar la postura del piloto y el rendimiento del monoplace.

3. Resultados

La captura del movimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Biomecánica de la ETSEIB. Los pilotos ejecutaron los movimientos esenciales de conducción en las dos configuraciones del prototipo definidas previamente donde se modifica la altura del volante (Figura 4). En cada caso, comenzaron en una posición de reposo con los brazos estirados en cruz, utilizada como referencia para la calibración. A continuación, tomaron el volante y realizaron giros de 90° hacia la izquierda y 90° hacia la derecha, repitiendo el movimiento al menos cinco veces para evaluar la amplitud y comodidad del gesto. Tras completar la secuencia de giros, se llevó a cabo la simulación de las maniobras de frenado y aceleración, en las cuales los pilotos accionaron los pedales de manera alterna para analizar la movilidad de las piernas y su interacción con la pedalera en ambas configuraciones de conducción. Finalmente, los pilotos retornaron a la posición inicial con los brazos estirados, asegurando así la uniformidad del protocolo de captura.

La Figura 7 presenta el modelo biomecánico en OpenSim junto con la representación del *cockpit* inicial. Por su parte, la Figura 8 muestra la evolución temporal del centro de masas de los tres pilotos (en el sistema de coordenadas de la Figura 7) en las dos configuraciones del *Goula*. Las líneas azules corresponden a la configuración A y las líneas naranjas a la configuración B. Los datos del piloto 1 (P1) se representan con una línea continua, los del piloto 2 (P2) con una línea discontinua de guiones y los del piloto 3 (P3) con una línea de puntos.

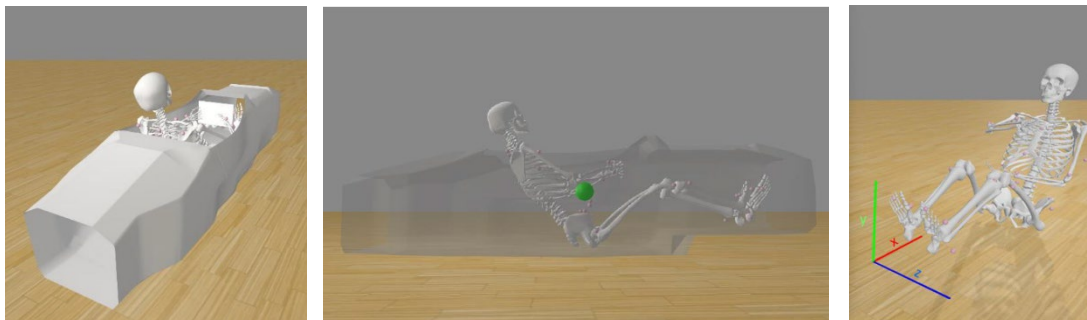


Figura 7: Modelado en OpenSIM del sujeto y el monoplace.

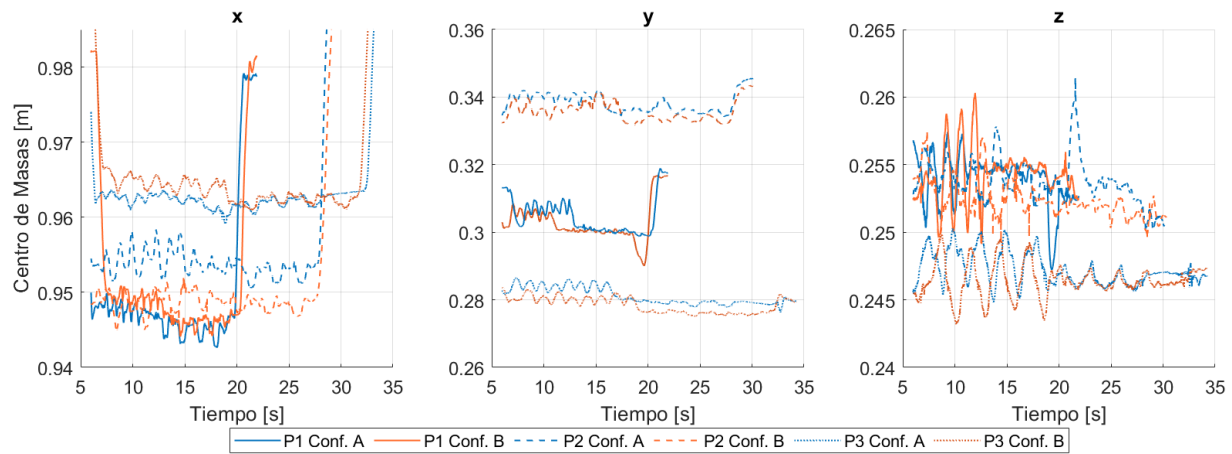


Figura 8: Evolución temporal del centro de masas del sujeto.

En la coordenada x del centro de masas, se observa un cambio claro al inicio y al final del intervalo de tiempo analizado. Este cambio está relacionado con la transición entre la posición de calibración (brazos estirados) y la posición de conducción (brazos en el volante). Las configuraciones A y B presentan una diferencia notable en el nivel promedio de esta coordenada, lo cual puede estar vinculado a las diferencias ergonómicas entre ambas configuraciones.

En la coordenada vertical y , la posición absoluta depende más de cada piloto, pero en los 3 casos, de forma general puede decirse que la configuración B presenta unos valores inferiores a la configuración A del mismo piloto. Finalmente en la coordenada z , las posiciones de los 3 pilotos son más parecidas.

La figura 9 muestra los valores medios de las coordenadas del centro de gravedad para los 3 pilotos. Para el cálculo de los datos, únicamente se consideraron las fases de movimiento activo, descartando los periodos en los que los participantes mantenían los brazos en cruz, ya que estos solo fueron empleados para la calibración. Como se observa en la Figura 9, el valor de la coordenada y es el más diferente según la posición y el piloto que se esté analizando. El piloto 1 es el que presenta un valor más alto, ubicado a 33,83 cm en la configuración A y a 33,57 cm respecto al suelo en la configuración B. Mientras que el piloto 3 es el que tiene el centro de gravedad más bajo, concretamente a 28,08 cm en la configuración A y a 27,81 cm respecto al suelo en la configuración B. Como se observa, en todos los casos, en la configuración B se logra reducir el centro de gravedad respecto a la configuración A al tener los brazos más bajos.

	Piloto	Configuración A	Configuración B
x (cm)	P1	95,71	95,48
	P2	95,03	95,03
	P3	96,22	96,54
y (cm)	P1	33,83	33,57
	P2	30,24	29,97
	P3	28,08	27,81
z (cm)	P1	25,36	25,22
	P2	25,52	25,51
	P3	24,82	24,63

Figura 9: Valores medios de las coordenadas del centro de masas de los pilotos en la simulación de conducción.

Los resultados obtenidos hasta ahora indican que una posición más baja del volante implica, como era de esperar, una posición del centro de gravedad también más baja. Antes de considerar esta configuración como válida, es necesario verificar su cumplimiento con la normativa de la competición. Según las reglas de seguridad, el volante debe situarse siempre por debajo del arco de protección frontal (*front hoop*), una estructura que protege al piloto en caso de vuelco. Se implementó en el modelo virtual del CAT16x la configuración B y se obtuvo que el ángulo del volante más cercano al límite reglamentario está a una distancia de 9,81 mm por debajo de dicho arco, lo que confirma que esta configuración cumple con los requisitos de seguridad establecidos (Figura 10).

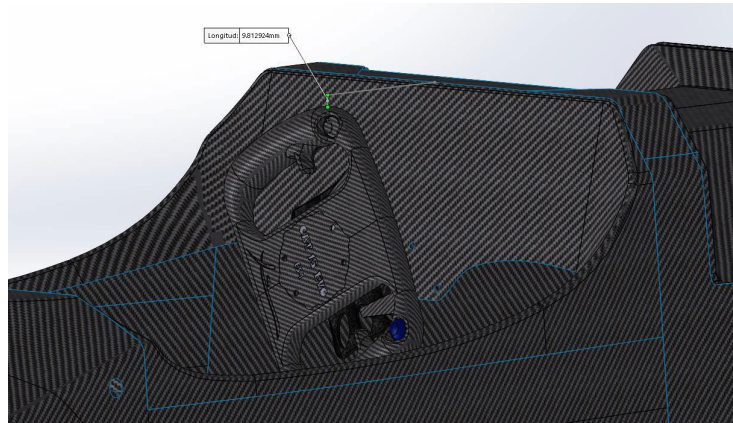


Figura 10: Distancia mínima del volante al plano superior del arco de protección frontal.

El modelo de OpenSim, conjuntamente con los modelos CAD de los distintos coches permitió seguir cuantificando mejoras a introducir al CAT17.

El diseño del habitáculo se definió utilizando la configuración B, priorizando la comodidad del piloto y el cumplimiento de la normativa. Este diseño se basó en dos aspectos clave: la geometría escalonada y la altura del habitáculo ajustada para garantizar una visibilidad lateral adecuada. La geometría escalonada, también conocida como "bañera", permitió maximizar el espacio disponible para el movimiento del volante y los controles, al tiempo que se minimizaban las dimensiones inferiores, limitando el espacio destinado a las piernas del piloto. Esta configuración también favoreció la aerodinámica al aumentar el área del difusor lateral, lo que mejoró la carga aerodinámica y redujo el peso del monocasco.

La configuración A provocaba un aumento de 19,58 mm en la altura del tablero de controles (*dashboard*) respecto al modelo anterior. Este incremento no cumplía con los objetivos de reducción dimensional del monocasco. En contraste, la configuración B logró una reducción de 10,81 mm en la altura del tablero en comparación con el modelo previo, lo que permitió alcanzar los objetivos relacionados con el diseño, el centro de gravedad y la ergonomía, convirtiéndola en la opción seleccionada.

En cuanto a la visibilidad frontal (Figura 11a), los análisis mostraron que, en temporadas anteriores como en el modelo CAT11e, el ángulo de visibilidad era insuficiente ($7,87^\circ$) lo que dificultaba la conducción. Las mejoras introducidas en el modelo CAT12e incrementaron este ángulo a $11,23^\circ$. Para el modelo CAT17, el ángulo de visibilidad obtenido fue de $11,12^\circ$, ligeramente superior al mínimo requerido. En el caso del piloto más bajo (piloto 3), el ángulo alcanzó los $10,5^\circ$, un valor que, aunque inferior al ideal, se consideró adecuado al compensarse mediante ajustes adicionales en la geometría del monocasco. En el análisis de visibilidad lateral se evaluó que el piloto pudiera percibir adecuadamente el área frontal del vehículo, en particular las placas terminales del alerón delantero. Las simulaciones realizadas con el modelo CAT13e, utilizando plantillas físicas, confirmaron que incluso el piloto de menor estatura mantenía una visibilidad aceptable sin obstáculos visuales (Figura 11 b).

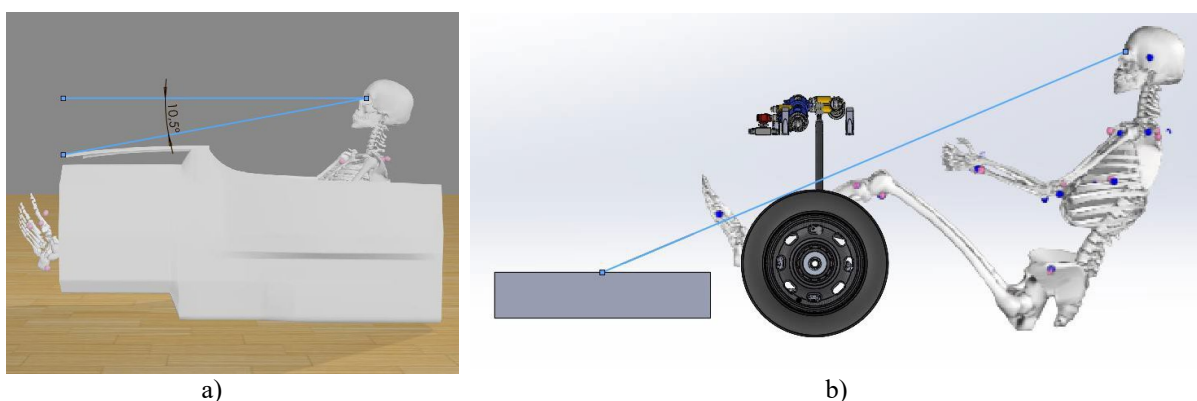


Figura 11: Evaluación de la visibilidad.

En la evaluación de la pedalera (Figura 12 a), se comprobó que el recorrido de los pedales de freno y acelerador eran diferentes, con desplazamientos de 120 mm y 100 mm, respectivamente. Se ajustaron las posiciones máxima y mínima de los pedales a 974,80 mm y 854,80 mm, garantizando la comodidad de todos los pilotos y cumpliendo

con el requisito reglamentario de una distancia mínima de 915 mm entre el centro del círculo inferior y la superficie de actuación de los pedales de la Figura 1.

El análisis de los ángulos articulares de los brazos permitió identificar el espacio necesario del piloto y así ajustar las dimensiones superiores del habitáculo sin comprometer la ergonomía. Este rediseño del habitáculo se validó importando el modelo ajustado en OpenSim, asegurándose de que no ocurrieran interferencias entre el codo y la estructura del monocasco (Figura 12 b).

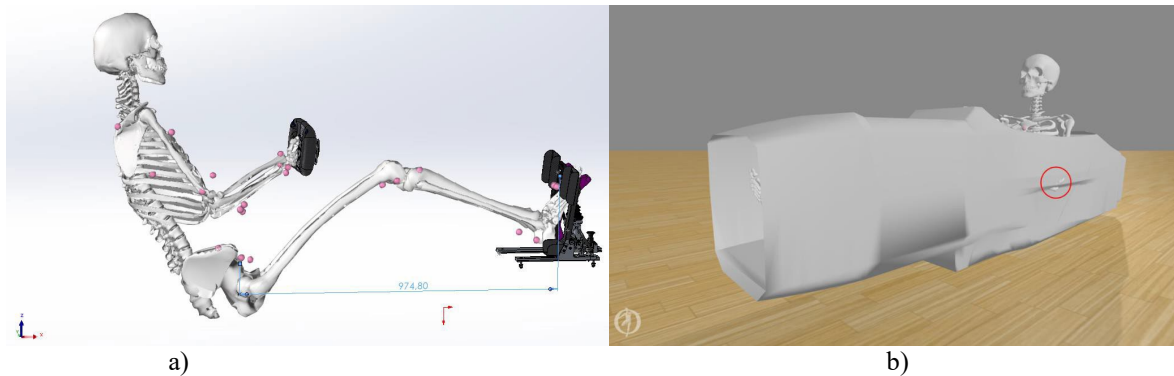


Figura 12: Visión conjunta del modelo biomecánico y algunas partes del monocasco.

Con la implementación de los ajustes propuestos, se logró el diseño final del monoplaza que garantiza la comodidad de los pilotos, cumple con los requisitos normativos establecidos y permite reducir la altura del centro de masas del conjunto.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron un rediseño informado de elementos clave del vehículo, como el asiento, los pedales, el volante y la geometría del monocasco. La nueva configuración no solo mejoró la ergonomía para los pilotos, sino que también consideró aspectos críticos del rendimiento del vehículo, como la distribución del peso y la aerodinámica.

La metodología empleada, combinando un prototipo físico configurable con análisis biomecánico avanzado, demostró ser efectiva para optimizar la posición de conducción en un entorno de ingeniería de competición. Este enfoque podría ser aplicable a otros equipos de Formula Student o incluso a proyectos de diseño del área de la automoción más amplios.

Más allá de los resultados técnicos alcanzados, este estudio ha permitido demostrar el valor del Aprendizaje Basado en Proyectos como metodología docente. La participación activa del estudiantado en todas las fases del proceso —desde la identificación del problema hasta el diseño, análisis y validación de soluciones— ha contribuido al desarrollo de competencias clave como la autonomía, la resolución de problemas complejos, la comunicación técnica y el trabajo colaborativo. El proyecto Formula Student se consolida así como un entorno privilegiado para el aprendizaje significativo en el ámbito de la ingeniería.

5. Referencias

- [1] Gerald M., Fernandes P., Empresa E., “SAE TECHNICAL Cockpits: Design and Development”, (2018)
- [2] Abdullah M. A., Haziq M., Rahman A., Azis M. Z., “Ergonomic study on human-powered vehicles”, Vol. 01063, 1–10, (2017)
- [3] Hidayat H., Anwar M., Harmanto D., Dewi F. K., Orji C. T., Mohd Isa M. R., “Two decades of project-based learning in engineering education: A 21-year meta-analysis”, TEM Journal **13**(4), 3514–3525, (2024). <https://doi.org/10.18421/TEM134-84>
- [4] Kjellberg M., Adawi T., Brolin K., “Challenges in implementing PBL: Chalmers Formula Student as a case”, 43rd Annual SEFI Conference, Orléans, France, June 29–July 2, (2015)
- [5] Andreoni G., Santambrogio G. C., Rabuffetti M., Pedotti A., “Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers”, *Applied Ergonomics* **33**(6), 511-522, (2002)
- [6] Mansfield N., Sammonds G., “Automotive seating comfort: the influence of seat design on vibration discomfort”, *International Journal of Vehicle Design* **80**(1), 1-23, (2019)

- [7] Happee R., Wismans J., “Optimizing the human occupant model”, SAE Technical Paper, 2009-01-2282, (2009)
- [8] Ahmad A., Zaheen S. A., Ahmad I., Talib F., “Cockpit Design of a Formula Student Race Car: An Ergonomics Study”, in Muzammil M., Khan A. A., Hasan F. (Eds.), *Ergonomics for Improved Productivity. Design Science and Innovation*, pp. 679-689, Springer, (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-15-9054-2_79
- [9] Milojević M., Ivanović L., Dimitrijević B., “Design and Analysis of Formula Student Frame”, 9th International Quality Conference, Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, (2015)
- [10] Dabhade A., Pathan K. A., Khan S. A., Jadhav A., “Design and Development of Chassis for Formula Student Vehicle”, *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* **11** (10), 1121-1130, (2020) <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.10.2020.108>
- [11] Marques M. E., Oliveira G., Canuto da Silva G., “Ergonomics study for chassis construction of a SAE Formula Prototype”, SIMEA 2021 – São Paulo, Brasil, Brazilian Society of Automotive Engineering, (2021)
- [12] Delp S. L., Anderson F. C., Arnold A. S., Loan P., Habib A., John C. T., Thelen D. G., “OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **54**(11), 1940-1950, (2007)
- [13] Rajagopal A., Dembia C., DeMers M., Delp D., Hicks J., Delp S., “Full body musculoskeletal model for muscle-driven simulation of human gait”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **63**(10), 2068–2079, (2016)