



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño y Óptima Integración de Componentes  
Mecánicos y Sistema de Accionamiento en un Kart  
Eléctrico de Alto Rendimiento

**Autor:** Pablo Bayona Arboleda

**Directores:** Xavier Soldani

Mariano Jiménez Calzado

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Diseño y Optima Integración de Componentes Mecánicos y Sistema de  
Accionamiento en un Kart Eléctrico de Alto Rendimiento  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2023/2024 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.: Pablo Bayona Arboleda

Fecha: 10/ 07/ 2024

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Xavier Soldani - Fecha: 10 / 07 / 2024



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado - Fecha: 10 / 07 / 2024





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño y Optima Integración de Componentes  
Mecánicos y Sistema de Accionamiento en un Kart  
Eléctrico de Alto Rendimiento

**Autor:** Pablo Bayona Arboleda

**Directores:** Xavier Soldani

Mariano Jiménez Calzado

Madrid

# **Diseño y Óptima Integración de Componentes Mecánicos y Sistema de Accionamiento en un Kart Eléctrico de Alto Rendimiento**

**Autor: Bayona, Arboleda, Pablo**

Directores: Soldani, Xavier; Jiménez Calzado, Mariano

Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Se han diseñado componentes mecánicos y el sistema de accionamiento de un kart eléctrico de alto rendimiento. Estos diseños abarcan desde la presentación de la problemática general, seguido del diseño de la solución y concluido por la compra o fabricación del diseño realizado. Se han realizado simulaciones mecánicas y eléctricas por medio de programas como Matlab y ANSYS, para demostrar la fiabilidad de los diseños.

**Palabras clave:** kart eléctrico, motor brushless, simulación, baterías, motorsport

### **1. Introducción**

El diseño mecánico y eléctrico abarca una sorprendente variedad de sectores, siendo fundamental no solo en la automatización industrial, sino también en el diseño de vehículos eléctricos. En las competiciones de motor, la audacia de los ingenieros se fusiona con el ingenio de los pilotos para competir por el primer puesto en carreras de velocidad y habilidad. A través de este fascinante mundo del motorsport, este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se centra en el diseño eléctrico y estructural de un kart de alto rendimiento. Este proyecto busca comprender los principios del diseño de vehículos de alto rendimiento y los procesos de fabricación en la industria del motor. Además, en un contexto de creciente preocupación por el impacto ecológico y la eficiencia energética, la creación de un kart eléctrico de alto rendimiento representa un esfuerzo hacia la mejora continua y la concienciación social, demostrando la viabilidad de la transición ecológica en la industria de los karts.

### **2. Definición del proyecto**

Este proyecto se basa en el diseño y análisis de la configuración estructural y eléctrica de un kart eléctrico con el objetivo de optimizar su rendimiento. Este diseño se centra en la minimización del peso, asegurando la resistencia necesaria para garantizar la seguridad, maximizar la velocidad en pista y reducir los costos de fabricación. Los componentes difíciles de encontrar en el mercado se diseñarán y fabricarán utilizando tecnologías de mecanizado, fundición o impresión 3D, con el fin de lograr un kart eléctrico eficiente y competitivo.

A lo largo del proceso de construcción y adquisición de piezas, la lista de componentes a analizar y fabricar se irá actualizando. El objetivo es que todas las piezas adquiridas cumplan con los cálculos y análisis previos realizados, alcanzando los resultados esperados (*Figura 1*). Sin embargo, como es común en la industria, en ocasiones será necesario que los análisis se adapten a las limitaciones del mercado y a restricciones tecnológicas y económicas.

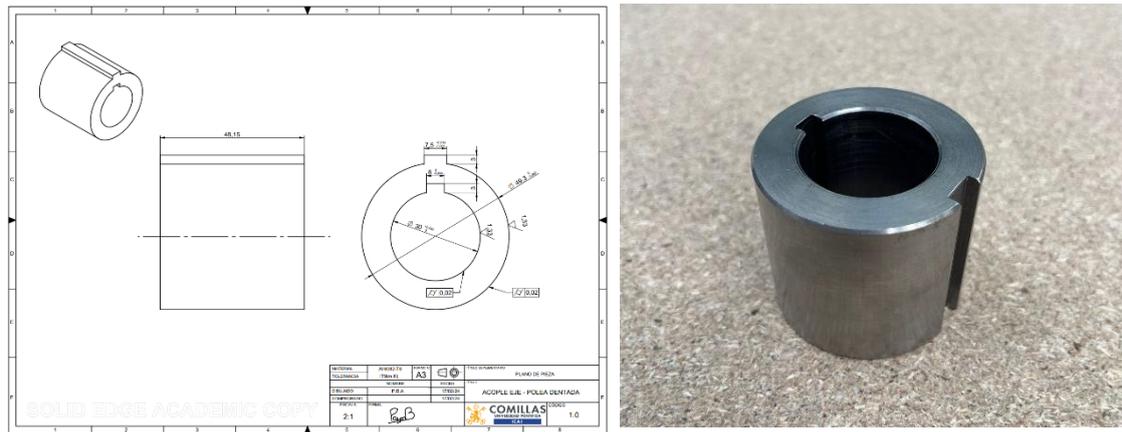


Figura 1. Ejemplo de diseño y fabricación de piezas

Otro aspecto crucial es la selección de materiales, considerando su impacto ecológico, para crear un producto lo más sostenible posible. Este proyecto busca demostrar que la transición hacia la movilidad ecológica no solo es viable, sino que también puede ofrecer mejores rendimientos que un vehículo convencional impulsado por gasolina en competiciones de motorsport. Actualmente, hay preocupaciones entre los ingenieros sobre si el deporte ecológico podría frenar el avance industrial en la automoción, pero este proyecto pretende demostrar las dificultades y el ingenio necesario para desarrollar una propulsión eléctrica efectiva. Este desafío implica abordar cuidadosamente aspectos clave como las baterías, el motor y la controladora.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos en este proyecto demuestran la viabilidad y eficiencia del diseño y fabricación de un kart eléctrico de alto rendimiento. Se realizaron simulaciones mecánicas y eléctricas mediante programas como Matlab y ANSYS, que validaron la fiabilidad de los componentes diseñados y su integración en el sistema completo (Figura 2). Los cálculos mostraron que el sistema de transmisión, el soporte del motor y la estructura del chasis cumplen con los requisitos de resistencia y seguridad establecidos. Además, se ha demostrado la elección de los materiales empleados para la fabricación de las piezas mediante simulaciones precisas.

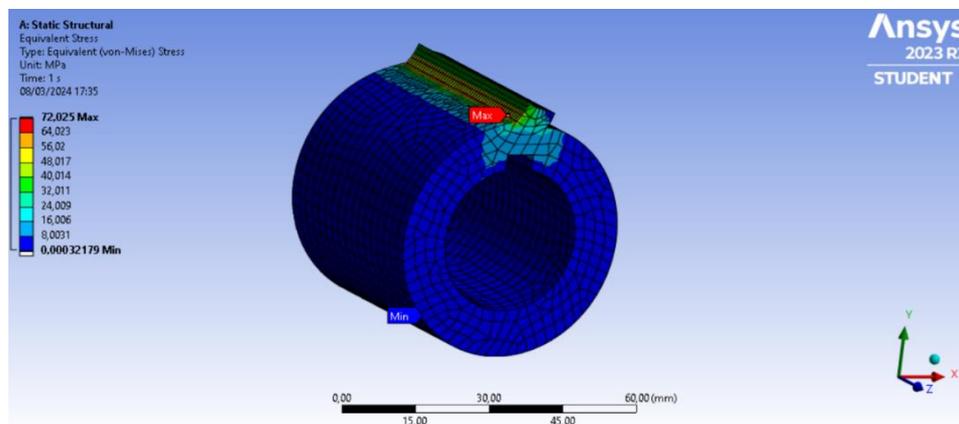
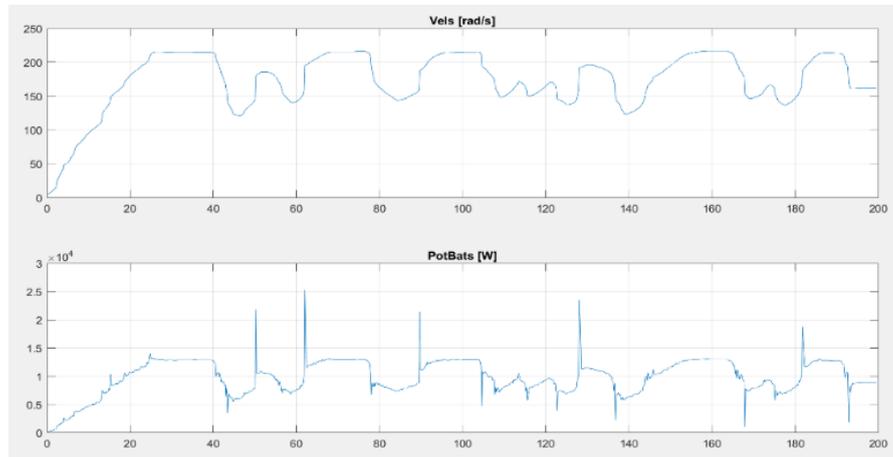


Figura 2. Resultados de simulación en ANSYS

El motor brushless de 10 kW, junto con la controladora y las baterías de ion-litio seleccionadas, permitió alcanzar las metas de velocidad y aceleración establecidas. Las simulaciones de comportamiento eléctrico (*Figura 3*) mostraron que el sistema es capaz de mantener un rendimiento óptimo durante periodos prolongados, con un consumo de energía eficiente. Además, se logró una significativa reducción de peso en comparación con otros karts eléctricos, lo que mejoró notablemente la agilidad y respuesta del vehículo en pista.



*Figura 3. Resultados de simulaciones eléctricas en Matlab*

#### **4. Conclusiones**

En conclusión, el diseño y la fabricación de un kart eléctrico de alto rendimiento es no solo viable, sino también altamente eficiente y competitivo en comparación con vehículos de gasolina. Este proyecto demostró que es posible integrar sistemas eléctricos y mecánicos de manera óptima, alcanzando un equilibrio entre rendimiento, seguridad y sostenibilidad. La utilización de baterías de ion-litio y motores brushless ofrece una ventaja significativa en términos de eficiencia energética y duración, aunque implica un costo inicial más elevado.

Además, este proyecto subraya la importancia de considerar el impacto ecológico en la selección de materiales y procesos de fabricación, contribuyendo a la movilidad sostenible y reduciendo la huella de carbono. La transición hacia la movilidad ecológica en el deporte del karting es una realidad alcanzable, y este trabajo de fin de grado representa un paso importante en esa dirección, demostrando que es posible superar las barreras de la ingeniería convencional para crear vehículos de competición respetuosos con el medio ambiente.

# **Design and Optimal Integration of Mechanical Components and Drive System in a High-Performance Electric Go-Kart**

**Author: Bayona, Arboleda, Pablo**

Supervisors: Soldani, Xavier; Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

Mechanical components and the drive system of a high-performance electric go-kart have been designed. These designs range from the presentation of the general problem, followed by the design of the solution and concluded by the purchase or manufacture of the design. Mechanical and electrical simulations have been performed using programs such as MATLAB and ANSYS to demonstrate the reliability of the designs.

**Keywords:** electric go-kart, brushless motor, simulation, battery, motorsport

## **1. Introduction**

Mechanical and electrical design spans an astonishing variety of sectors, being fundamental not only in industrial automation, but also in the design of electric vehicles. In motorsport, the daring of engineers merges with the ingenuity of drivers to compete for first place in races of speed and skill. Through this fascinating world of motorsport, this Final Degree Project (TFG) focuses on the electrical and structural design of a high-performance kart. This project seeks to understand the principles of high-performance vehicle design and manufacturing processes in the motor industry. Furthermore, in a context of growing concern for ecological impact and energy efficiency, the creation of a powerful electric kart represents an effort towards continuous improvement and social awareness, demonstrating the feasibility of the ecological transition in the karting industry.

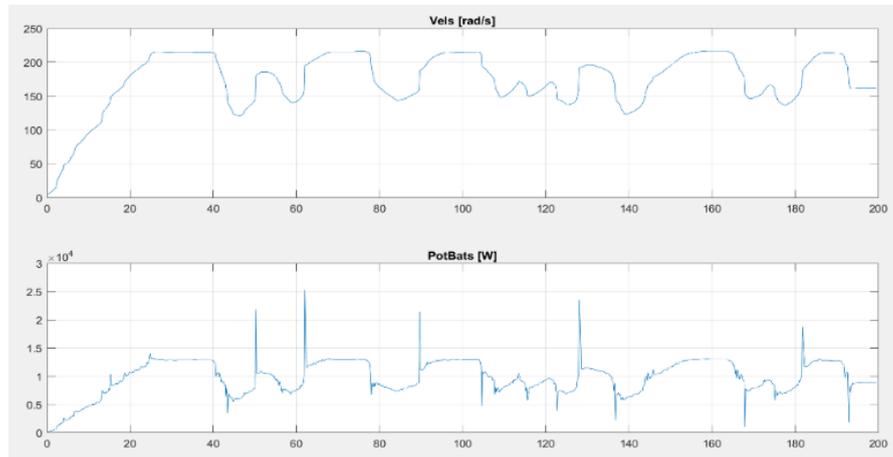
## **2. Project definition**

This project is based on the design and analysis of the structural and electrical configuration of an electric go-kart with the objective of optimizing its performance. This design focuses on minimizing weight, ensuring the necessary strength to guarantee safety, maximize track speed and reduce manufacturing costs. Components that are difficult to find on the market will be designed and manufactured using machining, casting or 3D printing technologies, in order to achieve an efficient and competitive electric kart.

Throughout the construction and parts acquisition process, the list of components to be analyzed and manufactured will be updated. The objective is that all purchased parts comply with the previous calculations and analyses performed, achieving the expected results (*Figure 1*). However, as is common in the industry, sometimes it will be necessary for the analyses to be adapted to market limitations and technological and economic restrictions.



The 10-kW brushless motor, together with the controller and the selected lithium-ion batteries, made it possible to achieve the established speed and acceleration goals. Electrical behavior simulations (*Figure 3*) showed that the system is capable of maintaining optimal performance over extended periods, with efficient energy consumption. In addition, a significant weight reduction was achieved compared to other electric go-karts, which significantly improved the vehicle's agility and response on track.



*Figure 3. MATLAB electrical simulation results*

#### **4. Conclusions**

In conclusion, the design and manufacture of a high-performance electric go-kart is not only feasible, but also highly efficient and competitive compared to gasoline-powered vehicles. This project demonstrated that it is possible to integrate electrical and mechanical systems in an optimal way, achieving a balance between performance, safety and sustainability. The use of lithium-ion batteries and brushless motors offers a significant advantage in terms of energy efficiency and durability, although it implies a higher initial cost.

In addition, this project underlines the importance of considering the ecological impact in the selection of materials and manufacturing processes, contributing to sustainable mobility and reducing the carbon footprint. The transition towards green mobility in the sport of karting is an achievable reality, and this final degree work represents an important step in that direction, demonstrating that it is possible to overcome the barriers of conventional engineering to create environmentally friendly racing vehicles.

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>14</b>
1.1 Motivación.....	14
1.2 Contextualización de la situación .....	15
1.3 Estado de la cuestión.....	17
1.4 Objetivos y metodología de trabajo .....	19
1.5 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) .....	21
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías .....</b>	<b>23</b>
<b>Capítulo 3. Sistema eléctrico.....</b>	<b>24</b>
3.1 Introducción al sistema eléctrico .....	24
3.2 Diseño del motor.....	24
3.2.1 Parámetros escogidos.....	24
3.2.2 Tipo de motor.....	25
3.2.3 Motores brushless .....	27
3.2.4 Caracterización del motor .....	29
3.3 Búsqueda en el mercado .....	33
3.4 Estudio del comportamiento del motor y el dimensionamiento de las baterías .....	37
3.4.1 Estudio teórico.....	37
3.4.2 Dimensionamiento de las baterías con Matlab.....	39
3.4.2.1 Simulación mediante balance de potencias .....	41
3.4.2.2 Simulación mediante el estudio teórico del motor BLDC.....	42
3.5 Elección de las baterías.....	46
3.5.1 Tipo de baterías .....	46
3.5.2 Búsqueda en el mercado .....	48
3.6 Conexionado eléctrico .....	50
<b>Capítulo 4. Sistema mecánico.....</b>	<b>51</b>
4.1 Introducción al sistema mecánico.....	51
4.2 Elección del chasis .....	51
4.2.1 Elección y compra del chasis.....	52

---

4.3	Adaptaciones estructurales .....	54
4.4	Modelación de la parte trasera del kart en SolidWorks .....	54
4.4.1	<i>Modelo CAD de los componentes</i> .....	55
4.5	Soporte tubular motor-chasis.....	62
4.6	Acople eje-polea dentada.....	66
4.6.1	<i>Bocetos, tolerancias y planos</i> .....	69
4.6.2	<i>Elección del material</i> .....	69
4.6.2.1	<i>Estudio teórico</i> .....	70
4.6.2.2	<i>Simulación en ANSYS</i> .....	72
4.6.3	<i>Fabricación</i> .....	77
4.6.3.1	<i>Prototipo</i> .....	77
4.6.3.2	<i>Mecanizado</i> .....	81
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>		<b>85</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>		<b>87</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de diseño y fabricación de piezas .....	3
Figura 2. Resultados de simulación en ANSYS.....	3
Figura 3. Resultados de simulaciones eléctricas en Matlab .....	4
Figura 4. Componentes fundamentales para el accionamiento [1].....	14
Figura 5. Protector frontal por impresión [2] .....	16
Figura 7. ODSs a seguir [3] .....	20
Figura 8. Comparación de PWM entre motor Brushless (BLDC) e Inducción (PMSM) [4] .....	24
Figura 9. Motor Con escobillas vs Sin Escobillas [5] .....	25
Figura 10. Comportamiento BLDC [6].....	26
Figura 11. Esquema de transmisión .....	27
Figura 12. Comportamiento motor brushless [8] .....	28
Figura 13. Relación Par-Velocidad en motores Brushless [9] .....	28
Figura 14. Esquema de fuerzas del sistema .....	29
Figura 15. Motor 10kW Golden Motor y Controladora "VECTOR 500" [10],[11] .....	33
Figura 16. Planos motor y controladora Golden Motor [12],[13] .....	34
Figura 17. Modelo EGT5 de Play and Drive [14] .....	37
Figura 18. Circuito Roquetas del Mar y telemetría asociada [15] .....	38
Figura 19. Esquema Potencias .....	39
Figura 20. Perfil de velocidades y de potencias según método de balance de potencias .....	40
Figura 21. Circuito equivalente del motor.....	40
Figura 22. Diagrama de bloques en Simulink .....	42
Figura 23. Diagrama de bloques invertido.....	43
Figura 24. Potencia en las baterías según método de comportamiento teórico del motor .....	43
Figura 25. Celdas de Litio-ión [17] .....	45
Figura 26. Módulo de baterías de "Green Works" [18] .....	46
Figura 27. Conexión eléctrica recomendado por el fabricante, con y sin fusible [21].....	48
Figura 28. Chasis Tony Kart Racer 401 RR [22] .....	50
Figura 29. Chasis del kart adquirido por 280€ .....	51
Figura 30. Bastidor limpio y repintado .....	51
Figura 31. Ejemplo de adaptación estructural .....	52
Figura 32. Bocetos acotados de distintitos elementos .....	53

<i>Figura 33. CAD Chasis .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34. CAD Polea y piñón dentados .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35. CAD Acople eje-polea dentada .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 36. CAD Sistema de transmisión completo .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37. CAD Motor BLDC 10kW Golden Motor .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 38. CAD Rodamiento de almohada .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 39. CAD Pontón lateral derecho .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 40. CAD Eje con chavetas .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 41. CAD Conjunto sin motor ni sistema de transmisión .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 42. Centro de masas de un cilindro [23] .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 43. Cargas aplicadas sobre modelo simulado .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 44. Mallado del conjunto simulado .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 45. Tensiones de Von Mises en conjunto simulado .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 46. Desplazamiento del conjunto simulado en mm .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47. Planta de resultados de tensión de Von Mises .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 48. Portacoronas de aluminio de Mondokart [24] .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 49. Representación conceptual .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 50. Diagrama de Fletores .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 51. Boceto tensiones cortantes .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 52. Mallado Final .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 53. Tensión Equivalente de Von-Mises .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 54. Tensión de Cizalladura .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 55. Tensión Equivalente de Von-Mises en simulación en 2D .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 56. Tensión de cizalladura en simulación en 2D .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 57. Prototipo impreso en 3D .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 58. Ajuste del prototipo en polea dentada .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 59. Plano corregido V1 .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 60. Prototipos creados con ajuste de dimensiones .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 61. Prototipo #3 para verificación de precisión .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 62. Plano corregido V2 .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 63. Acople y acople + polea dentada .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 64. Chavetero con defectos vs chavetero tras fresado .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 65. Comparativa concepto original con resultado final .....</i>	<i>82</i>

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 MOTIVACIÓN

El diseño mecánico y eléctrico abarca una sorprendente variedad de sectores, siendo fundamental no solo en la automatización industrial, sino también en el diseño de vehículos eléctricos. En las competiciones de motor, o también conocido como el deporte de motorsport, se junta la audacia de los ingenieros, con el ingenio de los pilotos, para que, por equipos, compitan por el primer puesto en una carrera de velocidad y habilidad.

A través de este fascinante mundo del motorsport, mi profundo interés por los karts se ve representado mediante mi Trabajo de Fin de Grado (TFG), centrado en el diseño eléctrico y estructural de un kart de alto rendimiento. Este desafío fusiona mi creatividad ingenieril con los conocimientos automovilísticos que deseo adquirir, así como lo hace el deporte en sí. A través de mi TFG, aspiro a no solo comprender profundamente los principios del diseño de un vehículo de alto rendimiento, sino también procesos de fabricación fundamentales en la industria del motor.

Además, en un mundo donde la preocupación por el impacto ecológico y la eficiencia energética está en constante aumento, la creación de un kart eléctrico de alto rendimiento representa mi deseo por la mejora constante y la concienciación social. Por otro lado, y como ha sido comentado anteriormente, la materialización del diseño es solo una parte del proyecto, pero la demostración de que es posible alcanzar una óptima traslación ecológica choca con las fronteras de la ingeniería convencional en la industria de los karts.

## ***1.2 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA SITUACIÓN***

El proyecto consiste en el diseño y análisis de la configuración estructural y eléctrica de un kart eléctrico a fin de conseguir su rendimiento óptimo. Su diseño se fundamentará en la minimización del peso, asegurando los requisitos de resistencia para garantizar la seguridad, así como en la maximización de la velocidad en pista y la minimización de los costos de fabricación. Los elementos de difícil acceso en el mercado se diseñarán y fabricarán mediante tecnologías de mecanizado, fundición o plegado, buscando lograr un kart eléctrico eficiente y competitivo.

La evolución del proceso de construcción, así como el de las piezas compradas, determinará la lista de componentes a analizar y a fabricar posteriormente. De igual manera, se procurará que todas las piezas compradas sean lo más afines a los cálculos y al previo análisis realizado y representado a lo largo de este proyecto alcanzando cada uno de los resultados estudiados y estimados. Sin embargo, como sucede cotidianamente en la industria, en ocasiones será el análisis que tendrá que adaptarse al mercado y a las limitaciones tecnológicas-económicas.

Por otro lado, será importante en la selección de materiales en el proceso de diseño, el impacto ecológico que estos tienen sobre el medioambiente, a fin de crear un producto que sea lo más próximo a sostenible. Uno de los fines del proyecto será demostrar que la transición hacia la movilidad ecológica no solo es viable, sino que también puede conseguir mejores rendimientos que un vehículo convencional con impulsión de gasolina en una competición de motorsport. Actualmente existe una preocupación entre ingenieros respecto a si apostar por el deporte ecológico podría determinar el fin del avance industrial en la industria automotriz. No obstante, este proyecto busca demostrar, entre otras cosas, las complicaciones y el preciso ingenio que se ha de tener para desarrollar una impulsión eléctrica efectiva. Este desafío implica abordar cuidadosamente aspectos clave, como las baterías, el motor y la controladora, *Figura 4*.



*Figura 4. Componentes fundamentales para el accionamiento [1]*

Lo que diferenciará este vehículo con los ofertados en el mercado de características semejantes, será la gran diferencia económica usando componentes electrónicos de altas capacidades [1]. La optimización del espacio estructural y del diseño de los materiales fabricados, logrará que la fabricación del vehículo mantenga una calidad excepcional, junto a las mejores prestaciones posibles de velocidad punta, aceleración y seguridad. Como se explicará más adelante, el diseño inicial está formado por hipótesis estimadas de parámetros varios como: el peso máximo del conjunto piloto-kart, la fricción con el aire o el coeficiente de rozamiento neumático-suelo, entre otros.

Sin embargo, estos parámetros no mantienen un valor constante a lo largo del proyecto. A medida que se realizan compras de componentes y fabricaciones de piezas, el diseño del kart va evolucionando, lo que nos proporciona una perspectiva distinta a la previa adquisición de los elementos. Es por ello por lo que este proyecto tendrá un diseño único y distintivo en el mercado de los karts eléctricos. Consistirá en un diseño realizado por versiones previas y adaptándose en todo momento al modelo y condiciones vigentes, lo que aporta una mayor optimización al resultado final, puesto que estaremos literalmente haciendo el kart a medida de la mano del mercado y las limitaciones de fabricación.

### ***1.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN***

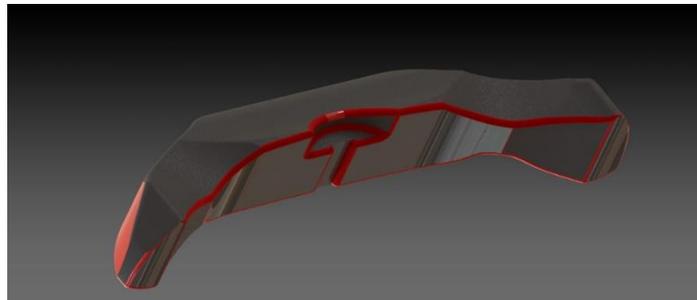
La generalizada concienciación social sobre la transformación ecológica ha ido aumentando exponencialmente a lo largo de los últimos años, dejando un gran impacto sobre las industrias mundiales, extendiéndose incluso a la industria del motor. La presión global para adoptar prácticas más sostenibles ha llevado a la creación de competiciones paralelas dentro del mundo del motorsport, como la Fórmula E y la Moto E fundamentadas en la propulsión eléctrica de los vehículos de competición. Este cambio hacia la electrificación no se limita solo a competiciones de élite, ya que el interés general por vehículos eléctricos ha experimentado un crecimiento significativo, abarcando diversas áreas, incluyendo el ámbito deportivo y de recreación, donde se encuentra la creciente popularidad de los karts eléctricos.

La evolución de las tecnologías de accionamiento en vehículos eléctricos ha influido directamente en el rendimiento de los karts eléctricos. Investigaciones realizadas por los grandes productores de karts eléctricos revelan lo evidente, la propulsión más destacable se la lleva el motor brushless. Este motor no solo es más sencillo de controlar por su señal de intensidad trapezoidal, sino que también es más ligero y duradero que uno con escobillas, aunque será más adelante donde compararemos y diseñaremos el motor elegido. Un buen diseño de los elementos con su conexionado correcto maximizará la potencia y la eficiencia de nuestro vehículo. Además, gracias al creciente interés sobre la fabricación de baterías más duraderas y con un mayor voltaje, minimizando el peso y así optimizando su eficiencia, podremos realizar un elección apoyada en estudios que aumenten la fiabilidad del funcionamiento a largo plazo.

El diseño-fabricación de componentes específicos y la elección de sus materiales es, y ha sido a lo largo de los años, una de las área más importantes para conseguir una mejoría del rendimiento general de cualquier vehículo. La implementación de nuevas formas de fabricación como la impresión 3D (*Figura 5 [2]*) o nuevos avances tecnológicos como la optimización topológica ha hecho que los karts puedan pesar

menos y soportar las mismas e incluso mayores esfuerzos, disminuyendo poco a poco su tiempo de vuelta en pista.

El apoyo de los novedosos estudios sobre la ciencia de los materiales y su fabricación, donde se analizan la relación peso-propiedades mecánicas, nos aportará la información suficiente para poder realizar una buena elección de materiales a usar para la fabricación de nuestros elementos.



*Figura 5. Protector frontal por impresión [2]*

La minimización de costos en el diseño de vehículos eléctricos es un factor crucial. Una de las inquietudes principales al recortar gastos se encuentra en la tarea de diseño, donde se busca mantener los altos estándares de seguridad y rendimiento, pero con los materiales y el proceso de fabricación menos costoso posible. Además, con la creación de softwares de bases de datos de materiales, se facilita la elección del material a emplear para que cumpla con las propiedades requeridas e impuestas.

## ***1.4 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO***

Sobre las bases de este proyecto se encuentran definidos ciertos objetivos que definirán y justificarán los diseños y las decisiones realizadas.

- **Mínimos Costes de Fabricación Posibles:**

Una de las bases del proyecto será la búsqueda de la eficiencia económica en cada fase del proceso de fabricación. La optimización analítica de cada elemento a diseñar asegurará la reducción máxima de los costes del proyecto, a fin de conseguir una ventaja indiscutible frente a los productos semejantes ofrecidos en el mercado.

- **Mínimo Peso Posible:**

Así como lo es en las competiciones profesionales automovilísticas, la ligereza es una de las variables más importantes a controlar para conseguir un kart de alto rendimiento. La minimización de este parámetro se traduce en un aumento de agilidad en la pista mejorando la capacidad de respuesta, así como facilitando el funcionamiento óptimo del sistema de accionamiento.

- **Mayor Velocidad y Menor Tiempo en Pista Posible:**

En este proyecto se pretende no sólo realizar un kart convencional con impulsión eléctrica, sino realizar uno que sea considerado de alto rendimiento, de competición. Para ello, se buscará maximizar la velocidad punta y la aceleración, así como su agilidad en curvas. De esta forma, los diseños de los elementos irán siempre enfocados a su eficiencia en circuito, a fin de conseguir un vehículo competitivo. Además, las condiciones a las que está sometido el vehículo a altas velocidades no son las mismas que a bajas velocidades, por lo que será un elemento esencial a la hora de realizar un diseño apropiado.

- **Crear un Mecanismo Seguro y Fiable:**

La seguridad y la fiabilidad son prioridades absolutas en el diseño de este proyecto. Cada componente se selecciona y ensambla con un enfoque en la integridad estructural y la durabilidad. Este objetivo garantiza que el kart no solo alcance un rendimiento excepcional, sino que también proporcione un entorno seguro para el piloto.

- **Realizar un Diseño Próximo a Sostenible:**

La responsabilidad ambiental es un criterio esencial. Nuestro objetivo será minimizar la huella ecológica en la elección de materiales, tecnologías de fabricación y procesos. La meta es crear un vehículo que no solo destaque en la pista, sino que también refleje un compromiso con la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente.

Sin embargo, además de los objetivos generales, este proyecto se fundamenta en una serie de objetivos específicos. Estos se dividen entre el sistema eléctrico y el sistema mecánico.

- **Sistema eléctrico:**

Se diseñará el sistema eléctrico y su conexionado, haciendo especial énfasis en el diseño, elección y compra del motor eléctrico y de las baterías. Además, se diseñará y escogerá una controladora adecuada al motor y al resto de componentes.

- **Sistema mecánico:**

Se diseñarán ciertos elementos mecánicos necesarios para la adaptación del kart a los componentes eléctricos adquiridos. Entre ellos se diseñará, simulará y fabricará un acople de la transmisión y un elemento de soporte para el motor eléctrico sobre el chasis. Además, se realizará una elección y compra de un chasis adecuado para el proyecto.

El cronograma empleado para este proyecto es el siguiente.

El cronograma se ve representado en la *Tabla 1*.

*Tabla 1. Cronograma*

Actividades	25 sep - 9 oct	9 oct - 16 oct	16 oct - 30 oct	30 oct - 13 nov	13 nov - 30 nov	15 ene - 15 feb	15 feb - 15 mar	15 mar - 15 abr	15 abril - 30 abr	30 abr - 4 may
Estudio general: Definición, estudio de la cuestión y metodología a seguir	■									
Análisis chasis: estudio y elección		■	■							
Estudio, diseño y elección del Motor y Accionamiento eléctrico				■	■					
Estudio, diseño y fabricación de componentes para la adaptación estructural						■	■			
Diseño de baterías, BMS, sistemas de seguridad							■	■		
Análisis de resultados generales y corrección de errores									■	
Conclusiones y preparación presentación										■

## ***1.5 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

Entre otras cosas, será fundamental que este proyecto se encuentre orientado según algunos de los ODS. Entre estos destacará la promoción de una innovación sostenible al diseñar un kart con tecnologías de accionamiento distintas a las convencionales a través de un apunte ecológico (correspondiente con el objetivo 9 de las ODS: “Industria, Innovación e Infraestructuras”) Este proyecto servirá como divulgación para demostrar que el desarrollo sostenible y ecológico puede ser posible en la industria de la competición del kart. Además, esto deriva en un subobjetivo más trascendental, la promoción de la transformación ecológica hacia un deporte limpio en emisiones de carbono.

Por lo que se refiere a la producción responsable, como ya ha sido mencionado anteriormente, en la elección de los materiales, dentro del proceso de desarrollo, se tendrá en cuenta en todo momento la repercusión medioambiental que dicha producción puede tener. Asimismo, dentro de lo posible, la compra de los elementos necesarios que se encuentren dentro del presupuesto fomentará la elongación de la vida útil de un elemento. Esto será muestra de que la producción, y su impacto

ecológico, no será siempre necesario para realizar un producto de altos estándares, dando vida al objetivo número 12 de las ODS: “Producción y Consumo Responsable”.

Por último, se podría decir que este proyecto ha sido orientado, entre otras cosas, gracias a la creciente concienciación social que impulsa el desarrollo sostenible y la lucha contra el cambio climático. Según los datos del Parlamento Europeo, la industria del transporte produce una quinta parte de la cantidad total de gases de efecto invernadero del mundo. La elección de una impulsión eléctrica y no de gasolina (como es convencional), se ha influenciado por el objetivo número 13 de las ODS: “La Acción por el Clima”, donde se lucha por aquella transformación hacia un transporte verde [3]. Las ODSs presentes se encuentran en la *Figura 6*.



*Figura 6. ODSs a seguir [3]*

---

## Capítulo 2. Descripción de las tecnologías

La investigación que se desea llevar a cabo en este Trabajo de Fin de Grado exige el diseño y la simulación de cuerpo mediante diversos programas. Para el diseño CAD de piezas y conjuntos se usarán programas como SolidWorks y SolidEdge. Los planos de fabricación acotados y con sus respectivas tolerancias se crearán con estos mismos programas. Una vez creado el modelo de una pieza, se simularán las piezas mediante los programas de simulación mecánica de Solid Works y la simulación mecánica de ANSYS. Además, para el diseño eléctrico, será esencial emplear Matlab para simular el motor eléctrico y estimar el consumo tras introducir un perfil de tensiones. Dentro de Matlab, se empleará Simulink para resolver diagramas de bloques y obtener conclusiones de las simulaciones. En el Capítulo 3 se explicará el desarrollo de la simulación con más detalle.

Por otro lado, para realizar los prototipos, se empleará un software de importación de contenidos a impresoras 3D. En este caso se usará el Software Print-Rate CoLiDo Repetier-Host. Este software realizará el slicer de la pieza y diseñará la estructura-soporte necesaria para la creación de una pieza en la impresora 3D. Este software y las características de la impresora 3D se verán más en detalle en el Capítulo 3. Dentro de ANSYS, se empleará Rigid Dynamics donde el proceso de simulación consiste en la importación de la pieza CAD, la elección de un material seguido de la generación de una malla fina y adecuada al modelo y finalmente la importación de las condiciones de contorno y de las fuerzas del sistema. En el Capítulo 4 se especificarán los ajustes escogidos en cada paso de la simulación.

Finalmente, máquinas fresado y torneado serán necesarias para el proceso de fabricación. En la máquina de fresado, se emplea un cabezal mortajador para poder realizar la geometría requerida. La utilización de estas máquinas y la fabricación de la pieza se han logrado gracias al apoyo del profesorado del laboratorio de fabricación y a la colaboración de la empresa TEYDE. Por último, también se ha empleado papel de lijas, limas de cola de ratón y una fresa de mano para el refinado del eje principal. Estos procesos se verán más en detalle en el Capítulo 4.

## Capítulo 3. Sistema Eléctrico

### 3.1 INTRODUCCIÓN AL SISTEMA ELÉCTRICO

La elección de un motor eléctrico es una de las decisiones más importantes de este proyecto. Se trata de un componente costoso y de difícil adquisición, por lo que será vital indagar en el mercado y tomar la decisión correcta, pues su compra ocupará un buen porcentaje del presupuesto total. Además, evidentemente, previamente a su diseño se deberán fijar algunos parámetros de hipótesis para poder comenzar con el diseño.

### 3.2 DISEÑO DEL MOTOR

Como se ha mencionado, hay algunos parámetros que se deben fijar a priori para poder comenzar a diseñar con unos objetivos/restricciones marcadas. Algunos de estos parámetros son: el coeficiente de rozamiento neumático-suelo, el peso mínimo del conjunto, velocidad máxima alcanzable por el vehículo, aceleración máxima...

#### 3.2.1 Parámetros escogidos

Los parámetros han sido elegidos a través de distintos criterios tras haber realizado un profundo análisis en las características de los karts de alto rendimiento. Los criterios son los siguientes:

1. *Masa Máx:* Suponemos: una masa media del piloto de 70kgs, masa motor + baterías 70kgs, chasis 70 kgs, resto de componentes 10kgs = **220 kgs**.
2. *Coef. Roz:* Sobre asfalto seco, un neumático de un turismo tiene entre **0.8** y 1.
3. *Radio Ruedas:* Radio promedio neumáticos kart de competición: 128 mm
4. *Aceleración máx:* para lograr el 0-60km/h en 8s.
5. *Velocidad máx:* Un kart de alto rendimiento alcanza los 70km/h.
6. *Relación de transmisión:* De **7.8** según karts de competición.

### ***Parámetros***

1. Gravedad:  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
2. Masa mínima:  $m = 220 \text{ kg}$
3. Coef. Rozamiento:  $\mu = 0.8$
4. Radio de las ruedas traseras:  $r = 0.128 \text{ m}$
5. Aceleración Máxima (de 0-60km/h en 8s):  $a_{kart} = 2.083 \text{ m/s}^2$
6. Velocidad Máxima:  $v_{kart} = 70 \text{ km/h}$
7. Relación de transmisión:  $n = 7.8$
8. Rendimiento transmisión:  $\eta_t = 90\%$
9. Ángulo de Carga:  $\cos\varphi = 0.8$
10. Inercia del motor:  $J_{mot} \approx 0.15 \text{ kg/m}^2$

### ***3.2.2 Tipo de Motor***

Hay diversos tipos de motores eléctricos, pero el preciso y necesario para este proyecto es un motor brushless.

En primer lugar, es destacable la facilidad para variar la velocidad de un motor brushless, gracias a su onda EMF trapezoidal en comparación con los motores síncronos (PMSM), que presentan ondas sinusoidales, como se observa en la *Figura 7* [4]. Esta propiedad resulta esencial para el control PWM, proporcionando un ajuste más preciso y eficiente. Para aclarar terminología y en términos sencillos, el back-EMF es una fuerza electromotriz que se produce cuando el motor sin escobillas gira, más tarde será explicado en detalle.

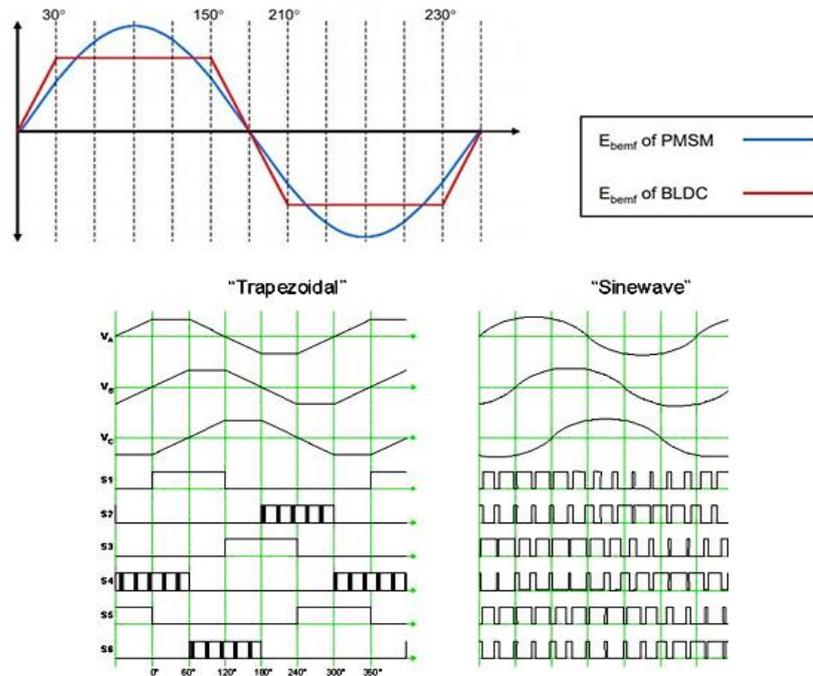


Figura 7. Comparación de PWM entre motor Brushless (BLDC) e Inducción (PMSM) [4]

Otro aspecto determinante en mi elección es la habilidad del motor brushless para operar con tensiones más bajas que el resto de motores eléctricos. Esto, no sólo simplifica la variación de velocidad, sino que también admite el uso de unas baterías de tamaño reducido que operan en corriente continua (CC). A pesar de que el motor brushless funciona intrínsecamente con corriente alterna (CA), mediante el uso de controladores electrónicos se podrá convertir la corriente continua suministrada en alterna.

Finalmente, la decisión se encuentra entre la elección de un motor con o sin escobillas. A pesar de la limitada disponibilidad y el superior costo asociado con los motores brushless, estos aparte de mantener un rendimiento superior minimizan las pérdidas caloríficas y tienen una mayor vida útil.



Figura 8. Motor Con escobillas vs Sin Escobillas [5]

Aunque la adquisición de motores brushless puede presentar desafíos logísticos, considero que los beneficios en eficiencia y durabilidad compensan ampliamente las dificultades asociadas con su disponibilidad y precio. En resumen, la elección de un motor brushless se alinea de manera coherente con los objetivos de rendimiento y eficiencia que busco para el proyecto del kart eléctrico de alta potencia.

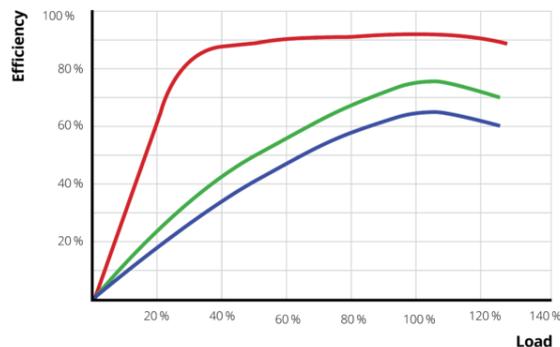
### 3.2.3 Motores brushless

Un motor brushless de corriente continua (BLDC) es un tipo de motor eléctrico que no utiliza escobillas para la conmutación, lo que lo diferencia de los motores de corriente continua tradicionales. En lugar de escobillas, la conmutación se realiza electrónicamente mediante semiconductores que sincronizan la aplicación de voltaje con la posición del rotor. Estos motores son conocidos por su alta eficiencia, durabilidad y capacidad para operar a altas velocidades sin el desgaste que implican las escobillas.

Estos motores cuentan con dos partes principales: el estator (parte no móvil) y el rotor (parte móvil). El estator está compuesto por bobinas de fase que generan un campo magnético cuando se les aplica corriente eléctrica. El rotor contiene imanes permanentes que interactúan con el campo magnético del estator, produciendo rotación.

La conmutación mencionada anteriormente, se realiza mediante un controlador que ajusta el voltaje aplicado a las bobinas del estator en función de la posición del rotor.

El rendimiento de un motor brushless (BLDC) varía en función de la velocidad. La *Figura 9* muestra como la potencia, la eficiencia, el par y la corriente varían típicamente con la velocidad.



*Figura 9. Comportamiento BLDC [6]*

En comparación con los motores de corriente continua tradicionales, los motores BLDC emplean la conmutación electrónica en vez de escobillas y un conmutador mecánico. Al no tener escobillas, disminuye el desgaste mecánico del motor y reduce las pérdidas transmitidas por calor, permitiendo que los motores brushless trabajen a mayores velocidades sin tener problemas de calor [7].

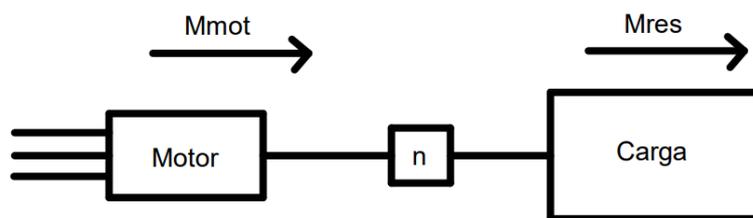
Por otro lado, en comparación con los motores síncronos de imanes permanentes, mientras que estos presentan una corriente sinusoidal, los motores BLDC emplean una corriente trapezoidal como se ha explicado anteriormente en el apartado 3.2.2 *Tipo de motor*.

Esta teoría presenta una base sólida para entender la elección de un motor BLDC como parte del sistema eléctrico de este proyecto, asegurando un rendimiento óptimo y eficiente.

### 3.2.4 Caracterización del motor

Una vez hemos decidido el tipo de motor adecuado, debemos calcular las características que queremos que tenga nuestro motor para poder acudir posteriormente al mercado.

Simplificando el sistema motor-carga, se crea una representación sencilla donde visualizamos la transmisión de potencia en nuestro sistema (*Figura 10*).



*Figura 10. Esquema de transmisión*

Será fundamental definir en las bases de nuestro diseño un **tiempo de aceleración**, una **velocidad máxima** y la **capacidad de ascenso de pendientes (gradeability)**, que en nuestro caso será cero al ser las pistas de karting típicamente planas. Estas características dependen fundamentalmente del par que puede ejercer el motor y su velocidad asociada, por ello, será indispensable estudiar el comportamiento de los motores brushless para distintos puntos de funcionamiento.

En una carrera de karts, la salida es uno de los momentos más importantes de toda la competición, ya que una buena posición de inicio ayudará a conseguir un buen resultado final. Es por esto, que a través de este proyecto buscamos maximizar la aceleración del vehículo. Observando el diagrama de comportamiento de los motores brushless (*Figura 11*), el torque máximo (relacionado directamente con la aceleración) se consigue al arrancar, es decir en el punto de velocidad cero.

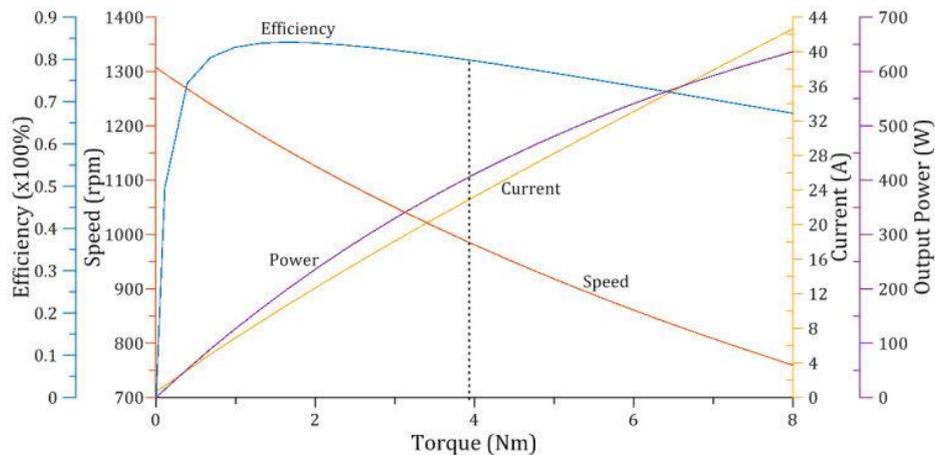


Figura 11. Comportamiento motor brushless [8]

Por otro lado, la *Figura 12* muestra la relación entre el par motor y la velocidad un poco más en detalle. Existen dos parámetros de par motor utilizados para definir un motor BLDC: el pico de torque (TP) y el par nominal (TR). Tal como se observa en la figura, en funcionamiento continuo, el motor es cargado con el par nominal manteniéndose constante hasta la velocidad nominal. Sin embargo, el motor es capaz de funcionar a velocidades superiores a la nominal, pudiendo llegar a funcionar hasta el 150% de la misma, con la consecuente disminución del par.

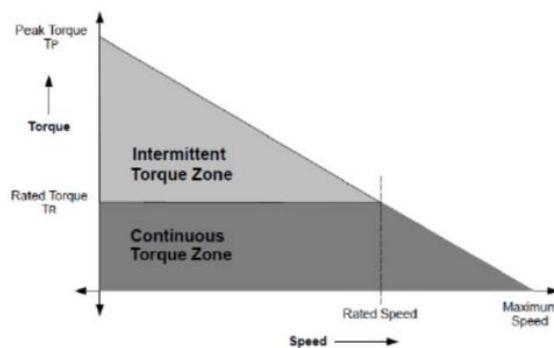


Figura 12. Relación Par-Velocidad en motores Brushless [9]

Una vez hechas estas consideraciones, se puede comenzar a plasmar los cálculos que diseñarán las características de nuestro motor deseado.

A través del diagrama se deduce la ecuación de comportamiento de un motor BLDC ideal, pérdidas:

$$M_{mot} = M_{m\acute{a}x} - \frac{M_{m\acute{a}xMot}}{W_{m\acute{a}xMot}} * W$$

*Ecuación 1. Relación Par-velocidad de un motor BLDC ideal*

Para el cálculo del par resistivo se identifican dos resistencias principales: el rozamiento y el drag (resistencia del aire), *Figura 13*.

$$M_{res} = F_{res} * r$$

$$F_{res} = F_{drag} + F_{roz}$$

*Ecuación 2: Par y Fuerzas de Rozamiento*

Asumiendo un área de alzado:  $A= 0.5m^2$ , un coeficiente de drag:  $C_D=0.5$ ; velocidad máxima:  $v=19.4$  m/s, la densidad del aire:  $\rho=1kg/m^3$  y una superficie plana:  $\theta=0^\circ$ .

$$F_{drag} = C_D * A * \frac{\rho * v^2}{2} = 0.6 * 0.5 * 1 * \frac{19.4^2}{2} = 56.454N$$

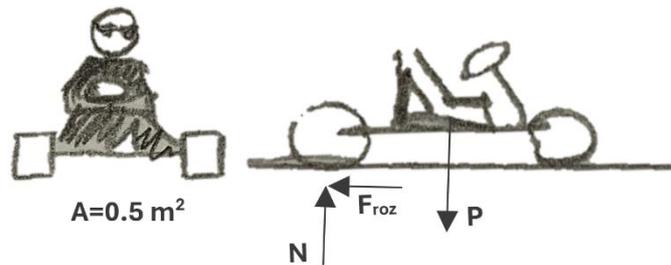
$$F_{roz} = \mu * N = m * g * \cos\theta \rightarrow F_{roz} = 1726.56 N$$

*Ecuación 3. Fuerza "Drag" y de rozamiento*

$$M_{res} = F_{res} * r = 228.23 Nm \text{ (en lado rueda)}$$

$$M_{res} = 228.23 * \frac{1}{n * \eta_t} = 32.511 Nm \text{ (en lado motor)}$$

*Ecuación 4. Par resistivo en lado de la rueda y en lado del motor*



*Figura 13. Esquema de fuerzas del sistema*

Una vez conocida el par resistente, calculamos el Par máximo que debe ejercer el motor para que cumpla con las condiciones impuestas. Para ello planteamos el balance en el lado del motor:

$$M_{mot} - M_{res} = J_{total} * \alpha_{mot\_m\acute{a}x}$$

$$J_{total} = J_{mot} + \frac{J_{res}}{\eta_t * n^2}$$

*Ecuación 5. Ecuación dinámica del kart, con inercias*

$$\alpha_{eje\_m\acute{a}x} = \frac{a_{kart}}{r} = 16.276 \frac{rad}{s^2} \rightarrow \alpha_{mot} = \alpha_{eje} * n \rightarrow \alpha_{mot\_m\acute{a}x} = 126.95 \frac{rad}{s^2}$$

$$w_{eje\_m\acute{a}x} = \frac{v_{m\acute{a}x}}{r} = 151.81 \frac{rad}{s} \rightarrow w_{mot} = w_{eje} * n \rightarrow w_{mot\_m\acute{a}x} = 1184.896 \frac{rad}{s}$$

*Ecuación 6. Aceleración y velocidad angular máxima según requisitos definidos*

Combinando las ecuaciones y los valores obtenidos de  $\alpha_{mot\_m\acute{a}x}$  y  $w_{mot\_m\acute{a}x}$ , obtenemos:

$$M_{mot\_m\acute{a}x} - M_{res} * \frac{1}{n * \eta_t} = \left( J_{mot} + \frac{J_{res}}{\eta_t * n^2} \right) * \alpha_{mot\_m\acute{a}x} \rightarrow \mathbf{M_{mot\_m\acute{a}x} = 59.91 Nm}$$

*Ecuación 7. Par motor máximo mínimo*

Finalmente podemos calcular con los valores obtenidos el valor de la potencia máxima:

$$P_{m\acute{a}x} = M_{m\acute{a}x} * w_{m\acute{a}x}$$

$$P_{m\acute{a}x} = 59.91 Nm * 1184.896 \frac{rad}{s} \rightarrow \mathbf{P_{m\acute{a}x} = 70.988 kW}$$

*Ecuación 8. Potencia máxima mínima*

Sin embargo, esto **NO** es correcto porque como podemos comprobar en la *Figura 12*, el punto donde la potencia es máxima no coincide con el punto donde el par o la velocidad son máximos. Por ello acudimos a la *Ecuación 1*, la cual describe el par en cualquier punto de funcionamiento (de un modelo ideal), y junto a la *Ecuación 8* creamos la expresión de la potencia en función de la velocidad.

$$P(w) = \left( M_{m\acute{a}x} - w * \frac{M_{m\acute{a}x}}{w_{m\acute{a}x}} \right) * w [W]$$

$$P(w) = 59.91 * w - 0.05056 * w^2 [W]$$

*Ecuación 9. Potencia en función de la velocidad de un motor ideal*

Derivando esta expresión e igualando a cero, encontraremos su valor máximo:

$$\frac{dP}{dw} = 0 \rightarrow 59.91 - 2 * 0.05056 * w = 0 \rightarrow w = 592.46 \frac{rad}{s}$$

$$P(w = 592.46) = 17,747.27 W \rightarrow P_{mot_{m\acute{a}x}} = 17.747 kW$$

*Ecuación 10. Potencia máxima mínima del motor ideal*

Esta potencia es la potencia entregada por el motor, es decir la potencia mecánica, no tiene en cuenta el rendimiento del propio motor.

### 3.3 BÚSQUEDA EN EL MERCADO

Una vez tenemos las características propias del motor ideal, debemos buscar en el mercado un motor con las condiciones más parecidas posibles. Esto no será tarea fácil, pues así como los motores brushless cuentan con una alta eficiencia y son muy fáciles de controlar, no se emplean en la industria por lo que el mercado se acota exponencialmente. Estos motores comúnmente tienen dos usos: en la industria de los drones (son motores que alcanzan altas velocidades sin calentarse, ideales para un dron) y para los karts u otros vehículos eléctricos de dimensiones pequeñas.

Realizando un profundo análisis de mercado y tras descartar la opción de comprarlo reciclado a una empresa de e-karts en España (porque no están disponibles para la venta), encuentro dos proveedores asiáticos que me ofrecían motores con muy buenas características a un precio moderado. La gran problemática de estos motores es los impuestos a pagar en aduanas, así como el propio transporte.

Los modelos ofertados por los proveedores fueron:

Tabla 2. Comparación de motores del mercado

	<b>SIAECOSYS MID DRIVE MOTOR 3000W V1</b>	<b>SIAECOSYS MID DRIVE MOTOR SPEC 4000W</b>	<b>QS MOTOR 4000W V3 Mid Dive Motor</b>
<b>Potencia nominal</b>	6000 W	7500 W	4000 W
<b>Potencia pico</b>	10 kW	13.5 kW	15 kW
<b>Tensión nominal</b>	72 V	72 V	72 V
<b>Par nominal</b>	10 Nm	14.3 Nm	15 Nm
<b>Par pico</b>	55 Nm	72 Nm	80 Nm (+140Nm con rel. transmisión)
<b>Velocidad nominal</b>	3800 rpm	4000 rpm	3800 rpm
<b>Máxima eficiencia</b>	94 %	94 %	91.6 %
<b>Intensidad nominal</b>	67 A	89 A	60 A
<b>Intensidad pico</b>	140 A	200 A	200 A
<b>Rel. transmisión</b>	1:1	1:1	19:45
<b>Precio (envío incluido)</b>	<b>\$ 443.41</b>	<b>\$ 513.18</b>	<b>\$ 850.20</b> (con controladora incluida)

Tabla 3. Presupuestos Motores SIAECOSYS con controladora

S/N	Item & Descriptions	Qty (piece)	U/p (USD)	T/p (USD)
1	QS 138 3000W V1 Sprocket shaft mid drive motor (14T default)	1	\$226.80	\$226.80
2	ND 72530 controller + bluetooth adapter	1	\$206.60	\$206.60
EXW				\$433.40
Shipping to Spain by Express				\$214.00
Total Amount by TT				\$647.40
Total Amount by Paypal				\$677.51

S/N	Item & Descriptions	Qty (piece)	U/p (USD)	T/p (USD)
1	QS 138 4000W V1 Sprocket shaft mid drive motor (14T default)	1	\$277.75	\$277.75
2	ND 72530 controller + bluetooth adapter	1	\$206.60	\$206.60
EXW				\$484.35
Shipping to Spain by Express				\$236.94
Total Amount by TT				\$721.29
Total Amount by Paypal				\$754.80

Una vez planteadas estas opciones apareció una nueva oferta: un motor con controladora de segunda mano en España [11],[12]. Más allá del ahorro económico que suponía que se encontrase en España, el motor contaba con características excepcionales.

Motor brushless de 10kW de Golden Motor, *Figura 14:*



*Figura 14. Motor 10kW Golden Motor y Controladora "VECTOR 500" [10],[11]*

Este motor cuenta con las siguiente características:

*Tabla 4. Características del Motor y controladora Golden Motor*

<b>Modelo</b>	<b>HPM-10KW — High Power BLDC Motor</b>	<b>VEC500</b>
<b>Tensión nominal</b>	96V	96V
<b>Eficiencia máxima</b>	91%	95%
<b>Resistencia eléctrica del motor</b>	0.01 $\Omega$	-
<b>Inductancia</b>	0.0002 H	-
<b>Peso</b>	17 Kg	2.5 Kg
<b>Velocidad nominal</b>	6000 rpm	-
<b>Método de control</b>	-	Control de par directo (control de campo orientado)
<b>Intensidad máxima en DC Bus</b>	-	200A

El precio del motor nuevo en la página oficial, junto con el de su controladora, asciende a \$1839, sin incluir los gastos de envío, una cifra inviable para el presupuesto disponible. Sin embargo, al tratarse de un motor de segunda mano en buenas condiciones, se logró negociar su precio hasta **600 €**, *Figura 15*. Sin duda, esta fue la mejor oferta posible para el proyecto, por lo que se procedió a su compra.

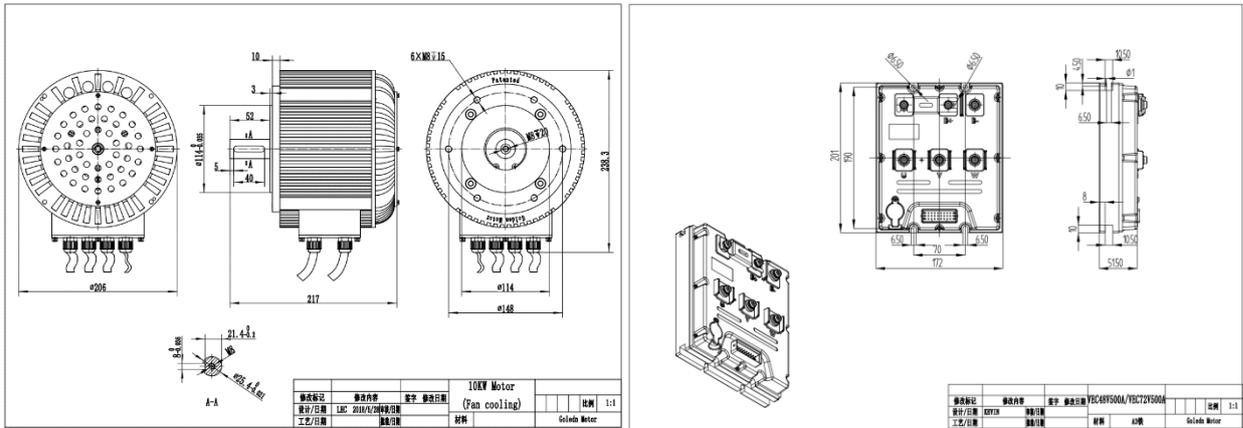


Figura 15. Planos motor y controladora Golden Motor [12],[13]

Además, cabe destacar que el motor venía con una piñón incorporado a su eje y una p Polea dentada como sistema de transmisión con una relación de 2.

### **3.4 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR Y EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS BATERÍAS**

Un aspecto fundamental en el diseño y estudio de este motor será su consumo de energía y el comportamiento eléctrico que sostenga en distintos puntos de trabajo. Para esto podemos realizar un estudio teórico y una simulación con Matlab (Simulink).

#### **3.4.1 Estudio teórico**

Al poder predecir el comportamiento del par y la potencia según la velocidad del motor, como hemos visto en las ecuaciones anteriores podemos realizar un análisis del flujo de intensidad y el voltaje en distintos puntos de trabajo.

Para ello acudiremos a la siguiente expresión:

$$P = U * I * \cos(\varphi)$$

*Ecuación 11. Potencia según tensión e intensidad*

Idealmente, sobrealimentaremos al motor con tensión para que la intensidad reduzca su valor consiguiendo diversas ventajas entre las cuales destaca evitar el posible riesgo de quemar el motor. Sobrealimentar al motor con tensión no tiene ningún riesgo siempre que sea durante periodos breves de tiempo (como puede ser el arranque de un carrera), esto es porque por normativa los motores de baja tensión deben soportar hasta un máximo de 1000V.

Con la expresión anterior y con la semejanza entre la recta de potencia y el consumo de intensidad en los motores brushless, es posible predecir el comportamiento de la tensión e intensidad del motor para diversos puntos de trabajo en un modelo ideal.

$$I(w) = I_{m\acute{a}x} - \frac{I_{m\acute{a}x}}{W_{m\acute{a}xMot}} * w [A]$$

*Ecuación 12. Intensidad en función de la velocidad*

Un breve estudio de mercado sobre los variadores de los motores brushless con propiedades semejantes a las del calculadas en el apartado 3.2.4. “*Caracterización del motor*”, nos indica que soportan intensidades máximas de hasta 200 A. El variador, que es el verdadero limitante de la intensidad en nuestro sistema, marcará el valor de la  $I_{m\acute{a}x}$  a emplear.

En este caso para tener un coeficiente de seguridad de 1.05, establecemos que la intensidad máxima que circulará por nuestro motor será de  $I_{m\acute{a}x} = 190$  A.

$$I(w) = 190 - 0.1604 * w \text{ [A]}$$

*Ecuación 13. Intensidad en función de la velocidad*

Además, es preciso destacar, aunque no lo vayamos a tener en cuenta en nuestro modelo, que el factor de potencia (hasta ahora considerado constante), varía con respecto a la carga. A medida que aumenta la carga (aumenta el par), el factor de potencia disminuye para que el motor pueda entregar una mayor cantidad de potencia reactiva.

Por lo tanto y tras combinar las ecuaciones anteriores, obtenemos la siguiente expresión:

$$U(w) = \frac{74.888 * w - 0.00632 * w^2}{190 - 0.1604 * w} \text{ [V]}$$

*Ecuación 14. Tensión de entrada al motor en función de su velocidad*

A través de estas ecuaciones, nuestro motor ideal y su comportamiento queda parametrizado en función de la velocidad de giro de este. De esta forma podemos obtener un consumo de las baterías si llegamos a obtener un perfil de velocidades. Sin embargo, para aumentar el realismo del modelo y volver más fiables las estimaciones de consumo, en el siguiente apartado tendremos en cuenta tanto las impedancias internas del motor como el rendimiento de la controladora. Los cálculos serán respaldados por dos métodos distintos y resueltos en Matlab.

### ***3.4.2 Dimensionamiento de las baterías con Matlab***

Para poder dimensionar las baterías de nuestro kart, nos basaremos en un proceso de ingeniería inversa en un modelo simulado. A través de la telemetría de un circuito de karts en España, logramos extraer en intervalos de tiempo muy pequeños la velocidad instantánea del piloto en ese lugar de la pista. De esta forma el perfil de velocidades y el par resistente del kart serán nuestras únicas entradas de los sistemas. Es importante destacar que el kart que corre la vuelta registrada es de condiciones similares al nuestro (velocidades y aceleraciones punta similares). El dimensionamiento se hará estudiando la energía consumida tras una vuelta y multiplicando dicho valor por el número de vueltas que deseamos que pueda correr. Este método no tiene en cuenta la caída de tensión mínima que hay en las celdas de litio-ion.

La vuelta de la que se ha extraído el perfil de velocidades proviene de la competición de karts eléctricos más importante de España. La competición de e-karting de Play and Drive está homologada por la FIA, y se lleva a cabo con karts que tienen 20kW de potencia pico y hasta 80Nm de par instantáneo, *Figura 16 [14]*. Dado que estas características son similares a las de nuestro modelo, podemos utilizar la telemetría de este kart como referencia para el dimensionamiento de las baterías. El modelo del kart de competición es el EGT5, la última versión de Play and Drive y el circuito donde se realizó la vuelta es en el circuito Roquetas del Mar en Almería.



*Figura 16. Modelo EGT5 de Play and Drive [14]*

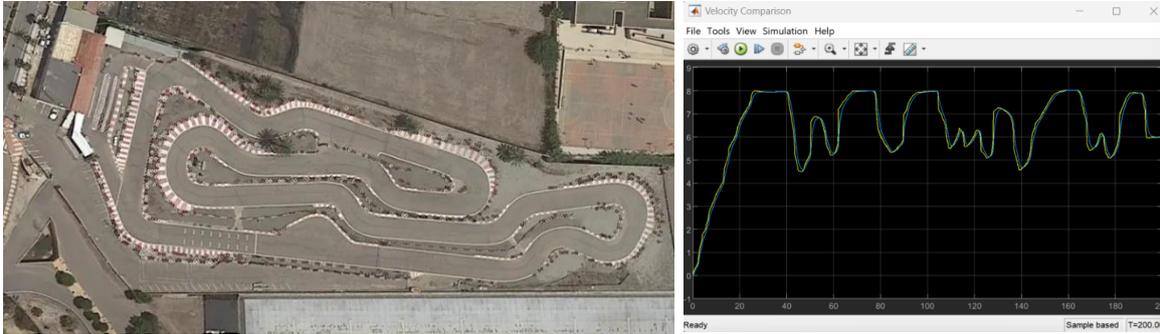


Figura 17. Circuito Roquetas del Mar y telemetría asociada [15]

Tabla 5. Comparativa EGT1 vs Golden Motor 10kW

	<b>EGT1</b>	<b>Golden Motor BLDC 10kW</b>
<b>Tipo de motor eléctrico</b>	Brushless	Brushless
<b>Potencia Pico</b>	20kW	20kW
<b>Par Máximo</b>	80Nm	68 Nm
<b>Tensión nominal</b>	96.2 V	96 V

Realizaremos 3 simulaciones con distintos métodos:

1. Simulación mediante balance de potencias.
2. Simulación mediante estudio teórico del comportamiento de un motor BLDC.
3. Simulación completa de un modelo realista.

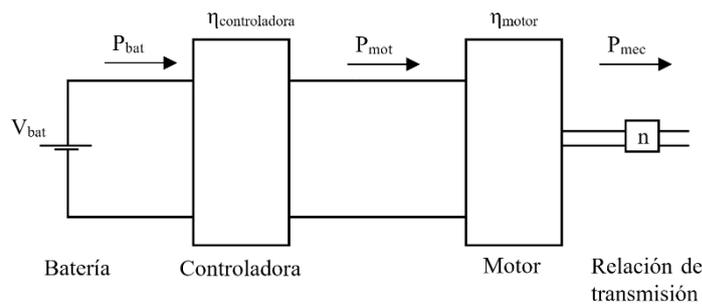
Para todas estas simulaciones hemos empleado los siguientes parámetros:

Tabla 6. Parámetros simulación en Matlab

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b><math>T_g</math> – Par resistente</b>	32.51 Nm
<b><math>n</math> – Relación de transmisión</b>	2
<b><math>r</math> – Radio de las ruedas</b>	0.128 m
<b><math>\eta_{mot}</math> – Rendimiento nominal del motor</b>	91%
<b><math>\eta_{contr}</math> – Rendimiento nominal de la controladora</b>	95%
<b><math>J_{mot}</math> – Momento de inercia</b>	0.01 kgm <sup>2</sup>
<b><math>b</math> – Coeficiente de fricción rotor</b>	0.09 Nm/s
<b><math>k_e</math> – Constante fuerza electromotriz</b>	0.2069 V/rad/s
<b><math>k_t</math> – Constante de proporcionalidad del par</b>	0.2151 Nm/A
<b><math>R</math> – Resistencia eléctrica del motor</b>	0.01 $\Omega$
<b><math>L</math> – Inductancia</b>	0.0002 H

### 3.3.1.1 Simulación mediante balance de potencias

En esta simulación, dimensionaremos la capacidad de las baterías utilizando un balance de potencias, asumiendo un rendimiento constante del sistema. Comenzamos con el perfil de velocidades del rotor. Dado que ya contamos con un motor y una controladora, consideramos estos rendimientos, aportados por el fabricante, constantes (aunque realmente solo serán veraces cuando el motor trabaje a velocidades nominales). El proceso implica calcular la potencia mecánica en el eje del motor ( $P_{mec}$ ), convertirla en potencia eléctrica a la entrada del motor ( $P_{mot}$ ) y, finalmente, determinar la potencia necesaria de las baterías ( $P_{bat}$ ), *Figura 18*.



*Figura 18. Esquema Potencias*

$$J_{tot} = J_{mot} + J_{eq} = J_{mot} + m * r^2 * \frac{1}{n^2}$$

*Ecuación 15. Inercia total del sistema*

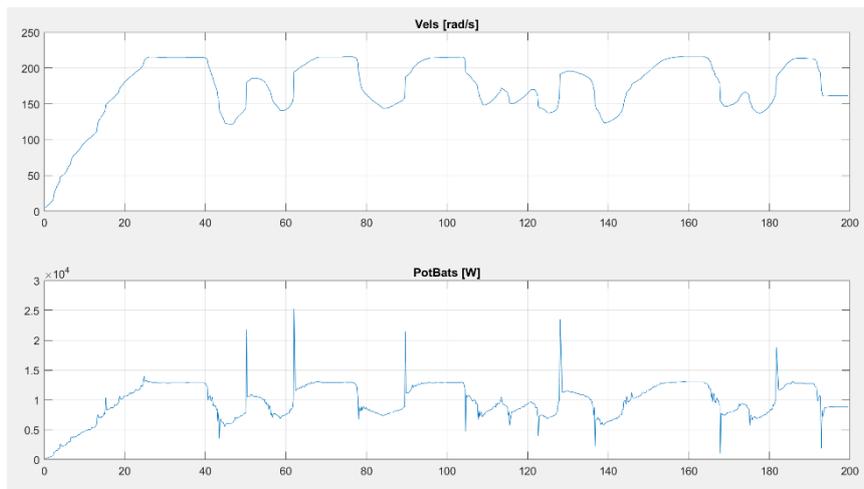
$$P_{mec} = \left( J_{tot} * \frac{dw}{dt} + T_g + b * w \right) * w$$

$$P_{mot} = \frac{P_{mec}}{\eta_{mot}}$$

$$P_{bat} = \frac{P_{mot}}{\eta_{contr}} = \frac{P_{mec}}{\eta_{mot} * \eta_{contr}}$$

*Ecuación 16. Potencia consumida por baterías*

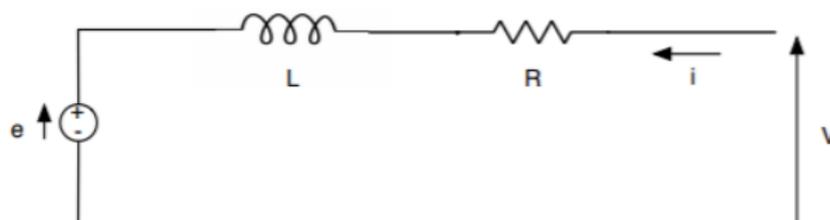
Como la entrada es un vector de velocidades con respecto al tiempo, la salida será un vector de potencia. Si hacemos la integral de dicho perfil temporal conseguimos la energía consumida de las baterías (*Figura 19*). La energía final correspondiente con una vuelta es de **546.3348 Wh**.



*Figura 19. Perfil de velocidades y de potencias según método de balance de potencias*

### 3.4.2.2 Simulación mediante el estudio teórico del motor BLDC

Para modelizar el comportamiento del motor de corriente continua podemos acudir a dos ecuaciones diferenciales ligadas entre sí que definirán su comportamiento eléctrico y mecánico. Una está referida al circuito eléctrico equivalente del motor (*Figura 20*), mientras que la otra definirá su comportamiento mecánico. Estas ecuaciones, muy lejos de ser independientes, simularán el comportamiento completo del motor ante las entradas definidas.



*Figura 20. Circuito equivalente del motor*

La ecuación diferencial eléctrica proviene del circuito monofásico equivalente de un motor brushless ante una vista externa, como la controladora.

$$V = R * i + L * \frac{di}{dt} + e$$

*Ecuación 17. Comportamiento eléctrico del motor*

Siendo 'e' la fuerza electromotriz e 'i' la corriente que circula.

La ecuación diferencial mecánica:

$$T_g - T_f - T_e = J * \frac{d^2\theta}{dt^2} = J * \alpha$$

*Ecuación 18. Comportamiento mecánico del motor*

Donde  $T_g$  es el par mecánico generado por el motor,  $T_f$  es el par resistente debido a la fricción del rotor,  $T_e$  es el par resistente externo en el rotor (la carga) y  $\alpha$  es la aceleración angular.

Además, se puede definir cada término:

$$T_g = k_t * i$$

$$T_f = b * \frac{d\theta}{dt} = b * w$$

$$e = k_e * \frac{d\theta}{dt} = k_e * w$$

*Ecuaciones 19. Descripción de parámetros del motor*

Sustituyendo las ecuaciones y resolviendo obtenemos lo siguiente:

$$V = R * i + V_L + k_e * w \quad \rightarrow \quad V_L = V - R * i - k_e * w$$

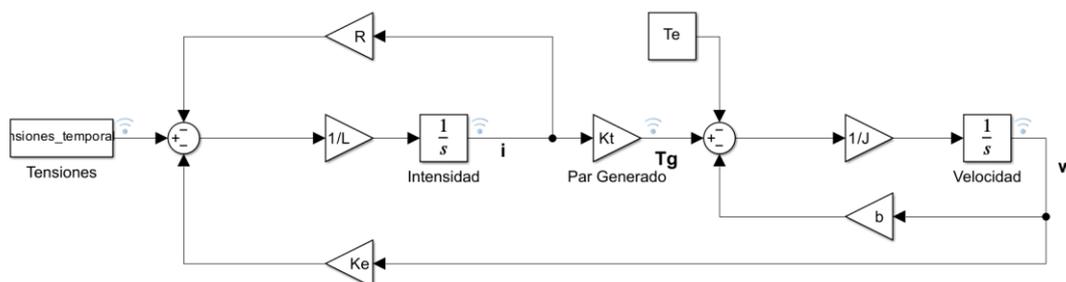
$$k_t * i - b * w - T_e = J * \alpha \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{k_t * i - b * w - T_e}{J}$$

*Ecuación 20. Ecuaciones desarrolladas para diagrama de bloques*

Siendo  $V_L$  la tensión que cae sobre la inductancia.

Con estas ecuaciones podemos crear un diagrama de bloques en Matlab-Simulink que modelará el comportamiento de nuestro motor (*Figura 21*). Las entradas de este sistema serán la carga externa aplicada sobre el rotor ( $T_e$ ) y la tensión que recibe el motor por parte de la controladora. Por otro lado, las salidas a analizar serán la intensidad consumida por el motor (importante para diseñar la batería más adelante), el par ejercido por el motor ( $T_g$ ) y la velocidad angular del rotor ( $w$ ).

Como la controladora varía la tensión que le llega de la batería, al motor, con el fin de modificar la velocidad, introducimos un vector de tensiones asociados a un segundo determinado para poder analizar superficialmente el efecto que tiene variar la tensión sobre el resto de parámetros. Es decir, a través de un registro de tensiones por segundo, podremos realizar una primera estimación del consumo y del comportamiento del vehículo.



*Figura 21. Diagrama de bloques en Simulink*

Como podemos observar, en un modelo normal usaríamos el balance para ir en sentido de la energía (diagrama de bloques normal). Sin embargo, como nuestra única entrada es el perfil de velocidades del rotor, debemos crear el diagrama inverso (*Figura 22*).

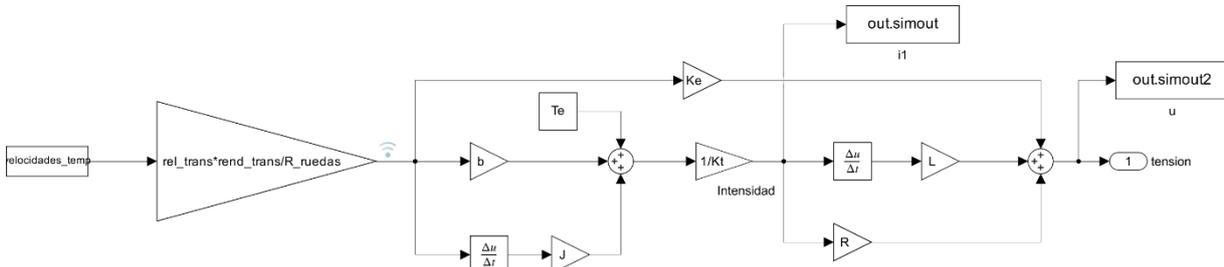


Figura 22. Diagrama de bloques invertido

La energía resultante se obtiene como:

$$P = i_1 * U * \frac{1}{rend_{cont}}$$

Ecuación 21. Potencia en las baterías

Este modelo consume **584.41 Wh** tras una vuelta, como se observa en la Figura 23.

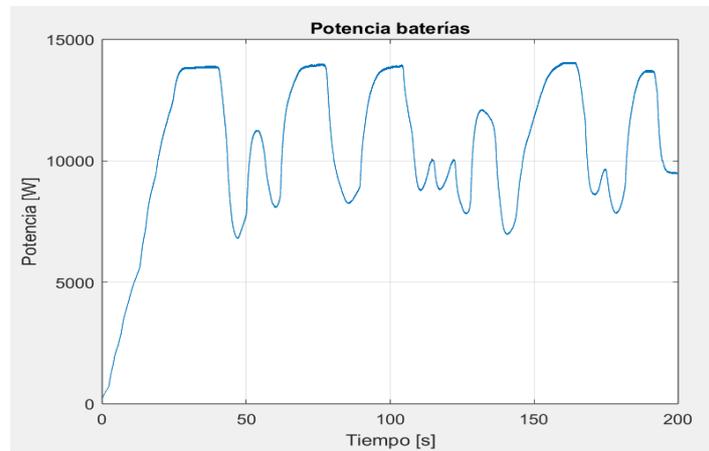


Figura 23. Potencia en las baterías según método de comportamiento teórico del motor

Comparativa de resultados y conclusiones:

Tabla 7. Comparación de energía consumida

	Balance de potencias	Modelo teórico del motor
Energía consumida (1 vuelta)	546.34 Wh	582.41 Wh

Como se observa, los resultados son bastante similares (un error del 6%) lo que representan pérdidas caloríficas y por fricción, que no se han tenido en cuenta en el modelo de balance de potencias. Por lo tanto, si queremos que nuestro kart haga un total de 5 vueltas a máxima velocidad, requeriremos unas baterías de aproximadamente **2.5kWh**.

### ***3.5 ELECCIÓN DE LAS BATERÍAS***

Una vez dimensionadas las baterías es crucial realizar un detallado estudio del mercado para encontrar aquellas que se ajusten mejor a nuestras necesidades y presupuesto. Dado que las baterías representan la mayor parte del presupuesto del proyecto, será fundamental realizar una elección con criterio incluso si implica comprometer aspectos como la duración en pista. Además, es importante prestar atención a otros elementos clave, como el sistema de gestión de baterías (BMS), que influye significativamente en el rendimiento general.

#### ***3.5.1 Tipo de baterías***

Para alimentar nuestro sistema eléctrico se opta por las baterías de ion-litio, al ser estas las más adecuadas para este proyecto gracias a su alta densidad energética y eficiencia. Cada celda de ion-litio suele ofrecer una tensión nominal de 3.6 a 3.7 voltios y una capacidad de entre 2000 y 3000 mAh, permitiendo almacenar una gran cantidad de energía en un tamaño y peso relativamente pequeños.

Hoy en día, los vehículos eléctricos optan por baterías de ion-litio en lugar de otros tipos de batería gracias a su capacidad para proporcionar una alta potencia de salida y una vida útil prolongada (*Figura 24*). A diferencia de las baterías de plomo-ácido o níquel-cadmio, las baterías de ion-litio no sufren del efecto memoria y tienen una menor tasa de autodescarga. Esto las hace ideales para aplicaciones donde se requiere un rendimiento fiable y consistente, como es el caso de un kart eléctrico en este proyecto. [16]



*Figura 24. Celdas de Litio-ión [17]*

Sin embargo, estas baterías tienen un coste elevado. El precio medio de una celda de ion-litio se encuentra entre los 5€ y, el precio de una celda de segunda mano no baja de los 3€, lo que significa un incremento en el presupuesto total del proyecto. Pese a ello, la inversión se justifica por la mejora en el rendimiento y la duración de la batería en comparación con los otros tipos de alimentación

No obstante, las baterías de ion-litio también presentan ciertos riesgos que deben ser gestionados adecuadamente. Estas, pueden llegar a ser peligrosas si no se manejan correctamente, ya que son propensas a incendiarse o explotar si se sobrecargan, se descargan en exceso, se exponen a altas temperaturas o sufren daños físicos. Por este motivo, es esencial implementar sistemas de gestión de baterías (BMS) que monitoreen y regulen su carga y descarga para garantizar la seguridad y longevidad del sistema eléctrico del kart.

### 3.5.2 *Búsqueda en el mercado*

La mayor problemática de nuestras baterías será que para llegar a los 96V requeridos por el motor, tensión nominal, necesitaremos al menos 27 celdas en serie (suponiendo celdas de 3.6V cada una). Para aumentar la capacidad de la batería, debemos realizar conexiones en paralelo hasta llegar al amperaje/hora deseado. Si cada celda cuenta con aproximadamente 5Ah, para llegar a unos 20 Ah, debemos realizar 4 conexiones en paralelo, lo que significa que hace falta comprar un total de 108 celdas litio-ion. Esto, sumado a las planchas de zinc que se soldarán directamente a los polos de la celda mediante un soldador de puntos, eleva el precio de fabricación de las baterías a unos 580€. Además, será necesario comprar y adaptar un sistema de control para las baterías (BMS), para asegurar la fiabilidad y longevidad de estas. Esto eleva el precio a unos 700€. Además, el conexionado y el proceso de soldadura de cada celda es sumamente complejo, por lo que no será la opción escogida para este proyecto.

Indagando en el mercado, encontramos que las baterías no solo significarán la mayor parte del presupuesto de este trabajo, sino que también es sumamente complejo encontrar packs de baterías que alcancen los 96V y que tengan altas capacidades.

Sin embargo, tras mucho análisis se logró llegar a la idea de emplear en paralelo módulos de baterías de una empresa de jardinería. Esta empresa, llamada “Green Works”, desarrollaba herramientas eléctricas para el jardín de alta tensión, y con ello vendían cargadores y módulos de baterías (*Figura 25*).



*Figura 25. Módulo de baterías de "Green Works" [18]*

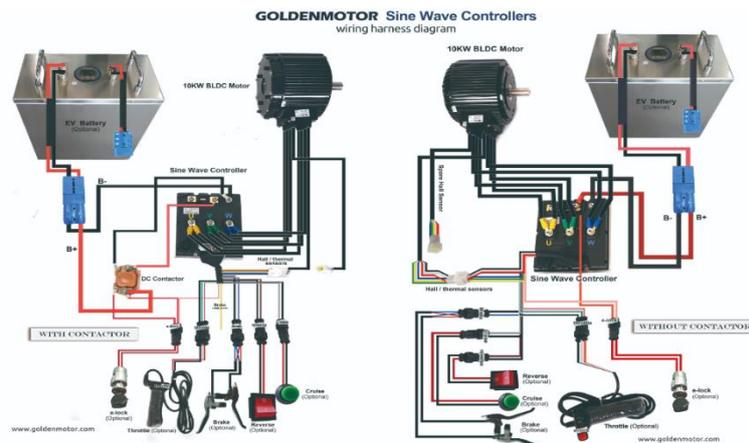
Sin duda alguna, esta se convirtió en la mejor opción posible. Estos módulos contaban con su propia BMS, y existían evidencias de personas que habían empleado estas baterías para funciones parecidas a las de este proyecto. Esto significaba que, al conectarse un módulo con otro en paralelo, la BMS aceptaba un balance de potencias igualando la carga, y la tensión consecutivamente, de ambos módulos. Esto sería crucial para evitar saltos de tensión entre los módulos que, aunque estos fuesen mínimos, serían de alto riesgo para la seguridad del vehículo.

Estos módulos existían con varias configuraciones, pero la más interesante y adecuada para el proyecto sería el modelo de 80V con una capacidad de 8000mAh, llegando a costar 310€ en Ebay dos módulos [19]. Esto sería idóneo ya que lo único que haría falta sería una estructura para contener los módulos y cables para realizar el conexionado. El voltaje no sería un problema porque, aunque no llegue a los 96 V de tensión nominal, el motor puede seguir operando y dando altos valores de par y velocidad. El concepto consiste en que serán las baterías las que limiten el consumo del motor de forma analógica, y no la propia controladora de forma digital.

Para comprar la capacidad adecuada nos guiaremos según el modelo EGT1 de *PlayandDrive*, los productores de los karts eléctricos de competición más conocidos de España. Estos modelos tienen una batería de 2.0kWh [20]. Comprando dos packs de dos módulos cada uno, **620€** - 4 módulos de baterías, alcanzaríamos una batería de 80V con una capacidad de 32000 mAh. Como sabemos que  $I [Ah] * U [V] = P [Wh]$ , la energía disponible de nuestra batería sería de **2.56 kWh**, un 22% más de capacidad que el modelo de competición homologado EGT1.

### 3.6 Conexión eléctrica

Como se ha explicado brevemente en el apartado anterior, aunque las baterías vengan con un voltaje nominal de 80V, si las conectamos en paralelo y resulta haber un mínimo salto de tensión entre puntos de conexión, la corriente quemaría el cable por la resistencia interna, creando un grave problema de seguridad en nuestro vehículo. Para evitar esto, lo ideal sería conectar las baterías en paralelo con una resistencia externa entre medias. De esta forma, se creará un flujo de potencias que igualará el voltaje de todas las baterías conectadas. Por otro lado, una vez contamos con todos los elementos eléctricos, procedemos con el conexionado. La unión entre las baterías, la controladora, el motor y los sistemas de accionamiento del motor sigue el siguiente esquema, *Figura 26*:



*Figura 26. Conexión eléctrica recomendada por el fabricante, con y sin fusible [21]*

Siendo el “contactor” un fusible para evitar sobretensiones en casos de fallo

## **Capítulo 4. Sistema Mecánico**

### ***4.1 INTRODUCCIÓN AL SISTEMA MECÁNICO***

El diseño del sistema mecánico de un kart eléctrico se caracteriza por su complejidad y la precisión necesaria en cada componente, desde el chasis hasta los soportes para los elementos eléctricos y los mecanismos de acople. Este proyecto incluye un análisis detallado para la selección y diseño de estos componentes, empleando simulaciones avanzadas que garantizan la máxima seguridad, la reducción del peso y la optimización del rendimiento.

Como se estableció en los objetivos específicos, el enfoque del estudio de este proyecto se centrará en el diseño de componentes clave que facilitan la integración del sistema eléctrico con el mecánico.

Los elementos específicos en los que se enfocará este análisis incluyen:

1. La elección del chasis adecuado para optimizar la dinámica y la seguridad.
2. El diseño de un acople entre el eje y una polea dentada, esencial para la transmisión de potencia.
3. El desarrollo de un soporte robusto para unir el motor al chasis, asegurando estabilidad y eficiencia.

### ***4.2 ELECCIÓN DE UN CHASIS***

El chasis de un vehículo es la estructura que sostendrá todo el conjunto, proporcionando la base sobre la que se montan los demás componentes, desde el sistema de propulsión hasta los sistemas de seguridad y control. Este actuará como el esqueleto del kart, no solo ofreciendo soporte estructural sino también influyendo significativamente en la dinámica de conducción y la eficiencia del vehículo. Al elegir el chasis, se debe considerar su capacidad para integrar de manera eficiente los elementos eléctricos y mecánicos, garantizando así un balance óptimo entre rigidez y flexibilidad, lo cual es crucial para maximizar el rendimiento y la seguridad en pista.

### 4.2.1 Elección y compra del chasis

Como es habitual antes de cualquier proceso de compra, es esencial realizar un exhaustivo estudio de mercado. Los chasis de los karts de alto rendimiento suelen estar fabricados con aleaciones de hierro robustas que no solo incrementan su durabilidad, sino también su ligereza. Sin embargo, los principales fabricantes de karts a nivel mundial emplean materiales exclusivos y adoptan geometrías innovadoras para sus chasis, lo cual se refleja en precios considerablemente altos. Por ejemplo, el modelo Tony Kart Racer 401 RR, conocido por ser el chasis campeón del mundo en la categoría KZ, tiene un precio de venta que alcanza los 5000€, representado en la *Figura 27* [22].



*Figura 27. Chasis Tony Kart Racer 401 RR [22]*

Tras buscar y estudiar todas las opciones, decidí que la mejor opción era comprar un chasis que tuviera potencial para ser restaurado y donde cupieran mis elementos eléctricos. Finalmente, a través de una página de segunda mano, adquirí un chasis de un kart que había sido abandonado por el dueño pero que tenía todas las características que estaba buscando: 4 neumáticos, eje, bielas de dirección, volante, sistema de frenos, rodamientos y pontones delanteros y laterales. El conjunto, *Figura 28*, se vendía por 350€ y negociando pagué por el **280€**, lo que me dejaba un margen para cambiar componentes rotos y con necesidad de cambio.



*Figura 28. Chasis del kart adquirido por 280€*

Una de las características que me inclinaron a comprarlo, a parte del precio, fue el soporte encima del eje que se usaba antes para soportar el motor. Esa plataforma era idónea para situar la controladora del sistema eléctrico. Más allá de la suciedad acumulada tras el paso de los años, la estructura tubular se encontraba en buen estado. Esta estaba libre de oxidaciones probablemente por su conservación en un lugar seco como un garaje, las ruedas no estaban pinchadas sino desinfladas, las varillas de dirección estaban firmes pero desequilibradas. El disco de freno presentaba oxidaciones, pero superficiales, por lo que no había más que limpiar con quita óxidos. Los bujes y rodamientos estaban en buen estado, pero les faltaba grasa para lubricar el sistema. Por estas razones, este chasis fue una buena compra e ideal para actuar como esqueleto de este proyecto. Una vez limpio el resultado se observa en la *Figura 21*.



*Figura 29. Bastidor limpio y repintado*

### **4.3 ADAPTACIONES ESTRUCTURALES**

Al igual que se realiza un diseño previo a la compra de todos los componentes, será fundamental realizar un diseño donde se pueda estudiar la adaptación del chasis hacia estos componentes (*Figura 30*). Dichas adaptaciones deben tener en cuenta los esfuerzos que genera correr a altas velocidades en un circuito convencional. Estos esfuerzos vendrán de torques específicos, el peso del conjunto o la propia aceleración del motor. Para comprobar que las adaptaciones al chasis son correctas (validando el material aplicado, su geometría...), realizaremos diversas simulaciones de pequeños conjuntos en SolidWorks.



*Figura 30. Ejemplo de adaptación estructural*

### **4.4 MODELACIÓN DE LA PARTE TRASERA DEL KART EN SOLIDWORKS**

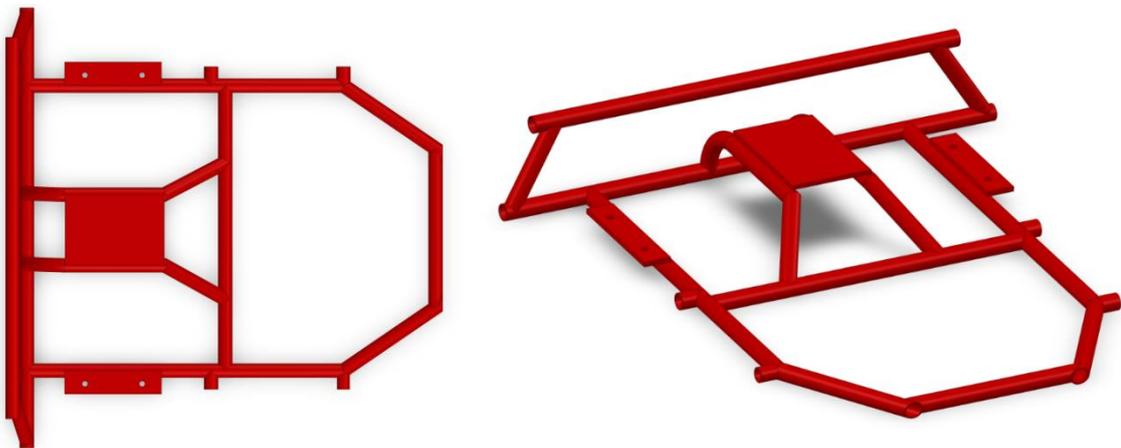
A través de un conjunto de ensamblajes, se modela la mitad trasera del chasis del kart con el fin de realizar adaptaciones precisas y poder simular su comportamiento con el conjunto. Además del chasis, incluimos en el ensamblaje algunos componentes al modelo como: los pontones laterales con sus barras de acople al kart, el eje, rodamientos, conjunto de transmisión (poleas dentadas y correa) y motor eléctrico BLDC 10kW de Golden Motor. Estos componentes serán necesarios para comprobar que las adaptaciones creadas no interfieren con las restricciones geométricas del kart original.



Los elementos mecánicos del kart se deben modelar en CAD para poder realizar simulaciones de comportamiento y para estudiar la disposición de cada uno de los elementos a incorporar. Por ello, se ha creado una lista de elementos modelizados que posteriormente se ensamblarán. El conjunto está principalmente orientado a la mitad posterior del chasis del kart, ya que es aquí donde se encuentran la mayor parte de las dificultades del proyecto.

- EL CHASIS:

Se trata de un chasis de tamaño adulto compuesto por barras de acero con perfiles tubulares de diámetro exterior 30mm e interior 25mm. Dispone de un soporte único por encima del eje para originalmente situar el motor, sin embargo, en este proyecto se usará para situar la controladora del sistema eléctrico. En la *Figura 32*, se ve representado la parte media y posterior (más cercana al eje trasero) del kart, donde se ubicarán los elementos a instalar.

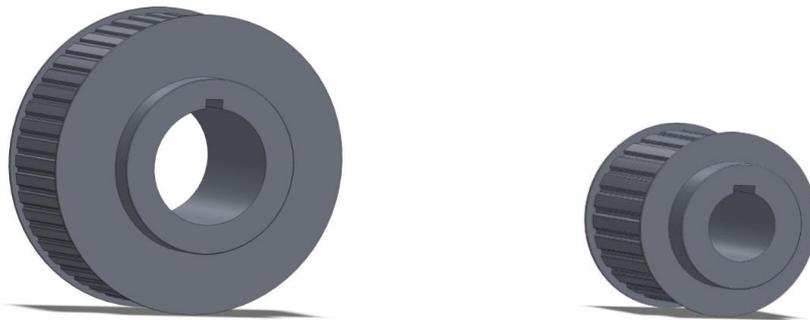


*Figura 32. CAD Chasis*

- SISTEMA DE TRANSMISIÓN:

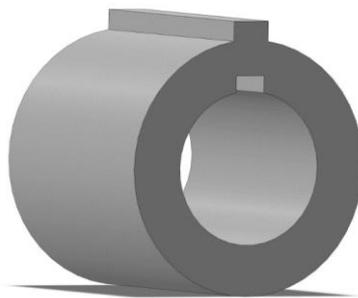
El sistema de transmisión por correa (de caucho) está compuesto por un piñón y una corona (*Figura 33*). El piñón tiene 25 dientes mientras que la corona tiene 50. El diámetro interno del piñón es de 25mm mientras que el de la corona es de 50mm. Estos elementos, venían en el conjunto de compra del motor eléctrico.

Están fabricadas probablemente mediante una fundición gris, lo que garantiza la pieza ante esfuerzos mecánicos elevados. La relación de transmisión es de 2. La longitud de la correa depende de la ubicación en el chasis del motor, así en el diseño realizado se requiere una correa de 1023mm.



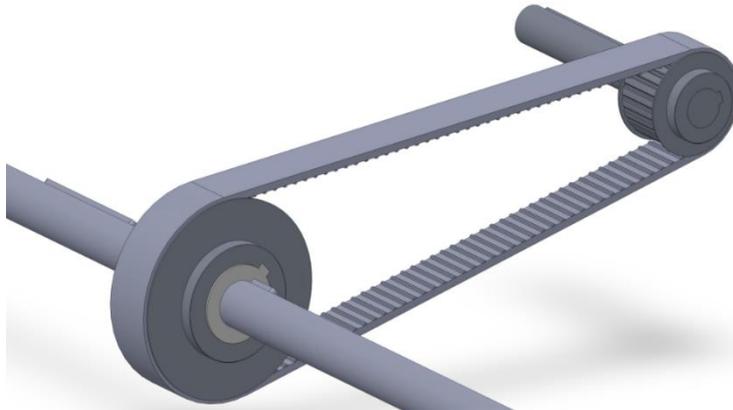
*Figura 33. CAD Polea y piñón dentados*

Surge entonces la primera problemática: la diferencia de diámetros entre el eje y el diámetro interior de la polea dentada. Para solventar dicho problema se crea un acople que transmita el movimiento entre ambos elementos (*Figura 34*). El diseño y estudio de este acople se verá en el apartado *4.6 Acople eje-polea dentada*.



*Figura 34. CAD Acople eje-polea dentada*

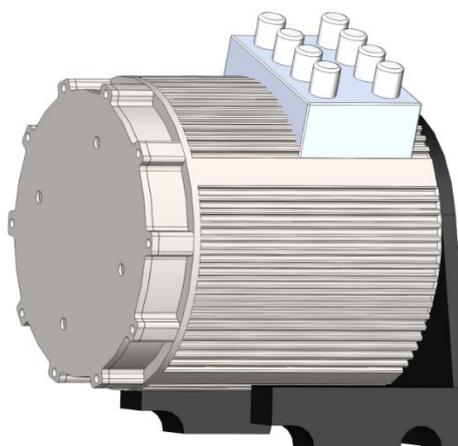
De esta forma la implementación final tendrá el aspecto de la *Figura 35*.



*Figura 35. CAD Sistema de transmisión completo*

- MOTOR BLDC 10kW de Golden Motors.

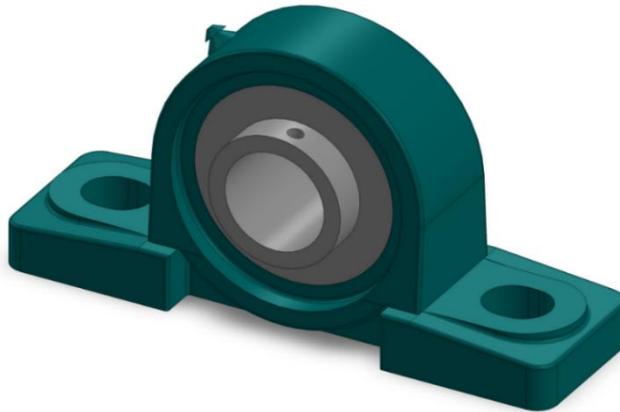
El motor de Golden Motors, con especificaciones ya vistas en el *Capítulo 3*, tiene una masa de 17 kg y su carcasa está fabricada de acero. Además, cuenta con un soporte adicional, también en un acero, que permite la fijación del motor a dos secciones tubulares y paralelas del propio chasis, este soporte está en pintado de negro la *Figura 36*.



*Figura 36. CAD Motor BLDC 10kW Golden Motor*

- RODAMIENTOS DE ALMOHADA:

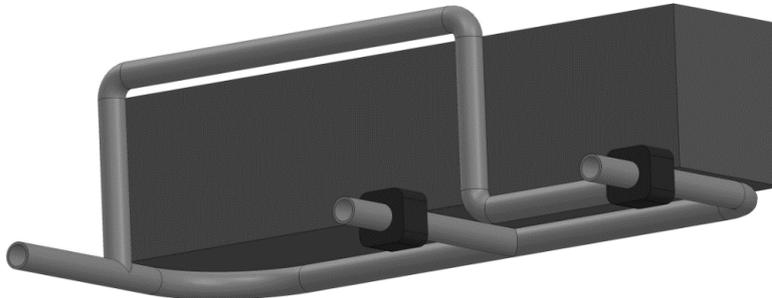
Estos rodamientos de almohada fijarán el eje con el chasis y permitirán su giro. Su diámetro interior es de 30mm y cuentan con una válvula para mantener su lubricación como se aprecia en la *Figura 37*. Estos rodamientos son comúnmente empleados para la fijación de ejes a soportes y son conocidos por poder soportar altas cargas axiales y radiales.



*Figura 37. CAD Rodamiento de almohada*

- PONTONES LATERALES:

Dos pontones simétricos que protegen el conjunto ante posibles colisiones laterales (de baja carga). Estos son plásticos y están sujetos al chasis gracias a una estructura tubular de aluminio. Además, cuentan con dos soportes de goma cuya función será disipar las vibraciones del conjunto a la estructura del chasis como podemos observar en la *Figura 38*.



*Figura 38. CAD Pontón lateral derecho*

- EJE:

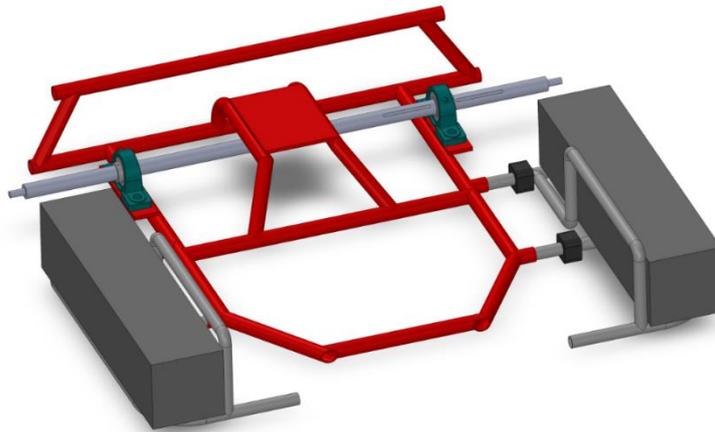
El eje trasero del kart es de acero y cuenta con un perfil de 30mm de diámetro y una longitud de 1087mm con dos extremos adicionales roscados de 30mm a cada lado (*Figura 39*). Cuenta con dos chavetas a cada lado, simétricamente opuestas para lograr la transmisión del par. En estas posiciones se ubica el disco de freno, el sistema de transmisión y los rodamientos de almohada que lo fijarán al chasis del kart. En los laterales roscados se encuentran los bujes que sostendrán las ruedas.



*Figura 39. CAD Eje con chavetas*

- CONJUNTO: (sin motor ni sistema de transmisión)

Aquí hallamos la segunda problemática: Hallar la correcta y adecuada ubicación para situar el motor. Para tomar esta decisión, parece evidente aprovechar el soporte de acero incorporado al motor con acoples a tubos de 30mm. Es por ello, y considerando que el peso de las baterías debe contrarrestar al peso del motor, situamos el motor en lado izquierdo del chasis, apoyándose por un lado sobre el propio chasis, y por otro sobre un soporte tubular creado para la cuestión. Como podemos observar en la *Figura 40*, existe el suficiente espacio encima del eje para ubicar ahí el variador de velocidad.

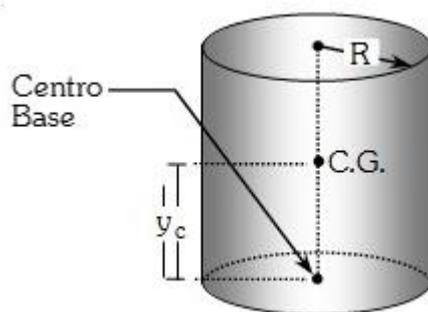


*Figura 40. CAD Conjunto sin motor ni sistema de transmisión*

## 4.5 SOPORTE TUBULAR MOTOR-CHASIS

Para resolver el problema mencionado anteriormente sobre la ubicación del motor en el chasis, diseñaremos un soporte tubular que se acoplará al lateral del chasis donde se ubicará el motor. Para cumplir con los requisitos de seguridad, es crucial realizar un dimensionamiento adecuado que garantice la fiabilidad, determinando las cargas críticas que puede soportar el conjunto motor-soporte. Para ello, crearemos una simulación en SolidWorks, donde aplicaremos al soporte del motor el par máximo que este le puede entregar (según la tercera ley de Newton, cuando el motor entregue un par de 32Nm al eje, el soporte recibirá un par de 32Nm en sentido contrario). Para las simulaciones se considerará que el soporte tubular es de un acero S275 y se considerarán los extremos del tubo más próximo al rotor como fijos en el espacio al ser parte del chasis.

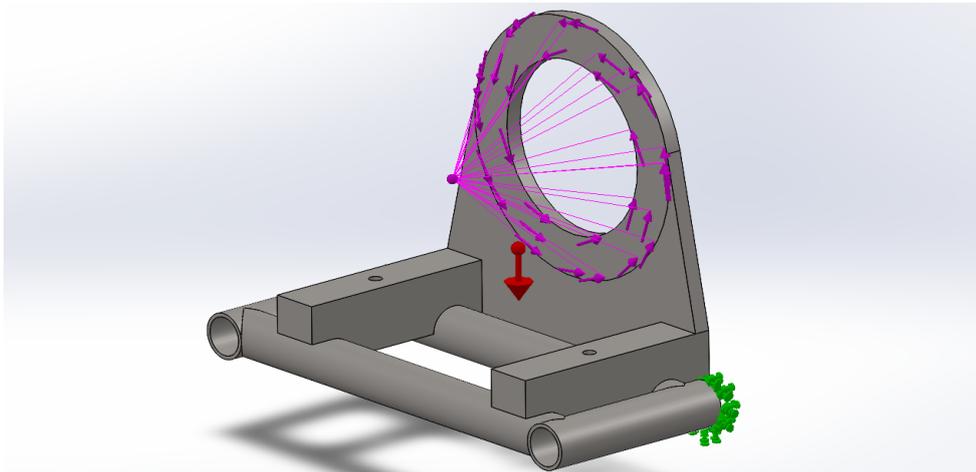
Además, será importante tener en cuenta el peso del peso motor, al ejercer este un esfuerzo sobre el propio soporte y consecutivamente sobre las barras de soporte. Para hallar el centro de gravedad del motor aproximaremos, por su geometría semejante, el motor a un cilindro de diámetro 206mm y profundidad 178mm (*Figura 41*) [23].



*Figura 41. Centro de masas de un cilindro [23]*

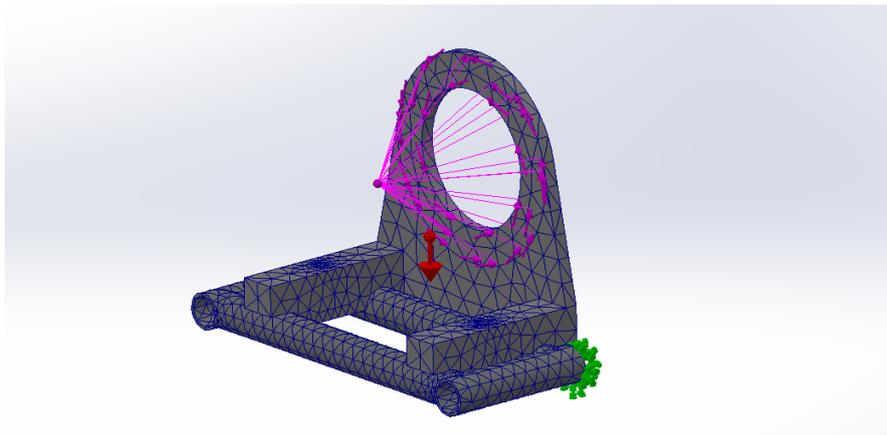
Con ello, ubicamos el centro de gravedad lo que nos permite aplicar en la simulación una carga remota que representará al motor. El motor está en contacto en una región determinada, por lo que al aplicar esta masa remota será preciso determinar la superficie de contacto. Dicha superficie, también sufrirá el efecto del par del motor,

por lo que también lo aplicaremos en las condiciones de contorno de la simulación como vemos en la *Figura 42*.



*Figura 42. Cargas aplicadas sobre modelo simulado*

Ajustamos una malla más fina en los puntos críticos, las intersecciones entre tubos, para realizar un estudio más preciso y veraz (*Figura 43*). Para esto aplicamos un intervalo de separación dentro de las propiedades de la interacción global al 0%.



*Figura 43. Mallado del conjunto simulado*

Expresamos los resultados obtenido en tensión de von Mises [MPa] y desplazamiento relativo (Ures), (*Figura 44* y *Figura 45*).

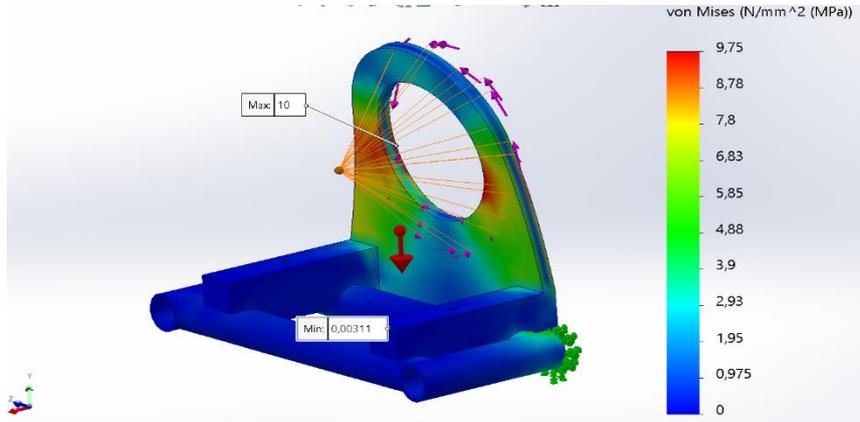


Figura 44. Tensiones de Von Mises en conjunto simulado

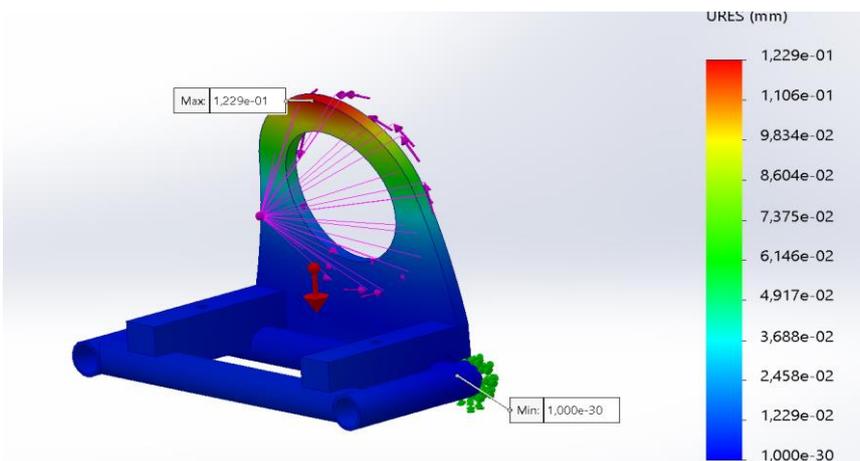


Figura 45. Desplazamiento del conjunto simulado en mm

Como podemos observar, los resultados obtenidos indican un comportamiento muy positivo. El soporte no se desplazará ni en el caso de esfuerzos críticos, por lo que no tendremos problemas de daños estructurales debidos al motor ni a su peso. Las tensiones en el soporte, como era de esperar, se aglomeran en los puntos de fijación, pero estas en ningún punto superan límites elásticos de los posibles materiales de fabricación como Aluminio (Al6063 -  $\sigma_e = 130\text{MPa}$ ) o Acero (S275 -  $\sigma_e = 275\text{MPa}$ ). (Figura 46)

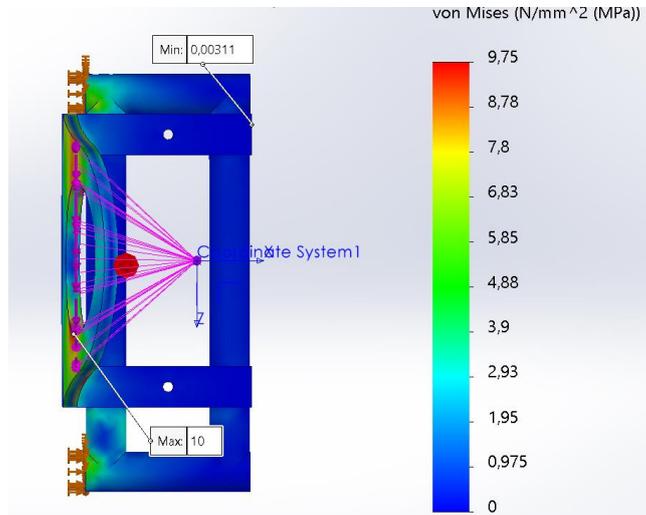


Figura 46. Planta de resultados de tensión de Von Mises

## **4.6 ACOPLA EJE-POLEA DENTADA**

La pieza a diseñar surge por la necesidad de solucionar un problema: la diferencia de diámetros entre el eje trasero y la polea dentada (que actúa como corona) proveniente del kit del motor.

La polea dentada dispone de un diámetro interior de 49.3mm y un chavetero, para asegurar la transmisión del par, con dimensiones 7.5x6 mm (bxh). Cabe destacar que no se trata de un chavetero para chavetas normalizadas. Mientras que, por otro lado, el eje cuenta con un diámetro de 30mm y su respectiva chaveta de 6x6 mm (esta sí está normalizada).

Para solventar esta situación existen algunas posibles soluciones que previamente deben ser estudiadas, entre ellas están:

1. La compra/diseño de una nueva polea dentada que se ajuste al tamaño de nuestro eje.
2. La transformación completa del sistema de transmisión de correa a cadena, cambiando de esta forma la polea dentada por un portacoronas (a diseñar/comprar) + corona (ya en posesión).
3. El diseño/compra de una pieza que funcione como un acople y que se encargue de la transmisión de par entre el eje y la polea dentada.
4. La compra/diseño de un nuevo eje con un diámetro mayor, que se adapte a la polea dentada.

Es evidente que algunas de estas opciones se ven más factibles a priori que otras, por lo que se pretenderá analizará cada una de ellas e ir descartando hasta quedarnos con la indicada.

### 1. Compra/diseño de nueva polea.

Esta opción parece la indicada, pero, una vez estudiada nos damos cuenta de sus numerosos inconvenientes. Por un lado, no existe apenas disponibilidad de esta pieza con sus respectivas dimensiones en el mercado. Las que tienen el mismo diámetro interno no coinciden con el ancho de la chaveta de nuestro eje, y las que sí que tienen un chavetero adecuado, no tienen los 30mm de diámetro interno que deben de tener. Por otro lado, la fabricación de esta pieza puede llegar a ser muy complicada. Cuenta con una geometría irregular y con una anchura superior a los 20 mm, lo que imposibilita el corte por chorro de agua en los laboratorios de ICAI. Además, debe ser de un material con alta resistencia a torsión como el acero, por lo que de nuevo los procesos de fundición de la universidad no nos servirán (altas temperaturas).

### OPCIÓN DESCARTADA

### 2. Transformación sistema de transmisión a cadena.

En esta opción se plantea la compra o diseño de un portacoronas que se ajuste al diámetro de nuestro eje. En este caso, la compra de un portacoronas con diámetro interno de 30mm no es muy complicado, pero si el ajuste a la corona que ya tenemos (*Figura 47*). Es decir, para comprar un portacoronas es recomendable comprar su corona correspondiente para no tener problemas con el encaje. La compra del conjunto entero se vuelve costosa lo que irrumpe a priori con uno de los objetivos principales del proyecto, la minimización de los gastos.

Cotización del kit completo: 34.5 € (Portacoronas de aluminio Ø=30mm) [24] + 62.73 € (Corona+Piñón+Cadena con dimensiones no aseguradas) [25] = **97.23 €**

### ÚLTIMA OPCIÓN



*Figura 47. Portacoronas de aluminio de Mondokart [24]*

### 3. **Diseño/compra acople intermedio.**

Es evidente que la compra de este elemento resulta imposible por tener unas especificaciones geométricas y dimensionales muy precisas. Sin embargo, su diseño y fabricación no parece tarea imposible. De realizar esta pieza, lo único que nos costaría sería las horas de trabajo, el bloque del material y, de ser necesario, el uso de las máquinas de un proveedor externo.

A priori no parece ser muy costoso/difícil por lo que procederemos a realizar sus diseños.

### **BUENA OPCIÓN**

### 4. **Compra de un eje de mayor diámetro.**

Esta opción, al llevarlo a la práctica, conlleva numerosos problemas entre ellos la inutilización de todo el resto de componentes que están incorporados en nuestro eje: 2 rodamientos, portadiscos, bujes y ruedas.

### **OPCIÓN DESCARTADA**

Por lo tanto, procederemos con el diseño y fabricación del *Acople Eje-Polea Dentada*.

#### ***4.6.1 Bocetos, Tolerancias y Planos***

En Anexo Planos y Bocetos

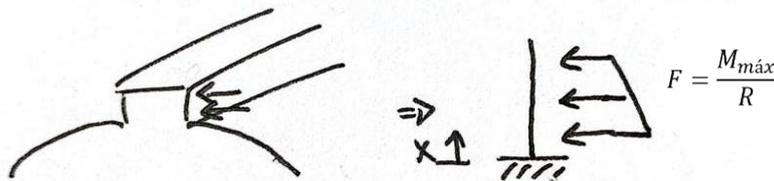
#### ***4.6.2 Elección del material***

El material a escoger será fundamental en el proceso de diseño pues esta pieza soportará grandes esfuerzos de torsión y las chavetas sufrirán esfuerzos de cizalladura. Para realizar una óptima selección de material acudimos a dos métodos distintos: **cálculos teóricos** y **simulación en ANSYS Static Structural**. Se partirá de la hipótesis de que el punto más propenso a rotura en la pieza se produce por el esfuerzo que sufre la chaveta exterior, donde la polea dentada le transmitirá directamente el par. Para determinar la fuerza aplicada sobre esta cara, es preciso indicar que el par máximo que puede transmitir el motor y el comunicado al eje con la relación de transformación. Siendo  $M_{\max\_mot}=32.6467$  Nm en el motor y  $M_{\max\_eje}=151.807$  Nm en el eje con una relación de transformación de  $N=4.65$ .

#### 4.6.2.1 Estudio Teórico

Para escoger el material de la pieza tendremos que analizar el punto de la pieza donde los esfuerzos son máximos. Identificamos dos esfuerzos principales a los que estará sometida la chaveta de nuestra pieza: una tensión normal y una cortante.

Mediante un análisis de resistencia de materiales, observamos que la cara de transmisión de la chaveta presenta un comportamiento similar al de una viga en voladizo (o pilar) bajo una carga distribuida no uniforme, como se representa en la *Figura 48*.



*Figura 48. Representación conceptual*

$$R = \left(\frac{49.3}{2} + x\right) * 10^{-3}m$$

Para evaluar la seguridad de una pieza con esfuerzos combinados acudimos al criterio de von Mises (*Ecuación 22*). El punto de máxima tensión se encuentra en la base de la chaveta, por lo que el análisis se deberá hacer en dicho lugar.

$$\sigma_{adm} \geq \sqrt{3 * \tau^2 + \sigma^2}$$

*Ecuación 22. Tensión admisible según von Mises*

El cálculo de la tensión máxima se deduce a través de la ecuación de Navier (*Ecuación 23*). El diagrama de flectores de la viga semejante (*Figura 49*), nos proporcionará el valor del momento en el punto crítico.

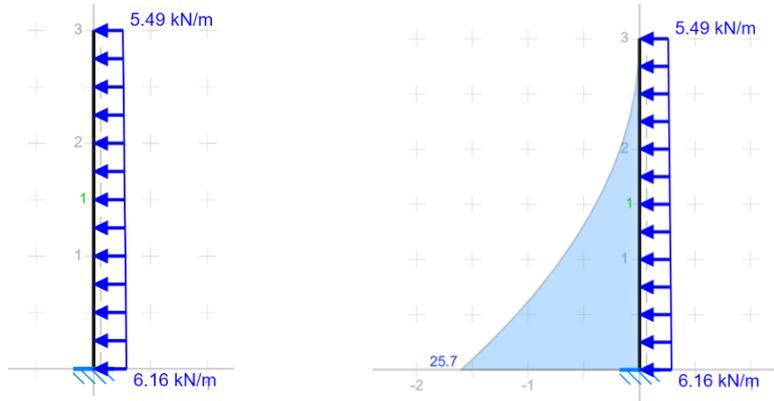


Figura 49. Diagrama de Flectores

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M}{I} * y_{\text{máx}} = \frac{25.7 * 10^3 \text{ Nm}}{\frac{1}{12} * 7.5 * 10^{-3} * (48.15 * 10^{-3})^3} * \frac{48.15}{2} * 10^{-3} \text{ m} = 61.58 \text{ MPa}$$

Ecuación 23. Ecuación de Navier para determinar la tensión máxima

Por otro lado, la tensión cortante se definirá por la fuerza aplicada en la base de la chaveta, entre su área transversal (Figura 50). Será en este lugar donde se produzca el efecto de cizalladura.

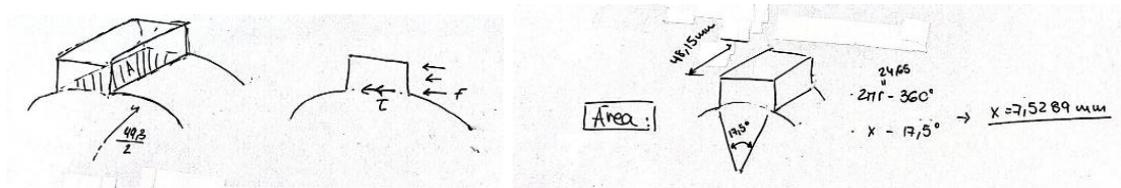


Figura 50. Boceto tensiones cortantes

$$\tau_{\text{Máx}} = \frac{F}{A} = \frac{6158.499 \text{ N}}{(181.26) * 10^{-6} \text{ m}^2} = 33.98 \text{ MPa}$$

$$\left\{ A = 7.5289 * \frac{48.15}{2} = 181.26 \text{ mm}^2 ; F = \frac{M}{R} = \frac{151.807 \text{ Nm}}{\frac{49.3}{2} * 10^{-3} \text{ m}} = 6158.499 \text{ N} \right\}$$

Ecuación 24. Tensión cortante máxima

Por lo tanto, la tensión admisible será:

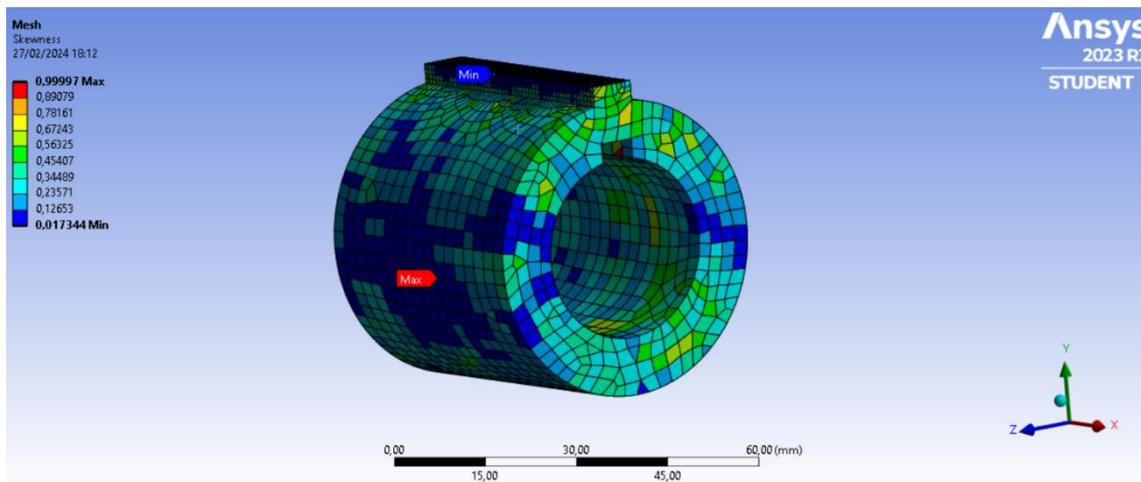
$$\sigma_{adm} \geq \sqrt{3 * \tau^2 + \sigma^2} \rightarrow \sigma_{adm} \geq 61.58 \text{ MPa}$$

*Ecuación 25. Tensión admisible mínimo teórico según el criterio de von Mises*

#### 4.6.2.2 Simulación en ANSYS

Tras importar el diseño CAD en el software, se da comienzo al proceso de mallado. Teniendo en cuenta la hipótesis de punto crítico planteada, en el mallado, se crea un “Face Sizing” sobre esta zona, para analizar los efectos producidos más detalladamente. Se comprueba la calidad del mallado, tras asegurarse de que el parámetro “skewness” es <0.6 en la chaveta exterior (zona a analizar).

Por otro lado, se ha fijado un mallado con un método “Hex Dominant” y elementos “Quad/Tri” = Cuadrados y Triángulos, para facilitar la adaptación del mallado ante la geometría curva como podemos observar en la *Figura 51*. Ante estas adaptaciones, el programa ha indicado que pudo hacer el 30.1% del mallado total como el modelo solicitado.



*Figura 51. Mallado Final*

Además, se ha definido que la superficie interna está como “Fixed Support” para simular el frenado completo, indicando también como “Frictionless Support” a las caras laterales para considerar la fijación axial sin rozamiento (nuestra pieza no se desplazará axialmente).

Seguidamente, se introducen las fuerzas correspondientes con la transmisión. Es importante aclarar que se entiende que es la fuerza normal a la superficie de la chaveta externa la que recibirá directamente el par proveniente de la polea-motor. Mientras que, por otro lado, es una de las caras de la chaveta interna la que recibirá el par proveniente del eje. Por otra parte, se podría tener en cuenta que existe un par torsor sobre la superficie cilíndrica exterior, pero realmente, esta cara deslizaría sobre la cara interna de la polea dentada si la chaveta no existiera.

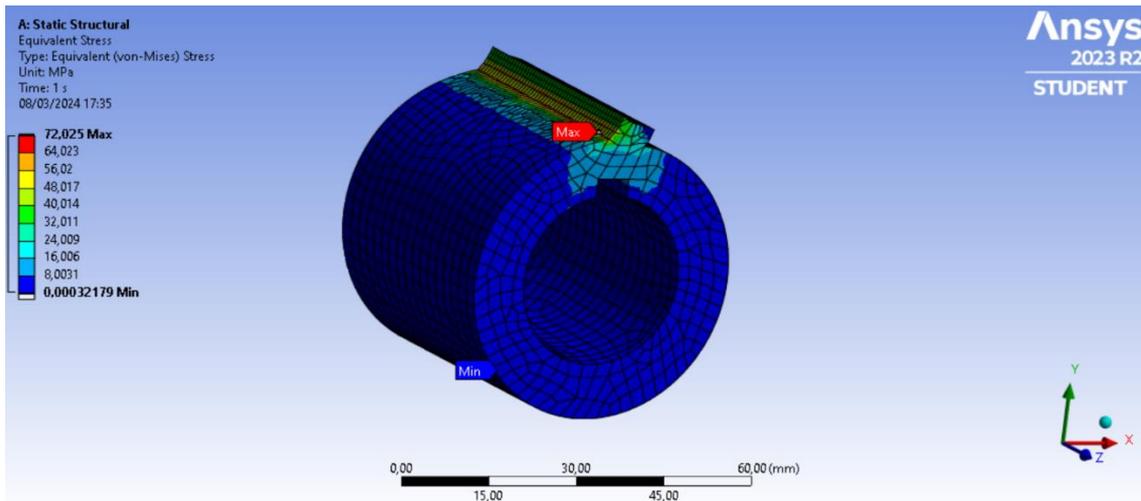
Se estudiará entonces el caso crítico: el motor está entregando el par máximo y se pisa el freno bloqueando el eje. Para ello, se simula una carga uniformemente distribuida en la cara de contacto. Esta carga será impuesta en el programa como una presión de valor definido.

$$P_{chaveta} = \frac{F_{chaveta}}{A_{chaveta}} \rightarrow \left\{ F_{chaveta} = \frac{M_{m\acute{a}x\_eje}}{R_{base\_chaveta}} \right\} \rightarrow \frac{\frac{151.807}{49.3} Nm}{2 * 10^{-3}} \rightarrow \frac{3 * 48.5 * 10^{-3} m^2}{3 * 48.5 * 10^{-3} m^2} \rightarrow P = 42.63412 MPa$$

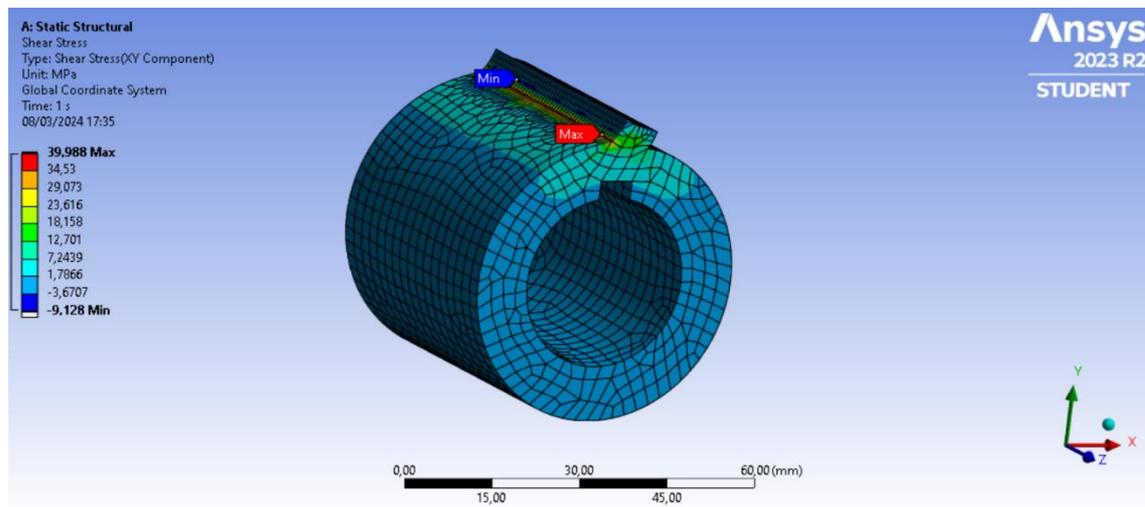
*Ecuación 26. Presión aplicada al modelo en ANSYS*

Otra cosa a considerar es el tiempo de frenado para poder simular con exactitud el comportamiento de la pieza. El par de frenado depende de las condiciones del disco y de las pastillas de freno, así como su capacidad de fricción. Sin embargo, en esta simulación, valdrá con asumir que el freno del vehículo es inmediato, esta hipótesis actuará como un segundo coeficiente de seguridad para nuestra pieza. Además, para realizar la simulación se ha escogido un “acero estructural”, lo que influye en la deformación representada.

Al simular y analizar se obtienen los siguientes resultados. Según la *Figura 52*, la tensión equivalente de Von-Mises alcanza el valor de 72.025 MPa y según la *Figura 53* la tensión cortante alcanza el valor de 39.988 MPa.



*Figura 52. Tensión Equivalente de Von-Mises*



*Figura 53. Tensión de Cizalladura*

Sin embargo, para realizar un correcto diseño y una buena elección del material, se debe encontrar aquel punto (nodo) que tenga la mayor tensión y cortante de toda la pieza.

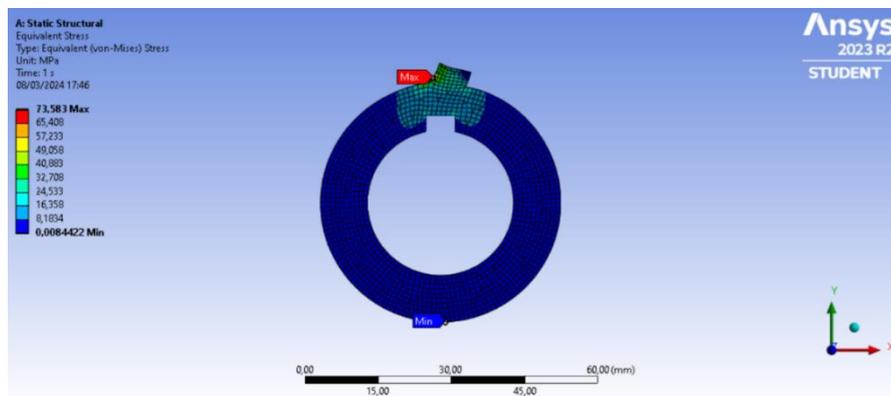
Por lo tanto, la tensión admisible será:

$$\sigma_{adm} \geq \sqrt{3 * \tau^2 + \sigma^2} \rightarrow \sigma_{adm} \geq 82.38 \text{ MPa}$$

*Ecuación 27. Tensión admisible mínima en modelo 3D según von Mises*

### Simulación 2D:

Con un mallado mucho más fino, gracias a la sencillez de la geometría, se obtienen los resultados numéricos de una simulación en 2D que nos ayuda a demostrar la validez del ensayo en 3D, los resultados se representan en la *Figura 54* y en la *Figura 55*.



*Figura 54. Tensión Equivalente de Von-Mises en simulación en 2D*

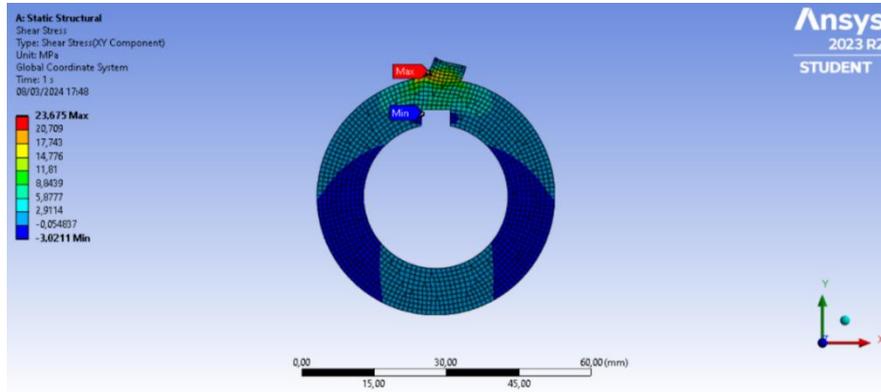


Figura 55. Tensión de cizalladura en simulación en 2D

Comparando el método teórico como el numérico se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 8. Comparación de resultados teóricos y simulados

	Valores Teóricos	Simulación 3D	Simulación 2D
$\sigma$ [MPa]	61.584	72.025	73.583
$\tau$ [MPa]	33.976	39.988	23.675
$\sigma_{adm}$ [MPa]	<b>70.33</b>	<b>82.38</b>	<b>77.3</b>

Un acero convencional tiene como mínimo un límite elástico de 200 MPa, por lo que queda demostrado que cualquier acero nos servirá para la fabricación de esta pieza.

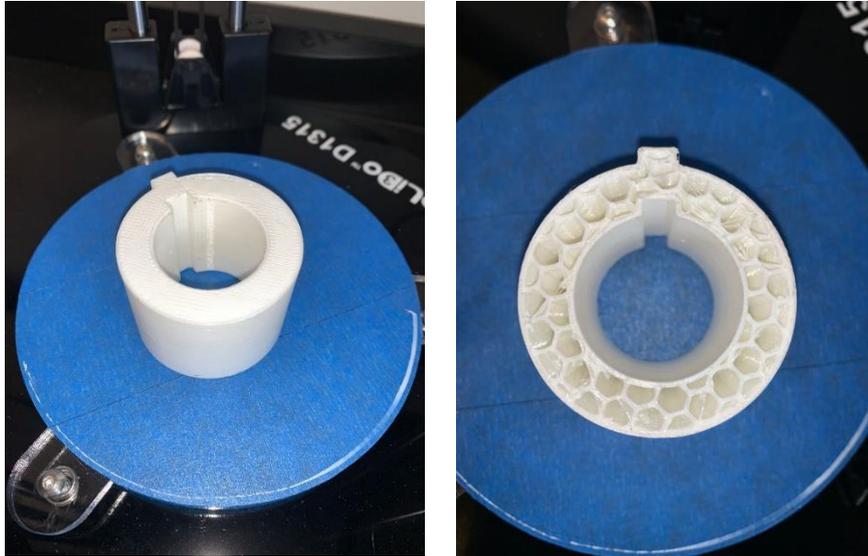
### 4.6.3 *Fabricación*

#### 4.6.3.1 *Prototipo*

Antes de realizar un mecanizado, se realiza un prototipo mediante impresión 3D para estar seguros de que las medidas son correctas. La pieza cuenta con una densidad del 20% en forma de panal de abeja, además, está hecha con filamento PLA blanco de  $\varnothing=1.75\text{mm}$ . Como su función es únicamente la comprobación de medidas y su geometría, la densidad y el material que se use no será relevante. El primer prototipo se observa en la *Figura 56*. Cabe destacar que se está empleando una impresora CoLiDo D1315 3D cuyas características son las siguientes:

*Tabla 9. Características de Impresora 3D*

<b>Impresora CoLiDo D1315 3D</b>	
Diámetro del extrusor	0.4 mm
Temperatura máxima del extrusor	280°C
Temperatura máxima de la cama	120°C
¿Temperatura de la cama regulable?	No
¿Temperatura ambiente regulable?	No
Máxima velocidad por segundo	24 mm <sup>3</sup> /s
Radio máxima de impresión	67 mm
Altura máxima de impresión	151 mm
Slicer	Slic3r
Altura de capa	0.2 mm



*Figura 56. Prototipo impreso en 3D*

Como se observa en la *Figura 57*, debido a un error en la medición inicial o bien en la precisión de la impresora 3D, hay un error grande en las medidas del prototipo.



*Figura 57. Ajuste del prototipo en polea dentada*

Por lo tanto, se identifican las dimensiones erróneas midiendo sobre el prototipo y se ajustan los nuevos planos representados en la *Figura 58* (en amarillo las medidas cambiadas).

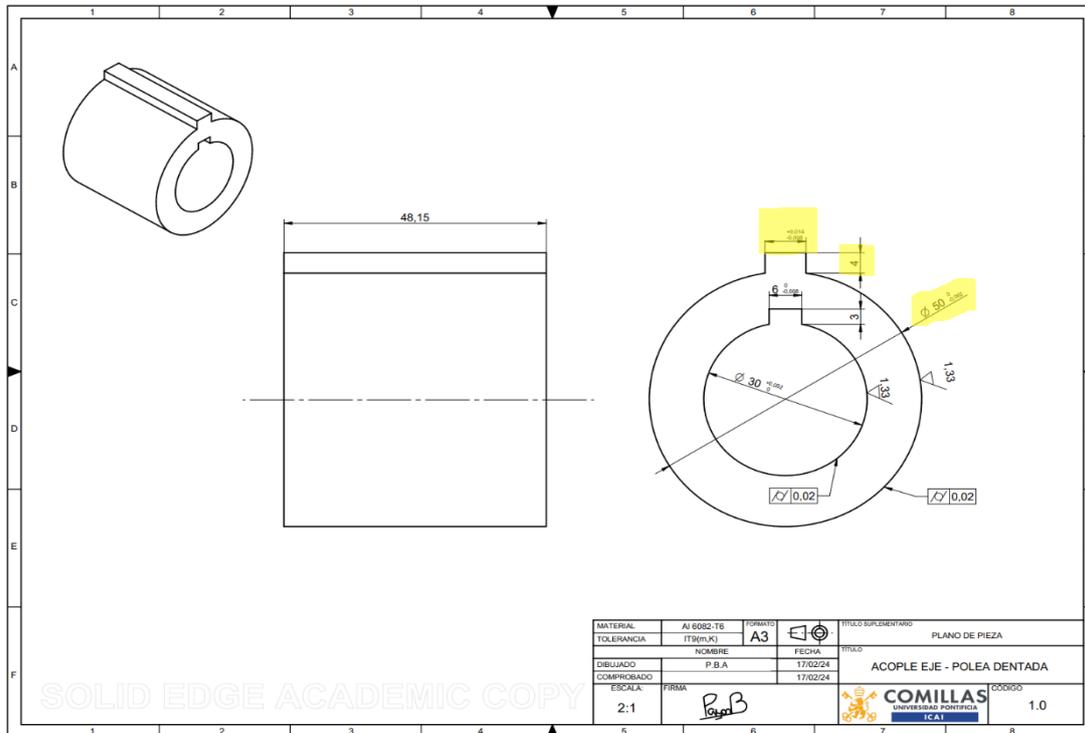


Figura 58. Plano corregido V1

Una vez corregido, se procede a rediseñar el prototipo 3D para garantizar la precisión de las dimensiones esta vez. Dado que no necesitaremos verificar la profundidad de la pieza (48.15mm), se ha optado por reducir significativamente el espesor del prototipo para conservar filamento de impresión. El segundo prototipo, muestra un encaje perfecto con respecto a la directriz exterior, es decir, los cambios realizados han sido exitosos. No obstante, al medir el diámetro de la directriz interior, se observa que, en lugar de los 30 mm esperados, mide 29 mm. Esto puede ser causa directa de la precisión de la impresora, por ello, para comprobar nuestra hipótesis, se realiza un ajuste de prueba en las medidas de nuestra pieza. Se cambiará el diámetro interior a 31mm. Una vez impreso medimos el diámetro interno y se comprueba que mide 30mm, verificando la hipótesis planteada.

A efectos prácticos, esto quiere decir que la versión 1 del plano corregido (*Anexo*) es correcta, y que debemos seguirlo para el proceso de mecanizado.



Figura 59. Prototipos creados con ajuste de dimensiones

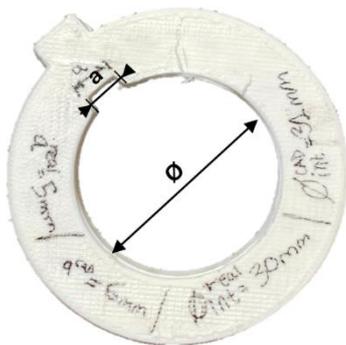


Figura 60. Prototipo #3 para verificación de precisión

Tabla 10. Determinación de error en prototipos

	<b>MEDIDA EN CAD</b>	<b>MEDIDA REAL</b>
$\text{Ø}_{\text{int}}$	31mm	30mm
<b>a</b>	6mm	5mm

#### **4.6.3.2 Mecanizado**

Al plantear la secuencia de mecanizado, así como las máquinas a usar, nos encontramos con la problemática que supone desarrollar una pieza con tal geometría. De nuevo nos encontramos con distintas opciones a escoger una:

1. *El mecanizado de la pieza completa por chorro de agua.*
2. *Adaptación de la geometría de la pieza y su mecanizado por chorro de agua.*
3. *Adaptación de la geometría de la pieza y su mecanizado por torneado y fresado.*

Cada una de estas opciones es factible, pero la diferencia de precio entre ellas será significativa y como reducir los costes generales es uno de los objetivos base del proyecto deberemos realizar un estudio económico sobre cada una de las opciones.

##### **[1] El mecanizado de la pieza completa por chorro de agua.**

Un mecanizado por chorro de agua puede ser una muy buena opción cuando se tienen geometrías complicadas de alcanzar. En esta pieza, la chaveta externa dificulta enormemente el proceso de mecanizado, aumentando el precio de fabricación por lo que esta opción resulta costosa y complicada. Además, aunque el chorro de agua consiga la geometría deseada, no alcanza tolerancias medias que necesitamos.

##### **OPCIÓN DESCARTADA**

##### **[2] Adaptación de la geometría de la pieza y su mecanizado por chorro de agua.**

Una solución ante la problemática planteada en el punto anterior sería deshacerse geoméricamente de la chaveta y plantear un chavetero donde podamos meter una chaveta que transmita el movimiento. Esta solución, parece más razonable que la anterior al eliminar el proceso de reducción de diámetro lo que aumentaba la dificultad de la fabricación, pero cuenta con la misma problemática que se plantea anteriormente: el acabado del chorro de agua no es suficientemente bueno para nuestra pieza.

##### **OPCIÓN DESCARTADA**

### [3] Adaptación de la geometría de la pieza y su mecanizado por torneado y fresado.

Finalmente planteamos la última opción que mezcla conceptos ya planteados en la opción 2. De nuevo, volvemos a implementar la idea de realizar un chavetero donde podamos introducir una chaveta que transmita el movimiento. Además, con esta geometría, sí es posible usar métodos de fabricación como el torneado y el fresado que nos aportan la tolerancia deseada.

### BUENA OPCIÓN

#### Adaptación del diseño:

A continuación, se realiza la adaptación final del diseño de la pieza para proceder con el mecanizado. El plano se observa en la *Figura 61*.

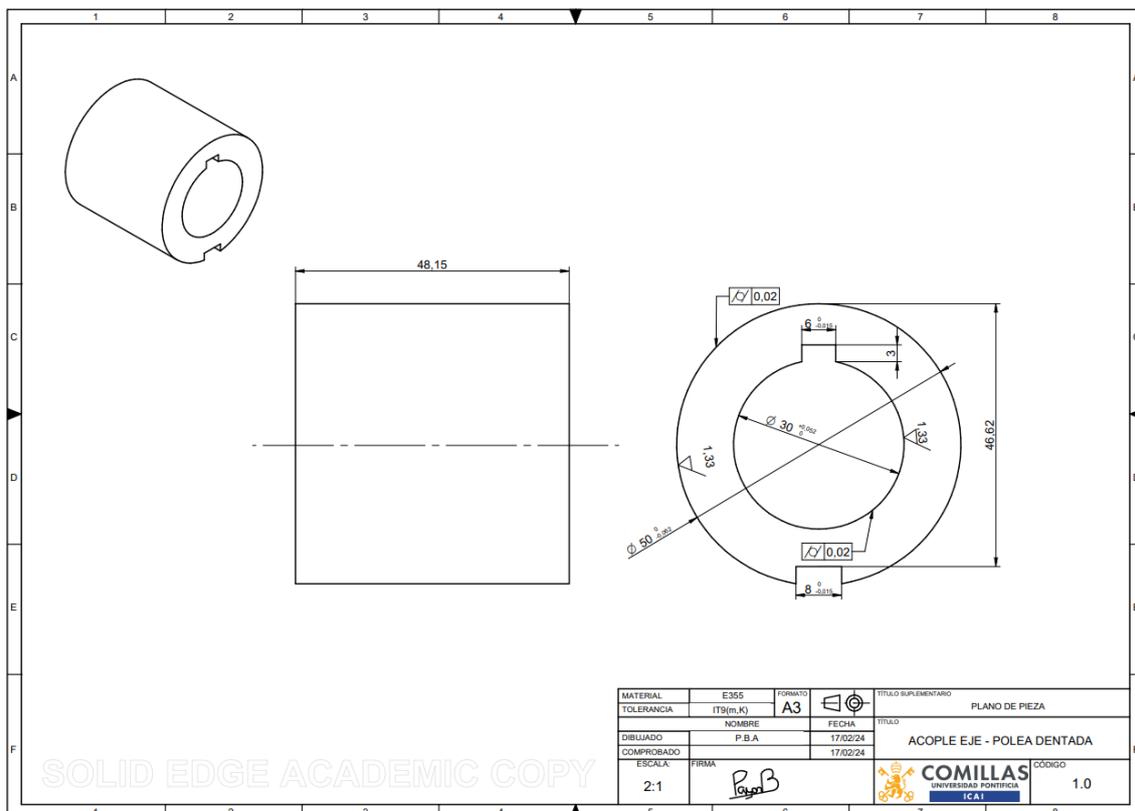


Figura 61. Plano corregido V2

Una vez tenemos los planos definitivos de la pieza a fabricar, acudimos directamente al proceso de fabricación de la pieza. En este caso, gracias al profesorado del laboratorio de fabricación de la universidad y a la empresa TEYDE, obtuvimos la posibilidad de mecanizar la pieza con las tolerancias y el material deseado. El resultado se observa en la *Figura 62*.



*Figura 62. Acople y acople + polea dentada*

Sin embargo, para que la pieza encajase perfectamente con el eje, este debía tener la misma calidad de tolerancias que la pieza. Para ello, tuvimos que realizar un proceso de lijado y ranurado mediante una fresa de mano como se aprecia en la *Figura 63*.



*Figura 63. Chavetero con defectos vs chavetero tras fresado*

Una vez refinada la tolerancia podemos comparar el primer modelo planteado, con la versión final. Esta versión final se compara en la *Figura 64*.



*Figura 64. Comparativa concepto original con resultado final*

## Capítulo 5. Conclusiones

Según lo planeado, este proyecto ha desarrollado el diseño de los componentes eléctricos y mecánicos esenciales para construir un kart eléctrico de alto rendimiento. Como parte de la conclusión, es necesario incluir una comparación de precios entre el modelo creado y el modelo de referencia utilizado en varios puntos del proyecto, el e-kart PlayandDrive EGT1. Como no es un modelo que esté a la venta al público, tras contactar con la empresa logré obtener el precio estimado de uno de sus modelos de segunda mano.

*“El Kart de competición completo, modelo EGT1 con cargador, te lo dejaría a 10.000 € + IVA. Ten en cuenta que para montar cualquier Kart de esa potencia te vas a gastar más en comprar los componentes adecuados...”*: **Gonzalo Parra, cofundador de PlayandDrive.**

El precio de nuestro proyecto se desglosa en:

*Tabla 14. Precio total del proyecto desglosado*

	<b>Precio (€)</b>
<b>Chasis</b>	280
<b>Motor + Controladora</b>	600
<b>Baterías + BMS + Cargador</b>	620
<b>Elementos mecánicos (rodamientos...)</b>	40
<b>Total</b>	<b>1540 €</b>

Sin embargo, además de precios, es preciso comparar también características de funcionamiento para poder juzgar la diferencia de rendimientos.

Tabla 15. Comparación de precios con modelo EGT1

	<b>Kart eléctrico TFG</b>	<b>EGT1 PlayandDrive</b>
<b>Tipo de motor eléctrico</b>	Brushless	Brushless
<b>Potencia Pico</b>	20kW	20kW
<b>Par Máximo</b>	68 Nm	80Nm
<b>Tensión nominal</b>	96 V	96.2 V
<b>Sistema de transmisión</b>	Por correa	Por cadena
<b>Peso total (con 80kg de piloto medio)</b>	170 Kg	189 Kg
<b>Autonomía</b>	2.56 kWh	2.0 kWh
<b>Precio</b>	<b>1540 €</b>	<b>12100€</b>

Como se puede observar, el proyecto ha sido todo un éxito, se ha logrado diseñar un kart eléctrico por casi un décima parte del modelo EGT1, un modelo de la competición de karts eléctricos más influyente en España. Además, se ha logrado demostrar que las piezas diseñadas son seguras. Esto se ha logrado a través de simulaciones en softwares como ANSYS, también se ha estudiado el comportamiento del motor y su autonomía a través de simulaciones detalladas.

## Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Velero Eléctrico. (s.f.). El Motor. Disponible en: <https://velero-electrico.ovh/el-proyecto/el-motor/>
- [2] GrabCAD. (s.f.). Go Kart Front Bumper. Disponible en: <https://grabcad.com/library/go-kart-front-bumper-1>
- [3] Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [4] Biblioteca Binus. (s.f.). Disponible en: <http://library.binus.ac.id/eColls/eThesidoc/Bab2/2013-1-00687-SK%20Bab2001.pdf>
- [5] Samebike. (s.f.). Motores sin Escobillas vs Motores con Escobillas para E-Bikes. Disponible en <https://www.gzsamebike.com/brushless-vs-brushed-motors-for-e-bikes/>
- [6] Lorentz. (s.f.). Motor de CC sin Escobillas (ECDrive). Disponible en <https://www.lorenz.de/es/productos-y-tecnologia/tecnologia/motor-de-cc-sin-escobillas-ecdrive/>
- [7] IJSTR. (2014). Revisión Comparativa de PMSM y BLDCM Basada en el Método de Control de Par Directo. Disponible en <https://www.ijstr.org/final-print/mar2014/Comparative-Review-Of-Pmsm-And-Bldcm-Based-On-Direct-Torque-Control-Method-.pdf>
- [8] ResearchGate. (s.f.). Curvas Características: Eficiencia, Velocidad, Corriente y Potencia de Salida en Función del Tiempo. Disponible en [https://www.researchgate.net/figure/Characteristic-curves-efficiency-speed-current-and-output-power-as-a-function-of\\_fig1\\_327574465](https://www.researchgate.net/figure/Characteristic-curves-efficiency-speed-current-and-output-power-as-a-function-of_fig1_327574465)
- [9] Stack Exchange Electronics. (s.f.). Motor DC y Potencia. Disponible en <https://electronics.stackexchange.com/questions/222373/dc-motor-and-power>

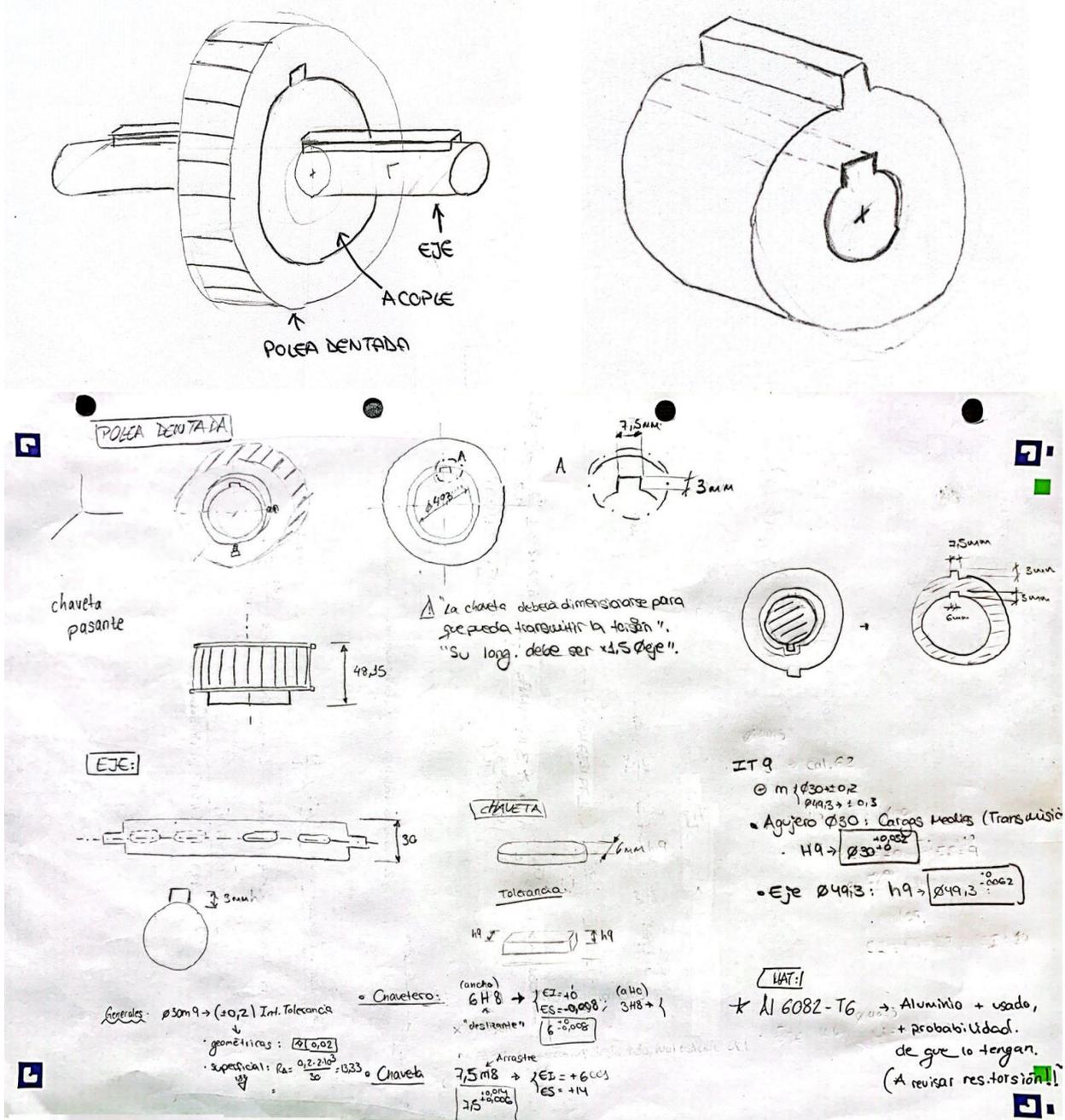
- [10] Golden Motor. (s.f.). Motor BLDC de 48 Voltios y 10kW, Refrigerado por Aire. Disponible en <https://goldenmotor.bike/product/48-volt-10kw-bldc-motor-air-cooled/>
- [11] Golden Motor. (s.f.). Controlador de Motor sin Escobillas Serie Vector 500 de 72 Voltios. Disponible en <https://goldenmotor.bike/product/vector-500-series-72-volt-brushless-motor-controller/>
- [12] Golden Motor. (s.f.). HPM 10kW - Dibujo (Refrigeración por Ventilador). Disponible en [https://www.goldenmotor.com/hubmotors/hubmotor-imgs/HPM%2010KW-Drawing%20\(Fan%20Cooling\).pdf](https://www.goldenmotor.com/hubmotors/hubmotor-imgs/HPM%2010KW-Drawing%20(Fan%20Cooling).pdf)
- [13] Golden Motor. (s.f.). Dibujo VEC500A. Disponible en <https://goldenmotor.bike/wp-content/uploads/2019/12/VEC500A-Drawing.pdf>
- [14] Play and Drive. (s.f.). eKart. Disponible en <https://www.playanddrive.com/es/ekart/>
- [15] Wiki Karting. (s.f.). Karts en Almería: Karting Roquetas. Disponible en <https://wikikarting.com/karts-en-almeria/karting-roquetas/>
- [16] Universidad Nacional de La Plata. (s.f.). Disponible en <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/81/35081/a05b0f92e176924a0a8a841528d0df88.pdf>
- [17] LBIBE Star. (s.f.). Disponible en [https://lbibestar.shop/product\\_details/33325942.html](https://lbibestar.shop/product_details/33325942.html)
- [18] Woodcraft. (s.f.). Batería de Ion-Litio Greenworks 80V 2.5Ah EVE. Disponible en <https://www.woodcraft.com/products/greenworks-80v-2-5ah-eve-lithium-ion-battery>
- [19] eBay. (s.f.). Disponible en <https://www.ebay.com/itm/385603422303>
- [20] Play and Drive. (s.f.). eKart. Disponible en <https://www.playanddrive.com/es/ekart/>
- [21] Golden Motor. (s.f.). Imagen del Motor BLDC de 10kW. Disponible en <https://www.goldenmotor.com/hubmotors/hubmotor-imgs/10kwBLDCmotor%20B.jpg>
- [22] TKart. (s.f.). Todo lo que Necesita Saber sobre el Nuevo Chasis Tony Kart Racer 401RR para las Categorías Shifter. Disponible en

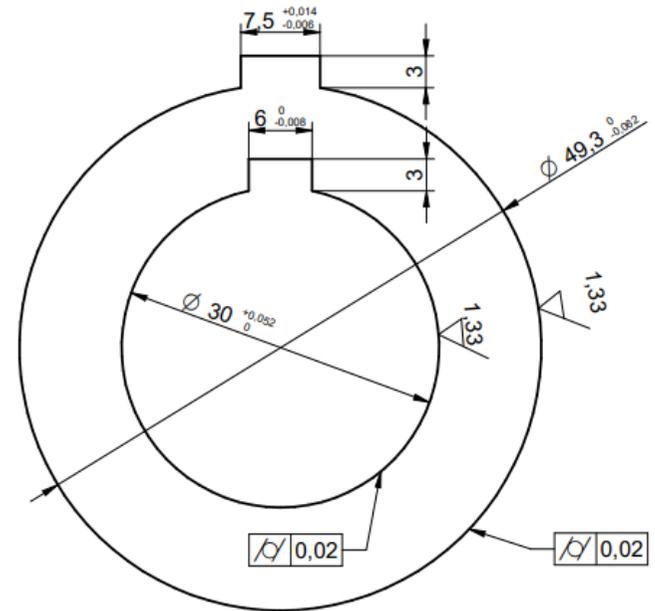
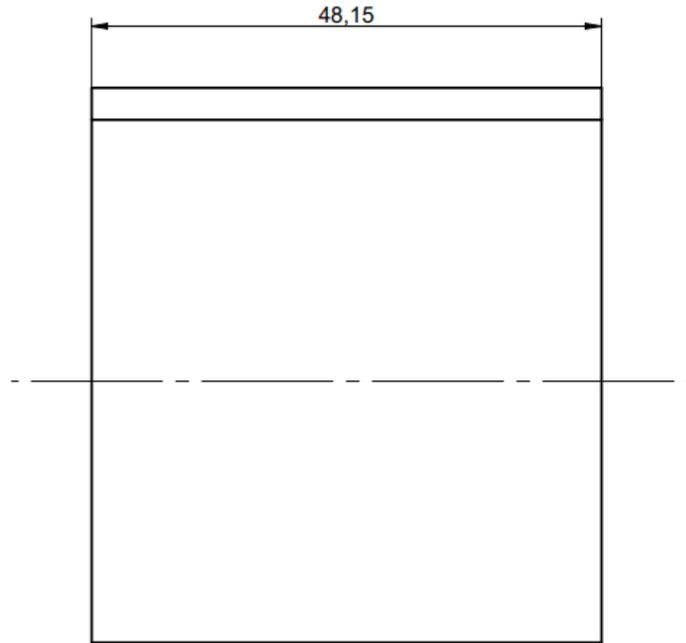
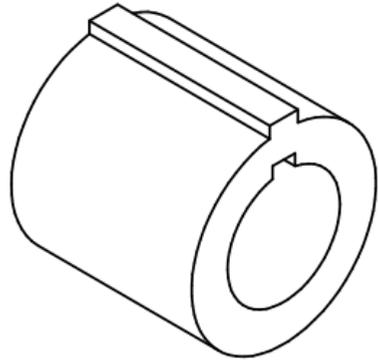
<https://tkart.it/es/magazine/a-examen/todo-lo-que-se-necesita-saber-sobre-el-nuevo-chasis-tony-kart-racer-401rr-para-las-categorias-shifter>

[23] Ejercicios de Física. (s.f.). Centro de Gravedad. Disponible en <https://ejerciciosdefisica.com/centro-de-gravedad/>

[24] Mondo Kart. (s.f.). Portacorona 30mm Aluminio Anodizado. Disponible en <https://www.mondokart.com/es/recambios-chasis-mondokart/portacorona-mondokart/portacorona-30mm-aluminio-anodizado.html>

## Anexo Planos y Bocetos





MATERIAL	Al 6082-T6	FORMATO	A3	TITULO SUPLEMENTARIO	PLANO DE PIEZA
TOLERANCIA	IT9(m,K)			TITULO	ACOPLE EJE - POLEA DENTADA
DIBUJADO	P.B.A	FECHA	17/02/24		
COMPROBADO		FECHA	17/02/24		
ESCALA:	FIRMA				CODIGO
2:1	<i>P.B.A</i>				1.0

SOLID EDGE ACADEMIC COPY