



Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

Estrategia para el desarrollo de un monoplaza autónomo
en el ISC Racing Team

Autor

Jorge López Guillén

Director

José María Cancer Abóitiz

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Estrategia para el desarrollo de un monoplaza autónomo en el ISC Racing Team”
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Jorge López Guillén

Fecha: 04/ 07/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José María Cancer Abóitiz

Fecha: 04/ 07/ 2022



Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

Estrategia para el desarrollo de un monoplaza autónomo
en el ISC Racing Team

Autor

Jorge López Guillén

Director

José María Cancer Abóitiz

Madrid

A José María Cancer, por tutelarme a lo largo de este proyecto, por aportarme conocimientos de gran valor y por haberme dado la oportunidad de haber aprendido mucho junto a él.

A mi familia, por haber sido mi mayor apoyo y haberme dado todas las oportunidades que he podido tener.

RESUMEN DEL PROYECTO

El proceso de transición de vehículos con motorización de combustión a vehículos con motorización eléctrica es un hecho irreversible dentro de la industria automovilística. Con el objetivo de reducir los niveles de contaminación emitidos por los vehículos de combustión interna, la Comisión Europea ha establecido el año 2035 como fecha límite para la comercialización de nuevos vehículos con motorización de combustión. Por ello, en el contexto de esta transición, los fabricantes de automóviles han comenzado a desarrollar vehículos eléctricos que les permitan cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible demandados por las instituciones públicas y por los usuarios de sus vehículos.

La electrificación de los vehículos facilita, colateralmente, el desarrollo del denominado “Vehículo Autónomo”, siendo éste aquél que tiene la capacidad de percibir el entorno que le rodea actuando en consecuencia por sí mismo. Como los vehículos eléctricos presentan una menor cantidad de componentes mecánicos y una simplificación del funcionamiento en comparación con aquellos con motorizaciones de combustión, su automatización genera un gran interés dentro de la industria automovilística dado que permite mejorar significativamente la seguridad vial, eliminando las variables de errores humanos en la conducción (principal causa de los accidentes).

Dicha automatización depende en gran medida del impulso tecnológico realizado por los fabricantes de vehículos y componentes y por las instituciones públicas y privadas, como las universidades, que invierten recursos para su desarrollo.

Dentro de este contexto, con el objetivo de impulsar el desarrollo tecnológico y la formación de los estudiantes de las escuelas de ingeniería, la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE Internacional) creó en 1982 la competición denominada “Formula Student”. En esta competición, los equipos, formados por estudiantes de las escuelas participantes, han de desarrollar y fabricar un monoplaza funcional y competitivo que se somete a una serie de pruebas estáticas y dinámicas. Actualmente, con una participación de más de mil universidades de diferentes países, la organización de Formula Student se ha propuesto impulsar el desarrollo de monoplazas con motorizaciones eléctricas con el objetivo de eliminar la participación de monoplazas de combustión interna en los próximos años. Esto sigue con las líneas de desarrollo del equipo ISC Racing Team, formado por estudiantes de la Universidad Pontificia Comillas, el cual lleva varios años trabajando en el desarrollo de un vehículo monoplaza eléctrico de competición. Adicionalmente, en los últimos cinco años, algunas universidades han iniciado su participación en una nueva categoría de Formula Student dedicada a los vehículos autónomos, involucrándose dichos equipos en el desarrollo de un vehículo monoplaza autónomo en línea con la tendencia de la industria automovilística actual.

Dada la experiencia adquirida por el ISC Racing Team con el desarrollo de un monoplaza eléctrico pilotado, desde la junta directiva del equipo se ha planteado la posibilidad de estudiar la automatización de dicho monoplaza con el objetivo de situar a la Universidad Pontificia Comillas a la altura del resto de universidades de prestigio.

Dicho todo lo anterior, lo que se pretende en este trabajo de fin de grado es estudiar y analizar las diferentes posibilidades y aspectos que deberían tenerse en cuenta a la hora de evaluar la viabilidad del desarrollo de dicho monoplaza autónomo en un futuro cercano, al igual que analizar su impacto en la estrategia actual del ISC Racing Team. En particular, se ha hecho un especial énfasis en los requerimientos tecnológicos, financieros y organizativos que conlleva este nuevo proyecto. Para ello, se han estudiado las diferentes tecnologías y componentes utilizados en los vehículos autónomos con el

objetivo de identificar aquellos componentes óptimos para cumplir los requerimientos de un monoplaza autónomo de Formula Student. Además, dicha selección de tecnologías y componentes ha sido validada identificando los componentes seleccionados por otros equipos dentro de la misma categoría. Así mismo, se ha analizado el rendimiento en competición de estos equipos haciendo uso de estos componentes.

Tras la identificación y validación de los componentes seleccionados para la automatización del monoplaza se han planteado tres escenarios hipotéticos de inversión, en función del volumen de financiación obtenida por el equipo, para llevar a cabo este proyecto con diferente nivel de ambición y medios.

En cada uno de los escenarios anteriores se han distinguido los principales componentes tecnológicos requeridos por este monoplaza autónomo para su participación en Formula Student. Dichos componentes se refieren a cuatro áreas principales del sistema autónomo. Estas áreas son las siguientes:

- Monitorización del entorno (LiDAR y cámaras)
- Medición de parámetros del vehículo (sistema de localización INS/GNSS y sensores de velocidad)
- Procesamiento de la información (CPU y GPU)
- Gestión de controladores y actuadores (aceleración, frenado y dirección)

Por otra parte, una vez se han identificado los diferentes escenarios de desarrollo se ha estudiado el impacto en recursos humanos que conlleva la implementación de este proyecto en el organigrama actual del equipo, el cual ha alcanzado un grado de funcionalidad óptima tras su profesionalización en la temporada 2021/2022. Por lo tanto, en este trabajo se propone cómo incorporar este nuevo proyecto impactando en la menor medida posible sobre la estructura actual del equipo.

Adicionalmente, se ha analizado el impacto positivo del desarrollo de un monoplaza autónomo en el ISC Racing Team desde la perspectiva de nuestros patrocinadores, única fuente de financiación del equipo. Además, se proponen nuevos sectores industriales que podrían estar interesados en la afiliación con el ISC Racing Team debido a la conexión existente entre el desarrollo de un monoplaza autónomo y sus líneas de negocio.

Por último, se ha descrito un marco temporal de desarrollo del proyecto con el objetivo de estar en situación de competir con dicho monoplaza en la temporada 2023/2024. Para ello se plantea desde el comienzo de la próxima temporada 2022/2023 el inicio de determinadas actividades: formación, financiación y desarrollo.

En conclusión, en este trabajo de fin de grado se analizan los requerimientos tecnológicos, financieros y organizativos ligados al desarrollo de un monoplaza autónomo en el ISC Racing Team. Con ello, **se llega a la conclusión de su viabilidad desde un punto de vista tecnológico y financiero y se describe el impacto positivo que tendría en la Universidad Pontificia Comillas, en el conjunto de entidades que colaboran con el mismo y en el futuro desarrollo profesional de sus estudiantes** al tener la oportunidad de aplicar de forma práctica la formación obtenida en la escuela.

ABSTRACT

The transition process from vehicles with combustion engines to vehicles with electric engines is an irreversible fact within the automobile industry. With the aim of reducing the levels of pollution emitted by internal combustion engine vehicles, the European Commission has established the year 2035 as the deadline for the marketing of new vehicles with combustion engines. For this reason, in the context of this transition, car manufacturers have begun to develop electric vehicles that allow them to meet the sustainable development objectives demanded by public institutions and by the users of their vehicles.

The electrification of vehicles facilitates, collaterally, the development of the so-called "Autonomous Vehicle", this being the one that has the ability to perceive the environment that surrounds it, acting accordingly on its own. As electric vehicles have a smaller number of mechanical components and a simplified operation compared to those with combustion engines, their automation generates great interest within the automotive industry since it allows to significantly improve road safety, eliminating error variables driving (main cause of accidents).

This automation depends to a great extent on the technological impulse carried out by vehicle and component manufacturers and by public and private institutions, such as universities, which invest resources in its development.

Within this context, with the aim of promoting technological development and the training of students in engineering schools, the Society of Automotive Engineers (SAE International) created in 1982 the competition called "Formula Student". In this competition, the teams, made up of students from the participating schools, must develop and manufacture a functional and competitive autonomous vehicle that is subjected to a series of static and dynamic tests. Currently, with the participation of more than a thousand universities from different countries, the Formula Student organization has set out to promote the development of autonomous vehicles with electric motors with the aim of eliminating the participation of internal combustion autonomous vehicles in the coming years. This follows the lines of development of the ISC Racing Team, made up of students from the Comillas Pontifical University, which has been working for several years on the development of an autonomous vehicle electric competition vehicle. Additionally, in the last five years, some universities have begun their participation in a new category of Formula Student dedicated to autonomous vehicles, involving these teams in the development of an autonomous vehicle in line with the trend of the current automobile industry.

Given the experience acquired by the ISC Racing Team with the development of a piloted electric autonomous vehicle, the team's management board has considered the possibility of studying the automation of said autonomous vehicle with the aim of placing the Universidad Pontificia Comillas at the level of other prestigious universities.

Having said all the above, what is intended in this Final Degree Project is to study and analyze the different possibilities and aspects that should be taken into account when evaluating the feasibility of developing said autonomous single seater in the near future, as well as to analyze its impact on the current strategy of the ISC Racing Team. Special emphasis has been placed on the technological, financial, and organizational requirements that this new project entails. To do this, the different technologies and components used in autonomous vehicles have been studied with the aim of identifying those optimal components to meet the requirements of an autonomous Formula Student autonomous

vehicle. In addition, said selection of technologies and components has been validated by identifying the components selected by other teams within the same category. Likewise, the performance in competition of these teams has been analyzed using these components.

After the identification and validation of the selected components for the automation of the car, three hypothetical investment scenarios have been proposed, to carry out this project, depending on the volume of financing obtained by the team with different level of ambition and means.

In each of the previous scenarios, the main technological components required by this autonomous car for its participation in Formula Student have been distinguished. These components refer to four main areas of the autonomous system. These areas are as follows:

- Environment monitoring (LiDAR and cameras)
- Vehicle parameter measurement (INS/GNSS location system and speed sensors)
- Information processing (CPU and GPU)
- Controllers and actuators (acceleration, braking and steering)

On the other hand, once the different development scenarios have been identified, the impact on human resources that the implementation of this project entails in the current organization chart of the team has been studied. The team has reached an optimal degree of functionality after its professionalization in the 2021/2022 season. Therefore, this paper proposes how to incorporate this new project impacting in the smallest way possible the current structure of the team.

Additionally, the positive impact of the development of an autonomous vehicle in the ISC Racing Team has been analyzed from the perspective of our sponsors, the only source of financing for the team. In addition, new industries that could be interested in affiliation with the ISC Racing Team due to the connection between the development of an autonomous vehicle and its business lines are proposed.

Finally, a timeframe for project development has been described with the aim of being able to compete with said autonomous vehicle in the 2023/2024 season. To do this, the start of certain activities is proposed from the beginning of the 2022/2023 season: training, financing, and development.

In conclusion, this Final Degree Project analyzes the technological, financial, and organizational requirements linked to the development of an autonomous vehicle in the ISC Racing Team. With this, **the conclusion is reached of its viability from a technological and financial point of view and the positive impact that it would have on Comilla's Pontifical University, on the group of entities that collaborate with it and on the future professional development of Comilla's students** who will have the opportunity to apply in a practical way the training obtained at the school.

Contenido

1. Introducción.....	15
2. Evolución de la normativa de Formula Student	20
3. Vehículos autónomos	22
3.1 Normativa sobre los niveles de automatización	22
3.2 Principales componentes del sistema de automatización	24
3.2.1 Sensores.....	24
3.2.2 Procesamiento de la información	26
3.2.3 Tipos de actuadores.....	27
4. Monoplaza Autónomo de Formula Student	29
4.1 Requerimientos del monoplaza autónomo	31
4.2 Sensores del entorno del monoplaza autónomo	33
4.2.1 Radar	34
4.2.2 Sensor de ultrasonidos.....	34
4.2.3 Cámaras.....	35
4.2.4 LiDAR.....	36
4.3 Sensores de parámetros del monoplaza autónomo	37
4.3.1 IMU – Unidad de medición inercial (IMU)	37
4.3.5 INS – Inertial Navigation System (INS)	38
4.3.2 GPS – Global Positioning Systems	39
4.3.3 GNSS – Global Navigation Satellite System	39
4.3.4 GSS – Ground Speed Sensor.....	40
4.3.5 Sensores de velocidad en las ruedas.....	40
4.4 Procesadores del monoplaza autónomo.....	41
4.5 Controladores y actuadores del monoplaza autónomo	42
4.5.1 Acelerador	43
4.5.2 Freno	43
4.5.3 Dirección	44
4.6 Análisis de los sistemas autónomos utilizado por otros equipos.....	46
4.6.1 KA-RaceIng (Karlsruhe, Alemania).....	46
4.6.2 StarkStrom Augsburg (Augsburg, Alemania).....	48
4.6.3 AMZ Racing (Zúrich, Suiza).....	48
4.6.4 Ecurie Aix (Aachen, Alemania).....	50
4.7 Conclusiones preliminares en base al estudio realizado.....	52
5. Análisis de costes de la inversión requerida.....	54
5.1 Descripción de la estructura de hardware del sistema autónomo	54

5.2 Análisis resumen de costes de los distintos escenarios	62
5.2.1 Escenario 1	62
5.2.2 Escenario 2	63
5.2.3 Escenario 3	64
5.3 Conclusión	66
6. Análisis del impacto en la estructura actual del equipo.....	67
6.1 Estructura actual del equipo	67
6.2 Estructura del equipo requerida para la implementación del sistema autónomo .	68
7. Análisis de la financiación requerida en este proyecto.....	70
7.1 Sistema actual de financiación del equipo.....	70
7.2 Propuestas sobre financiación a futuro.....	72
8. Marco temporal de desarrollo del sistema autónomo	74
9. Consideraciones finales: ¿Por qué se debe impulsar este proyecto?	75
10. Bibliografía.....	76
11. Anexo A – Configuraciones de sistemas autónomos adicionales	78
12. Anexo B – Información sobre los fabricantes contactados	82
13. Anexo C – Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	85

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Formula Student de la Universidad de Texas en Arlington, 1986	15
Ilustración 2. Formula Student Germany 2019	16
Ilustración 3. Primer proyecto del ICAI Speed Club, 2016.....	17
Ilustración 4. Patrocinadores equipo ISC Racing Team Formula Student 2022	17
Ilustración 5. Niveles de automatización en automóviles	23
Ilustración 6. Radar frontal de un vehículo [7].....	24
Ilustración 7. Emisión de ultrasonidos en un vehículo [8]	25
Ilustración 8. Imágenes obtenidas por las cámaras de un Tesla Model X [9]	25
Ilustración 9. Imagen tridimensional obtenida con LiDAR, sensor fabricado por Velodyne. [10].....	26
Ilustración 10. Actuador lineal electro-mecánico MA2T, TiMOTION Europe [11]	28
Ilustración 11. CES 2022 Indy Autonomous Challenge [12].....	29
Ilustración 12. Render del monoplaza ISF-04 del ISC Racing Team	30
Ilustración 13. Prueba Skid Pad, monoplaza autónomo, Formula Student Spain. [13] .	32
Ilustración 14. Proceso de diseño del sistema autónomo	33
Ilustración 15. Precisión de imagen generada en un mismo entorno por LiDAR y radar de alta resolución. [14]	34
Ilustración 16. Imagen de cámara del monoplaza autónomo del equipo AMZ Racing [21]	35
Ilustración 17. LiDAR Velodyne posicionado en el alerón frontal del monoplaza del equipo Monash Motorsport [15].....	36
Ilustración 18. Diagrama comparativo entre LiDAR, radar, ultrasonidos y cámaras	37
Ilustración 19. Ejes de medición del IMU [16]	38
Ilustración 20. Esquema de funcionamiento del INS [17].....	38
Ilustración 21. Obtención de la ubicación del receptor con tres satélites [18]	39
Ilustración 22. Radio de las órbitas de satélites de navegación [19]	40
Ilustración 23. Sensor de velocidad en el eje trasero de un Formula Student [20]	40
Ilustración 24. Arquitectura hardware-software del sistema autónomo del Formula Student AMZ Racing 2018. [21]	42
Ilustración 25. Sistema de frenada de emergencia incorporado en el monoplaza de AMZ Racing Team [21]	44
Ilustración 26. Sistema de dirección del monoplaza de AMZ Racing Team [21].....	45
Ilustración 27. Monoplaza KIT21d del equipo KA-RaceIng, 2021[24].....	47
Ilustración 28. Monoplaza Zapp DV del equipo StarkStrom Augsburg, 2021[25].....	48
Ilustración 29. Monoplaza Pilatus del equipo AMZ Racing, 2021 [26].....	50

Ilustración 30. Monoplaza eace07.d del equipo Ecurie Aix, 2021 [27]	51
Ilustración 31. Estructura del sistema autónomo en el ISF-04 del ISC Racing Team ...	55
Ilustración 32. Cámara Basler Ace 2 [28]	56
Ilustración 33. VectorNav VN-200 Rugged [29]	57
Ilustración 34. Cincoze DS-1201 [30]	58
Ilustración 35. Comparativa de velocidad de procesamiento de imágenes entre Jetson TX2 vs. Jetson AGX Xavier [31]	60
Ilustración 36. Ouster OS1-32 [32]	62
Ilustración 37. Organigrama del ISC Racing Team Formula Student 2021/2022.....	67
Ilustración 38. Organigrama propuesto para la incorporación del sistema autónomo ...	68
Ilustración 39. Patrocinadores equipo ISC Racing Team Formula Student 2021/2022. 70	
Ilustración 40. Sectores involucrados tras la implementación del sistema autónomo....	72
Ilustración 41. Propuestas de empresas de interés para patrocinio.....	73
Ilustración 42. Monoplaza CAT 12D del equipo UPC, 2019.....	78
Ilustración 43. Frontal del monoplaza SC19 del equipo Squadra Corse, 2019.....	79
Ilustración 44. Frontal del monoplaza Edge8 D del equipo TUW Racing, 2017.....	80
Ilustración 45. Componentes del sistema autónomo del monoplaza del equipo Beijing IT, 2019	81
Ilustración 46. ODS	85

Índice de tablas

Tabla 1. Especificación técnica del Cincoze DS-1201 presupuestado	59
Tabla 2. Presupuesto del Escenario 1	63
Tabla 3. Presupuesto del Escenario 2	64
Tabla 4. Presupuesto del escenario 3	65
Tabla 5. Resumen de importes de costes tecnológicos y administrativos estimados en cada escenario	66

1. Introducción

En 1982 nace en Estados Unidos la competición Formula SAE (Society of Automotive Engineers), también conocida como Formula Student. Se trata de una competición en la que las escuelas técnicas de ingeniería diseñan y fabrican un monoplaza de competición con el que los estudiantes universitarios tienen la oportunidad de mostrar y poner en práctica los conocimientos adquiridos.



Ilustración 1. Formula Student de la Universidad de Texas en Arlington, 1986

Dentro de esta competición hay una serie de pruebas dinámicas y pruebas estáticas. Todas estas pruebas son puntuadas y son relevantes para el resultado final obtenido por cada equipo. Por ello, el ganador de la competición no es aquel con el monoplaza más rápido en un circuito, sino aquel que haya obtenido una mayor puntuación en la sumatoria de las diferentes pruebas.

Las pruebas dinámicas son cronometradas. Dichas pruebas son las siguientes:

- Pilotaje en una skid pad. Se trata de un circuito delimitado por conos formando un ocho en un área amplia de pavimento.
- Prueba de aceleración. Esta prueba se realiza en una recta de 75 metros, empezando el monoplaza de forma estática en el inicio del recorrido.
- Prueba de autocross. Se realiza en un tramo de 1.5 km delimitado por conos con distintas zonas de curvas y rectas.
- Prueba de rendimiento y eficiencia. Se analiza la relación entre la eficiencia del vehículo, midiendo la cantidad de energía consumida y el tiempo que conlleva completar un número de vueltas determinado en un circuito.

Por otra parte, las pruebas estáticas son las siguientes:

- Presentación de un Business Plan. Cada equipo ha de presentar un plan de negocio donde debe mostrar su capacidad de monetizar y escalar su proyecto.
- Análisis de costes y fabricación. Se analizan los costes de desarrollo del proyecto de cada equipo.
- Ingeniería del diseño. Se deben exponer los aspectos técnicos del desarrollo del monoplaza.

En las competiciones actuales de Formula Student se distinguen tres categorías, dos dedicadas a monoplazas pilotados, con motorizaciones de combustión y eléctricas, y una tercera dedicada a monoplazas autónomos.

La competición de Formula Student es un conjunto de experiencias que somete a los equipos a distintos escenarios prácticos de la vida. No solo se enfoca en la construcción de un monoplaza rápido, sino que debe haber trabajo en equipo, innovación, desarrollo, cumplimiento de una normativa, gestión de presupuesto, relaciones con patrocinadores, etc. Es decir, se pretende preparar a los estudiantes a enfrentarse con un proyecto real y desafiante. Deben mostrar su máximo potencial haciendo uso de sus capacidades técnicas y personales para lograr un monoplaza exitoso.

Debido al gran interés que genera la Formula Student, con el paso de los años esta competición ha tenido un gran crecimiento a nivel global. Así, actualmente hay eventos en Estados Unidos, Australia, Japón y Europa, y participan en total más de mil universidades en todo el mundo. Hay una normativa general que se aplica a todas las competiciones de Formula Student de cada año. De esta forma, todos los equipos trabajan bajo las mismas normas en los diferentes países y pueden así participar en distintos eventos.



Ilustración 2. Formula Student Germany 2019

De igual manera, en 2009 fue creada en Aragón, España, otra competición adicional que recibió el nombre de Motostudent. En ella los participantes debían desarrollar una moto de competición. Con el objeto de participar en este evento nació en 2015 la asociación ICAI Speed Club, renombrada en 2021 como ISC Racing Team. Esta asociación se formó con un grupo de veinte estudiantes amantes del mundo del motor que decidieron aplicar sus conocimientos de ingeniería para desarrollar una moto de combustión interna con la que competir en Motostudent.



Ilustración 3. Primer proyecto del ICAI Speed Club, 2016

En 2018 este proyecto creció con la intención de fabricar a la par una moto con propulsión eléctrica, con la que participar en Motostudent Electric, y un monoplaza eléctrico con el que competir en Formula Student. Desde entonces, la asociación de ISC Racing Team está formada por dos equipos: un equipo de Motostudent y otro equipo de Formula Student. Aunque ambos equipos pertenecen a una misma asociación, cada uno tiene su propio proyecto, presupuesto y equipo, siendo independientes entre sí.

Actualmente, tras varios años trabajando en ambos proyectos, el ISC Racing Team está formado por aproximadamente 120 estudiantes de la Universidad Pontificia Comillas, generando cada año más interés.

La asociación cuenta con el apoyo de numerosas empresas que financian el desarrollo de los vehículos mediante patrocinios. Estas empresas, que apuestan por el talento joven, la innovación y la sostenibilidad, son las que permiten mantener vivos ambos proyectos. Los acuerdos de patrocinio se establecen según el proyecto, siendo independientes las colaboraciones con ambos equipos. Para la temporada 2021/2022 el equipo de Fórmula Student cuenta con los siguientes patrocinadores:



Ilustración 4. Patrocinadores equipo ISC Racing Team Formula Student 2022

Los mejores resultados del ISC Racing Team en las distintas competiciones son los siguientes: en la competición de MotoStudent en 2015 el proyecto de la moto de combustión obtuvo un cuarto puesto en el proyecto de innovación y en 2021 el proyecto de la moto eléctrica obtuvo el primer puesto en la prueba de frenada dinámica. Por su parte en Formula Student, en 2021 el proyecto del monoplaza obtuvo un segundo puesto en el plan de negocio, proyecto que tuve la oportunidad de desarrollar junto a mi compañera Itziar González Rodríguez de Biedma.

Actualmente, la lucha contra el cambio climático se considera una de las principales prioridades globales de nuestra sociedad. En la Conferencia de París sobre el Clima (COP21) se firmó el Acuerdo de París, en el que 195 países acordaron limitar el calentamiento global [1]. La principal causa del calentamiento global es la emisión de dióxido de carbono (CO_2). Éste es el gas que tiene una mayor incidencia en el efecto invernadero. Con el objeto de controlar el calentamiento global se propone reducir significativamente las emisiones de dicho gas. Éste es emitido principalmente a través de la quema de combustibles fósiles. En Europa más del 30% de las emisiones de CO_2 son producidas por el transporte, del cual un 72% es emitido por el transporte en carretera [2]. Por ello, una de las propuestas para controlar las emisiones de CO_2 está enfocada en la industria automovilística. Esto exige la renovación del parque móvil con vehículos más eficientes y menos contaminantes, pudiendo así combatir dichos niveles de contaminación. Como ejemplo, la Comisión Europea ha fijado el año 2035 como fecha final para la venta de turismos de combustión en la UE [3]. No obstante, se da el caso de Reino Unido que ha llegado a tomar medidas incluso más restrictivas. Su propuesta es prohibir la venta de vehículos de combustión en el año 2030 [4]. Se considera vehículo de combustión a todos aquellos vehículos con motorizaciones de gasolina, diésel, gas e híbridos. Es decir, los únicos vehículos nuevos que podrán comercializarse serán aquellos con motorizaciones eléctricas. Por ende, el principal interés de la industria automovilística es impulsar el desarrollo de vehículos eléctricos y la infraestructura que esto conlleva.

Es por ello, por lo que competiciones como la Formula Student en su versión eléctrica son muy atractivas para aquellos estudiantes universitarios con interés en aprender y desarrollar conocimientos con gran valor que pueden generar un impacto social en su futuro profesional.

El foco en los vehículos eléctricos conlleva, colateralmente, una posibilidad de mayor desarrollo de los vehículos autónomos. La facilidad de automatización de los vehículos eléctricos suscita un gran interés por parte de las marcas fabricantes de automóviles. Estos vehículos presentan una menor cantidad de componentes mecánicos y parámetros de funcionamiento a controlar en comparación con aquellos con motorizaciones de combustión, facilitando así el desarrollo de sistemas de automatización del vehículo.

En el año 2021/2022 se ha implementado en la Universidad Pontificia Comillas un nuevo grado en la escuela de ingeniería enfocado en Matemáticas e Inteligencia Artificial. En el plan de estudios de este nuevo grado se cursan asignaturas como Análisis Matemático y Cálculo Vectorial, Cognición humana e Inteligencia Artificial, Aprendizaje automático, Optimización y simulación, Robots móviles autónomos, etc. La formación de este grado ofrece a los estudiantes sólidos conocimientos de matemáticas aplicadas, ciencias de la computación e Inteligencia Artificial. Es por ello, por lo que, con la creación de este grado, el crecimiento del equipo y el interés suscitado en los estudiantes, el nuevo objetivo a medio plazo de la asociación podría estar en el desarrollo de un monoplaza eléctrico autónomo con el que participar en la categoría específica para estos vehículos.

En particular, en este trabajo de fin de grado, lo que se pretende es contemplar las diferentes posibilidades y aspectos que deberían tenerse en cuenta a la hora de evaluar la viabilidad del desarrollo de dicho monoplaza autónomo en un futuro cercano, al igual que analizar su impacto en la estrategia actual del ISC Racing Team.

2. Evolución de la normativa de Formula Student

En el año 2017 se creó una nueva categoría para las competiciones de Formula Student llamada Driverless Vehicle (DV), en español “Vehículo Autónomo”. Esta nueva categoría seguía la misma estructura de las dos ya existentes, diferenciándose en que los monoplazas debían ser autónomos. Es decir, debían tener la capacidad de poder realizar las pruebas dinámicas de forma autónoma sin ser pilotados. En esta categoría la competición buscaba identificar el mejor sistema de automatización de un monoplaza desarrollado por las universidades participantes. Dado que el objetivo perseguido en esta categoría era el valorar el sistema de automatización desarrollado, se permitía a los equipos poder participar convirtiendo en autónomo un monoplaza pilotado en ediciones anteriores. Por ello, la reutilización de un monoplaza de otras ediciones con motorización de combustión o eléctrica acabó siendo la tendencia más común entre los equipos, dado que así se evitaba tener que desarrollar un nuevo monoplaza.

En un primer momento, la normativa obligaba a los equipos a participar con monoplazas distintos en cada categoría en la que compitiesen (pilotados y autónomos). Sin embargo, la organización pronto observó dos inconvenientes. El primero de ellos era el de que los equipos optaban por seguir desarrollando monoplazas pilotados y muchos equipos no podían asumir el alto coste de desarrollar un monoplaza pilotado y otro autónomo al mismo tiempo. En consecuencia, se observó que la participación en la categoría Driverless Vehicles era inferior a la inicialmente estimada. El segundo inconveniente estaba en que aquellos equipos que participaban en dos categorías distintas no solían alcanzar un buen resultado en la categoría Driverless Vehicles. Esto se debía a que el lapso de tiempo transcurrido desde el desarrollo del monoplaza pilotado hasta que se transformaba a autónomo dificultaba la coordinación entre los equipos. Los estudiantes que desarrollaron el monoplaza pilotado en ediciones anteriores bien se habían graduado ya o se encontraban centrados en el desarrollo de un nuevo monoplaza pilotado. Esto hacía más difícil a los estudiantes trabajar en la automatización de dicho monoplaza desarrollado anteriormente. Por lo anterior, dados los altos costes y las dificultades de coordinación de proyectos, Formula Student tomó la decisión de cambiar la normativa para el año 2021/2022.

Con la nueva normativa desaparece la categoría Driverless Vehicles y nace la categoría denominada Driverless Cup. El objetivo de este cambio es el de desarrollar un único vehículo que pueda participar como monoplaza pilotado de combustión o eléctrico y al mismo tiempo participar como vehículo autónomo en la Driverless Cup. Es decir, anteriormente se exigía participar con dos monoplazas diferentes en cada categoría y actualmente se podrá desarrollar un único monoplaza y participar en dos categorías. De esta forma se fomenta en los equipos el interés por automatizar sus monoplazas.

La puntuación para las categorías de monoplazas pilotados sigue siendo sobre un máximo de 1000 puntos, repartidos de la siguiente forma:

- Business Plan. Puntuación máxima 75 puntos.
- Costes y fabricación. Puntuación máxima 100 puntos.
- Ingeniería del diseño. Puntuación máxima 150 puntos.
- Skid Pad. Puntuación máxima 75 puntos.
- Aceleración. Puntuación máxima 75 puntos.
- Autocross. Puntuación máxima 100 puntos.
- Rendimiento. Puntuación máxima 250 puntos.
- Eficiencia. Puntuación máxima 75 puntos.

La puntuación de la nueva Driverless Cup será sobre un máximo de 600 puntos, repartidos de la siguiente forma:

- Ingeniería del diseño. Puntuación máxima 150 puntos.
- Skid Pad. Puntuación máxima 75 puntos.
- Aceleración. Puntuación máxima 75 puntos.
- Autocross. Puntuación máxima 100 puntos.
- Trackdrive. Puntuación máxima 200 puntos.

Con independencia de poder participar en la Driverless Cup con monoplazas de combustión o eléctricos, un objetivo prioritario de Formula Student es el de reducir paulatinamente la participación de motorizaciones de combustión fomentando así el desarrollo de vehículos eléctricos. La responsabilidad social por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el desarrollo de vehículos de emisión cero debe incitar a los equipos a trabajar en el desarrollo de vehículos sostenibles, en línea con los objetivos fijados por la Comisión Europea en relación con la comercialización de vehículos.

3. Vehículos autónomos

Antes de comenzar a profundizar en el estudio del monoplaza autónomo, se requiere una introducción acerca de determinados conceptos básicos sobre los vehículos autónomos. Un vehículo autónomo es aquel que, haciendo uso de su hardware y software, puede llevar a cabo acciones dinámicas de conducción. Se entiende por acciones dinámicas las variaciones de movimiento del vehículo de manera longitudinal o lateral en su conducción. El rango de estas acciones puede ir desde la implantación de sistemas de seguridad que asistan en la conducción hasta la completa automatización del vehículo.

3.1 Normativa sobre los niveles de automatización

Con el ánimo de normalizar los distintos grados de automatización de los automóviles, en el año 2014 Formula SAE (Society of Automotive Engineers) estableció la norma SAE J3016 [5], en la cual se definen los distintos niveles de conducción autónoma en los automóviles. La clasificación del nivel de autonomía de los vehículos se hace en base a cuatro aspectos principales:

- Quién es responsable de las acciones dinámicas del vehículo (conductor o sistema). Se entiende como acción dinámica todo movimiento longitudinal (acelerar o frenar) y lateral (dirección) del vehículo.
- Quién es responsable de la detección y respuesta ante sucesos imprevistos. La monitorización del entorno y el análisis de los riesgos puede ser realizado por el conductor o por el sistema de automatización.
- Quién es responsable de responder ante un eventual fallo del sistema automatizado. En caso de fallo de dicho sistema éste puede ser respaldado bien por el propio conductor o bien podría existir otro sistema automatizado que actuase como respaldo.
- Limitaciones en el funcionamiento del sistema automatizado ante condiciones determinadas. En base al nivel de automatización del sistema se pueden presentar diferentes limitaciones que, en su caso, deben ser respaldadas por el conductor.

En base a los cuatro aspectos anteriores la norma distingue seis niveles diferentes numerados desde el nivel 0 al nivel 5:

- Nivel 0: Ninguna automatización. La conducción del vehículo recae absolutamente sobre el conductor. En este nivel también se sitúan aquellos vehículos equipados con sistemas de seguridad activos, como puede ser el sistema de antibloqueo de los frenos (ABS), el control de estabilidad (ESP), etc. La implicación del conductor en la conducción es total.
- Nivel 1: Asistencia al conductor. El vehículo puede llevar a cabo acciones dinámicas de forma lateral o longitudinal, no simultáneamente, con la supervisión del conductor en todo momento. Como ejemplo, dentro de las posibles acciones que puede llevar a cabo el vehículo está el control de velocidad en base a la señalización de tráfico. La implicación del conductor en la conducción sigue siendo total.

- Nivel 2:** Automatización parcial. El vehículo puede llevar a cabo acciones dinámicas de forma lateral o longitudinal, al mismo tiempo, y solo es necesaria la supervisión del conductor. El sistema de autonomía en este nivel es capaz de detectar ciertos objetos y sucesos y responder en consecuencia, por lo que el conductor deberá seguir atento y solo podrá retirar las manos del volante y la vista temporalmente. En este nivel están, por ejemplo, aquellos vehículos equipados con *Lane Keeping System (LKS)*, sistema que mantiene el vehículo entre carriles o corrige la dirección en caso de distracción del conductor.
- Nivel 3:** Automatización condicional. El vehículo está capacitado para realizar el total de las acciones dinámicas habituales con la posible intervención del conductor en caso de fallo del sistema. Los vehículos de nivel 3 de autonomía analizan el entorno y toman decisiones en base a las distancias, objetos o peligros que haya alrededor. El conductor puede retirar las manos del volante y la vista de la carretera, pero ha de seguir disponible para conducir en caso de ser necesario.
- Nivel 4:** Alta automatización. El vehículo puede realizar la totalidad de las acciones dinámicas incluso en caso de un posible fallo del sistema. Éste es capaz de analizar las condiciones y tomar las decisiones adecuadas con el menor riesgo posible. El conductor no tiene por qué estar supervisando las acciones del vehículo, aunque puede tomar el control del mismo en caso de desearlo. Es decir, aunque se trata de un vehículo completamente automatizado sigue llevando control de acelerador, freno y volante que podrían ser utilizados por el conductor.
- Nivel 5:** Automatización absoluta. El vehículo tiene el control total de las acciones dinámicas en todo momento. Este vehículo está capacitado para tomar decisiones ante cualquier situación y condición meteorológica. Por ello, vehículos con nivel 5 de autonomía se consideran vehículos sin conductor y carecen de volante y de pedales.

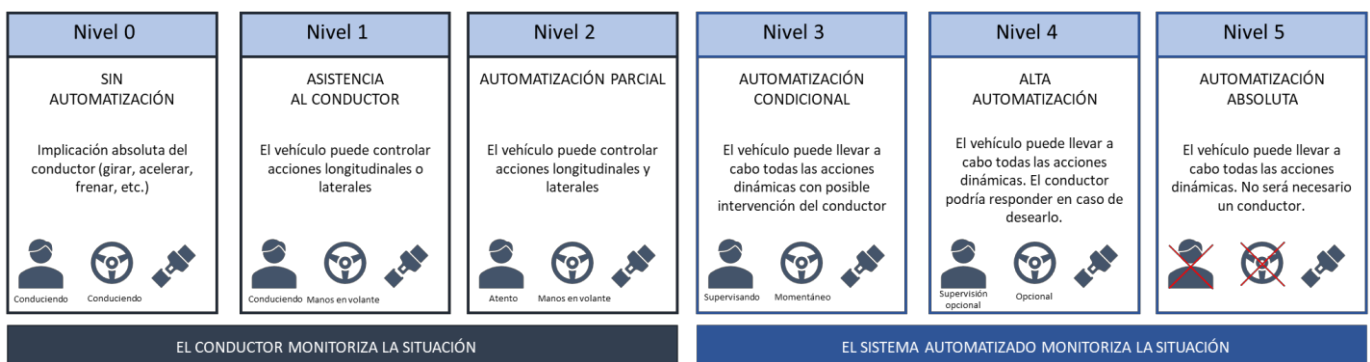


Ilustración 5. Niveles de automatización en automóviles

3.2 Principales componentes del sistema de automatización

El correcto funcionamiento de un vehículo autónomo requiere del desarrollo de un sistema que, al igual que realizaría un conductor, pueda percibir el entorno, tomar las decisiones que se consideren más adecuadas y actuar en consecuencia. Esto se logra mediante la combinación de sensores, procesamiento computacional y actuadores.

3.2.1 Sensores

Los sensores son los encargados de la percepción de señales (auditivas, visuales, térmicas, etc). En base al tipo de sensor utilizado estos pueden informar de parámetros del vehículo tales como su velocidad, temperaturas de componentes y fluidos, presiones de sistemas, etc, o detectar e identificar objetos y capturar imágenes del entorno del vehículo.

Para percibir información del entorno del vehículo hay distintos tipos de sensores utilizados en la industria de vehículos autónomos. Estos sensores son:

- Radar (Radio Detection and Ranging): El funcionamiento del radar se fundamenta en la medición del retraso existente desde la emisión de microondas hasta el retorno de su señal reflejada en los objetos. Esto permite conocer la distancia a la que se encuentran los objetos a su alrededor. La principal ventaja de esta tecnología es su alto rendimiento bajo condiciones ambientales exteriores adversas. Es decir, el radar mantiene la precisión de sus señales ante condiciones lumínicas y meteorológicas desfavorables. Esto se debe al tipo de ondas emitidas por los radares: ondas electromagnéticas. Según la banda de frecuencia usada se detectarán objetos a menor o mayor distancia, utilizándose frecuencias bajas (24-29 GHz) para distancias cortas y frecuencias altas (76-77 GHz) para distancias largas [6]. Adicionalmente, otra ventaja de la tecnología radar es su gran utilidad a la hora de detectar objetos en movimiento en su entorno, como es el caso de cualquier vehículo circulando por la vía pública. Su principal desventaja está en la limitación de la utilidad de su información ya que solo permite detectar y conocer la distancia a la que se encuentran los objetos. No consiguiendo por ello identificarlos. Por este motivo, siempre debe de ir acompañado de alguna otra tecnología de sensores.

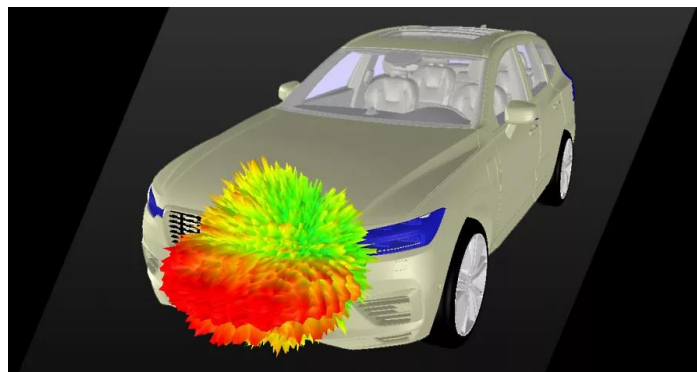


Ilustración 6. Radar frontal de un vehículo [7]

- **Sensores de ultrasonidos:** El funcionamiento del sensor de ultrasonidos se fundamenta en la medición del retraso existente desde la emisión de ondas ultrasónicas hasta el retorno de la señal de éstas reflejada en los objetos. Este tipo de tecnología permite detectar objetos a corta distancia, siendo por ello su principal uso la detección de objetos cercanos. Este sería el caso de un vehículo a la hora de realizar una maniobra de aparcamiento. La desventaja de los sensores de ultrasonidos es su poca utilidad a media o larga distancia, al no producir señales fiables. Por lo tanto, únicamente pueden utilizarse en distancias cortas.



Ilustración 7. Emisión de ultrasonidos en un vehículo [8]

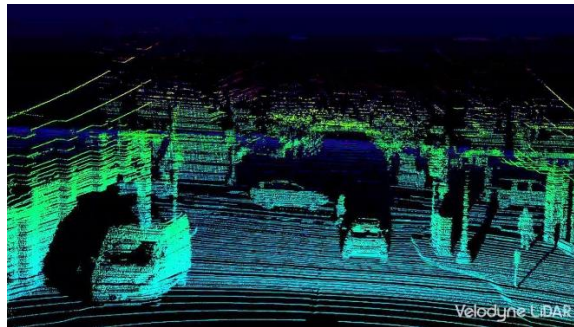
- **Cámaras:** La toma de imágenes es la forma sensorial más semejante al ojo humano. Esta tecnología permite obtener imágenes de gran resolución que sirven para reconocer aspectos relevantes del entorno. Una de sus ventajas está en que su funcionamiento no se ve afectado por la emisión de otras señales, como si puede suceder en los radares con las ondas electromagnéticas o en los sensores de ultrasonidos. Como principal desventaja se encuentra su bajo rendimiento en condiciones meteorológicas adversas o de baja luminosidad.



Ilustración 8. Imágenes obtenidas por las cámaras de un Tesla Model X [9]

- **LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging):** El LiDAR se fundamenta en la medición del retraso existente desde la emisión de señales láser hasta el retorno de su señal reflejada en los objetos. Es capaz de reproducir una imagen tridimensional de su alrededor conociendo la distancia exacta entre el foco emisor y cada punto del entorno. El principal beneficio de la tecnología LiDAR es el gran rango de visión que tiene ya que permite generar una imagen tridimensional del entorno incluso en condiciones con cambios de luminosidad u oscuridad. Como

principal desventaja está el coste de implementación de esta tecnología y la gran potencia de procesamiento que requiere.



*Ilustración 9. Imagen tridimensional obtenida con LiDAR, sensor fabricado por Velodyne.
[10]*

Dentro de la industria automovilística actual hay varios enfoques acerca de cuál es la tecnología óptima para reconocer el entorno en los vehículos autónomos. Así, fabricantes como Tesla invierten en el desarrollo de radares y cámaras, sin hacer uso de LiDAR. Otros fabricantes como Toyota, Volkswagen, Google o UBER, están centrando sus recursos en el desarrollo del LiDAR como principal tecnología, dejando como sensores complementarios las cámaras y los radares.

3.2.2 Procesamiento de la información

Una vez percibido el entorno del vehículo mediante las señales emitidas por sus sensores es necesario que un ordenador procese dicha información y tome las decisiones de actuación adecuadas. El procesamiento computacional sustituye al cerebro humano en la conducción por lo que son los procesadores incorporados en el vehículo los encargados de procesar la información emitida por los sensores y proporcionar una respuesta adecuada. Estos procesadores deben tener las siguientes cualidades:

- Procesamiento escalar y paralelo. El procesamiento escalar es el procesamiento más simple, operando únicamente con un dato por cada instrucción. Por otro lado, el procesamiento paralelo es el más complejo, operando distintas instrucciones al mismo tiempo.
- Inteligencia artificial y procesamiento vectorial. La finalidad de la inteligencia artificial es imitar la inteligencia humana al realizar tareas. Para ello debe poder lograr un autoaprendizaje con el que mejorar, analizando los datos obtenidos en cada una de las acciones. Esto implica una gran demanda de rendimiento en los procesadores, siendo necesario hacer uso de procesamiento vectorial con el cual poder acelerar la velocidad de cómputo de cada operación.
- Procesador de cámaras. Los vehículos autónomos han de ir equipados con cámaras con las que poder obtener información visual del entorno. El nivel de información extraído de las imágenes depende de la complejidad de procesamiento al que estas se vean sometidas. Se puede realizar un procesamiento más simplificado, reconociendo únicamente objetos del entorno, o incluso utilizar esas imágenes para funciones mucho más complejas como es en el caso de la

estimación de distancias entre objetos. El procesamiento de las cámaras implica el filtrado de las imágenes y requiere de una gran potencia de computación.

- Realizar un autoaprendizaje analizando las decisiones tomadas para poder mejorar y aprender. Al llevar a cabo cada tarea la inteligencia artificial analiza la información de sus sensores con el fin de poder aprender y mejorar su respuesta en acciones similares.
- Garantizar la seguridad del vehículo. Las decisiones tomadas por los procesadores del vehículo deben garantizar la seguridad de sus pasajeros tanto como de los sujetos y objetos que se encuentren en su entorno.
- Garantizar la ciberseguridad ante un posible ciberataque. El acceso de los vehículos autónomos a diferentes redes de conexión los hace especialmente vulnerables ante un potencial ciberataque al cual pudieran verse sometidos.
- Comunicación colaborativa. El vehículo debe analizar el recorrido y comunicar a otros vehículos las variaciones o peligros que haya percibido. De esta forma se crea un mapa virtual informativo en colaboración con el resto de los vehículos (Internet Of Things).

3.2.3 Tipos de actuadores

Por último, una vez se ha determinado el entorno del vehículo a través de los sensores y se ha tomado una decisión tras haberse procesado la información es necesario llevar a cabo las acciones dinámicas correspondientes. Esta última acción del sistema autónomo resulta ser la función más compleja de llevar a cabo debido a la dificultad de lograr replicar la sensibilidad de un conductor haciendo uso de actuadores y controladores. Los humanos contamos con una gran capacidad de percepción que nos permite variar las fuerzas aplicadas sobre el sistema de dirección, acelerador y frenado de forma automática y sin ser nosotros conscientes de ello. Por lo tanto, la forma mediante la cual se consigue controlar las acciones del vehículo repercutirá en gran medida en la suavidad de conducción de este.

Estas acciones se ejecutan mediante la acción de diferentes controladores o actuadores. En función de las necesidades se distinguen diferentes controladores como puede ser el uso de una bomba ABS en el sistema de frenado para lograr controlar una frenada suave, el uso de un controlador con el cual conseguir una frenada regenerativa, etc.

Además, también en base a las necesidades se puede hacer uso de diferentes tipos de actuadores. Cabe destacar que lograr esa sensibilidad mencionada haciendo uso de actuadores tiene una gran complejidad y por ende su diseño es más complejo o presenta más limitaciones de uso. Dentro de los diferentes tipos de actuadores se encuentran:

- Hidráulicos: Funcionan mediante la compresión de aceite. Tienen un amplio espectro de usos, siendo por ello una tecnología muy práctica y probada. Su principal desventaja es la cantidad de espacio que ocupan ya que necesitan un motor, un depósito de aceite, un regulador de presión y válvulas de control.
- Neumáticos: Funcionan mediante la compresión de aire. Estos actuadores tienen menos componentes y por lo tanto son más compactos. Sin embargo, tienen menor precisión que los actuadores hidráulicos funcionando únicamente en acciones en

las que el movimiento va de un extremo a otro del recorrido. Por lo tanto, presentan una mayor limitación de uso.

- Electromecánicos: Funcionan mediante la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Se distinguen dos tipos de actuadores electromecánicos: lineales y rotativos. Estos destacan por su gran precisión y por su versatilidad en diferentes tipos de usos. Por consiguiente, estos son los actuadores utilizados actualmente en los vehículos autónomos.



Ilustración 10. Actuador lineal electro-mecánico MA2T, TiMOTION Europe [11]

4. Monoplaza Autónomo de Formula Student

Las competiciones de automovilismo han sido a lo largo de la historia uno de los principales focos en la industria de la automoción. Fabricantes de automóviles y componentes invierten grandes cantidades de dinero, investigación y desarrollo en escuderías con el objetivo de lograr un vehículo ganador. No obstante, con el desarrollo en este tipo de vehículos de alta competición los fabricantes persiguen validar los componentes y tecnologías implementadas, pudiendo así incorporar estas innovaciones posteriormente en vehículos comerciales o escalar su utilización en la competición. A modo de ejemplo, el uso de motores turboalimentados, componentes de fibra de carbono, frenos cerámicos de carbono, compuestos de neumáticos, lubricantes, el control de tracción, etc, han sido desarrollados para la alta competición y actualmente son componentes utilizados en vehículos homologados para circular por carretera. Es decir, la inversión en innovación y desarrollo en la alta competición tiene otros objetivos adicionales más allá de lograr el buen resultado competitivo y el reconocimiento de la marca.

Debido al auge en el interés por la electrificación del parque móvil y a la alta demanda de vehículos cada vez más automatizados, los fabricantes han comenzado a mostrar interés en su participación en competiciones de vehículos autónomos. En estas competiciones los vehículos se someten a situaciones desafiantes en las que se requiere una obtención rápida de información del entorno, una gran velocidad de procesamiento de datos, un rápido autoaprendizaje y una gran precisión en la conducción. Esto conlleva a los fabricantes a llevar a cabo una inversión en investigación y desarrollo del sistema de automatización, con el fin de poder transferir los conocimientos obtenidos a la industria de vehículos autónomos de calle y mejorar con ello la seguridad de sus vehículos. Actualmente, las competiciones de vehículos autónomos más importantes a nivel internacional son la Indy Autonomous Challenge (USA) o la Roborace, actualmente en fase de preparación.



Ilustración 11. CES 2022 Indy Autonomous Challenge [12]

Otra competición con gran alcance internacional y con mayor accesibilidad para estudiantes universitarios es la Formula Student Driverless Cup, en la que el equipo ISC Racing Team participaría en el caso de llevar a cabo el proyecto del monoplaza autónomo

sobre el cual se centra este trabajo. Con esta competición los estudiantes se adentran en el mundo de la automoción mediante el desarrollo de un monoplaza y de su sistema de automatización, obteniendo así conocimientos de gran riqueza y valor al involucrarse en tecnologías aplicables al futuro de la automoción autónoma.

Los monoplazas autónomos desarrollados para participar en la Driverless Cup de Formula Student hacen uso de los componentes básicos del sistema autónomo de un vehículo mencionados anteriormente: sensores, procesadores y actuadores. Dichos monoplazas son de chasis tubular, ligeros y con motorización de combustión o eléctrica. Como ejemplo, el monoplaza ISF-04 fabricado por el equipo ISC Racing Team para competir en Formula Student Electric en la temporada 2021/2022 tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Chasis tubular de acero estructural S355
- Dimensiones: largo 3074, ancho 1416 y alto 1104 mm
- Peso: 238 kg.
- Motor: Motor síncrono, 100 kW, 400 V, 5500 rpm.
- Configuración del motor: trasero central.
- Tracción: trasera.
- Acumulador: material Li-Ion, 6.36 kWh



Ilustración 12. Render del monoplaza ISF-04 del ISC Racing Team

Por otro lado, aunque estos monoplazas necesitan hacer uso de sensores, procesadores y actuadores, sus requerimientos son distintos de los de los vehículos autónomos homologados para circular por la vía pública. Mientras los vehículos autónomos matriculados deben ser capaces de responder a una infinidad de escenarios como reconocer objetos y realizar una conducción suave y cómoda para los pasajeros, los monoplazas de Formula Student han de ajustarse a las necesidades de las pruebas y normativa que demanda la competición. Así, las diferentes pruebas de la Driverless Cup

están constituidas por una prueba estática y por cuatro pruebas dinámicas. Estas pruebas son las siguientes:

- Ingeniería del diseño
- Skid Pad
- Aceleración
- Autocross
- Trackdrive¹

Para entender la estructura del sistema de automatización del monoplaza primero se hará una introducción de sus requerimientos para poder competir en la Driverless Cup.

Posteriormente se analizarán los distintos componentes y tecnologías disponibles para el desarrollo del sistema autónomo. Una vez conocidos los distintos componentes se mostrará un análisis de las estrategias llevadas a cabo por algunos equipos competidores de la misma categoría.

Por último, en base a dicho análisis se abordarán distintos escenarios de estimaciones de costes en función a las diferentes configuraciones de componentes.

4.1 Requerimientos del monoplaza autónomo

La categoría Driverless Cup tiene como objetivo la participación de los equipos con un monoplaza autónomo capaz de llevar a cabo todas las acciones dinámicas del vehículo desde el inicio hasta el final de cada prueba. No obstante, como se comentó anteriormente, el objetivo de la Driverless Cup es que los equipos hagan uso de un mismo monoplaza con el que competir pilotado por una persona en la categoría de monoplaza con motorización de combustión o eléctrica, y además, dispongan de un sistema autónomo con el que competir en la Driverless Cup. Es decir, los monoplazas han de poder ser pilotados por una persona o pilotados de forma autónoma sin realizar cambios en sus componentes. Para alcanzar este objetivo se requiere de un Nivel 4 de autonomía mediante el cual, aunque el vehículo tiene el control absoluto de las acciones dinámicas, puede seguir siendo pilotado por una persona dado que dispone de los controles de acelerador, freno y volante.

Para desarrollar de forma adecuada el sistema autónomo del monoplaza es necesario conocer las situaciones a las que este debe enfrentarse. Las pruebas dinámicas se realizan en circuito cerrado, controlado y sin personas. Es decir, los únicos elementos presentes en la pista son los conos utilizados para delimitar el circuito. El monoplaza puede funcionar única y exclusivamente de forma autónoma en el circuito cerrado a la hora de realizar su prueba, siendo este empujado en cualquier otro momento. Todo movimiento del vehículo fuera las pruebas dinámicas ha de ser controlado por una persona. Por lo tanto, el único momento de funcionamiento del sistema autónomo del monoplaza es a la hora de llevar a cabo la respectiva prueba dinámica. Es decir, la finalidad del sistema ha de ser detectar y analizar los distintos conos del circuito y realizar la prueba de la forma más rápida y eficiente posible.

¹ La prueba Trackdrive es la prueba de “Rendimiento y Eficiencia” comentada en la introducción. Al igual que en las categorías de monoplazas pilotados, se valorará la relación entre el tiempo en recorrer un número de vueltas a un circuito y la energía consumida. La única variación es la duración de la prueba, reducida de veintidós a diez vueltas.

Como ejemplo, en Formula Student Spain el criterio de conos utilizado en las pruebas dinámicas es el siguiente:

- Conos azules pequeños: delimitan los límites izquierdos del circuito.
- Conos amarillos pequeños: delimitan los límites derechos del circuito.
- Conos naranjas pequeños: delimitan los carriles de entrada y salida del circuito.
- Conos naranjas grandes: delimitan el inicio y final del circuito y sus zonas cronometradas.



Ilustración 13. Prueba Skid Pad, monoplaza autónomo, Formula Student Spain. [13]

En la normativa de Formula Student no se establecen requisitos relacionados con los tipos de tecnologías a utilizar en el sistema de automatización del monoplaza. Por lo tanto, los equipos tienen total libertad para hacer uso de distintas tecnologías que permitan su automatización. No obstante, pese a buscar la funcionalidad y el mejor rendimiento del vehículo en las pruebas dinámicas, un diseño sobredimensionado para los requerimientos del monoplaza repercutirá negativamente en la puntuación de la prueba estática “Ingeniería del diseño” y, además, redundará en un mayor coste de desarrollo. Es por ello, por lo que el sistema autónomo debe tener una relación adecuada entre funcionalidad, eficiencia y coste.

El correcto dimensionamiento del sistema autónomo sería aquél en el cual el monoplaza lograra realizar las distintas pruebas dinámicas de la Driverless Cup con un buen resultado. Por lo tanto, el diseño del sistema autónomo se debe realizar en base a los requerimientos de las pruebas más complicadas: la prueba Autocross y la prueba Trackdrive. Ambas pruebas se llevan a cabo sobre el mismo circuito formado por un conjunto de diferentes curvas y rectas con una distancia por vuelta de entre 200 y 500 metros. Se trata de un circuito desconocido por el monoplaza el cual debe realizar el recorrido en el menor tiempo posible.

Al tratarse de un vehículo autónomo, éste debe percibir, decidir y actuar de forma autónoma sin interacción de ninguna persona. Es decir, queda terminantemente prohibido pilotar este monoplaza de forma teledirigida y, por lo tanto, toda acción dinámica del monoplaza ha de ser controlada por el sistema autónomo del mismo.

Para llevar a cabo el desarrollo del sistema autónomo este debe iniciarse por la parte más compleja. Como se ha mencionado anteriormente, replicar la sensibilidad de un humano en la conducción es la parte que presenta el mayor reto del sistema autónomo. Es por ello por lo que el desarrollo del sistema debe iniciarse con el diseño de los respectivos

controladores y actuadores que se hayan estimado adecuados, para posteriormente diseñar el procesamiento de la información obtenida por los sensores. Es decir, antes de comenzar con el diseño del sistema sensorial del monoplace sería adecuado el desarrollo del conjunto de componentes que permitan al monoplace responder con la sensibilidad de un conductor. Como recomendación, se sugiere tener el objetivo de poder pilotar el monoplace de forma teledirigida ya que una vez se ha conseguido la calibración óptima de los controladores y actuadores el trabajo pendiente será el procesamiento de la información obtenida por los sensores y definir las respuestas del ordenador en base a la decisión tomada. Cabe destacar, que como se ha comentado recientemente, este monoplace no puede ser pilotado de forma teledirigida en la competición. No obstante, si puede ser pilotado de esta manera en testing privados para lograr la calibración del sistema.

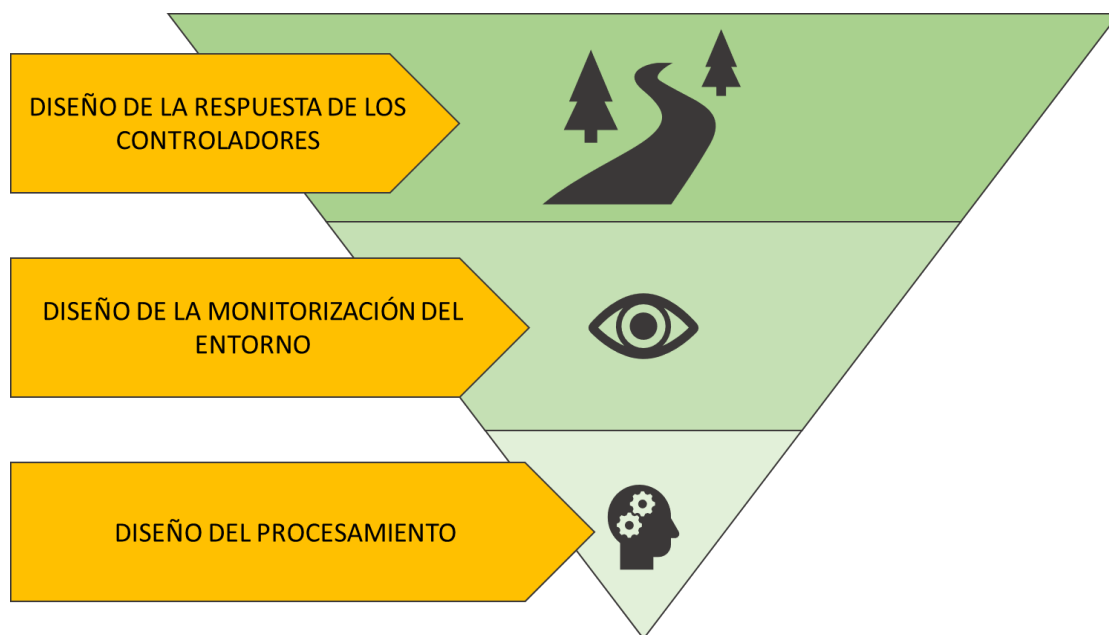


Ilustración 14. Proceso de diseño del sistema autónomo

Una vez conocidos los requerimientos del monoplace autónomo es necesario estudiar las tecnologías y los componentes del sistema de automatización. A continuación, en los siguientes apartados, se explican las diferentes tecnologías y componentes disponibles del sistema autónomo del monoplace.

4.2 Sensores del entorno del monoplace autónomo

El sistema autónomo necesita reemplazar la visión del conductor para poder percibir información del entorno del vehículo. Esto lo consigue haciendo uso de sensores que permitan generar imágenes con las que reconocer objetos o tomar distancias entre los objetos próximos al monoplace. Para poder realizar las diferentes pruebas a alta velocidad y obtener un buen resultado es necesario una lectura del espacio con gran precisión. Esto permitirá al sistema autónomo conocer los límites del circuito con exactitud para poder trazar el circuito de forma óptima en las siguientes vueltas.

A continuación, se comentarán las ventajas y desventajas de los diferentes sensores del entorno existentes en la actualidad.

4.2.1 Radar

Como se ha dicho anteriormente, el funcionamiento del radar se basa en la medición del retraso existente desde la emisión de microondas hasta el retorno de su señal reflejada en los objetos. Esto permite conocer la distancia a la que se encuentran dichos objetos a su alrededor.

La principal ventaja del uso de la tecnología radar reside en la gran capacidad para detectar objetos en movimiento, siendo por ello utilizado en vehículos de carretera. Además, debido al tipo de señal emitido (microondas) el radar mantiene sus capacidades sensoriales en distintas condiciones climatológicas, no viéndose afectado su funcionamiento bajo situaciones de lluvia o nieve. Por otro lado, la principal desventaja del radar es su menor precisión de medida en comparación con otras tecnologías como LiDAR.

La alta velocidad de los monoplazas al recorrer los estrechos circuitos de las pruebas dinámicas hace necesario obtener una información del entorno de gran precisión para el sistema autónomo. Además, debido a la inexistencia de objetos en movimiento a la hora de realizar las pruebas dinámicas de Formula Student no se haría uso de su principal ventaja, la detección de objetos en movimiento. Por ello, la tecnología radar no sería óptima para las necesidades del monoplaza.

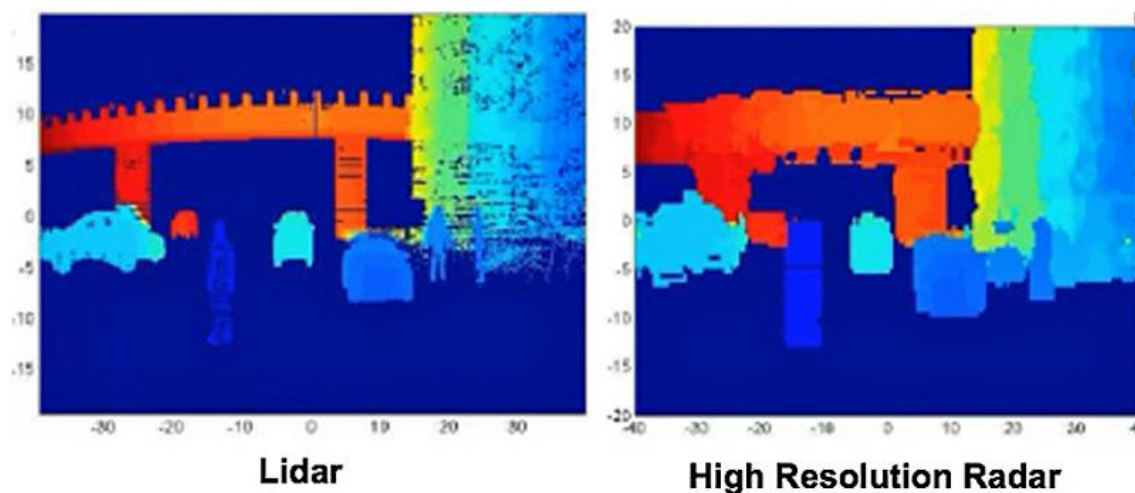


Ilustración 15. Precisión de imagen generada en un mismo entorno por LiDAR y radar de alta resolución. [14]

4.2.2 Sensor de ultrasonidos

El funcionamiento del sensor de ultrasonidos se basa en la medición del retraso existente desde la emisión de ondas ultrasónicas hasta el retorno de la señal de éstas reflejada en los objetos.

Los sensores de ultrasonidos pertenecen al sistema ADAS (Advanced Driver Assistance System) de un vehículo “normal”. El uso de estos sensores se destina a la detección de

objetos próximos al vehículo circulando a bajas velocidades, como es en el caso de un vehículo al realizar la maniobra de aparcamiento.

La limitación de los sensores de ultrasonidos es su baja distancia de monitorización, siendo esta inferior a los 10 metros. Además, la calidad de percepción de este sistema se ve afectada por las vibraciones del sensor. Por ello, debido a la corta distancia de percepción del entorno y las vibraciones del monoplaza al circular a altas velocidades, este sistema no resulta óptimo para los requerimientos exigidos del monoplaza.

4.2.3 Cámaras

El uso de cámaras es de vital importancia para los sistemas de automatización de vehículos. Las cámaras permiten al sistema autónomo percibir de forma visual el entorno del monoplaza logrando el reconocimiento de objetos y sus colores. En el caso de las pruebas de Formula Student el sistema autónomo debe identificar los diferentes conos con sus respectivos colores.

El principal beneficio del uso de cámaras es la cantidad de información que puede generar. No obstante, el uso de cámaras conlleva un gran procesamiento gráfico. Para el filtrado de las imágenes y lectura de ellas es necesario hacer uso de una tarjeta gráfica de gran potencia que permita un rápido procesamiento de las imágenes obtenidas.

Existen dos tipos de cámaras utilizadas: cámaras estéreo y cámaras monoculares. Las cámaras estéreo utilizan dos cámaras colocadas juntas en paralelo y son utilizadas para detectar objetos a corta distancia. Es decir, las cámaras estéreo funcionan de la misma forma que los ojos de los seres humanos: superponemos las imágenes de ambos ojos y eso nos permite tener profundidad en la imagen generada. Por otro lado, las cámaras monoculares utilizan una única cámara con la que se consigue detectar mejor los objetos más lejanos. Como se mostrará posteriormente, para la automatización de los monoplazas se suele hacer uso de ambos tipos de cámaras, siendo las cámaras estéreo utilizadas para un radio cercano del monoplaza, hasta 5-7 metros, y las cámaras monoculares utilizadas para distancias entre 7 y 15 metros.

Con el objetivo de poder obtener la máxima visión frontal y periférica posible la ubicación óptima para el emplazamiento de las cámaras en el monoplaza suele ser la parte alta de la barra antivuelco.



Ilustración 16. Imagen de cámara del monoplaza autónomo del equipo AMZ Racing [21]

4.2.4 LiDAR

El LiDAR se fundamenta en la medición del retraso existente desde la emisión de señales láser hasta el retorno de su señal reflejada en los objetos. Es capaz de reproducir una imagen tridimensional de su alrededor conociendo la distancia exacta entre el foco emisor y cada punto del entorno. El LiDAR genera una imagen tridimensional del entorno pudiendo obtener así las distancias a la que se encuentra cada objeto de su alrededor. Uno de los principales beneficios de esta tecnología es el rápido procesamiento de la información generada ya que éste produce una nube de puntos del entorno que es procesada por el ordenador.

Pese a que en la industria automovilística de vehículos de carretera hay distintas opiniones acerca de si hacer uso o no de la tecnología LiDAR en el sistema de automatización, en la competición de Formula Student se puede observar cómo todos los equipos hacen uso de LiDAR. Esto se debe a la cantidad de información que consigue aportar esta tecnología ya que genera una imagen del entorno con la que se pueden detectar objetos y además permite conocer las distancias a las que se encuentra cada objeto, así como su dimensión.



Ilustración 17. LiDAR Velodyne posicionado en el alerón frontal del monoplaza del equipo Monash Motorsport [15]

La clasificación de los LiDAR se realiza según el número de canales que disponga el dispositivo. En función de la cantidad de canales del dispositivo se podrá generar una nube de puntos del entorno con mayor o menor definición. Es por ello por lo que existen LiDAR en con un rango de 1 a 128 canales, influyendo en gran medida en el precio del dispositivo en función del número de canales. Para los requerimientos del monoplaza autónomo en las pruebas dinámicas de Formula Student se recomienda el uso de LiDAR con 32 o 64 canales.

La mejor ubicación del LiDAR en estos monoplazas es en la zona más baja del alerón frontal. Esto se debe a dos motivos: el plano horizontal y vertical de la imagen generada. Una posición baja permite detectar mejor el plano horizontal en el que se encuentran los conos del circuito. Además, en caso de inclinación del vehículo debido a la aceleración del monoplaza, los rayos láser del LiDAR siguen detectando los conos. Respecto a este último punto cabe destacar que los equipos suelen inclinar el LiDAR al posicionarlo en el monoplaza para poder contrarrestar dicha inclinación en la aceleración. Por otro lado, en el plano vertical, la altura de los conos de la imagen generada por el LiDAR permite

al sistema autónomo conocer la distancia a la que se encuentran los próximos conos en su trazada.

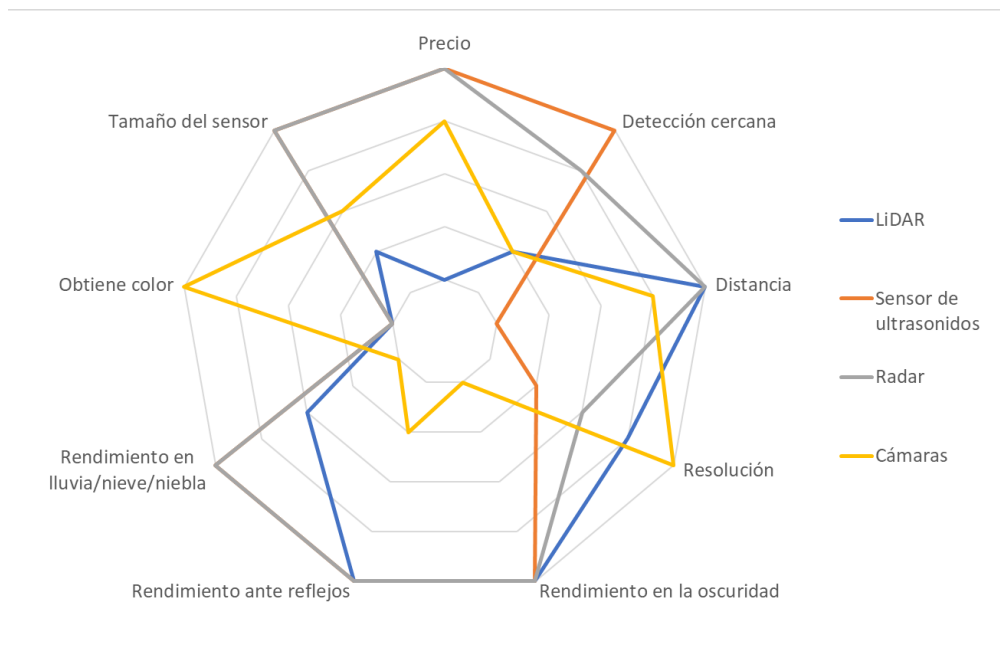


Ilustración 18. Diagrama comparativo entre LiDAR, radar, ultrasonidos y cámaras

4.3 Sensores de parámetros del monoplaza autónomo

Una vez conocidos los distintos componentes que permiten al sistema autónomo del monoplaza percibir el entorno que le rodea, es necesario comentar las diferentes formas mediante las cuales el sistema determina su propia aceleración, velocidad, orientación y localización. Para obtener toda esta información es necesario incorporar al vehículo una serie de sensores que extraigan los parámetros con los que generar dicha información.

Los sensores de parámetros mostrados a continuación se utilizan de forma complementaria entre ellos, necesitándose únicamente un conjunto de ellos para obtener la información requerida. Por lo tanto, como se mostrará posteriormente, parte de la estrategia del desarrollo del sistema autónomo reside en determinar cuáles de los siguientes componentes escoger en base a sus funciones.

4.3.1 IMU – Unidad de medición inercial (IMU)

El IMU es un elemento compuesto por acelerómetros y giroscopios que permiten obtener la aceleración, orientación y fuerzas gravitacionales del cuerpo. Este componente destaca por su simplicidad al estar formado únicamente por un conjunto de acelerómetros y giroscopios. Permite obtener la información necesaria acerca de las acciones dinámicas del vehículo. Para lograr un funcionamiento óptimo de este componente debe ser montado en el centro de gravedad del monoplaza.

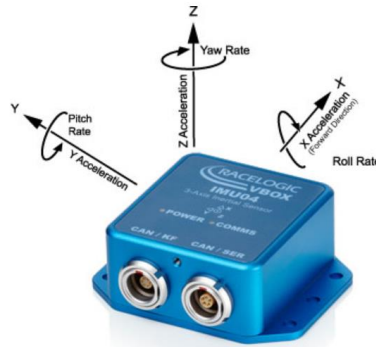


Ilustración 19. Ejes de medición del IMU [16]

4.3.5 INS – Inertial Navigation System (INS)

El INS es un dispositivo compuesto por giroscopios, acelerómetros y ordenador que determina la localización, aceleración y velocidad del objeto que lo monta. El INS destaca por su precisión y su autonomía. Al igual que el IMU, los acelerómetros del dispositivo obtienen la dirección y velocidad de la aceleración en cada eje mientras que los giroscopios determinan los ángulos de giro con respecto a su eje de referencia.

El funcionamiento del INS se basa en la navegación por estima (Dead reckoning). Se trata de un procedimiento matemático mediante el cual, conocida la ubicación inicial, el vector velocidad del dispositivo (velocidad y dirección) y el tiempo de ese vector velocidad se consigue estimar la ubicación del dispositivo en cada momento sin hacer uso de agentes externos como la conexión a satélites.

En comparación con el IMU, el INS establece la localización del objeto además de la inercia global del componente en cada momento. Es decir, el INS monta en su interior un IMU y además tiene la capacidad de determinar su localización. La principal ventaja del INS reside en su gran autonomía de funcionamiento al no necesitar recibir ni emitir señales con el exterior. Para su funcionamiento necesita únicamente establecer su ubicación en el momento inicial pasando a funcionar de forma independiente de agentes externos.

Es habitual la incorporación de GNSS en los dispositivos INU con el objetivo de poder establecer la ubicación inicial del dispositivo. No obstante, también existen dispositivos INU a los cuales es necesario conectar un GNSS para poder obtener su ubicación inicial.

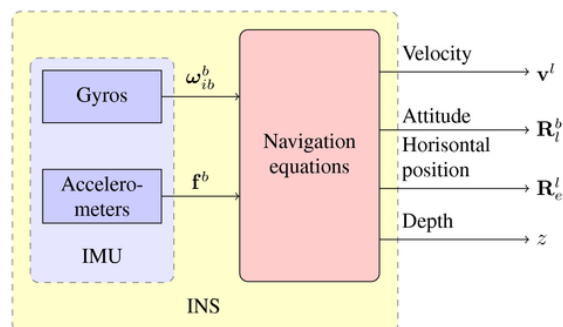


Ilustración 20. Esquema de funcionamiento del INS [17]

4.3.2 GPS – Global Positioning Systems

El sistema GPS permite obtener el posicionamiento del monoplaza en cada momento, así como su velocidad. Con las mediciones de este sistema se genera un mapa del recorrido realizado por el dispositivo conociendo la velocidad, altitud y distancia recorrida en cada momento.

El sistema GPS está formado por tres componentes principales: una constelación de satélites (NAVSTAR), una red de estaciones y un receptor. La constelación de satélites NAVSTAR, desarrollado por Estados Unidos, está formada por 31 satélites en órbita en la tierra. Para conocer la ubicación de cada satélite en órbita estos emiten señales a una red de estaciones repartidas alrededor de la superficie de la tierra. Conocida la ubicación de cada satélite solo queda conectar el receptor, el dispositivo GPS, con los satélites de la órbita. Una vez llevada a cabo dicha conexión entre el receptor y los satélites se mide la distancia a la que se encuentra el receptor de cada satélite. La localización del receptor será la intersección de las distancias del conjunto de satélites conectados. Por lo tanto, para obtener una medición fiable es necesaria una conexión del receptor con un mínimo de tres satélites, siendo más precisa la medición cuantos más satélites están conectados en cada momento.

Cabe destacar que el proyecto del monoplaza actual del equipo ISC Racing Team ya monta un GPS en el ISF-04 de la temporada 2021/2022.

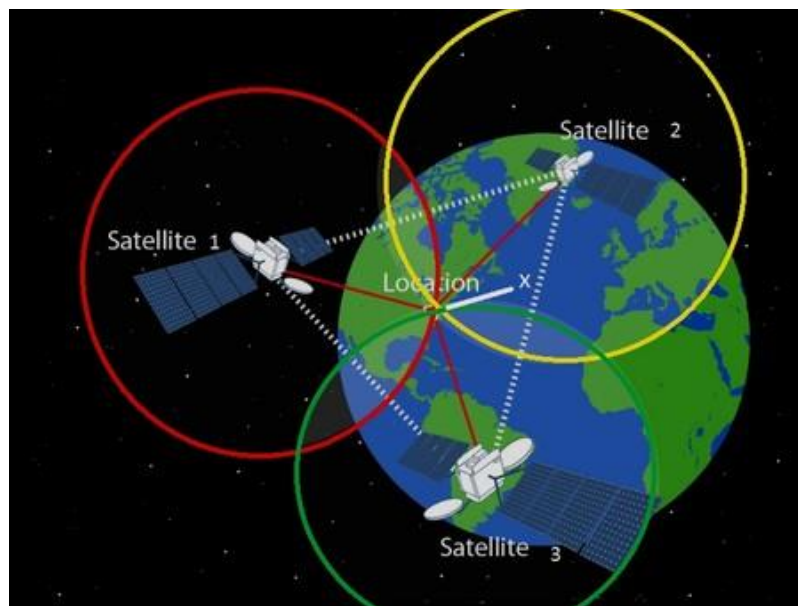


Ilustración 21. Obtención de la ubicación del receptor con tres satélites [18]

4.3.3 GNSS – Global Navigation Satellite System

El sistema GNSS funciona de la misma forma que el sistema GPS. Sin embargo, a diferencia del GPS, que puede conectarse únicamente a los satélites que forman la constelación NAVSTAR, el GNSS puede conectarse a diferentes constelaciones de satélites como son GLONAA, Beidou, Galileo y NAVSTAR. Es decir, el GPS es un sistema que solo permite la conexión a su propia órbita de satélites y el GNSS es un sistema global que conecta con el conjunto de satélites de otros países. La mayor

disponibilidad de satélites orbitando alrededor de la Tierra con los que conectar un receptor permite obtener una mayor precisión de medición del sistema GNSS en comparación con el GPS.

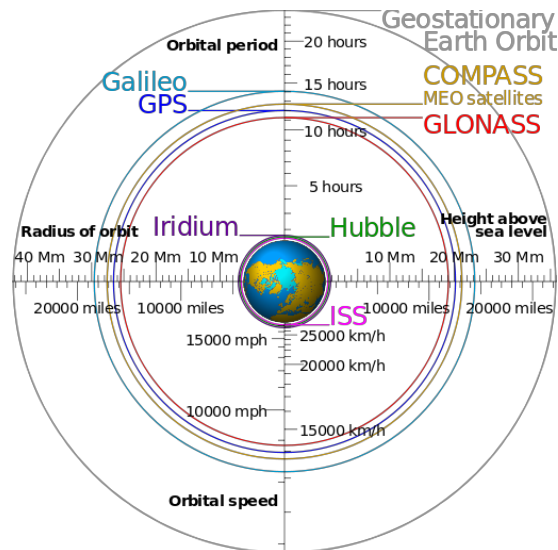


Ilustración 22. Radio de las órbitas de satélites de navegación [19]

4.3.4 GSS – Ground Speed Sensor

El GSS permite medir la velocidad del monoplaza de forma no mecánica. Este componente emite una señal láser al suelo y mide el retraso de su retorno. De esta forma se consigue obtener la velocidad del vehículo sin imprecisiones de elementos mecánicos.

4.3.5 Sensores de velocidad en las ruedas

Los sensores de velocidad colocados en las ruedas del monoplaza son utilizados para conocer la velocidad del eje o rueda al que éste apunta. Su principal ventaja es la simplicidad de este sistema, pero su mayor desventaja es la pérdida de precisión en la medida al perder agarre o derrapar la rueda en la que se toma la medición. Por ello, estos sensores suelen ser montados en las cuatro ruedas, perdiendo únicamente precisión de la medida en caso de perder agarre en las cuatro ruedas del monoplaza.

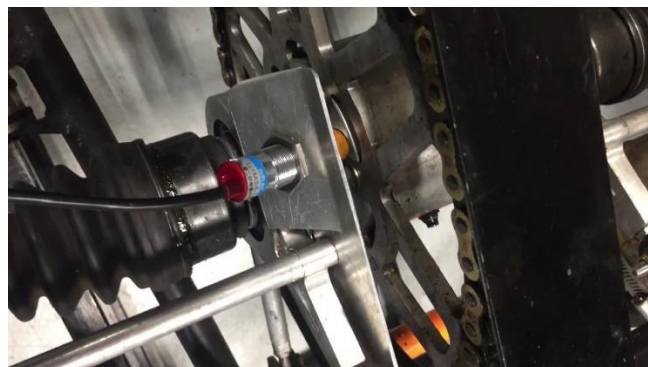


Ilustración 23. Sensor de velocidad en el eje trasero de un Formula Student [20]

4.4 Procesadores del monoplaza autónomo

Una vez obtenida la información del conjunto de sensores del monoplaza ésta debe ser analizada en los procesadores del sistema. Debido a la cantidad de información obtenida por los sensores es necesario una gran potencia de procesamiento. Esto se puede conseguir haciendo uso de un ordenador con suficiente capacidad o diversificando el tratamiento de esa información en dos ordenadores. La configuración final de los procesadores montada en el monoplaza autónomo dependerá de las tecnologías disponibles y del conocimiento técnico del equipo en el momento de llevar a cabo este proyecto.

No obstante, aunque se detallará más adelante, en base al estudio realizado en este trabajo sobre las distintas configuraciones del sistema autónomo de otros equipos participantes, se puede obtener una idea sobre diferentes configuraciones de procesadores utilizadas en esta competición.

Como ejemplo de referencia, una configuración validada por sus buenos resultados en competición es la utilizada por el equipo AMZ Racing de la Asociación Académica de Motorsport de Zurich. Desde la creación de la categoría de monoplazas autónomos en el año 2017, AMZ Racing ha demostrado ser un referente en la categoría. Este equipo ha resultado ser ganador del Formula Student Driverless Germany en los años 2017, 2018 y 2019, quedando en segundo puesto en 2021. Para contextualizar, Formula Student Germany se trata de una de las competiciones más exigentes a nivel global. Por lo que la configuración de procesamiento de la información del equipo AMZ ha sido validada y ha demostrado su capacidad. Respecto a la configuración de su monoplaza, AMZ Racing publicó el artículo “*AMZ Driverless: The Full Autonomous Racing Team*” [21] en el año 2019 en el cual describen el sistema autónomo utilizado en su monoplaza autónomo de la temporada 2017/2018. Para procesar toda la información obtenida por los sensores de su monoplaza el equipo hizo uso de dos ordenadores, cada uno con su CPU y GPU, diversificando así las tareas necesarias. De esta forma un ordenador es utilizado como ordenador principal (master) y el segundo como secundario (slave). El ordenador principal está vinculado al procesamiento de la información del LiDAR y la cámara monocular, obteniendo así la información necesaria para poder funcionar en caso de desconexión u error del segundo ordenador. El segundo ordenador queda dedicado al filtrado de imágenes de las cámaras estereo ya que esto conlleva una gran cantidad de procesamiento y requiere de una tarjeta gráfica (GPU) con potencia. Por lo tanto, la estructura hardware-software del monoplaza autónomo de AMZ Racing es la siguiente:

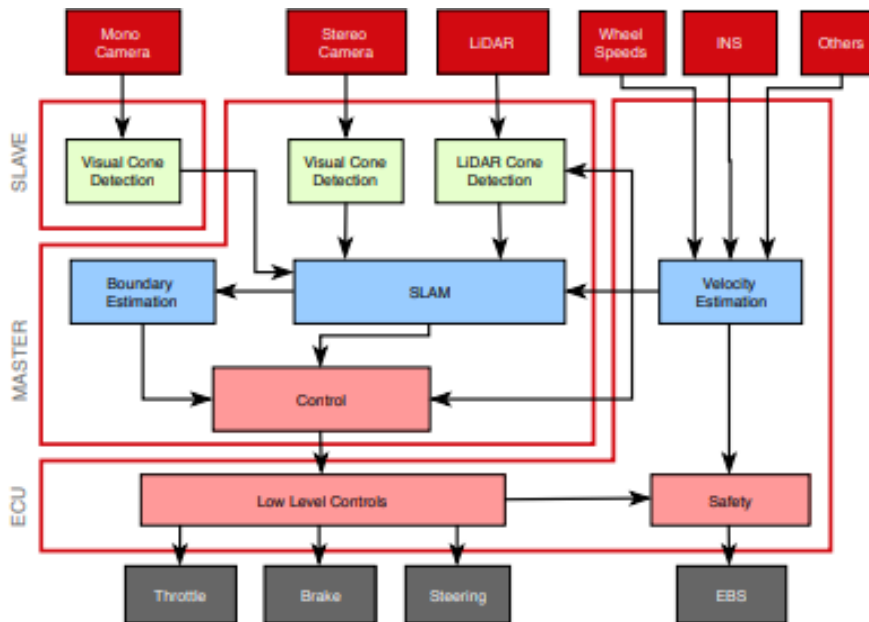


Ilustración 24. Arquitectura hardware-software del sistema autónomo del Formula Student AMZ Racing 2018. [21]

El sistema operativo utilizado en los ordenadores es el sistema Ubuntu con el uso de ROS (Robot Operating System). El sistema ROS ha sido desarrollado específicamente para ser utilizado en aplicaciones de robótica, habitualmente en robótica autónoma. Debido al desarrollo del sistema con la finalidad de su uso en robótica, éste tiene aplicaciones como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) mediante la cual el sistema es capaz de generar y actualizar un mapa de un entorno desconocido haciendo uso de los sensores equipados en el robot, en este caso el monoplaza autónomo. Por lo tanto, con esta aplicación SLAM el monoplaza es capaz de generar un mapa del circuito en su primera vuelta para pasar a optimizar su trazada en las siguientes.

Para el tratamiento de las imágenes obtenidas por las cámaras el ordenador debe tener una tarjeta gráfica (GPU) potente con la cual poder procesar dichas imágenes de forma rápida.

Debido las vibraciones del monoplaza y la posibilidad de impacto por un fallo del sistema autónomo el o los ordenadores montados en el monoplaza deben poder resistir ante fuertes vibraciones o impactos.

4.5 Controladores y actuadores del monoplaza autónomo

Una vez la información de los sensores ha sido procesada en los ordenadores y estos han tomado la decisión de ejecutar una determinada acción, esta decisión es transmitida a los actuadores del monoplaza. Al igual que sucede en cualquier otro vehículo, el control de las acciones dinámicas del monoplaza se realiza mediante la actuación de tres controladores: acelerador, freno y volante. Debido a los requerimientos de la Driverless Cup, el monoplaza autónomo ha de poder ser pilotado por una persona. Por ello, al

demandar esta categoría un Nivel 4 de autonomía el monoplaza debe mantener los controles del acelerador, freno y volante.

Al tratarse de un monoplaza de dimensiones reducidas, el espacio libre para el piloto es limitado y por lo tanto se debe tener en cuenta la ubicación y el espacio ocupado por los diferentes componentes del sistema autónomo. Es decir, se deben considerar la dimensión y ubicación de los actuadores para no interferir de forma negativa en la conducción del piloto.

Además de los tres controles mencionados, necesarios para la conducción del monoplaza, la normativa de Formula Student obliga a los equipos a montar en sus monoplazas autónomos un sistema de frenada de emergencia, EBS (Emergency Brake System). La finalidad de este sistema es poder controlar la frenada del monoplaza en caso de emergencia mediante su control desde el ordenador de a bordo o bien de forma remota.

El control de los cuatros sistemas se realiza mediante la acción de actuadores o de forma electrónica. El tipo de control para cada sistema depende de la necesidad y espacio disponible en el habitáculo del monoplaza. Por ello, a continuación, se definen las necesidades de cada control y los actuadores necesarios.

4.5.1 Acelerador

Una de las ventajas de trabajar con motorizaciones eléctricas en los monoplazas desarrollados por el ISC Racing Team es la facilidad de automatización del control del motor. Los monoplazas eléctricos hacen uso de motores síncronos, los cuales varían su velocidad en función de la frecuencia establecida por el accionamiento eléctrico. Es decir, la frecuencia a la cual se alimenta el motor síncrono es controlada electrónicamente y fijada por los procesadores del monoplaza en función de las necesidades. En base a la decisión de actuación tomada por los ordenadores, el accionamiento controlará la frecuencia con la cual alimenta el motor variando así la velocidad del monoplaza. Por lo tanto, no es necesario montar ningún actuador mecánico para controlar el acelerador del monoplaza.

4.5.2 Freno

La motorización eléctrica del monoplaza aporta otra ventaja adicional en relación con el control de la frenada. Ésta se puede controlar de forma mecánica, actuando el sistema de frenada, o también mediante la regeneración de energía en el motor eléctrico.

Existen dos formas de controlar el freno de forma mecánica: incorporar un actuador electromecánico en el pedal de freno o controlar el sistema de frenado desde una bomba ABS. Haciendo uso de un actuador en el pedal de freno se busca replicar la actuación del pie del conductor con un actuador electromecánico que debe ser calibrado de tal forma que consiga tener la sensibilidad del pie de una persona. Esta opción es ampliamente utilizada dentro de los monoplazas autónomos de Formula Student. No obstante, como se ha comentado anteriormente, lograr la sensibilidad de un humano haciendo uso de un actuador tiene una gran complejidad. Por ello, en este trabajo se plantea una segunda opción que es incorporar una bomba ABS en el sistema de frenado. De esta forma, se puede programar este controlador de ABS para abrir sus válvulas de las líneas del sistema de frenado en función de las necesidades del monoplaza. Por lo tanto, esta segunda opción resultar ser más simple que la anterior y además permite conseguir dicha sensibilidad de

frenado buscada. Con ambas formas recién planteadas se consigue una frenada del vehículo haciendo uso del sistema de frenada del monoplaza mediante la actuación de los frenos de las ruedas. La principal ventaja de este sistema es la mayor velocidad de frenada en comparación con la regeneración de energía en el motor.

Por otro lado, la frenada del monoplaza mediante la regeneración de energía eléctrica busca frenar el monoplaza sin interacción de los sistemas de frenos. Esto se consigue mediante la variación de frecuencia en el estator del motor al actuar este como carga para el rotor, que es movido por las ruedas, frenando de esa forma el monoplaza. La principal desventaja de este sistema es que aplica más fuerza cuanto mayor es la velocidad del vehículo, necesitando por ello una gran programación para detener el vehículo a bajas velocidades o necesitando hacer uso del sistema de frenado hidráulico. Además, este sistema de frenada tiene un punto de fluctuación en el cual se nota una cierta inestabilidad en el control regenerativo. Por lo tanto, pese a ser una forma de frenado utilizada por diversos equipos de Formula Student con motorizaciones eléctricas ésta presenta ciertas desventajas con respecto las otras dos opciones que hacen uso del sistema de frenado hidráulico recién planteadas.

En lo que respecta al sistema de frenada de emergencia es necesario incorporar un sistema mecánico que detenga el vehículo en caso de ser necesario. Para accionar este sistema será necesario incorporar un controlador ABS adicional al sistema de frenado.

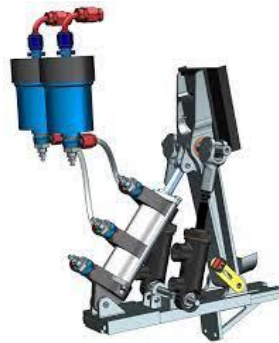


Ilustración 25. Sistema de frenada de emergencia incorporado en el monoplaza de AMZ Racing Team [21]

4.5.3 Dirección

El control de la dirección del monoplaza se puede realizar de dos maneras: incorporando un actuador mecánico en la columna de dirección o haciendo uso de una columna de dirección de un coche con ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Dentro de los distintos actuadores existentes será necesario incorporar un actuador electromecánico debido a su amplio rango de uso con una alta precisión. Además, al ser controlado por un motor eléctrico, este controlador puede tener una gran sensibilidad en su movimiento que permitirá una mejor conducción del monoplaza. Cabe destacar que ésta resulta ser la opción utilizada por la mayoría de monoplaza autónomos de Formula Student. La segunda opción planteada en este trabajo es la incorporación de una columna de dirección de un coche con asistencia de dirección. El beneficio de ello es utilizar un sistema de dirección motorizado ya diseñado por un fabricante de vehículos e implantado a nivel comercial. Como desventaja de esta segunda opción está el alto coste de un sistema de estas características y la limitación de espacio del monoplaza para incorporar la columna de dirección de un coche.

Los actuadores se clasifican en función del tipo de movimiento: lineal o rotativo. El actuador lineal puede ser colocado al final de la columna de dirección junto al sistema de dirección piñón-cremallera existente en el monoplaza actual. En cambio, el actuador rotativo es posicionado sobre la columna de dirección. Esto obliga a cambiar dicha columna existente en el vehículo y reduce el espacio disponible para las piernas del piloto. Por ello, la opción más adecuada para controlar la dirección del monoplaza es incorporar un actuador electromecánico lineal.



Ilustración 26. Sistema de dirección del monoplaza de AMZ Racing Team [21]

4.6 Análisis de los sistemas autónomos utilizado por otros equipos

Dado que el ISC Racing Team se encuentra en una fase inicial de desarrollo del proyecto del monoplaza autónomo es aconsejable analizar las estrategias llevadas a cabo por otros equipos de la competición. Esto nos permite conocer configuraciones ya validadas o que han resultado fallidas y/o descartadas en ediciones anteriores de la competición.

La participación en la categoría Driverless, una vez transcurridos cinco años desde su creación, cuenta un total de 122 equipos [22]. Es decir, un gran número de equipos han decidido afrontar el reto de automatizar sus monoplazas. Dentro de las distintas competiciones de Formula Student organizadas en distintos países, una de las principales, y más relevantes, es la competición Formula Student Germany. Con anterioridad a la celebración de cada edición Formula Student Germany realiza una publicación en la que muestran la normativa del evento, sus jueces, patrocinadores y especificaciones de los monoplazas de cada equipo participante. Por ello, para conocer los componentes validados en esta competición se han analizado detalladamente las configuraciones de los cuatro mejores equipos de Formula Student Driverless Germany 2021 al igual que de algunos monoplazas desarrollados por dichos equipos en ediciones anteriores con los que también han obtenido buenos resultados. Los sistemas autónomos analizados son de los siguientes equipos:

- Karlsruhe KIT (Alemania)
- Augsburg UAS (Alemania)
- Zürich ETH (Suiza)
- Aachen RWTH (Alemania)

4.6.1 KA-RaceIng (Karlsruhe, Alemania)

El equipo KA-RaceIng perteneciente al Instituto de Tecnología de Karlsruhe ha participado en Formula Student Driverless desde su primera edición en el año 2017. En el artículo “*The Autonomous Racing Software Stack of the KIT19d*” [23], publicado en el año 2019, se describe la arquitectura del software de su sistema autónomo. Con el monoplaza KIT19d, sobre el cual se basa dicho artículo, KA-RaceIng obtuvo un primer puesto en tres de las cuatro pruebas dinámicas de Formula Student Driverless Germany 2019 y un primer puesto en Formula Student Driverless Spain 2019. Al ser un artículo publicado basado en el software de su sistema autónomo también se mencionan algunos de los componentes utilizados en dicho sistema, estando éste formado por:

- Sensores:
 - Tres cámaras: trasera, frontal-izquierda y frontal-derecha
 - Cuatro LiDAR: izquierdo, derecho, trasero y frontal
 - IMU xsens IMU MTi G710
 - Sensores de velocidad en las ruedas
- Un ordenador:
 - Procesador: Intel i7-9700k
 - Placa base: ASRock x370 Mini-ITX (32 GB DDR4 RAM)
 - Disco duro SSD: Samsung 970 EVO
 - Ubuntu 18.04
- Actuadores:
 - Control electrónico del acelerador
 - Frenada mediante regeneración de energía en el motor

- EBS
- Actuador electromecánico en el sistema de dirección

En el año 2021 el equipo KA-RaceIng ha continuado obteniendo buenos resultados. Estos resultados han sido los siguientes: un primer puesto en Formula Student Driverless Germany, un segundo puesto en Formula Student Driverless East y un tercer puesto en Formula Student Driverless Italy. Es decir, este sistema, modificado respecto a su versión anterior ha sido validado y, por ello, debe ser estudiado y analizado el motivo de su cambio. La configuración del sistema autónomo de su monoplaza KIT21.d es la siguiente

- Sensores:
 - Tres cámaras: 2x IDS UI-3160CP y 1x Basler dart daA1600-60uc
 - 1 LiDAR Hesai Pandar40P
 - Sensores de velocidad en las ruedas
 - IMU xsens IMU MTi G710
 - GSS Kistler Correvit SFII
- Un ordenador:
 - Procesador: Intel i7-9700k
 - Google Coral Edge TPU coprocessor
 - Ubuntu 18.04
- Actuadores:
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección



Ilustración 27. Monoplaza KIT21d del equipo KA-RaceIng, 2021[24]

Mediante la comparación de ambas configuraciones utilizadas en el KIT19d y KIT21d se puede apreciar que el uso de 4 LiDAR resulta innecesario, siendo el uso de un LiDAR suficiente para obtener la victoria en las pruebas dinámicas. Además, al sistema autónomo del KIT21d se le ha incorporado un coprocesador Google Coral Edge TPU con el cual acelerar el procesamiento realizando tareas de *machine learning*. Por último, se puede apreciar la incorporación de un GSS en el monoplaza KIT21d.

4.6.2 StarkStrom Augsburg (Augsburg, Alemania)

El equipo StarkStrom Augsburg pertenece a la Universidad de Ciencias Aplicadas de Augsburg. En el año 2021 este equipo obtuvo el primer puesto en Formula Student Italy y el segundo puesto en Formula Student Germany al igual que en Formula Student East con su monoplaza autónomo Zapp DV. Se trata de un equipo con gran experiencia en la categoría Driverless debido a su participación desde la primera edición de ésta y en la cual han obtenido buenos resultados. Esto valida el sistema autónomo desarrollado por el equipo y, por lo tanto, también debe ser analizado. El sistema autónomo del Kapp DV está formado por:

- Sensores:
 - Dos cámaras Basler dart daA1600-60uc
 - LiDAR Hesai Pandar40P
 - Kistler S-Motion L
- Dos ordenadores:
 - dSPACE Micro Autobox II
 - ZOTAC MAGNUS EN72070V
- Actuadores:
 - No se mencionan



Ilustración 28. Monoplaza Zapp DV del equipo StarkStrom Augsburg, 2021[25]

4.6.3 AMZ Racing (Zúrich, Suiza)

Como se ha mencionado anteriormente, el equipo AMZ Racing la Universidad de Zúrich es actualmente uno de los equipos referentes dentro de la competición de Formula Student. En esta competición el equipo AMZ Racing ha resultado ser ganador de la categoría autónoma en Formula Student Germany en los años 2017, 2018 y 2019, quedando en tercer puesto en el año 2021. Además, en el año 2017 AMZ Racing fue ganador de la categoría autónoma en Formula Student Italy. Debido a su buen recorrido en esta competición, el estudio de la estrategia llevada a cabo por este equipo es de gran valor informativo.

En el artículo “AMZ Driverless: The Full Autonomous Racing System” [21] se describe la estrategia seguida en el desarrollo de su monoplaza autónomo Gotthard en la temporada 2018. El sistema autónomo de este monoplaza estaba formado por:

- Sensores:
 - Dos cámaras estéreo
 - Una cámara monocular
 - LiDAR frontal
 - INS
 - Sensores de velocidad en las ruedas
- Ordenador principal
- Ordenador secundario
- ECU
- Actuadores:
 - Control electrónico del acelerador
 - Frenada mediante regeneración de energía en el motor
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección

Por otro lado, en la descripción de su monoplaza Pilatus [26] desarrollado entre los años 2019 y 2021 el equipo menciona de manera superficial la configuración de su monoplaza autónomo. Este monoplaza resultó ser ganador de Formula Student Germany y Formula Student East además de convertirse en el líder mundial del ranking de Formula Student Driverless en el año 2019. Para el desarrollo del sistema autónomo de este monoplaza, en comparación con el sistema utilizado en la temporada anterior, el equipo aumentó su inversión con el objetivo de mejorar la precisión de la información obtenida así como la velocidad de procesamiento. La estructura del sistema autónomo de Pilatus mostrada a continuación pertenece al monoplaza utilizado en la temporada 2021 con el cual obtuvieron el tercer puesto Formula Student Germany. Este sistema estaba formado por:

- Sensores:
 - Tres cámaras de alta resolución del fabricante Basler
 - Dos LiDAR: Hesai Pandar 20 & 64. Uno de ellos posicionado en el alerón frontal y el otro en la parte superior de la barra de antivuelco.
 - Dos GPS
 - Dos INS
 - Sensores de velocidad en las ruedas
- Ordenador:
 - CPU: Intel Quad-Core Xeon E3-1505M V6ç
 - GPU: NVIDIA GeForce RTX 3060
- Actuadores:
 - Control electrónico del acelerador
 - Frenada mediante regeneración de energía en el motor
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección



Ilustración 29. Monoplaza Pilatus del equipo AMZ Racing, 2021 [26]

Como se puede apreciar el aumento de la inversión llevado a cabo en la última temporada se ha destinado a la incorporación de un LiDAR y un sistema INS adicional con respecto a la configuración utilizada en el Gotthard en 2018. Además, el equipo AMZ Racing ha reducido el procesamiento de dos ordenadores a uno solo, pero con la suficiente potencia en su CPU y GPU.

4.6.4 Ecurie Aix (Aachen, Alemania)

El equipo Ecurie Aix pertenece a la Universidad Técnica Rheinisch-Westfälische de Aachen. En el año 2021 Ecurie Aix obtuvo un cuarto puesto en Formula Student Driverless Germany con su monoplaza autónomo eace07.d. Este buen resultado valida el sistema autónomo del equipo y, por lo tanto, también debe ser analizado. El sistema autónomo del eace07.d estaba formado por:

- Sensores:
 - Tres cámaras industriales Basler acA1440-73gc
 - LiDAR Hesai Pandar40p posicionado en la parte superior de la barra de antivuelco
 - INS
- Ordenador:
 - Procesador: Ryzen 5 5600X
 - Tarjeta gráfica: GIGABYTE RTX 2060 Mini ITX
- Actuadores:
 - Control electrónico del acelerador
 - Frenada mediante regeneración de energía en el motor
 - EBS con controlador neumático de 1200 N
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección de hasta 24 Nm



Ilustración 30. Monoplaza eace07.d del equipo Ecurie Aix, 2021 [27]

Adicionalmente a la descripción detallada de estos cuatro monoplazas se ha estudiado la configuración utilizada por el resto de monoplazas participantes. Formula Student Germany Driverless 2021 contó con la inscripción de 20 equipos y la participación de 17 de ellos. Tras el estudio de los 20 monoplazas autónomos inscritos en la última edición se pueden llegar a diferentes conclusiones:

- Ningún equipo hizo uso de la tecnología radar en sus monoplazas.
- 17 de los 20 monoplazas utilizaron la tecnología LiDAR. Las únicas excepciones fueron de los equipos Sapienza Corse, del Fast Forest y MunicHMotorsport. El equipo Sapienza Corse, de la Universidad de Roma La Sapienza (Italia), únicamente utilizó cuatro cámaras para percibir el entorno de su monoplaza. El equipo Fast Forest, de la Universidad de Tecnología Deggerndorf (Alemania), hizo únicamente uso de una cámara estéreo en su monoplaza. El equipo MunicHMotorsport, de la Universidad de las Ciencias Aplicadas de Munich, utilizó seis cámaras en su sistema autónomo. Cabe destacar que de estos tres equipos que solo hicieron uso de cámaras para la monitorización del entorno solo Sapienza Corse logró participar en la prueba de Trackdrive, no participando ninguno de estos equipos en el resto de las pruebas dinámicas.
- Respecto al uso de cámaras, 19 de los 20 equipos participantes incorporan cámaras en sus monoplazas. La única excepción es la del equipo noruego Revolve NTNU de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega, que solo hizo uso de un LiDAR. Pese a no incorporar cámaras en su monoplaza el equipo Revolve NTNU logró participar en tres pruebas dinámicas y obtuvo un 5º puesto en la clasificación general de Formula Student Driverless Germany 2021.
- Dentro de los distintos equipos que hacen uso de LiDAR en sus monoplazas solo dos ellos montan más de un LiDAR.
- A pesar de que no todos los equipos especifican el sistema utilizado para obtener la localización de su monoplaza se puede observar cómo la gran mayoría incorporan sistemas de INS/GNSS.

- En lo que a procesamiento respecta los equipos hacen uso de ordenadores con procesadores potentes, como el Intel i7, o módulos de desarrollo como el módulo Jetson Xavier de Nvidia.

De los 17 equipos participantes en Formula Student Germany sólo ocho de ellos lograron participar en las pruebas dinámicas. De esos ocho equipos solo cuatro equipos participaron en más de una prueba dinámica. Entre los cuatro restantes, que solo participaron en la prueba dinámica Trackdrive, se encuentran el equipo AMZ Racing Team, que tuvo problemas con el sistema autónomo, y los equipos PISA U, Sapienza Corse y Revolve NTNU. Estos dos últimos han conseguido participar en la prueba haciendo uso de configuraciones menos complejas dado que Sapienza Corse ha utilizado únicamente cuatro cámaras en su monoplace y el equipo Revolve NTNU ha hecho uso de un LiDAR. Cabe destacar que pese a haber logrado participar ambos equipos en dicha prueba, su resultado no fue remarcable y, por lo tanto, no se tomarán como referencia para este trabajo.

Adicionalmente al análisis realizado en este apartado se han estudiado las configuraciones mencionadas en publicaciones y artículos académicos de otros equipos. Dicho estudio aparece en el Anexo A.

4.7 Conclusiones preliminares en base al estudio realizado

Tras el estudio de la información mencionada anteriormente se puede concluir lo siguiente:

- LiDAR: el uso de la tecnología LiDAR está generalizado en la mayor parte de los equipos y debe formar parte del monoplace a desarrollar.
- Cámaras: adicionalmente a la tecnología LiDAR, todos los equipos, con la excepción de uno, hacen uso de cámaras en los sistemas autónomos de sus monoplaces. Por lo tanto, se concluye que se trata de una tecnología que debe también ser incorporada.
- Radar: ningún equipo hace uso de la tecnología radar en sus vehículos. Por lo que esta tecnología queda descartada del sistema autónomo a desarrollar.
- Localización: para la localización del vehículo los equipos utilizan diferentes sistemas: IMU, INS, GPS o GNSS. No obstante, principalmente se hace uso de dispositivos INS con GNSS incorporados. Por ello, se planteará el uso de INS/GNSS en el sistema autónomo del monoplace.
- Procesador: la información proporcionada por los sensores requiere una gran capacidad de procesamiento. Esta puede ser procesada en un único ordenador con la suficiente potencia o diversificada en dos ordenadores. Con el objetivo de reducir costes del sistema autónomo este hará uso de un ordenador con la suficiente capacidad de procesamiento.

- Tarjeta gráfica: el tratado de las imágenes obtenidas por las cámaras requiere una tarjeta gráfica GPU potente.
- Sistema operativo: el sistema operativo utilizado por los ordenadores de la mayor parte de los monoplazas es Ubuntu con la finalidad de utilizar ROS (Robot Operating System) debido a su gran implicación con la robótica.
- Sistema de frenado: respecto de la estrategia seguida para detener el vehículo se utilizan dos metodologías diferentes: incorporar un actuador sobre el sistema de frenado o detener el monoplaza mediante la regeneración de energía en el motor. No obstante, en este trabajo se plantea hacer uso de una bomba ABS para controlar el sistema de frenada de forma electrónica. La decisión sobre el método de frenado escogido que queda retenida hasta el desarrollo final del monoplaza autónomo al no ser evidente.
- Sistema de frenado de emergencia: es obligatorio incorporar un sistema de frenado de emergencia (EBS) para la participación del monoplaza en las pruebas dinámicas.
- Sistema de dirección: el control de la dirección se realiza mediante actuadores electromecánicos. No obstante, se plantea la posibilidad de hacer uso de una columna de dirección de un coche con ayudas de dirección que permita ser programado para controlar la dirección. Al igual que sucede con el sistema de frenado, la decisión sobre el actuador del sistema de dirección queda retenido hasta el desarrollo final del proyecto.

5. Análisis de costes de la inversión requerida

Conocidos los componentes necesarios del sistema autónomo y algunas de las estrategias llevadas a cabo por otros equipos de la categoría Driverless, queda por definir la configuración y coste de dicho sistema autónomo para el equipo ISC Racing Team. Como consecuencia del análisis realizado anteriormente se obtienen una serie de puntos clave que indican cuál puede ser la elección de componentes más acertada.

El reducido número de monoplazas autónomos que logran realizar todas las pruebas dinámicas lleva a la conclusión de que el sistema desarrollado debe ser sólido y robusto de tal forma que los posibles fallos del monoplaza autónomo no sean causados por limitaciones del hardware. Por otra parte, el denominador común de los equipos que sí han conseguido participar en todas las pruebas dinámicas, e incluso han resultado victoriosos, es el de que han planteado un sistema autónomo robusto y que permite ser desarrollado y mejorado durante varias temporadas. En consecuencia, la decisión de compra de ciertos componentes habría de realizarse con el objetivo de alcanzar su amortización en un periodo de tres o cuatro años.

En este análisis de costes se van a plantear tres posibles escenarios hipotéticos, desde el más económico (escenario 1) al más ambicioso (escenario 3), sobre los que desarrollar un sistema autónomo sólido con el cual poder trabajar durante un mínimo de tres años. Dichos escenarios quedarían sujetos a los diferentes presupuestos de ingresos del ISC Racing Team con lo que pudiese contar en las próximas temporadas.

Con el objetivo de determinar los presupuestos de inversión de una forma lo más precisa posible se ha contactado con distintos fabricantes, bien por email o en video llamada, para conocer los precios actuales de los diferentes componentes en los que estamos interesados. Toda la información de contacto de los fabricantes y comerciales contactados para la selección de componentes queda detallada en el Anexo B con el objeto de que ISC Racing Team pueda hacer uso de ella cuando resulte necesario. Todos los precios que se incluyen en los próximos apartados se han considerado sin IVA.

5.1 Descripción de la estructura de hardware del sistema autónomo

Los tres escenarios planteados en este análisis han sido basados en una misma estructura de hardware del sistema autónomo, la cual ha sido considerada óptima, y se diferencian únicamente en la precisión y calidad de algunos de los componentes. Esto se traduce en una diferencia significativa de precio en base a los componentes incluidos en cada escenario.

Dicha estructura sobre la que se construyen los tres escenarios es la siguiente:

- 1 x LiDAR
- 2 x cámaras monoculares
- 1 x INS/GNSS
- Sensores de velocidad en las ruedas
- Ordenador de alto rendimiento
- GPU de alto rendimiento
- Módulo ABS en el sistema de frenado
- Sistema de frenada de emergencia

- Actuador electromecánico para el sistema de dirección

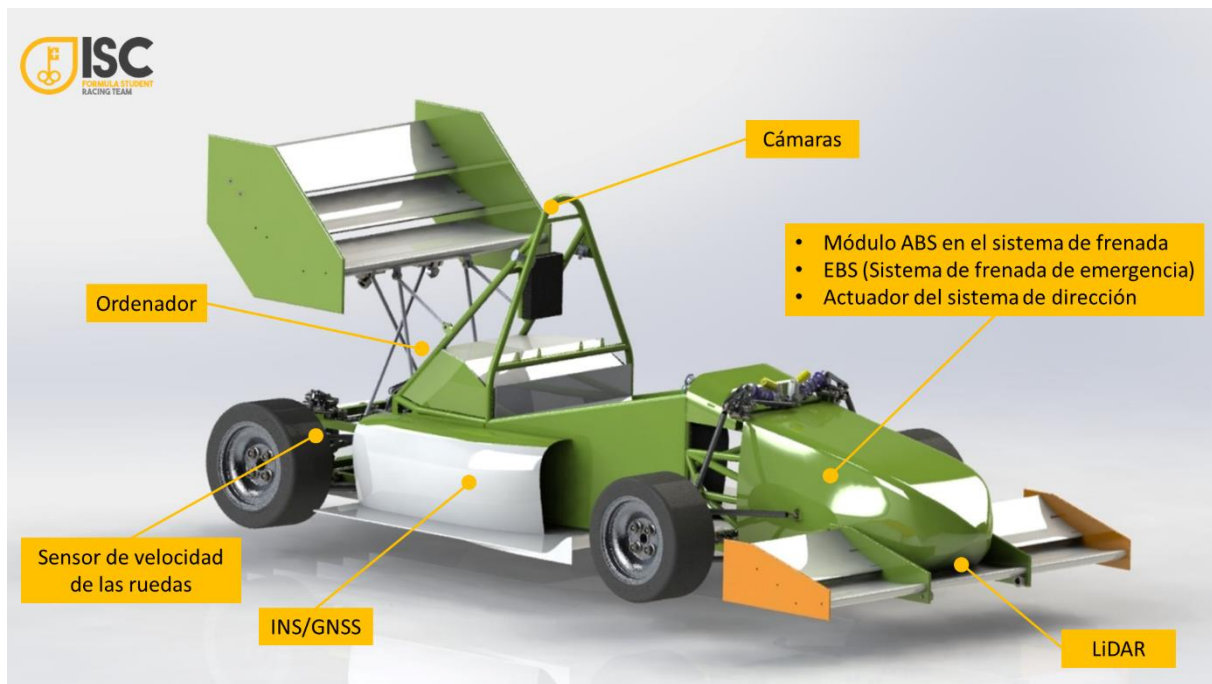


Ilustración 31. Estructura del sistema autónomo en el ISF-04 del ISC Racing Team

Una vez determinada la estructura del sistema autónomo se mencionan a continuación las razones por lo que dichos componentes han sido elegidos. Posteriormente, en cada escenario concreto se determinarán las especificaciones técnicas de aquellos componentes no comunes con el resto de los escenarios planteados. Los motivos de elección de los diferentes componentes son los siguientes:

LiDAR

Tras el análisis mostrado anteriormente en el apartado 4.6 se han evidenciado dos aspectos relevantes acerca de este componente: su utilización resulta muy conveniente y, por otra parte, con un único LiDAR es suficiente para lograr un buen funcionamiento del sistema autónomo. Además, debido a su elevado coste, el cual supone un 35% de la inversión inicial, solo se tendrá en cuenta en cada escenario el uso de un LiDAR en el sistema.

Para la selección del LiDAR en cada escenario se ha tenido en cuenta una distancia de reconocimiento de 120 a 200 metros y un número de canales del LiDAR de 32 o 64. Pese a la existencia de LiDAR con 16 canales, éste no se ha tenido en cuenta al tener una menor precisión, lo cual podría resultar en una limitación técnica. Adicionalmente, se da la circunstancia de que el precio obtenido para el LiDAR de 16 canales es más elevado que el precio que se ha conseguido identificar en algunos fabricantes de LiDAR de 32 o 64 canales que son mencionados más adelante.

Cámaras monoculares

Para obtener una imagen con profundidad, tal y como hacemos los seres humanos, es necesario hacer uso de una cámara estéreo o sobreponer la imagen de dos cámaras monoculares. Los tres escenarios planteados han sido diseñados sobre la premisa del uso de dos cámaras monoculares. Si bien esto conlleva un mayor coste en comparación con el uso de una cámara estéreo, aporta una serie de ventajas a tener en cuenta. Las cámaras monoculares, al ser individuales, pueden ser situadas de diversas formas y orientaciones con las cuales obtener las imágenes que el usuario considere necesarias. Por ello, como se ha comentado en el análisis realizado anteriormente (apartado 4.6), los principales equipos hacen uso de dos o incluso tres cámaras monoculares en sus monoplazas autónomos. Sin embargo, una cámara estéreo es fija y, por lo tanto, no permite tener esa libertad de movimiento.

Tras analizar las diferentes cámaras monoculares utilizadas por el resto de monoplazas autónomos, el tipo de cámara monocular elegido para los tres escenarios ha sido un modelo de cámara utilizado por varios equipos y, por lo tanto, ya validado. Se trata de la cámara Basler ACE 2, diseñada para aplicaciones industriales, con sensor CMOS, de un tamaño pequeño y con hasta 90 versiones diferentes para así poder seleccionar la configuración más apropiada para su uso. Adicionalmente, dentro de ese análisis de cámaras monoculares el modelo propuesto ha resultado ser el más económico con respecto a su competencia, siendo su precio 329 € la unidad. Por lo tanto, en lo que respecta a las cámaras no hay ninguna variación en los tres escenarios planteados.



Ilustración 32. Cámara Basler Ace 2 [28]

Para el funcionamiento de estas cámaras es necesario incorporar una lente acorde con la finalidad de su uso. Por lo tanto, debido a su posicionamiento en lo alto de la barra antivuelco y con el objetivo de obtener una imagen amplia, se ha considerado una necesidad de visibilidad de cada cámara de una altura de 2 metros a una distancia de 7 metros, resultando por ello óptima la lente Basler Lens C23-1224-5M-P f12mm con un precio de 99 €. Cabe destacar que otras lentes con diferentes especificaciones se encuentran en el mismo rango de precios. Por lo tanto, a la hora de escoger la lente final para el sistema autónomo el precio de ésta será similar al precio de la lente propuesta.

INS/GNSS

El uso de INS en conjunto con GNSS está ampliamente generalizado dentro de la categoría Driverless. Por lo tanto, su implementación en el sistema resulta necesaria. El coste de este sistema también conlleva una gran inversión inicial al resultar aproximadamente un 25% del presupuesto de adquisición de componentes. No obstante, la inversión en uno de estos dispositivos con una buena calidad podrá asegurar su uso durante múltiples temporadas amortizando con ello su alto coste.

El INS/GNSS seleccionado para los tres escenarios es el VectorNav VN-200 Rugged. Con el objetivo de obtener el máximo rendimiento en su funcionamiento éste debe ser montado en el centro de gravedad del monoplaza, logrando con ello la lectura más precisa de sus mediciones.



Ilustración 33. VectorNav VN-200 Rugged [29]

Sensores de velocidad en las ruedas

Para conocer la velocidad del monoplaza se hará uso de sensores de velocidad ubicados en las ruedas. Este sistema está ampliamente generalizado en la mayoría de los equipos ya que es utilizado en los monoplazas pilotados y autónomos de Formula Student y por lo tanto está validado. Adicionalmente, este componente ya está siendo utilizado en el ISC Racing Team en el monoplaza ISF-04 y por lo tanto no será necesaria su adquisición.

Por otro lado, la utilización de sensores de velocidad en las ruedas resulta ser necesaria para el funcionamiento del módulo de ABS utilizado para controlar el sistema autónomo de frenada planteado en estos escenarios.

Posteriormente, a medida que el sistema autónomo sea desarrollado se podría estudiar en los próximos años la opción de incorporar un GSS (Ground Speed Sensor) al monoplaza.

Ordenador de alto rendimiento

Dentro del diseño del sistema autónomo, el ordenador debe ser considerado como uno de sus principales pilares y, por ende, su configuración debe ser acorde con su función. Se trata del cerebro del vehículo, del procesador de toda la información y del responsable de las acciones dinámicas. Por lo tanto, la especificación técnica y el diseño del ordenador debe ser proporcional con la importancia de su rendimiento.

Con el objetivo de asegurar el alto rendimiento computacional se ha considerado la conveniencia de contar con un ordenador robusto y diseñado para un uso industrial en situaciones con un nivel alto de vibraciones. En las especificaciones técnicas analizadas de otros equipos se suele detallar el procesador CPU y GPU utilizado, pero son pocos los casos en los que se especifica el ordenador utilizado. No obstante, se ha podido observar cómo varios equipos, como el UPC (España) o Aristurtle (Grecia), hacen uso de ordenadores de un mismo fabricante, Cincoze, el cual fabrica ordenadores industriales diseñados para soportar vibraciones e impactos. Por lo tanto, tras analizar las especificaciones técnicas de los ordenadores de dicho fabricante y tras contactar con uno de sus comerciales se ha llegado a la selección de un modelo de ordenador óptimo para este proyecto.

Debido a la importancia de este componente, en los tres escenarios se ha tenido en cuenta el uso del mismo ordenador con la misma configuración técnica. Se trata de un ordenador Cincoze modelo DS-1201. Este es un ordenador industrial diseñado para obtener un alto rendimiento incluso en condiciones de temperaturas de hasta 70°C y con una gran tolerancia para funcionar en situaciones de vibraciones e incluso soportar impactos.



Ilustración 34. Cincoze DS-1201 [30]

Las especificaciones técnicas seleccionadas para este ordenador son las siguientes:

Processor	1 x Intel Core i7-9700TE (Coffee Lake R) 1.8 - 3.8 GHz 8-Core Processor
Memory (Up to 2)	1 x 32 GB SO-DIMM DDR4 3200 - Wide Temp
Primary Storage	1 x 512 GB M.2 SATA SSD
Connectivity	Sierra Wireless Extrovert 4G LTE Modem
Antennas for Wifi, Bluetooth, or 4G LTE	2 x 4G - Terminal Antenna 168 mm
External Fan	Cincoze External Fan Kit
PCIe or PCI Riser Card	1 x PCI/PCIe Slot for Add-on Cards
AD Adapter	1 x Power Adapter
Operating System	1 x Ubuntu Desktop 20.04 LTS 64-bit

Tabla 1. Especificación técnica del Cincoze DS-1201 presupuestado

En esta configuración seleccionada, el sistema autónomo cuenta con un gran procesador, al igual que con una memoria RAM suficiente. Además, este ordenador ofrece la posibilidad de añadir otra segunda memoria RAM en caso de ser necesario. Con el objetivo de poder archivar las imágenes y parámetros de los sensores, este ordenador cuenta con una memoria interna de 512 GB, suficiente para archivar todos aquellos datos necesarios de cada prueba dinámica. Por otro lado, esta especificación cuenta con la posibilidad de conectividad a dicho ordenador de forma remota, pudiendo así ser controlado sin necesidad de acceder de forma física a él. Además, cuenta con la posibilidad de conexión de una GPU externa, algo que, como se ha comentado anteriormente, resulta necesario para un procesamiento eficiente de las imágenes. Adicionalmente, incorpora el sistema operativo Ubuntu el cual es necesario para poder utilizar ROS (Robot Operating System). En conclusión, la configuración seleccionada cuenta con una gran robustez y capacidad para realizar las diferentes pruebas dinámicas. Con todo ello, el precio final de dicho ordenador con la especificación mostrada es de 2850 €.

Al igual que sucede con los componentes mencionados anteriormente, debido al alto coste de este dispositivo el objetivo es su amortización en un mínimo de al menos tres temporadas y, por lo tanto, la especificación técnica de éste debería resultar útil durante el periodo antes mencionado independientemente del escenario seleccionado.

Por último, cabe destacar que, el coste de fabricación de un ordenador “casero” o de otro fabricante conllevaría un coste similar o solo ligeramente inferior. Por lo tanto, aunque se seleccionase un ordenador de otro fabricante el importe a invertir sería similar al precio proporcionado por Cincoze a igualdad de especificaciones técnicas.

GPU adicional

El procesamiento de las imágenes obtenidas por las dos cámaras requiere de una gran potencia de procesamiento de imagen. Por lo tanto, para un correcto funcionamiento del sistema es necesaria la incorporación de una GPU con la suficiente potencia para los requerimientos del sistema.

Al igual que se ha comentado en los componentes anteriores, el coste de una tarjeta gráfica potente es alto y por lo tanto se han seleccionado, en función del escenario, dos GPU diferentes. No obstante, ambas han sido diseñadas para un uso industrial en aplicaciones de robótica e inteligencia artificial, siendo por ello utilizadas en sistemas autónomos de otros monoplazas de Formula Student y, por lo tanto, resultan validadas.

Para el escenario más económico (escenario 1) se ha tenido en cuenta el uso del módulo de desarrollo Nvidia Jetson TX2, tarjeta gráfica más que suficiente para este uso. En los otros dos escenarios (escenarios 2 y 3) se ha incluido un módulo de desarrollo Jetson AGX Xavier, el cual resulta ser el sistema con mayor potencia dentro de los modelos Jetson de Nvidia.

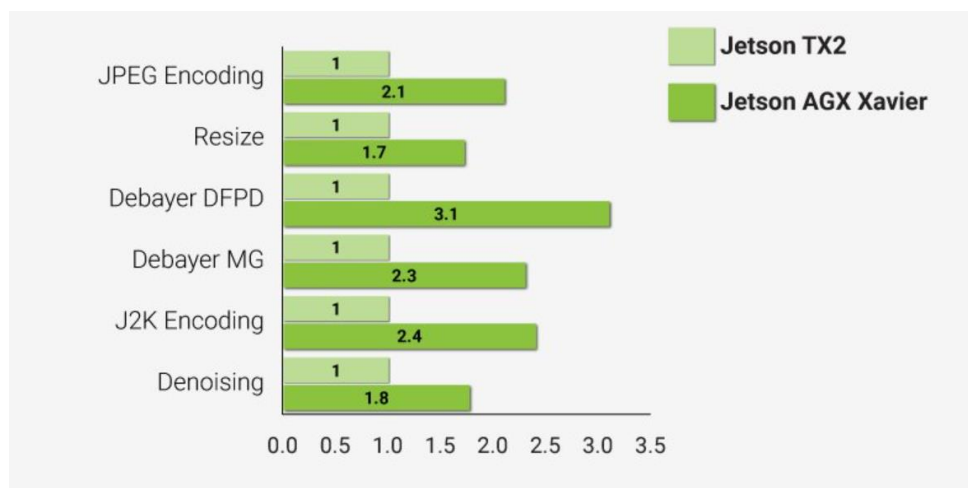


Ilustración 35. Comparativa de velocidad de procesamiento de imágenes entre Jetson TX2 vs. Jetson AGX Xavier [31]

Módulo ABS en el sistema de frenado

Para el control del sistema de frenado del monoplaza se plantea el uso de un módulo ABS el cual incorporar entre el servofreno y los latiguillos del sistema de frenado hidráulico. De esta forma se consigue controlar la frenada del monoplaza programando electrónicamente la apertura de las válvulas de la bomba de ABS.

Cabe recalcar que, como se ha comentado anteriormente, son varios los equipos que utilizan la regeneración de energía en el motor eléctrico para frenar el monoplaza, por lo que, en caso de seguir esa estrategia, el coste de este ABS no sería considerado. No obstante, con el objetivo de realizar un presupuesto representativo, se ha tenido en cuenta la implementación de dicho módulo en el sistema de frenado en los tres escenarios.

Sistema de frenada de emergencia (EBS)

Este trabajo no se ha enfocado en el diseño del sistema de emergencia a implementar en el sistema autónomo. No obstante, teniendo en cuenta que este sistema necesitará un servofreno adicional y otro módulo ABS para poder ser incorporado al sistema de frenado se ha considerado que el coste de éste es similar al coste del sistema de frenada comentado en el apartado anterior.

Actuador electromecánico para el sistema de dirección

Al igual que se ha comentado anteriormente en el resto de los actuadores, este trabajo no ha sido enfocado en el diseño de los actuadores debido a que éste depende de las especificaciones técnicas del futuro monoplaza autónomo. Para poder conocer el coste del actuador a utilizar se ha tenido en cuenta el actuador del sistema de dirección utilizado por el equipo Squadra Corse. Este equipo utiliza un actuador Maxon EC 60 Flat 150 W el cual tiene un precio de 131 €. Adicionalmente, este actuador necesita hacer uso de un controlador de posición Maxon EPOS 4 cuyo coste es de 463 €. Por lo tanto, con el objetivo de tener en cuenta el coste de un actuador rotativo de unas características similares y los respectivos complementos necesarios para la implementación al monoplaza se tendrá en cuenta como coste del sistema de la dirección autónoma un importe, con margen de seguridad incluido, de 1000 €. De esta forma, los tres escenarios contemplan el coste de un sistema de dirección autónoma similar.

Soportes de los componentes del sistema

Dispositivos como el LiDAR, cámaras y ordenador necesitan un soporte con el cual ser instalados en el monoplaza. Debido a la posibilidad del ISC Racing Team de fabricar dichos soportes con la maquinaria existente en los laboratorios de ICAI (cortadora láser, impresora 3D, etc.) se ha tenido en cuenta el coste del material necesario para la fabricación de estos soportes (aluminio, ABS, PLA, etc) al igual que de la respectiva tornillería que requiera su fijación. Puesto que el número de componentes en los tres escenarios no varía, este coste se mantiene constante.

Costes administrativos

Adicionalmente a los costes de los componentes de este sistema, será necesario incluir en cada escenario los costes administrativos requeridos para disponer de varios días de prueba, o *testing*, así como las inscripciones en las competiciones de Formula Student.

Por lo que a días de *testing* se refiere, se ha considerado disponer de 6 días de alquiler de circuito incluyendo, por lo tanto, todos los costes involucrados en un día de *testing*.

Por otro lado, dado que en el año actual ISC Racing Team va a participar en competiciones de Formula Student en España e Italia, se ha considerado el precio de inscripción en la categoría Driverless en ambas competiciones. El resto de los costes relacionados con las competiciones están ya incluidos en el presupuesto general del equipo y, por lo tanto, no se tienen en cuenta en estos escenarios.

5.2 Análisis resumen de costes de los distintos escenarios

A continuación, se muestran los costes de inversión en los distintos componentes identificados en cada uno de los escenarios.

5.2.1 Escenario 1

En este escenario se persigue poder adquirir los componentes de un sistema autónomo sólido que permita iniciar la participación en la categoría Driverless de la forma más económica con el presupuesto más reducido posible asegurando la máxima fiabilidad y rendimiento.

Este escenario cuenta con un LiDAR del fabricante Ouster y su modelo es el OS1-32. Este LiDAR cuenta con 32 canales con los que obtiene 655.360 puntos/segundo llegando a una distancia de reconocimiento de 120 metros. Además, este LiDAR cuenta con un diseño robusto y resistente, adecuado en caso de impacto. Su precio de venta al público es elevado, no obstante, tras contactar con Katia Turchaninova, comercial de Ouster, el precio final de venta con la finalidad de uso académico es de 4275 €. Se trata de un precio muy ajustado al coste de fabricación con el cual Ouster busca impulsar su marca en el mundo académico. Adicionalmente, tras proponer a Katia la posibilidad de llevar a cabo un acuerdo de patrocinio con Ouster, ésta ha comentado que lo podrían valorar una vez planteado este proyecto formalmente.



Ilustración 36. Ouster OS1-32 [32]

En los tres escenarios se ha considerado el uso del mismo ordenador, un Cincoze DS-1201. No obstante, sí varía con respecto a otros escenarios la elección de la GPU utilizada. En este caso se ha seleccionado el módulo de desarrollo Jetson TX2 el cual tiene una GPU de gran calidad para el procesamiento de imágenes y es utilizado por múltiples equipos en sus ordenadores.

Por lo tanto, el presupuesto estimado para este escenario 1 sería el siguiente:

Concepto	Unidades	Precio (€)	Precio Total (€)
Ouster OS1-32	1	4275	4275
Basler ACE 2	2	468	936
VectorNav VN-200 Rugged	1	3050	3050
Cincoze DS-1201	1	2850	2850
Nvidia Jetson TX2	1	455	455
Soportes de dispositivos	4	200	200
Módulo ABS del sistema de frenado	1	750	750
EBS	1	1000	1000
Actuador sistema de dirección	1	1000	1000
Subtotal Costes Tecnológicos			14516
Coste de <i>testing</i>	6	400	2400
Coste de inscripción	2	1800	3600
Subtotal Costes Administrativos			6000
TOTAL			20516

Tabla 2. Presupuesto del Escenario 1

5.2.2 Escenario 2

En este segundo escenario se ha planteado una mejora uno de los componentes con respecto al escenario 1. La configuración presentada a continuación consigue un sistema autónomo funcional de gran precisión, robustez y de larga duración que permite ser desarrollado durante más temporadas, objetivo clave ante la gran inversión que conlleva.

En este escenario se plantea una mejora con respecto al LiDAR, considerando en este caso la compra del LiDAR Ouster OS1-64. Se trata de una mejor versión dentro de la gama Ouster OS1 ya que ésta cuenta con el doble de definición al disponer de 64 canales. Con respecto al modelo seleccionado anteriormente este LiDAR mantiene la misma distancia de reconocimiento, 120 metros, pero duplica el número de puntos en cada imagen, con 1.310.720 puntos/segundo. Debido a esta gran mejora de calidad este LiDAR tiene un precio de venta para uso académico de 8396 €.

Por lo tanto, tras realizar las variaciones comentadas en este apartado el presupuesto de esta configuración es el siguiente:

Concepto	Unidades	Precio (€)	Precio Total (€)
Ouster OS1-64	1	8396	8396
Basler ACE 2	2	468	936
VectorNav VN-200 Rugged	1	3050	3050
Cincoze DS-1201	1	2850	2850
Nvidia Jetson TX2	1	455	455
Soportes de dispositivos	4	200	200
Módulo ABS del sistema de frenado	1	750	750
EBS	1	1000	1000
Actuador sistema de dirección	1	1000	1000
Subtotal Costes Tecnológicos			18637
Coste de <i>testing</i>	6	400	2400
Coste de inscripción	2	1800	3600
Subtotal Costes Administrativos			6000
TOTAL			24637

Tabla 3. Presupuesto del Escenario 2

No obstante, el aumento del presupuesto que conlleva la incorporación de este nuevo LiDAR plantea una posible variación de este escenario. Dicho aumento de 4121 € puede también ser dedicado a la compra de un segundo LiDAR OS1-32, creando así el escenario 2.2. Por lo tanto, este escenario 2.2 plantea la configuración del escenario 2 haciendo uso de dos LiDAR OS1-32. De esta forma, uno de ellos puede ser posicionado en la parte frontal del monoplaza y el otro en la parte superior de la barra antivuelco, configuración utilizada por el AMZ Racing Team en su monoplaza Pilatus.

5.2.3 Escenario 3

Este tercer escenario es el más ambicioso desde el punto de vista económico y tecnológico, hecho que justifica su aumento de coste con respecto al resto de escenarios.

En él se plantea una última mejora con respecto a la configuración utilizada en el segundo escenario. Se trata de la incorporación de un LiDAR del fabricante referente en la industria de este componente, Velodyne. Se trata del LiDAR Velodyne Ultra Puck el cual es utilizado por múltiples equipos dentro de la competición Formula Student. Cuenta con 32 canales y una lectura de 600000 puntos/segundo. Pese a poder resultar inferior en sus especificaciones técnicas con respecto al LiDAR seleccionado en el anterior escenario, éste resulta ser el LiDAR referente en la industria debido a su alto rendimiento y fiabilidad. Adicionalmente, en comparación con los otros dos LiDAR propuestos de la gama Ouster OS1, éste cuenta con un rango de lectura de 200 metros, lo cual supone una mejora de un 67% en lo que a distancia de reconocimiento respecta.

El segundo cambio con respecto a los otros dos escenarios está en la mejora de su GPU. En esta configuración se ha contemplado el uso del mejor módulo de desarrollo de Nvidia

Jetson, el Nvidia Jetson AGX XAVIER. Éste es un módulo de alto rendimiento diseñado para aplicaciones de inteligencia artificial, robótica y maquinaria autónoma.

El presupuesto de esta configuración es el siguiente:

Concepto	Unidades	Precio (€)	Precio Total (€)
Velodyne Ultra Puck	1	9150	9150
Basler ACE 2	2	468	936
VectorNav VN-200 Rugged	1	3050	3050
Cincoze DS-1201	1	2850	2850
Nvidia Jetson AGX XAVIER	1	1324	1324
Soportes de dispositivos	4	200	200
Módulo ABS del sistema de frenado	1	750	750
EBS	1	1000	1000
Actuador sistema de dirección	1	1000	1000
Subtotal Costes Tecnológicos			20260
Coste de <i>testing</i>	6	400	2400
Coste de inscripción	2	1800	3600
Subtotal Costes Administrativos			6000
TOTAL			26260

Tabla 4. Presupuesto del escenario 3

5.3 Conclusión

A modo de conclusión de este apartado 5 “Análisis de costes de la inversión requerida” se adjunta la siguiente tabla en la que se muestran los importes de costes tecnológicos y administrativos estimados en cada escenario.

Componentes	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
LiDAR	4275	8396	9150
Cámaras	936	936	936
INS/GNSS	3050	3050	3050
Ordenador	2850	2850	2850
GPU extra	455	455	1324
Actuador Freno	200	200	200
EBS	750	750	750
Actuador Volante	1000	1000	1000
Soportes	1000	1000	1000
Subtotal Costes Tecnológicos	14516	18637	20260
Coste de <i>testing</i>	2400	2400	2400
Coste de inscripción	3600	3600	3600
Subtotal Costes Administrativos	6000	6000	6000
TOTAL	20516	24637	26260

Tabla 5. Resumen de importes de costes tecnológicos y administrativos estimados en cada escenario

6. Análisis del impacto en la estructura actual del equipo

6.1 Estructura actual del equipo

Transcurridos cinco años desde el inicio del proyecto de Formula Student en el ISC Racing Team el equipo dedicado al desarrollo del monoplaza para Formula Student cuenta con una plantilla formada por un total de 70 estudiantes de la Universidad Pontificia Comillas. Se trata de un grupo de estudiantes que dedica un gran número de horas de trabajo y esfuerzo al desarrollo del monoplaza con los objetivos de obtener un buen resultado en la competición Formula Student y ampliar su formación técnica, de gestión y profesional-

Actualmente, gracias a la profesionalización de la asociación ISC Racing Team, realizada en esta última temporada, el equipo de Formula Student cuenta con una estructura organizativa consolidada y con un número de estudiantes bien dimensionado y equilibrado para los diferentes roles del mismo. Es decir, el equipo de Formula Student ha encontrado el balance adecuado de su plantilla y, por lo tanto, el aumento de personas en la plantilla del equipo no es su objetivo a corto/medio plazo.

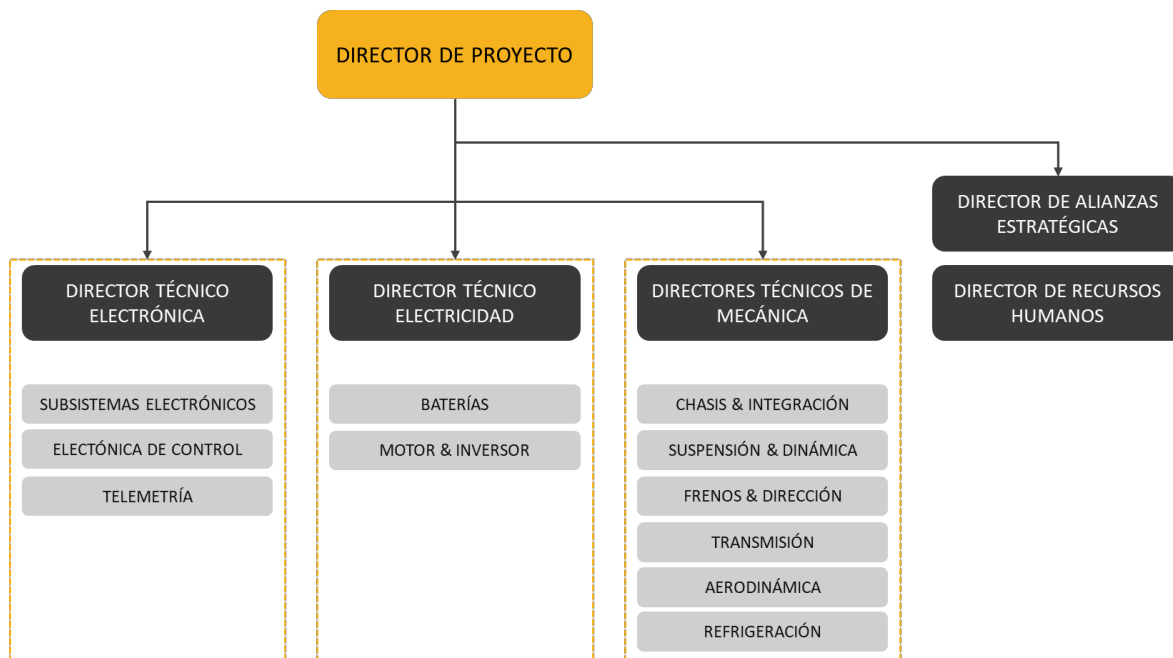


Ilustración 37. Organigrama del ISC Racing Team Formula Student 2021/2022

Como se puede observar en este organigrama, el equipo cuenta con un director de proyecto del cual dependen diferentes líneas de reporte en base a su área de especialización: electrónica, eléctrica, mecánico, administrativo y de recursos humanos. Cada área cuenta con un responsable del cual surgen diferentes ramificaciones en base a los requerimientos de cada departamento, creando con ello subdepartamentos con sus respectivos responsables en cada uno.

Tras haber transcurrido más de la mitad de la temporada 2021/2022, la junta directiva del equipo confía plenamente en haber planteado una estructura organizativa funcional y en haber encontrado un número óptimo de estudiantes asociados. Por lo tanto, debido al

aumento de interés de los estudiantes para formar parte del equipo, en la próxima temporada se cuenta con realizar una preselección entre los candidatos. De esta forma, se podrá realizar una formación previa a la incorporación al equipo y así seleccionar a aquellos candidatos con mayores cualificaciones en base a los requerimientos exigidos.

6.2 Estructura del equipo requerida para la implementación del sistema autónomo

La gran importancia del desarrollo de un sistema autónomo funcional, principal objetivo de la categoría Driverless, requeriría de la incorporación de una nueva área al equipo: el departamento del sistema autónomo. Con el objetivo de no variar significativamente el organigrama actual, con el cual el equipo ha venido operando adecuadamente, se plantea la incorporación de dicho nuevo departamento impactando en la menor medida posible sobre la estructura ya existente.

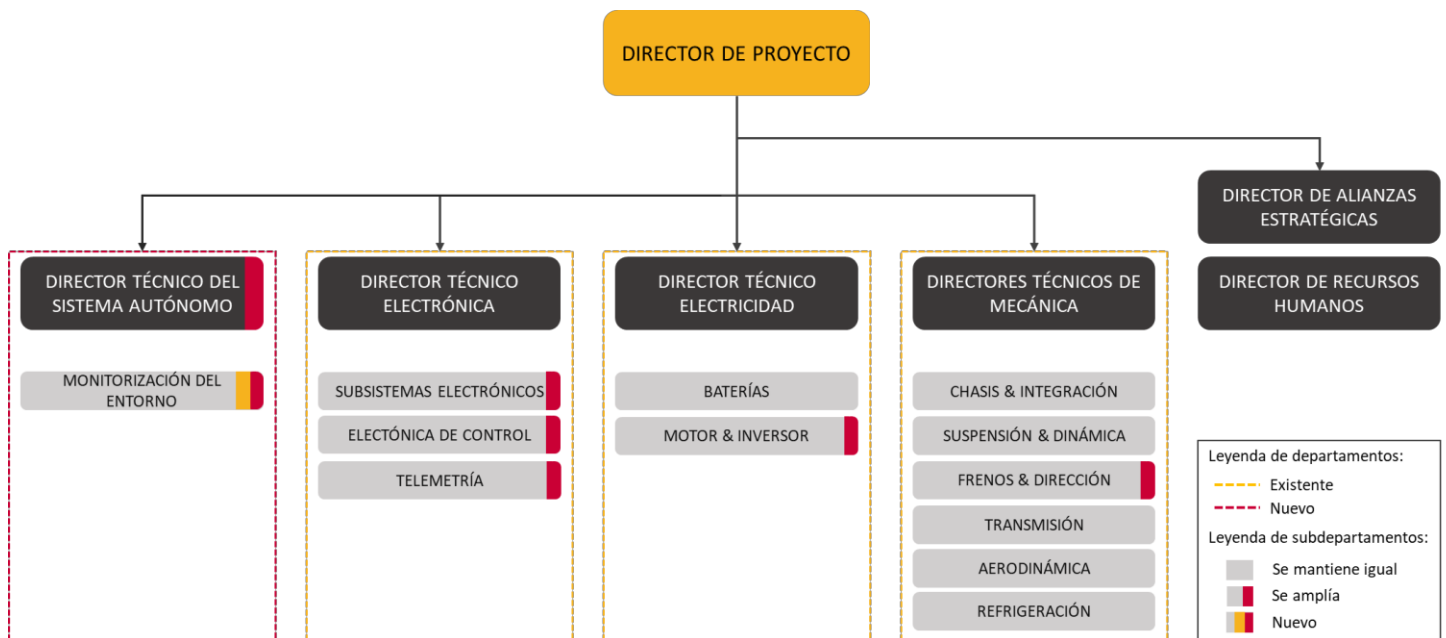


Ilustración 38. Organigrama propuesto para la incorporación del sistema autónomo

Dadas las sinergias del sistema autónomo con varias de las áreas ya existentes en el equipo, se propone la ampliación de personal en algunas de dichas áreas (señalizadas en rojo) así como la creación de una nueva área específica del sistema autónomo (señalado con el recuadro discontinuo rojo). En esta nueva área se crea un nuevo subdepartamento dedicado al desarrollo de la monitorización del entorno (señalizado en amarillo y rojo).

La nueva estructura planteada busca mantener el organigrama actual ampliando únicamente aquellas áreas involucradas en el sistema autónomo. De esta forma, cada subdepartamento puede llevar a cabo el desarrollo de sus componentes teniendo en cuenta los objetivos del monoplaza pilotado y del monoplaza autónomo.

El director técnico del sistema autónomo será el responsable de definir la estrategia de desarrollo del sistema junto con el resto de directores de departamento, de revisar periódicamente los avances de cada subdepartamento involucrado y de dirigir el desarrollo del sistema de monitorización del entorno.

De esta forma, la estructura planteada conllevaría la incorporación al equipo de un número de entre 10 y 15 estudiantes repartidos entre los diferentes subdepartamentos marcados en rojo. A continuación, se realizan algunas sugerencias en base a dicha estructura. No obstante, todo lo indicado a continuación quedaría sujeto a la situación y estructura concreta del equipo a la hora de acometer este proyecto pues depende en gran medida del perfil de los estudiantes que se logre atraer en esta temporada tras la salida de una parte de la estructura (como cada año), al haber finalizado su periodo en la universidad.

- Departamento de sistema autónomo: este departamento incluiría un nuevo subdepartamento dedicado a la monitorización del entorno y respuesta del sistema en base a la información obtenida por los sensores. Es decir, se dedicaría al desarrollo del procesamiento de toda la información generada por el LiDAR y las cámaras. Dada la relación de este subdepartamento con la inteligencia artificial, se sugiere incorporar estudiantes del grado de Matemáticas e Inteligencia Artificial, los cuales dispondrían de las competencias específicas requeridas en esta área.
- Departamento electrónico: debido a la alta sinergia de este departamento con el sistema de automatización se sugiere incorporar estudiantes del grado de Matemáticas e Inteligencia Artificial, los cuales trabajarían junto con los estudiantes del área de electrónica ya presentes en el departamento. Como se explicó al inicio de este proyecto la disponibilidad de este nuevo talento en la universidad es lo que permite afrontar con garantías un reto como éste.
- Departamento eléctrico: el número de estudiantes a incorporar en el subdepartamento Motor & Inversor queda sujeto al tipo de frenada que se decida utilizar: el sistema de frenada ya existente con un actuador o bien el sistema de frenada regenerativa. En caso de utilizar el sistema de frenada ya existente mediante un actuador, solo sería necesaria la incorporación de un nuevo estudiante el cuál sería el encargado de la transmisión de la respuesta del ordenador al accionamiento eléctrico. En caso de plantear el sistema de frenada regenerativa, la complejidad de desarrollo en esta área sería mayor y, por lo tanto, sería necesario aumentar el número de personas en este subdepartamento. No obstante, con independencia del sistema de frenada seleccionado, se sugiere la incorporación de ingenieros de la especialidad eléctrica.
- Departamento mecánico: al igual que sucede en el departamento eléctrico, el número de estudiantes a incorporar quedaría sujeto al tipo de frenada autónoma seleccionado. El uso del sistema de frenada con un actuador conllevaría el diseño e incorporación al monoplaza de tres actuadores: de frenada, EBS y de dirección. Por lo tanto, esto supondría mayor trabajo para este subdepartamento y sería necesario incorporar mayor cantidad de estudiantes. El caso contrario sucede al plantear la frenada regenerativa, con la cual no se incorporaría un actuador en el sistema de frenada y ello supondría diseñar e incorporar únicamente el EBS y el actuador de dirección. Por lo tanto, de esta forma se reduciría el volumen de trabajo de este subdepartamento y con ello también la cantidad de personal requerido.

7. Análisis de la financiación requerida en este proyecto

7.1 Sistema actual de financiación del equipo

El sistema de financiación actual del ISC Racing Team proviene exclusivamente del apoyo de las empresas patrocinadoras, las cuales apuestan por el talento joven con inquietud en la innovación, el emprendimiento y la sostenibilidad. Estos patrocinios son el pilar fundamental para la consecución del desarrollo de los diferentes proyectos del ISC Racing Team: Moto Student y Formula Student.

En función del valor económico de la aportación, los patrocinadores se clasifican en: Premium, Diamante, Oro, Plata, Bronce y Formula. Para la temporada 2021/2022 el equipo ISC Racing Team Formula Student cuenta con el apoyo de los siguientes patrocinadores:

PREMIUM				
DIAMANTE				
ORO				
PLATA				
BRONCE				

Ilustración 39. Patrocinadores equipo ISC Racing Team Formula Student 2021/2022

El apoyo recibido por estos patrocinadores proviene de empresas involucradas en múltiples sectores industriales, demostrando con ello la gran implicación del proyecto Formula Student en el mundo empresarial. Los patrocinadores que apoyan el desarrollo del proyecto actual pertenecen a los siguientes sectores:

- Sector energético: Iberdrola
- Sector financiero: Bankinter y Línea Directa
- Sector de la automoción: CesviMap, Gestamp, Tesla, SaarGummi
- Sector de ingeniería: Colegio Nacional de Ingenieros del ICAI, COGITIM y Teyde
- Sector manufacturero: NTN
- Sector de consultoría: Global Comunicación
- Sector metalúrgico: Ates

Una vez mencionados los diferentes sectores industriales vinculados al ISC Racing Team Formula Student, se debe analizar en qué modo impacta este proyecto sobre nuestros patrocinadores. El patrocinio obtenido de estas empresas se sustenta sobre cuatro pilares: i) visibilidad internacional, ii) asociación a proyectos de prestigio, iii) apoyo y captación de talento joven y iv) la importancia de posicionamiento en proyectos relacionados con vehículos autónomos.

i) Con la implementación del monoplaza autónomo el posicionamiento internacional del equipo en la competición Formula Student se vería reforzado al participar en una categoría adicional (Driverless). Por lo tanto, la visibilidad de nuestros patrocinadores a nivel internacional se vería amplificada con respecto a la situación actual.

ii) Por otro lado, uno de los fundamentos principales del patrocinio, es la asociación de las empresas a proyectos o actividades de prestigio. En este aspecto los patrocinadores pasan a ser reconocidos por su colaboración en actividades de la Universidad Pontificia Comillas, al igual que por su asociación con un proyecto de gran valor llevado a cabo por estudiantes. Así es el caso del desarrollo de un monoplaza autónomo por estudiantes universitarios los cuales, sin haber finalizado sus estudios y simultaneándolo con los mismos, son capaces de desarrollar desde cero, año tras año, un monoplaza y adicionalmente desarrollar un sistema con el cual lograr su conducción autónoma.

iii) El tercer pilar de este patrocinio es la muestra de apoyo de estos socios al talento joven de los estudiantes. El patrocinio de estas empresas ofrece la posibilidad de darse a conocer entre los estudiantes y ello les permite la oportunidad de captar a aquellos estudiantes con un perfil muy demandado en base a los requerimientos actuales de estas empresas. De tal forma, tanto los estudiantes como las empresas se ven beneficiados por esta estrecha relación entre organizaciones.

iv) Por último, el claro enfoque de la industria automovilística hacia los vehículos autónomos convierte a este proyecto en una forma óptima de involucrarse en la industria de la automoción autónoma. Todo ello, en una fase previa a la incorporación generalizada de estos vehículos en la industria automovilística.

De acuerdo con todo lo anterior, el conjunto de patrocinadores que actualmente muestra interés por el equipo seguiría resultando beneficiado con la consecución de este proyecto.

7.2 Propuestas sobre financiación a futuro

Con la aparición de este nuevo proyecto, el ISC Racing Team se encuentra ante la conveniencia de ampliar su cartera de patrocinadores. El desarrollo de este sistema autónomo incrementa el número de nichos industriales que podrían estar interesados en el patrocinio del equipo. Adicionalmente a los sectores industriales ya presentes entre los patrocinadores ya afiliados, el desarrollo del sistema autónomo podría generar interés en nuevas áreas: sector tecnológico, sector de la automatización, sector de la robótica y sector de la inteligencia artificial. Por lo tanto, con ello se incrementaría significativamente la posibilidad de conseguir la afiliación de nuevos socios a este proyecto.

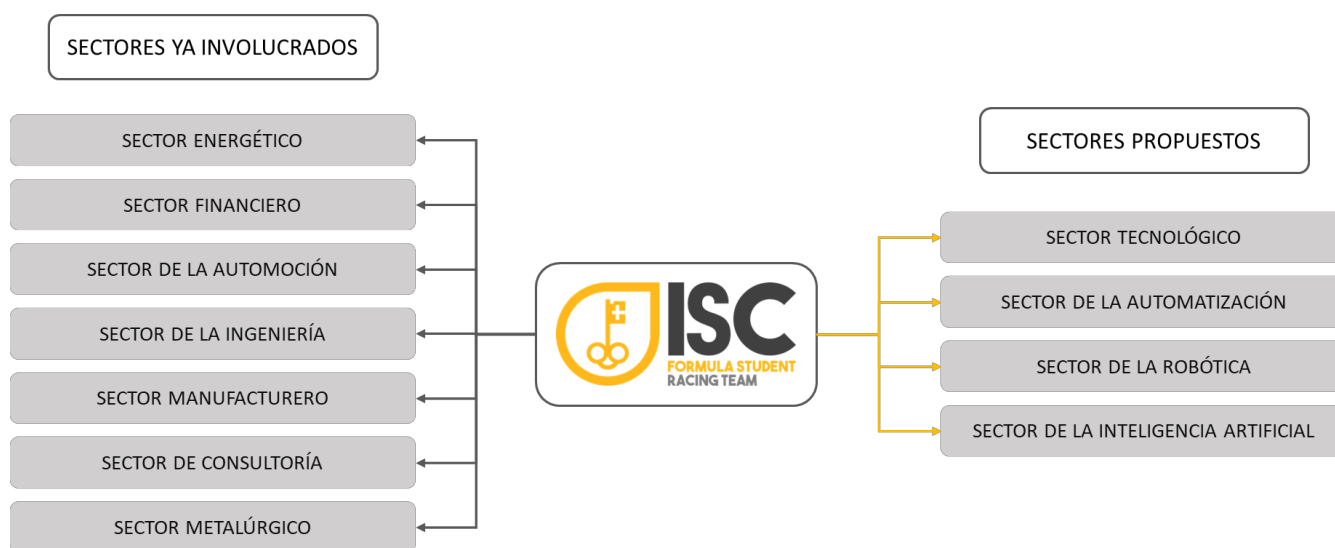


Ilustración 40. Sectores involucrados tras la implementación del sistema autónomo

Actualmente, se distinguen cuatro tipos diferentes de patrocinio en base a la aportación realizada:

- **Socio financiador:** Aporta capital al proyecto.
- **Socio de fabricación:** Provee piezas o colabora con la fabricación de ellas.
- **Socio logístico:** Proporciona medios (como herramientas, utillaje, etc).
- **Socio formador:** Colabora con la formación de los integrantes del equipo o concede licencias de software.

Dentro de las diferentes posibilidades de afiliación ofrecidas por el ISC Racing Team se plantean diferentes sugerencias para el equipo a la hora de desarrollar este proyecto. El alto coste de ciertos componentes como el LiDAR, el INS/GNSS y el ordenador aconsejaría intentar obtener una asociación con alguno de sus fabricantes o distribuidores con el objetivo de reducir el precio de dicho componente. Por otro lado, el resto de componentes, como son las cámaras y actuadores, también podrían ser obtenidos mediante la incorporación de un socio fabricante o distribuidor. Adicionalmente, la importancia de un adecuado procesamiento de información sugiere la afiliación de algún socio formador con el cual preparar adecuadamente al personal para desarrollar la programación requerida de los sistemas.

De acuerdo con todo lo anterior, a continuación, se muestran algunas empresas que se considera que podrían resultar de interés para el ISC Racing Team a la hora de llevar a cabo este proyecto.

LIDAR				
Cámaras				
INS/GNSS				
Ordenadores				
Distribuidores				

Ilustración 41. Propuestas de empresas de interés para patrocinio

8. Marco temporal de desarrollo del sistema autónomo

Dada la complejidad de este proyecto, a priori, parece que lo más razonable sería competir con este monoplaza autónomo en la temporada 2023/2024. No obstante, para poder estar en situación de competir en dicha temporada habría que comenzar a trabajar en el próximo curso ciertos aspectos que se mencionan a continuación:

- Formación de personal: se sugiere comenzar en la próxima temporada la formación de estudiantes del equipo de dos formas paralelas. Por un lado, tras plantear la nueva estructura del equipo se podría comenzar a formar a aquellos estudiantes de cada una de las áreas con conocimientos básicos del sistema autónomo. De esta forma, a la hora de afrontar dicho reto estos estudiantes dispondrían de una base de conocimiento inicial. Por otro lado, dado que en el año 2022/2023 la primera promoción del nuevo grado de Matemáticas e Inteligencia Artificial se encontrará cursando su segundo año, y conocida la necesidad de incorporar dichos estudiantes, resultaría aconsejable la presentación e invitación al equipo, con el objetivo de afrontar la temporada 2023/2024 con dichos estudiantes incorporados en la plantilla. Adicionalmente, con las siguientes nuevas promociones se debe iniciar la captación de su interés desde su primer año en la escuela.
- Financiación: sobre la premisa de que el desarrollo del monoplaza autónomo parece ineludible y va a ser realizado en los próximos años, se podría comenzar desde esta misma temporada asignando una parte del remanente del presupuesto general del equipo. Como ejemplo, una asignación de 7500 euros en ésta y en la próxima temporada, lo cual supone un 8% del presupuesto actual del equipo, permitiría comenzar la temporada 2023/2024 con un fondo de 15.000 euros para invertir en el sistema autónomo. Este importe supondría poder afrontar el inicio de dicha temporada con la disponibilidad de un 60-75% del importe de inversión requerido en los escenarios planteados. Por lo tanto, se vería reducido sustancialmente el importe de la aportación requerida a los nuevos patrocinadores, aunque se pretenda obtener el 100% de la financiación necesaria para el año igualmente.

Adicionalmente, el departamento de alianzas estratégicas podría comenzar en la próxima temporada 2022/2023 con la difusión de este proyecto entre potenciales patrocinadores con el objetivo de ir captando su interés.

- Inversión en tecnología: la disposición actual de ingenieros especializados en electrónica dentro del equipo puede resultar suficiente para dar comienzo a este proyecto. En base a las capacidades de dichos estudiantes resultaría provechoso dar comienzo al desarrollo del sistema autónomo. De esta forma, se podría iniciar la adquisición, ya la próxima temporada, de aquellos componentes que se consideren esenciales, como sería el caso de un ordenador, para empezar con las primeras fases de este proyecto.

En cualquier caso, todo esto quedaría sujeto a que la junta directiva del equipo evaluase el grado de involucración requerida en este proyecto en la próxima temporada con el objetivo de comenzar a competir en la temporada 2023/2024.

9. Consideraciones finales: ¿Por qué se debe impulsar este proyecto?

A continuación, se realizan unas consideraciones finales acerca de por qué se debe impulsar este proyecto desde la perspectiva de la Universidad Pontificia Comillas, los estudiantes y los patrocinadores:

1. Un proyecto de esta naturaleza muestra la alta cualificación de los estudiantes de la Universidad Pontificia Comillas, reflejando en particular las capacidades técnicas, analíticas y organizativas de los ingenieros de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI.
2. Adicionalmente, fomenta la colaboración transversal entre alumnos de diferentes grados de la Universidad Pontificia Comillas ICADE-ICAI. Con este nuevo proyecto se da la oportunidad de incorporar al equipo a los estudiantes del nuevo grado de Ingeniería Matemática e Inteligencia Artificial, así como de incorporar nuevos estudiantes de la escuela con interés por comenzar su trayectoria en el mundo de los vehículos autónomos.
3. Por lo que a los estudiantes respecta, con este proyecto se les da la oportunidad de afrontar un gran reto que les permite aplicar los conocimientos teóricos obtenidos en su formación académica de una forma práctica ya que son los responsables del desarrollo y fabricación de un monoplaza competitivo.
4. Además, el gran valor formativo, personal y profesional del proyecto tiene un gran impacto positivo sobre los integrantes del equipo los cuales contarán con una gran experiencia para su futuro laboral.
5. Por su parte, los patrocinadores amplían su oportunidad de darse a conocer dentro de la escuela al igual que de captar estudiantes con un gran valor añadido para sus compañías.
6. El carácter internacional de la competición Formula Student resulta ser un gran escaparate para la visibilidad de las compañías patrocinadoras al pasar a competir en una categoría adicional.
7. Por último, dada la envergadura de este proyecto se fomenta la relación de los patrocinadores con ICAI ya que ofrece la oportunidad de mostrar el apoyo de estas empresas a proyectos de prestigio con gran reconocimiento, reforzando así su vínculo con la Universidad Pontificia Comillas.

Por lo tanto, una vez se han identificado y validado claramente los elementos tecnológicos requeridos para el desarrollo del sistema autónomo, al igual que los requerimientos y retos a afrontar queda evidenciada la viabilidad del mismo. Todo ello queda corroborado por el hecho de ser un proyecto afrontado por un gran número de universidades de ingeniería en diferentes países.

Paralelamente, se han analizado diferentes escenarios económicos, concluyendo que la cantidad de inversión requerida para llevar a cabo este proyecto es asumible por el equipo. Como apoyo se han identificado potenciales nuevas vías de financiación que podrían llegar con la incorporación de este nuevo proyecto. Por último, se ha desarrollado la forma de incorporar nuevos recursos humanos a la estructura del equipo minimizando el impacto sobre el organigrama funcional actual.

En conclusión, el desarrollo de un monoplaza autónomo en el ISC Racing Team debe ser llevado a cabo dada su viabilidad y el impacto positivo que tendrá sobre la Universidad Pontificia Comillas, el conjunto de sus estudiantes y los patrocinadores involucrados.

10. Bibliografía

- [1] Naciones Unidas, “Acuerdo de París”, 2015 [Online] https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- [2] Environment, Public Health and Food Safety (ENVY), J. Huitema (Febrero 2022): “C02 emission standards for new cars and vans ‘Fit for 55’ Package”, [Online] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698920/EPRS_BRI\(2022\)698920_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698920/EPRS_BRI(2022)698920_EN.pdf)
- [3] Environment, Public Health and Food Safety (ENVY), J. Huitema (Febrero 2022). “C02 emission standards for new cars and vans ‘Fit for 55’ Package”, [Online]. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698920/EPRS_BRI\(2022\)698920_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698920/EPRS_BRI(2022)698920_EN.pdf)
- [4] “UK enshrines new target in law to slash emissions by 78% by 2035” (Abril 2021) [Online] <https://www.gov.uk/government/news/uk-enshrines-new-target-in-law-to-slash-emissions-by-78-by-2035>
- [5] Sociedad de Ingenieros de Automoción, (Abril 2021). “Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles” (J3016) https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104
- [6] “Cámaras digitales, radares y LIDAR: los ojos de los vehículos autónomos”. RS Componentes. [Online]. <https://es.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=footer1/camaras-digitales-radares-y-lidar-los-ojos-de-los-vehiculos-autonomos>
- [7] K. Gremillion (Diciembre 2021). “How to Choose the Right Sensors for Autonomous Vehicles”. Ansys. [Online] <https://www.ansys.com/blog/how-to-choose-the-right-sensors-for-autonomous-vehicles>
- [8] B. Shahian (Junio 2019). “Ultrasonic Sensors in Self-Driving Cars”. [Online] <https://medium.com/@BabakShah/ultrasonic-sensors-in-self-driving-cars-d28b63be676f>
- [9] Tesla Autopilot. [Online] https://www.tesla.com/es_ES/autopilot
- [10] “State Of Lidar: Funding Trends, Patent Activity, Corporate Investments, & The Latest Technologies” [Online] <https://www.cbinsights.com/research/automotive-lidar-startups-autonomous-vehicles/>
- [11] MA2T Series, TiMotion [Online] <https://www.timotion.com/en/products/linear-actuators/ma2t-series>
- [12] Indy Autonomous Challenge [Online] <https://discourse.ros.org/t/ces-2022-indy-autonomous-challenge-jan-7th/22996>
- [13] Formula Student Spain [Online] <https://www.formulastudent.es/home/sponsors/>
- [14] A. Neal (Abril 2018). “LiDAR vs. RADAR”. [Online] <https://www.fierceelectronics.com/components/lidar-vs-radar>
- [15] M. Mattiske (Noviembre 2020). “Simultaneous Localisation and mapping using LiDAR for autonomous racing”. [Online] <https://www.monashmotorsport.com/blog/slamfyt>

- [16] “Inertial Measurement Unit (RLVBIMU04)” (Diciembre 2017) [Online] https://en.racelogic.support/VBOX_Mining/Hardware_Info/IMU
- [17] K. Magne (Noviembre 2011). “Inertial Navigation System” [Online] <https://texample.net/media/tikz/examples/PDF/inertial-navigation-system.pdf>
- [18] T. Gunther, National Geographic. [Online] <https://education.nationalgeographic.org/resource/triangulation-sized>
- [19] Comparison satellite navigation orbits [Online] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_satellite_navigation_orbits.svg
- [20] I. Wang. “Formula sae race car speed sensor installed”. [Online] <https://www.youtube.com/watch?v=uXILDfzh5A4>
- [21] J. Kabzan et al. (Mayo 2019) “AMZ Driverless: The Full Autonomous Racing System”, ETH Zurich, Zurich, Switzerland
- [22] All FSD Teams [Online] <https://www.formulastudent.de/teams/fsd/>
- [23] S. Nekkah et al. (Octubre 2020) “The Autonomous Racing Software Stack of the KIT19d”, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany.
- [24] KIT21d [Online] <https://www.ka-raceing.de/21d?lang=en>
- [25] Zapp DV [Online] <https://starkstrom-augsburg.de/rennwagen/uasa2007-zapp-dv/>
- [26] AMZ Racing Pilatus (Marzo 2018) [Online] <https://driverless.amzracing.ch/en/node/530>
- [27] Eace07.d [Online] <https://www.ecurie-aix.de/eace07-d>
- [28] Basler ACE 2 [Online] <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace2/>
- [29] VectorNav VN-200 Rugged GNSS/INS. [Online] <https://www.vectornav.com/store/products/gnss-ins/p/vn-200-rugged-gnssins>
- [30] Cincoze DS-1201 [Online] https://www.cincoze.com/goods_info.php?id=256
- [31] F. Serzhenko. “Jetson TX2 vs AGX Xavier” [Online] <https://www.fastcompression.com/blog/xavier-vs-tx2.htm>
- [32] Ouster OS1-32 [Online] <https://ouster.com/products/scanning-lidar/os1-sensor/>
- [33] A. Roche (Junio 2019). “LiDAR cone detection as part of a perception system in a Formula Student Car”, Universidad Politécnic de Catalunya, Barcelona, España.
- [34] R. Manca (2020). “Design and implementation of an Electric Power Steering system for a Formula Student Driverless vehicle”, Universidad Politécnic de Turín, Turín, Italia.
- [35] M. Zeilinger (Mayo 2017). “Design of an Autonomous Race Car for the Formula Student Driverless (FSD)”, TU Wien Racing
- [36] H. Tian et al. (Octubre 2018). “Autonomous Driving System Design for Formula Student Driverless Racecar”. Instituto de Tecnología de Beijing , Beijing, China.
- [37] Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles. [Online]. Available: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/objetivo11.htm>

11. Anexo A – Configuraciones de sistemas autónomos adicionales

Además de los sistemas autónomos analizados en el apartado 4.6 se han estudiado otras publicaciones y artículos relacionados con la configuración del sistema autónomo de otros equipos.

UPC (España)

El equipo UPC pertenece a la Escuela Politécnica de Cataluña (España). En la tesis de grado publicada por Arnau Roche López “*LiDAR cone detection as part of a perception system in a Formula Student Car*” [33] este menciona parte de la configuración del sistema del primer monoplaza autónomo CAT12D desarrollado por el equipo UPC en el año 2019. En esta publicación el autor describe los sensores y la configuración de los ordenadores utilizada en el sistema autónomo del CAT12D, estando este formado por:

- Sensores:
 - Dos cámaras estéreo (DFK33UX252)
 - LiDAR: Velodyne VLP-32C
 - IMU
 - Sensor de velocidad en las cuatro ruedas
 - GPS
- Ordenador principal:
 - Ordenador Cincoze DX-1000
 - Sistema operativo ROS
 - Conectado al LiDAR
- Ordenador secundario:
 - Ordenador Nvidia Jetson TX2
 - Sistema operativo ROS
 - Conectado a las cámaras



Ilustración 42. Monoplaza CAT 12D del equipo UPC, 2019

Squadra Corse (Italia)

El equipo Squadra Corse pertenece a la Escuela Politécnica de Torino (Italia). En el artículo “*Design and implementation of an electric power steering systema for a formula student DV*” [34] el autor Raffaele Manca describe parte de la configuración del sistema autónomo del monoplaza SC19 del equipo Squadra Corse. Este sistema está formado por:

- Sensores:
 - Una cámara estéreo
 - LiDAR frontal
 - IMU
- Ordenador:
 - Ordenador dSpace MicroAutoBox
- Actuadores:
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección:
 - Motor: Maxon EC 60 Flat 150 W
 - Rack: zRack del fabricante Zedaro
 - Sensores de rotación del piñón de dirección



Ilustración 43. Frontal del monoplaza SC19 del equipo Squadra Corse, 2019

TUW Racing (Suiza)

Respecto al equipo TUW Racing, perteneciente a la Universidad Técnica de Viena, en el artículo “*Design and implementation of an electric power steering systema for a formula student DV*” [35] se describe la configuración de sensores utilizada en su monoplaza en la primera edición de Formula Student Driverless Germany del año 2017. Este sistema autónomo estaba formado por:

- Sensores:
 - Cámara ZED Stereo
 - Escáner Láser: Hokuyo 20LX
 - IMU
 - GNSS: Piksi Muulti
- Un ordenador
- Actuadores:
 - Actuador electromecánico en el pedal de freno
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección



Ilustración 44. Frontal del monoplaza Edge8 D del equipo TUW Racing, 2017

Beijing IT (China)

En el artículo “*Autonomous Driving System Design for Formula Student Driverless Racecar*” [36] el equipo Beijing IT, perteneciente a la Universidad Tecnológica de Beijing, mencionan algunos de los componentes de su primer monoplaza autónomo Smart Shark I utilizado para competir en Formula Student China 2017. Pese a tratarse de una configuración un tanto anticuada con esta estrategia utilizada por el Beijing IT, el equipo resultó ganador en Formula Student Driverles China 2017. Dicho sistema autónomo estaba formado por:

- Sensores:
 - Una cámara frontal
 - LiDAR frontal
 - GPS-INS
 - Sensores de velocidad en las ruedas
- Un ordenador
- Actuadores:
 - Actuador electromecánico en el sistema de frenada
 - EBS
 - Actuador electromecánico en el sistema de dirección

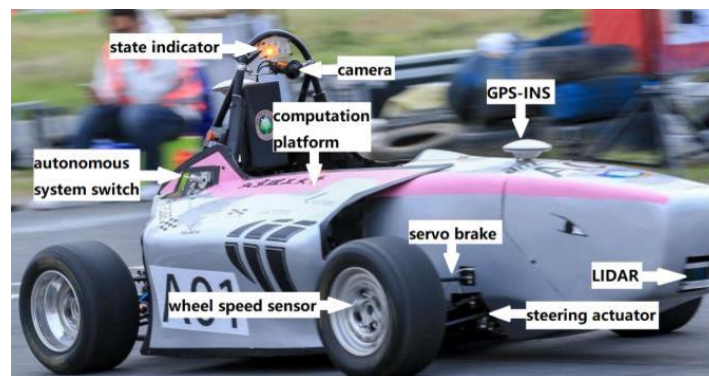


Ilustración 45. Componentes del sistema autónomo del monoplaza del equipo Beijing IT, 2019

12. Anexo B – Información sobre los fabricantes contactados

A continuación se muestra la relación de contactos que he efectuado en los diferentes proveedores de tecnología para el desarrollo de este trabajo:

LiDAR



- **Ouster:**
 - Nombre: Katia Turchaninova
 - Email: katia.turchaninova@ouster.io
 - Teléfono: +31 653 263 905



- **Distribuidor de Ouster:** (Oferta del modelo OS1-64)
 - Web: <https://atyges.es/tienda/>
 - Email: store@atyges.es
 - Teléfono: +34 952 020 600



- **Distribuidor de Velodyne:**
 - Web: <https://www.mapix.com/>
 - Nombre: Jubaida Tammi
 - Email: sales@mapix.com
 - Teléfono: +44 (0)7719307964



- **Hesai:**
 - Nombre: Xiangyu “Shawn” Li
 - Email: lixiangyu@hesaitech.com
 - Teléfono: +86 13787281380



- **Robosense:**
 - Nombre: Jasmine Liu
 - Email: jasmine.liu@robosense.ai
 - Teléfono: +86-13520575101



- **Neuvition:**
 - Nombre: Rubicon Chen
 - Email: rubicon.chen@neuvition.com
 - Teléfono: +8613559499988

Cámaras



- **Basler:**
 - Web: <https://www.baslerweb.com/en/>



- **Distribuidor de Basler España:**
 - Web: <https://www.grupoalava.com/>
 - Email: alava@grupoalava.com
 - Teléfono: +34 915679700



- **Lucid Vision Labs:**
 - Web: <https://thinklucid.com/>
 - Email: sales.emea@thinklucid.com
 - Teléfono: +49 (0) 7062 97676 12



- **Imaging Source:**
 - Web: <https://www.theimagingsource.com/>



- **Stereo Labs:**
 - Web: <https://store.stereolabs.com/>

INS/GNSS



- **VectorNav:**
 - Web: <https://www.vectornav.com/>



- **SBG Systems:**
 - Web: <https://www.sbg-systems.com/>



- **Distribuidor de Xsens:**
 - Web: <https://www.mouser.es/>
 - Teléfono: +34 93 6455263



- **Distribuidor de LORD:**
 - Nombre: Marta Rodríguez
 - Empresa: Europavia
 - Email: mrodriguez@europavia.es
 - Teléfono: +34 679 296 726



- **Distribuidor de Aceinna:**
 - Nombre: Raúl Lorenzo
 - Empresa: Richardson Electronics
 - Email: raulln@rell.com
 - Teléfono: +34 91 528 37 00

Ordenador



- **Cincoze:**
 - Web: <https://www.vectornav.com/>



- **Distribuidor de Cincoze:**
 - Nombre: Guillermo García
 - Empresa: QNV
 - Email: guillermogg@qnv.com
 - Teléfono: +34 944 106 350



- **Distribuidor Online de Cincoze / Neusys / Karbon:**
 - Web: <https://www.onlogic.com/>
 - Teléfono: +1 802 861 2300

Tarjeta gráfica (GPU)



- **Nvidia:**
 - Web: <https://www.nvidia.com/es-es/>

13. Anexo C – Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En el año 2015, la ONU estableció 17 objetivos con los que mejorar la sociedad mundial en relación a múltiples áreas como son la salud, la igualdad, la pobreza, el consumo energético, etc. Para la consecución de dichos objetivos es necesario un compromiso de todos los individuos a la hora de realizar nuestras acciones. Por ello, dentro de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) este proyecto está alineado con varios de estos objetivos, entre los que se encuentran:



Ilustración 46. ODS

- ODS 7: Fomentar el uso de energía asequible y no contaminante. La eficiencia energética y el fomento del desarrollo de vehículos eléctricos son desde 2017 objetivos claros del ISC Racing Team, impulsando así únicamente proyectos con motorizaciones eléctricas.
- ODS 9: Promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. El desarrollo de un vehículo autónomo conlleva una innovación y aprendizaje por parte de los alumnos que podrán aplicar en la industria en su vida profesional, apoyando la sostenibilidad e innovación, sea cual sea el sector en el que desarrollen su trayectoria empresarial.
- ODS 11: Lograr que las ciudades sean más sostenibles y seguras. Actualmente las ciudades son el mayor centro de crecimiento económico a la par que de emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de recursos. El 50% de la humanidad vive en ciudades y para el año 2030 se estima que esta cifra será un 84%. [37] Se está observando como las ciudades van tomando medidas restrictivas con los vehículos que permiten acceder haciendo uso de etiquetas medioambientales, pago de tasas para el acceso a ciertas zonas o restricciones de circulación en días de alta polución. Además, la automatización de los vehículos es uno de los objetivos de muchas ciudades para mejorar la seguridad de los ciudadanos y la movilidad del tráfico, por lo que el aprendizaje en este proyecto es de gran utilidad para los estudiantes.

- ODS 13: Apoyar medidas para combatir el cambio climático. Junto todo lo dicho en los objetivos anteriores, el desarrollo de vehículos eléctricos es vital para lograr ciudades con menores huellas de carbono.
- ODS 17: Colaborar con la alianza mundial para el desarrollo sostenible. La participación en proyectos de desarrollo de vehículos eléctricos por parte de las universidades apoya el progreso global sostenible desarrollando vehículos más eficientes y cuidadosos con el medio ambiente.