



Universidad de
los Andes

Análisis, simulación e implementación de
mejora del rendimiento para un kart
eléctrico

Proyecto de grado

David Gustavo Clavijo Pelayo

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Profesor asesor

Andrés Leonardo González Mancera, PhD, MSc

Bogotá D.C. Colombia

Mayo 2017

Tabla de contenidos

I.	Resumen	9
	Resumen	9
	Project's outline.....	9
II.	Introducción	11
	Kartismo.....	11
	Vehículos comerciales de energías alternativas.....	15
	Motorización eléctrica en el automovilismo actual	19
III.	Objetivos.....	25
	Objetivo General.....	25
	Objetivos Específicos	25
IV.	Marco teórico	27
	Especificaciones y categorías de karts.....	27
	Modelos físicos y matemáticos	29
	Relaciones de transmisión y cajas de cambios.....	37
V.	Trabajo previo.....	45
	Trabajo en la Universidad de los Andes	45
VI.	Posibilidades de mejora.....	51
	Cambio en la distribución del peso	51
	Mantenimiento.....	54
VII.	Simulaciones.....	59
	Parametrización del circuito.....	59
	Parametrización de trayectoria	60
	Parámetros del vehículo	63

Modelo por el Software Matlab ©	64
Modelo por el software OptimumLap ©.....	74
VIII. Soluciones implementadas.....	79
Cambio en la distribución del peso	79
Relación de transmisión	80
IX. Pruebas	85
X. Análisis de resultados	89
XI. Conclusiones.....	95
XII. Trabajo Futuro	97
Problemas a resolver.....	97
Investigación para simulación	97
XIII. Bibliografía.....	99
XIV. Anexos	103
Anexo 1: Performance	103
Anexo 2: Velocidad en curva	106
Anexo 3: Tracción	106
Anexo 4: Potencia	106
Anexo 5: Tracción máxima	106
Anexo 6: Drag	107
Anexo 7: Rodadura	107

Tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas básicas del GM EV1.....	18
Tabla 2: Especificaciones técnicas del Spark SRT_01E, auto base de la Fórmula E	23
Tabla 3: Características generales relevantes de un kart de competencia avalado por la CIK-FIA	28
Tabla 4: Características generales del motor	46
Tabla 5: Características generales de las baterías.....	46
Tabla 6: Relaciones de transmisión disponibles en el kart eléctrico.....	47
Tabla 7: Cálculo actual del CG longitudinal del kart.....	51
Tabla 8: Cálculo del CG después de las modificaciones propuestas	52
Tabla 9: Parametrización por segmentos del kartódromo de Tocancipá	62
Tabla 10: Parámetros utilizados en las simulaciones	63
Tabla 11: Comparación de las posibles soluciones para la transmisión de potencia	81

Ilustraciones

Ilustración 1: Primer kart construido por Art Ingels y Lou Borelli.....	11
Ilustración 2: Primer evento de resistencia para karts en 1959	12
Ilustración 3: Primera competencia bajo el reglamento de la CIK – 1962	13
Ilustración 4: Póster del campeonato mundial de karts celebrado en Parma - Italia en 1977	14
Ilustración 5: 1909 "White Touring car" Auto a vapor exhibido en el Petersen Automotive Museum, California	15
Ilustración 6: Auto eléctrico de Thomas Parker, 1895	15
Ilustración 7: GM EV1 en carretera	17
Ilustración 8: Plano técnico del GM EV1	18
Ilustración 9: Tren de potencia completo del Renault R.S.14, auto de fórmula 1:.....	20
Ilustración 10: Vista explosionada del tren de potencia completo del Renault R.S.14, auto de fórmula 1:	20

Ilustración 11: Audi R18, Porsche 919 Hybrid, Toyota Gazoo TS050. Autos híbridos LMP1 del WEC.....	22
Ilustración 12: Autos de Fórmula E en carrera: Vehículo del equipo Jaguar-Panasonic, equipo Venturi, y equipo Audi ABT Sport.....	23
Ilustración 13: Valida final del campeonato 2016 en Macau. 11 de Diciembre de 2016	28
Ilustración 14: Efecto del torque producido en el eje trasero de un vehículo normal	31
Ilustración 15: Vista frontal del eje, con diagrama de cuerpo libre en curva	32
Ilustración 16: Subviraje y sobreviraje	34
Ilustración 17: Diagrama de cuerpo libre en una curva a la izquierda.....	35
Ilustración 18: Relación entre la velocidad de curva y el ángulo de giro	36
Ilustración 19: Transmisión de una relación fija.....	39
Ilustración 20: Transmisión S-Tronic de Audi con 7 velocidades	40
Ilustración 21: Vista isométrica de una transmisión CVT convencional.....	41
Ilustración 22: Configuración de un CVT para bajas velocidades.....	42
Ilustración 23: Configuración de una CVT para altas velocidades.....	43
Ilustración 24: Motor ME1117 que actualmente utiliza el kart eléctrico	46
Ilustración 25: Batería de cuatro celdas que utiliza el kart	47
Ilustración 26: Central de control de baterías BMS instalada en el kart.....	47
Ilustración 27: Sistema de transmisión actual en el kart eléctrico	48
Ilustración 28: Distribución general del kart eléctrico	48
Ilustración 29: Velocidad del kart en varias vueltas al kartódromo de Tocancipá	49
Ilustración 30: Tiempos de vuelta en las pruebas	49
Ilustración 31: Lugar del chasis en donde se ubicará el soporte de baterías.....	53
Ilustración 32: Visualización del soporte montado al chasis.....	53
Ilustración 33: Estado del cableado general.....	55
Ilustración 34: Soporte actual de controlador del motor	56
Ilustración 35: Estado actual del soporte de la batería delantera	56
Ilustración 36: Estado actual de las borneras.....	57
Ilustración 37: Plano del kartódromo Juan Pablo Montoya.....	59

Ilustración 38:Parametrización del kartódromo Juan Pablo Montoya	59
Ilustración 39: Resultado de la parametrización en OptimumLab.....	60
Ilustración 40: Datos del circuito según OptimumLap	60
Ilustración 41: Trazada ideal del kartódromo de Tocancipá	61
Ilustración 42: Parametrización del kartódromo de Tocancipá	61
Ilustración 43: Curva de potencia del motor	64
Ilustración 44: Velocidad simulada del kart en una vuelta	68
Ilustración 45: Velocidad del vehículo en el circuito con diferentes relaciones de transmisión	69
Ilustración 46: Tiempo de vuelta estimado al variar la relación de transmisión	70
Ilustración 47: Tiempo de vuelta estimado al variar la velocidad máxima teóricamente alcanzable por el kart	71
Ilustración 48: Velocidad máxima teórica alcanzable al variar la relación de transmisión .	71
Ilustración 49: Tiempos de vuelta para diferentes relaciones de transmisión base para la caja CVT	72
Ilustración 50: Tiempo de vuelta estimado dependiendo de la velocidad máxima teóricamente alcanzable	73
Ilustración 51: Velocidad en una vuelta con la caja CVT	73
Ilustración 52: Datos suministrados al programa.....	74
Ilustración 53: Torque y potencia.....	74
Ilustración 54: Fuerza tractiva en las llantas del eje trasero	75
Ilustración 55: Modelo de tracción	75
Ilustración 56: Ficha técnica del vehículo.....	76
Ilustración 57: Datos de rendimiento del vehículo	76
Ilustración 58: Velocidad del vehículo en una vuelta (comparación)	77
Ilustración 59: Configuración de baterías antigua	79
Ilustración 60: Configuración nueva de baterías.....	80
Ilustración 61: Nuevo juego de piñones y cadena	82
Ilustración 62: Velocidad en una vuelta con la nueva relación de transmisión.....	82

Ilustración 63: Potencia suministrada por el motor en una vuelta con la nueva relación de transmisión	83
Ilustración 64: Torque suministrado por el motor en una vuelta con la nueva relación de transmisión	83
Ilustración 65: Drag aerodinámica en una vuelta con la nueva relación de transmisión	84
Ilustración 66: Fuerza de rodadura en una vuelta con la nueva relación de transmisión	84
Ilustración 67: Vehículo completamente terminado y listo para ser probado	85
Ilustración 68: Información GPS del kartódromo de Tocancipá	86
Ilustración 69: Vueltas iniciales de las pruebas.....	86
Ilustración 70: Vueltas posteriores de las pruebas	87
Ilustración 71: Diferencia entre el modo normal de operación (naranja) y el modo de protección (morado).....	90
Ilustración 72: Comparación entre las vueltas más rápidas de la configuración anterior (negro) y la configuración actual (naranja)	91
Ilustración 73: Segunda vuelta de la sesión (azul) y mejor vuelta de la configuración anterior (negro)	92
Ilustración 74: Última vuelta en la que el vehículo estuvo en modo normal (rojo) y mejor vuelta de la sesión anterior (negro)	93

I. Resumen

Resumen

Este proyecto de grado está principalmente enfocado en el mejoramiento del rendimiento de un kart eléctrico desarrollado por estudiantes y profesores de la Universidad de los Andes en años anteriores. El proyecto hace parte del grupo FSAE de la universidad (Fórmula SAE), cuyo objetivo es crear espacios para el diseño, simulación y construcción de vehículos propulsados por energías alternativas. Basándose en la teoría física y matemática de los fenómenos que gobiernan la dinámica de un vehículo, este proyecto pretende estudiar la manera en la que el desempeño del vehículo es afectado por diversos factores y parámetros. Una vez obtenidos los modelos adecuados, se espera poder realizar simulaciones computacionales con diferentes herramientas que permitan evaluar la viabilidad y utilidad de propuestas para mejorar el rendimiento. Con los resultados de las simulaciones, se pretende escoger una solución concisa, evaluar las implicaciones, costos y procedimientos necesarios para su implementación, y acoplarla al kart. Por último, el proyecto probará los cambios en el desempeño del vehículo producto de la solución seleccionada, y analizará los resultados comparándolos con las predicciones hechas por las simulaciones y los objetivos propuestos.

Project's outline

This undergraduate degree project is mainly aimed to improve the performance of an electric kart developed by students and teachers of Universidad de los Andes in the recent past. This project is part of the FSAE group of the university (Formula SAE). This groups' objective is to create opportunities for the design, simulation and construction of diverse types of vehicles driven by alternative energies. Based on physic and mathematic theory of the phenomena governing the dynamic response of the vehicle, this project aims to study the way in which the performance of the vehicle is affected by various factors and parameters. Once the adequate models are obtained, computational simulations will be created by using different tools, in order to evaluate the viability and utility of previously proposed solutions. With the simulations' results, it is expected to choose a specific

solution, evaluate its implications, costs and necessary procedures for its implementation. Finally, the project will test the changes in performance caused by the implementation of the chosen solution, in order to analyze and compare them against the result of simulations and the proposed objectives.

II. Introducción

Kartismo

La denominación de “Kart”, y los vehículos correspondientes a sus características, son elementos relativamente modernos en la historia del deporte motor mundial. El primer vehículo denominado como tal fue creado en el año 1951 en California - Estados Unidos, construido a partir de materiales sobrantes de una cortadora de césped, un avión y un sistema de calefacción [1]. Art Ingels y Lou Borelli fueron quienes crearon el vehículo, el cual tuvo un revuelo general del público casualmente presente. [2]



Ilustración 1: Primer kart construido por Art Ingels y Lou Borelli

Aunque la velocidad alcanzada por este vehículo fue de aproximadamente $50 \frac{km}{h}$, hubo un gran interés de las personas localmente por el vehículo. Fue tanto el éxito que, al año siguiente, Livingstone, Desbrow y Bill Rowles crearon “The GoKart Manufacturing Company”, la cual fue la primera empresa de producción de karts. Gracias a esta iniciativa, se empezaron a celebrar carreras y eventos locales, en donde la afición por los karts fue creciendo a pasos agigantados. Fue tanta la acogida que en Julio de 1959 se celebró un evento de resistencia, en donde los go karts producidos por la compañía corrieron durante 7 días y noches seguidas, con cambios de pilotos. Este evento fue una verdadera catapulta para la importancia internacional de este tipo de vehículos, pues atrajo la atención del mundo entero. [2]



Ilustración 2: Primer evento de resistencia para karts en 1959

Al año siguiente, 1960, el éxito que los karts habían experimentado en Estados Unidos se esparció a otros lugares. Carreras comenzaron a realizarse en Europa, específicamente en Monza (Italia), Alemania, Dinamarca, Bélgica, España, Luxemburgo y Polonia. En los años venideros, muchos de los demás países europeos comenzaron a formar organización, asociaciones y clubes encargados de controlar y propiciar los eventos automovilísticos de karts, llegando así a un gran número de eventos de este tipo alrededor del mundo. Suramérica no fue la excepción: En la ciudad de San José, Uruguay, se celebró la primera carrera de karts en el año 1961, siendo esta la primera incursión de este tipo de vehículos en nuestro continente. Sin embargo, fue en el año 1962 en el cual el kartismo realmente dio el paso más significativo en su historia. La FIA, o federación internacional del automóvil (por sus siglas en italiano), al ver la gran cantidad de actividad que se desarrollaba al rededor del mundo en los karts, decidió crear la CIK, o la Comisión de Karting Internacional. Esta entidad fue creada con el fin de estandarizar los criterios que rigen a las competencias de karts, para poder tener reglas, parámetros y definiciones claras y concisas, que permitan tener competencias y eventos justos, emocionantes y seguros. [2]



Ilustración 3: Primera competencia bajo el reglamento de la CIK – 1962

Desde este punto en adelante, la CIK organizó muchos campeonatos y validas tanto regionales y nacionales como internacionales. El campeonato europeo de Karting, que se mantienen en vigencia hasta la actualidad, fue el primer campeonato internacional de este tipo de vehículos y fue inaugurado en el mismo año de 1962. Dos años después, en 1964, se inauguró el campeonato mundial de Karting, válida que sigue siendo la competencia cúspide para los pilotos de Karts. Inicialmente, fueron los pilotos italianos los que dominaron las competencias, pero a medida que el tiempo fue pasando, pilotos de muchas más nacionalidades (especialmente europeas) fueron entrando a la élite del gremio kartista. La década del 70 representó un gran crecimiento en el prestigio y calidad del kartismo. Las carreras se trasladaron a circuitos de élite (Monza, Ímola, Silverstone, Mónaco, etc), y pilotos que regularmente corrían el campeonato mundial de Fórmula 1 comenzaron a correr estas válidas, incluyendo nombres como Ricardo Patresse, Eddie Cheever, y el más que famosos Ayrton Senna. El resultado fue que el kartismo pasó a ser una actividad automovilística de élite, en la que pilotos, autos y circuitos de primer nivel se medían entre sí. [2]



Ilustración 4: Póster del campeonato mundial de karts celebrado en Parma - Italia en 1977

En el pasado más reciente, la participación de pilotos de gran renombre ha seguido siendo una tendencia fuerte en el campeonato mundial. Este certamen ha servido tanto para catapultar pilotos a competencias más grandes, como para reunir a las grandes estrellas del automovilismo mundial en un evento diferente. Grandes nombres como Jarno Trulli, Giancarlo Fisichella, Jenson Button, Dan Wheldon, Michael Schumacher, Kimi Räikkönen, y Fernando Alonso fueron participantes y campeones del campeonato mundial de karts, lo que demuestra que este certamen tiene un nivel de calidad y competitividad realmente alto, en el mismo contexto que el de categorías como la Fórmula 1, Indycar o el WEC (World Endurance Championship). [2]

Toda esta contextualización histórica del kartismo permite evidenciar realmente la importancia que tienen los vehículos tipo kart en el mundo del automovilismo deportivo. Aunque los vehículos son monoplazas pequeños con motores relativamente poco poderosos, sus características de simplicidad y bajo peso permiten que las competencias dependan de la habilidad del piloto y del balance fino de los componentes, convirtiéndolo en un lugar común de encuentro para los pilotos y escuderías importantes. Así, desarrollar un kart y trabajar en el mejoramiento de su desempeño es una tarea que permite a estudiantes con poca experiencia, como los de pregrado, trabajar en un campo que tiene un altísimo desarrollo a nivel mundial, y que ofrece una competitividad muy alta.

Vehículos comerciales de energías alternativas

El término de “energías alternativas” suele ser visto como un parámetro perteneciente a la época contemporánea de la humanidad. Sin embargo, en el campo del transporte (y también específicamente en el automotriz), las energías no dependientes de combustibles fósiles han estado presentes desde los mismos inicios de la producción de vehículos comerciales. A diferencia de lo que generalmente se piensa, los automóviles con motores de combustión interna no han sido siempre la mayoría. De hecho, justo al comienzo de la era de producción masiva de automóviles (comienzos del siglo 20), los motores de combustión interna eran una minoría. Un estudio hecho en Estados Unidos concluyó que, en el año 1900, 40% de los automóviles eran propulsados con motores de vapor, 38% eran eléctricos, y tan sólo 22% tenían motores de combustión interna a gasolina o derivados del petróleo [3].



Ilustración 5: 1909 "White Touring car" Auto a vapor exhibido en el Petersen Automotive Museum, California



Ilustración 6: Auto eléctrico de Thomas Parker, 1895

Sin embargo, varias condiciones hicieron que estos porcentajes empezaran a variar de manera significativa. En primer lugar, a medida que la tecnología de los automóviles fue avanzando y evolucionando, los motores de combustión interna pudieron empezar a tener mejoras significativas, dado el nivel de complejidad de este tipo de propulsores. Por el contrario, las baterías no pudieron seguir el ritmo, ya que lo realmente crucial en el desarrollo de innovación en este campo depende directamente de nuevos materiales; tecnología que todavía se encontraba muy poco trabajada por la época. Así mismo, los motores propulsados por vapor eran demasiado pesados, y su desarrollo también se quedó corto al lado del desarrollo de los motores a gasolina. El resultado de esta diferencia de régimen de evolución fue que para el año 1915 (5 años después de la introducción del Ford modelo T al mercado) tan sólo 2% de los vehículos matriculados en los Estados Unidos tenían propulsión eléctrica, dejando la gran mayoría del mercado a los autos de motores que trabajan con combustibles fósiles [3]. Principalmente, la gran diferencia entre las prestaciones, autonomía y rendimiento de los tipos de motores fue la que determinó el éxito de uno y el declive y desaparición de los otros. Esto, sumado a la fácil accesibilidad de la gasolina, incluyendo un decrecimiento significativo de su precio, generó que los motores de combustión interna se posicionaran en el tope del mercado [4].

También, en el comienzo del auge de los vehículos automotores, hubo razones sociales que favorecieron a los motores de combustión interna. El ruido, la vibración, y en sí el poder que demostraban los motores de combustión interna eran características que, aunque podían llegar a ser molestas y poco eficientes, gustaban muchísimo al público en general. En una sociedad tan machista como la de Estados Unidos a comienzos del siglo 20, la virilidad que demostraba este tipo de motores fue un aspecto clave para que los hombres (principales propietarios de vehículos de la época) se inclinaran mucho más por el diseño, construcción y compra de este tipo de vehículos, por encima de los vehículos eléctricos o de vapor [3].

En la primera mitad del siglo 20, prácticamente no hubo ningún tipo de intento significativo por la producción en masa de autos propulsados por otro tipo de energías. Sin embargo, después de la mitad del siglo, varias empresas grandes que son bandera de la industria han

intentado desarrollar proyectos para comercializar vehículos que no dependan de derivados del petróleo para funcionar. Empresas como Ford, Renault, Citroën, Peugeot y Fiat lanzaron proyectos a través de los años, mayoritariamente eléctricos, para intentar pavimentar el camino hacia automóviles más eficientes y no dependientes del petróleo. Con los estudios y descubrimientos sobre el calentamiento global, el efecto invernadero, el deshielo de los polos y demás, la búsqueda por la disminución del uso de motores de combustión interna fue creciendo paulatinamente a medida que el tiempo pasaba [4]. Uno de los grandes ejemplos de proyectos eléctricos fue el GM EV1. Este automóvil, desarrollado por General Motors en la década de los años 90, fue toda una revolución en el mercado americano de vehículos. No sólo era el primer proyecto realmente grande de un vehículo eléctrico, incluyendo una fábrica enteramente dedicada a la producción del modelo; también era la primera vez que un automóvil sin un motor de combustión interna era capaz de igualar las prestaciones y desempeño de los automóviles regulares [5].



Ilustración 7: GM EV1 en carretera

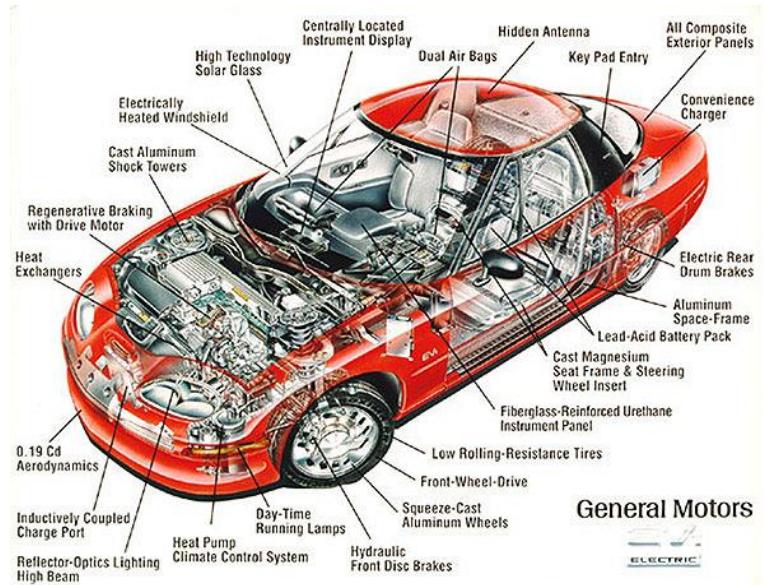


Ilustración 8: Plano técnico del GM EV1

Después de algunas actualizaciones, el EV1 fue capaz de desarrollar unas prestaciones impresionantes [6]:

Autonomía	160 millas
Vida útil	200,000 millas
Potencia	102 kW (137 HP)
Torque	150 Nm (Continuo desde 0 a 7000 RPM)
Aceleración 0-60 m/h (0-100 km/h)	< 9 segundos
Velocidad máxima	80 m/h (130 km/h) regulada
Coeficiente aerodinámico	0,19 (25% menor a los autos regulares)

Tabla 1: Especificaciones técnicas básicas del GM EV1

Lastimosamente, cuestiones económicas y políticas dentro de los Estados Unidos no permitieron que el proyecto fuera exitoso. Aunque el modelo contaba con todas las especificaciones y ventajas de un auto eléctrico eficaz y eficiente, sus implicaciones económicas afectaban directamente a empresas petroleras muy grandes que tenían (y tienen) alto nivel de control de las decisiones en ese país. Primordialmente por esta razón, numerosos trabas y contratiempos fueron impuestos al desarrollo normal del proyecto, por lo que la divisional de GM que lo impulsaba tuvo que decidir dar término al mismo en el año

1999 [5]. Aunque fue un fracaso comercial, el GM EV1 es la prueba de que la tecnología y los recursos necesarios para impulsar proyectos de vehículos completamente eléctricos ya existe, y está completamente disponible para ser utilizada y explotada.

Motorización eléctrica en el automovilismo actual

Históricamente, los motores de combustión interna han sido los grandes acaparadores del automovilismo competitivo. Desde los inicios, y pasando por todo el espectro de las categorías posibles, los automóviles de carreras han contado casi en su totalidad con motores de combustión interna. Esto responde a dos axiomas principales. El rendimiento y la “emoción” del ruido. Los autos de gran rendimiento, independientemente de la categoría, siempre han buscado tener grandes niveles de potencia y desempeño, y hasta el futuro reciente, esto ha sido sinónimo de grandes motores a gasolina. Sin embargo, en la última década se ha venido dando un cambio en la filosofía de los autos de competencia, pues grandes categorías han venido permitiendo y acogiendo a las energías alternativas en sus plantas de poder, especialmente a la motorización eléctrica. A continuación, se verán tres de los ejemplos más significativos.

Desde el año 2014, la FIA cambió la regulación general de la planta de poder para los vehículos de Fórmula 1, restringiéndolos en varios aspectos:

- Motores V6 de 1.6 Litros Turbo o Súper cargados
- 15000 RPM como tome máximo de velocidad angular
- Máximo caudal de combustible de 100 kg/hora
- Dos válvulas de admisión y dos de desalojo por cada pistón

Estas restricciones hicieron que, a pesar de tener los más avanzados recursos en el campo, los motoristas de la categoría (Ferrari, Mercedes, Renault y Honda) pudieran alcanzar niveles de potencia entre los 600 y 700 HP, lo cual es insuficiente para lo que se espera del rendimiento de estos monoplazas. En respuesta, la fia habilitó el uso de un sistema eléctrico denominado ERS, con el cual, por medio de sistemas de recuperación de energía, se pueden agregar unos 160 HP extra [7].



Ilustración 9: Tren de potencia completo del Renault R.S.14, auto de fórmula 1:



Ilustración 10: Vista explosionada del tren de potencia completo del Renault R.S.14, auto de fórmula 1:

En las ilustraciones anteriores [8] se puede apreciar la distribución de los diferentes componentes del tren de potencia híbrido de los autos de Fórmula 1 actuales. En cuanto al ámbito eléctrico destacan tres componentes principales: El MGU-K, el MGU-H, y la batería. A continuación, se explicarán los componentes con datos oficiales de la Fórmula 1 [7], y datos técnicos del motor Renault R.S.17 [9].

- MGU-K

Este es el componente principal del sistema eléctrico, pues tiene comunicación física directa con las partes móviles del motor, más específicamente, el cigüeñal. El MGU-K es en realidad un motor/generador eléctrico que tiene dos funciones. Primero, puede recolectar energía cinética del vehículo en los momentos de frenar (máximo 2 MJ por vuelta), y segundo, puede entregar energía directamente al cigüeñal cuando el vehículo esté acelerando (máximo 4 MJ por vuelta). Este elemento puede girar a una velocidad angular de 50,000 rpm, y puede almacenar un máximo de 120 kW en su operación.

- MGU-H

Este componente se dedica únicamente a la recuperación de energía. En este caso, el dispositivo es capaz de convertir la energía térmica librada por los frenos del vehículo en energía eléctrica almacenable y posteriormente utilizable por el MGU-K antes explicado. Este elemento no tiene ninguna restricción de cantidad de energía recolectada, por lo que su desarrollo está completamente abierto a los equipos.

- Batería

La batería en el sistema híbrido de los autos de Fórmula 1 está muy poco limitada, y su única restricción es que debe pesar entre 20 y 25 kg. Este elemento permite almacenar la energía provista por el MGU-K y MGU-H para después poder ser liberada en los momentos de aceleración plena.

Cabe resaltar que otra de las categorías reina del circuito automotor mundial, el WEC o campeonato mundial de resistencia, también decidió implementar motores híbridos en su parque automotor. En la categoría LMP1, la cual es la de vehículos más potentes y rápidos, los equipos deben usar al menos un sistema de recuperación de energía y un propulsor eléctrico. La gran diferencia en esta categoría es que los fabricantes son libres de escoger qué sistemas de recuperación de energía quieren usar, por lo que las opciones son ilimitadas. Estos autos, con sus motores híbridos, pueden rondar los 1000 HP, además de tener una gran capacidad de resistencia al desgaste; las carreras de 24 horas, como la

emblemática Le Mans los obligan a esto. Así, estos vehículos del WEC son un gran marco para el desarrollo de futuros elementos de recuperación de energía tanto para automovilismo como para comercialización, lo que impulsa de manera significativa el desarrollo de vehículos eléctricos con cada vez mejores prestaciones y desempeño. [10]



Ilustración 11: Audi R18, Porsche 919 Hybrid, Toyota Gazoo TS050. Autos híbridos LMP1 del WEC

Sin ninguna duda, si se desea hablar de automovilismo eléctrico, es necesario hablar de la Fórmula E. Esta categoría, la más nueva avalada por la FIA, es una revolución absoluta en el mundo automotor de competencia pues, por primera vez en la historia, utiliza vehículos completamente eléctricos. En general, estas son las especificaciones técnicas de los autos:

[11]

Peso total	888 kg
Potencia máxima	200 kW (270 HP)
Potencia en carrera	150 kW (203 HP)
Energía de la batería	28 kWh
Aceleración 0-100 km/h	< 3 segundos

Velocidad máxima	225 km/h (limitada)
Caja de cambios	Una relación fija con reducción
Autonomía (por pack de baterías)	50 km (media hora en carrera)

Tabla 2: Especificaciones técnicas del Spark SRT_01E, auto base de la Fórmula E



Ilustración 12: Autos de Fórmula E en carrera: Vehículo del equipo Jaguar-Panasonic, equipo Venturi, y equipo Audi ABT Sport

Los autos de Fórmula E cuentan con el sistema KERS (Kinetic Energy Recovery System) que les permite recuperar parte de la energía cinética del automóvil a la hora de frenar (muy similar al MGU-K de los autos fórmula 1). Así mismo, cuentan con una batería desarrollada por Williams Advanced Engineering, filial del equipo Williams de Fórmula 1, la cual tiene una vida útil suficiente para suplir a cada auto durante toda la temporada (12 carreras), sin ninguna pérdida de rendimiento o capacidad de carga [12]. El motor eléctrico, denominado MGU, tiene pocas limitantes para los equipos: deben ser máximo dos de ellos, deben estar conectados al eje trasero del auto, y no pueden tener control de tracción. McLaren, la marca de autos deportivos y dueña de equipo de Fórmula 1 es la responsable de proveer este componente a la mayoría de los equipos. El chasis es desarrollado por Dallara y los equipos electrónicos supervisados por Renault Sport [13].

III. Objetivos

Objetivo General

Mejorar el rendimiento competitivo el kart eléctrico desarrollado por la Universidad de los Andes.

Objetivos Específicos

- Modelar de manera coherente y fiel los fenómenos generales que afectan al vehículo cuando se encuentra funcionando (modelo dinámico).
- Por medio de diferentes herramientas, simular el tiempo de vuelta teórico del vehículo en el kartódromo de Tocancipá.
- Proponer y simular alternativas que permitan mejorar el rendimiento del vehículo, para evaluar su viabilidad y finalmente seleccionar una.
- Probar el cambio de rendimiento con la solución implementada y adquirir datos para ser comparados con las simulaciones realizadas.

IV. Marco teórico

Especificaciones y categorías de karts

Toda la información que será reportada está consignada en documentos oficiales de la CIK-FIA [14].

Los karts de competición están divididos de la siguiente forma:

- Grupo 1
 - KZ1: Motores de 125cc
 - Superkart: Motores de 250cc
- Grupo 2
 - KZ2: Motores de 125cc
 - OK: Motores de 125cc
 - OK-Junior: Motores de 125cc

Definición de kart: Vehículo terrestre monoplaza sin ningún tipo de techo o cabina cerrada, sin suspensiones y con o sin carenajes. Tiene 4 llantas no alineadas que están en contacto con el terreno; las dos delanteras controlan la dirección, y las dos traseras, conectadas a un eje de transmisión, transmiten la potencia.

Chasis	Sus partes deben estar firmemente adheridas en todo momento. Construcción rígida, sin suspensiones o articulaciones.
Materiales	Aceros ISO 4948 o ISO 4949
Dimensiones	Wheelbase: 101 cm – 107 cm Track: > 2/3 de Wheelbase Longitud total: 182 cm – 210 cm Ancho total: 140 cm Altura: 65 cm
Transmisión	Tracción trasera, sin ningún tipo de diferencial. La lubricación de la misma está prohibida. Es necesario un resguardo para cadenas o correas.

Frenos	Hidráulicos, operados por pedal, sistemas delantero y trasero independientes, garantizando frenos en al menos dos llantas.
Dirección	Controlada por timón metálico. Tipo libre.
Motor	Los sistemas de inyección están prohibidos. La capacidad y potencia dependen de la categoría.
Sonido	Límite máximo de 108 dB/A

Tabla 3: Características generales relevantes de un kart de competencia avalado por la CIK-FIA

Aunque existen muchas más especificaciones de cada uno de los sistemas del kart, estas son las más críticas y las que deben tenerse más presentes a la hora de proponer y diseñar modificaciones en el vehículo. El documento completo puede encontrarse en el sitio web del CIK-FIA [14].



Ilustración 13: Valida final del campeonato 2016 en Macau. 11 de Diciembre de 2016

Modelos físicos y matemáticos

Para aproximar el comportamiento dinámico que experimenta el kart en pista, se investigó en la literatura competente. Una de las aproximaciones más claras de entender, pero también fiables y bien sustentadas es la presentada por el ingeniero Thomas D. Gillespie en su libro “Fundamentals of Vehicle Dynamics”. Allí, se presentan modelos para todos los sistemas principales de un vehículo, pasando por toda la parte motriz, estructural, dinámica y de desempeño. Para efectos del proyecto y de las simulaciones que se quieren realizar, se deben estudiar los siguientes capítulos:

- Capítulo 2: Desempeño de aceleración
- Capítulo 4: Fuerzas en movimiento
- Capítulo 6: Curvas en estado estable

Con una buena aproximación a los modelos presentados en cada uno de estos capítulos, es posible simular de manera cercana a la realidad el rendimiento que puede ofrecer el vehículo. A continuación, se mostrarán los modelos y ecuaciones utilizadas, explicando sus principios fundamentales y las suposiciones tomadas para el correcto desarrollo del modelo. Toda la información fue obtenida de la fuente mencionada anteriormente [15].

Desempeño en aceleración

Luego de hacer un análisis de las fuerzas principales que gobiernan la dinámica del vehículo en aceleración, Gillespie enuncia la ecuación general de fuerza:

$$Ma_X = F_X - R_X - D_A - R_{hX} - W \sin(\Theta) \quad (1)$$

M = Masa del vehículo [kg]

a_X = Aceleración longitudinal $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

F_X = Fuerza de tracción [N]

R_X = Resistencia a la rodadura [N]

D_A = Resistencia aerodinámica (Drag) [N]

R_{hX} = Hitch (Towing) Forces [N]

Como se desea encontrar la aceleración que puede desarrollar el vehículo, es necesario determinar cada una de las fuerzas nombradas anteriormente. En la misma fuente se definen cada una de ellas:

- Fuerza de tracción

$$F_x = \frac{P}{V} \quad (2)$$

P = Potencia del motor [W]

V = Velocidad longitudinal $\left[\frac{m}{s}\right]$

Esta fuerza de tracción puede ser utilizada únicamente en los casos en que la fuerza está limitada por la potencia del motor y no por la tracción. Dado que el motor no es exageradamente potente y las llantas del vehículo son de competencia, se asume que la potencia del motor es la limitante crítica del fenómeno.

- Resistencia a la rodadura

$$R_x = f_r W \quad (3)$$

f_r = Coeficiente de rodadura

W = Peso del vehículo [N]

El coeficiente de rodadura se estimó como 1%, ya que es un valor muy recurrente en todo tipo de vehículos de pesos regulares [15].

- Resistencia aerodinámica (Drag)

$$D_A = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (4)$$

ρ = Densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

V = Velocidad longitudinal $\left[\frac{m}{s}\right]$

C_D = Coeficiente de drag

A = Área frontal proyectada del vehículo $[m^2]$

Los valores de Coeficiente de Drag y Área frontal fueron obtenidos gracias a la investigación de Marco Biancolini en su publicación “Evaluation of Aerodynamic Drag of Go Kart by Means of Coast Down Test and CFD Analysis”. En esta, Biancolini analiza el comportamiento de un kart con prácticamente las mismas características geométricas que las del kart de la Universidad de los Andes, razón por la que sus resultados son una muy buena aproximación a la realidad [16]. Los datos obtenidos son:

$$C_D = 0.803$$

$$A = 0.575 \text{ m}^2$$

Los valores de “Hitch Forces” y el último término de la ecuación (1) no son significativos para el análisis que se desea llevar a cabo, pues no existen elementos externos al chasis del kart que sean empujados o halados ni pendientes significativas en el circuito evaluado.

En adición, es recomendable verificar que no se exceda el límite de tracción máxima por fricción de las llantas. Para esto, primero se debe hacer un análisis de la forma de transmisión de potencia del vehículo [15]:

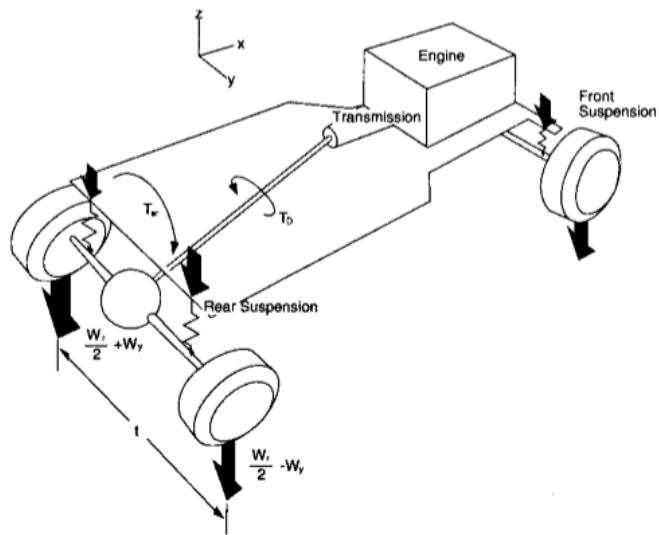


Ilustración 14: Efecto del torque producido en el eje trasero de un vehículo normal

En el vehículo en el que trabaja el proyecto no existe un eje “longitudinal” para transmitir la potencia, por lo que este efecto es despreciable. Así, y teniendo en cuenta que no existe suspensión en el eje trasero, la ecuación que gobierna el fenómeno es:

$$F_{XMax} = \frac{\mu(Wb)}{1 - \left(\frac{h}{L}\right)\mu} \quad (5)$$

μ = Coeficiente de rozamiento

W = Peso del vehículo [N]

b = Distancia longitudinal entre el eje delantero y el centro de gravedad [m]

h = Altura del centro de gravedad [m]

L = Distancia entre llantas del eje trasero [m]

Curvas en estado estable

La modelación de las curvas en estado estable permitirá conocer las velocidades máximas que puede alcanzar el vehículo en cada una de las curvas. Estos valores con críticos para poder simular el tiempo de vuelta.

En primer lugar, es necesario entender cómo la característica de una curva limita la velocidad de tránsito del vehículo. Existen dos fenómenos principales que influyen esto:

- Volcamiento

A continuación, se muestra la vista frontal de alguno de los ejes del vehículo:

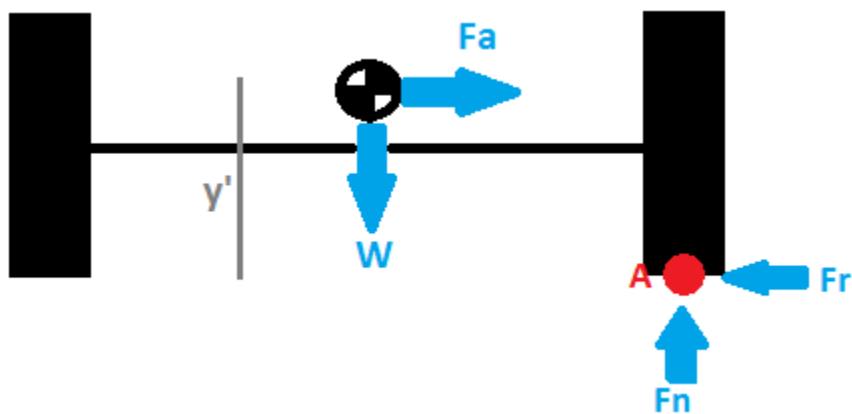


Ilustración 15: Vista frontal del eje, con diagrama de cuerpo libre en curva

Asumiendo que el vehículo está justo en el punto en el que el volcamiento comienza (no existe reacción en la llanta de la izquierda), se puede hacer una sumatoria de momentos en

el punto A. El peso multiplicado por la mitad de la longitud del eje debe hacer el mismo torque que las fuerzas iniciales causadas por la aceleración centrípeta. Así, se puede llegar a las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\sum M_A \rightarrow \left(W \frac{L}{2} \right) &= F_a y' \\ W = Mg; F_a &= \left(\frac{v^2}{r} \right) M \\ Mg \left(\frac{L}{2} \right) &= \left(\frac{v^2}{r} \right) My' \rightarrow v = \sqrt{\frac{gLr}{2y'}}\end{aligned}\quad (6)$$

M = Masa del vehículo [kg]

L = Longitud del eje trasero [m]

W = Peso del vehículo [N]

g = Aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

F_A = Fuerza por aceleración centrífuga [N]

r = Radio de curvatura de la curva [m]

y' = Altura del centro de gravedad [m]

v = Velocidad máxima en curva $\left[\frac{m}{s} \right]$

La ecuación 6 permite obtener el valor de la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo antes de volcarse. Esta será útil para determinar si el volcamiento es un factor realmente significativo o no en el caso del kart.

- Deslizamiento (slip)

El deslizamiento ocurre cuando las fuerzas iniciales producidas por la curva vencen a las fuerzas de rozamiento y grip que producen las llantas. En general, existen tres tipos de comportamiento dinámico de slip.

- Sobreviraje (Understeer)

El eje delantero pierde grip antes que el eje trasero, por lo que el vehículo en general tiende a no ser capaz de seguir el radio de curvatura. Las llantas delanteras deben ser giradas más

de la cuenta, por lo que el ángulo de slip se incrementa. En general, esta condición se presenta cuando el centro de gravedad está ubicado más hacia la parte frontal del vehículo ($CG < 50\%$).

- Viraje neutral (Neutral steer)

En esta situación, el eje delantero y el eje trasero tienen el mismo nivel de grip permisible. Por esta razón, no existe una tendencia marcada de inestabilidad en las curvas. Esta condición es la que permite mayores velocidades en curva, pues reparte lo más equitativamente posible las cargas laterales. El centro de gravedad suele estar ubicado muy cerca al centro del vehículo, o punto medio entre ejes ($CG \approx 50\%$).

- Sobreviraje (Oversteer)

El eje trasero pierde grip antes que el eje delantero, por lo que en general el vehículo tiende a incrementar su ángulo de curvatura, aunque su trayectoria no siga este cambio. Las llantas delanteras en este caso deben ser giradas en la dirección contraria a la curva, disminuyendo así el ángulo de slip. En general, esta condición se presenta cuando el centro de gravedad está ubicado hacia la parte posterior del vehículo ($CG > 50\%$).

A continuación, se muestra una ilustración del estado general del vehículo en casos de sobreviraje y subviraje [17].

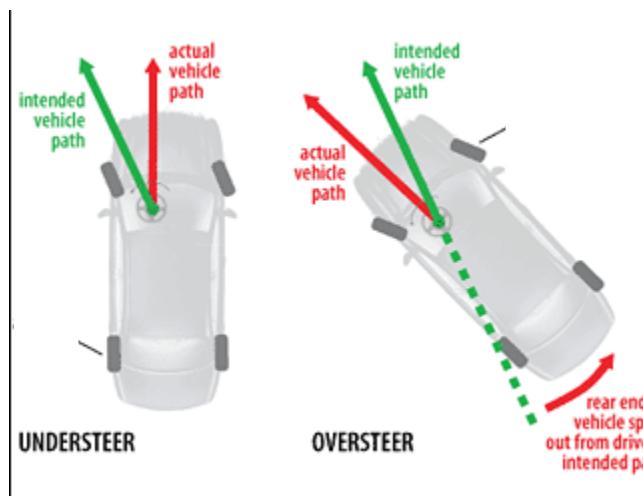


Ilustración 16: Subviraje y sobreviraje

Para todos los casos se puede hacer un análisis estático de las fuerzas que actúan en el vehículo

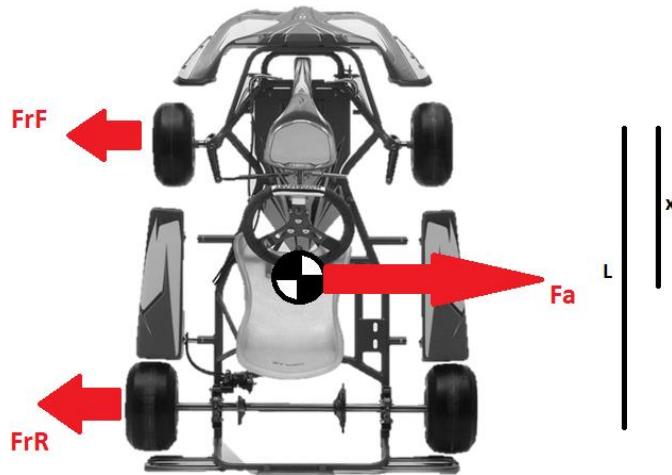


Ilustración 17: Diagrama de cuerpo libre en una curva a la izquierda

Por definición de centro de gravedad se tiene que:

$$Fr_F = \mu F_n * \frac{L - x}{L} = \mu Mg * \frac{L - x}{L} \quad Fr_R = \mu F_n * \frac{x}{L} = \mu Mg * \frac{x}{L}$$

Por definición de fuerza centrípeta se tiene que:

$$F_A = \frac{v^2}{r} * M$$

Ahora, haciendo una sumatoria de fuerzas en el eje lateral del kart se obtiene:

$$\sum F_{lat} \rightarrow F_a = Fr_F + Fr_R \rightarrow \left(\frac{v^2}{r} * M \right) = \left(\mu Mg * \frac{L - x}{L} \right) + \left(\mu Mg * \frac{x}{L} \right)$$

Despejando para velocidad y simplificando:

$$v = \sqrt{r\mu g} \quad (7)$$

Con esta ecuación, se puede determinar la velocidad máxima en curva del vehículo. Como se puede observar, la posición del CG no afecta esta relación. Esta afirmación no es correcta

pues se sabe que una condición de sobreviraje o subviraje disminuye la velocidad máxima en curva, así que es necesario encontrar otra limitante en la velocidad.

Se introduce entonces el concepto de velocidad crítica. Esta es la máxima velocidad a la que el vehículo puede girar, bajo efecto de sobreviraje, sin que su comportamiento sea inestable [15].

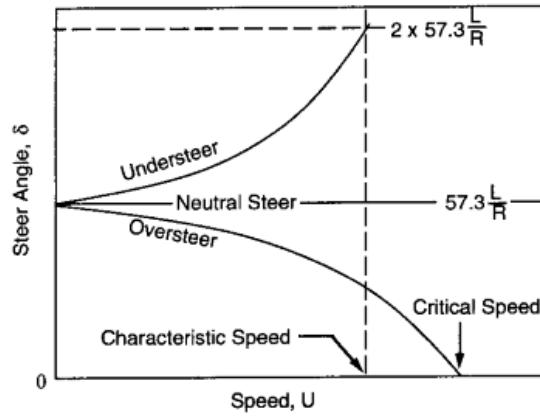


Ilustración 18: Relación entre la velocidad de curva y el ángulo de giro

La velocidad crítica entonces puede definirse como:

$$v_{crit} = \sqrt{-\frac{57,3Lg}{k}} \quad (8)$$

$$k = \frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}}$$

W_f = Peso del vehículo soportado por el eje delantero [N]

W_r = Peso del vehículo soportado por el eje trasero [N]

L = Longitud del eje trasero [m]

g = Aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

k = Gradiente de subviraje $\left[\frac{\circ}{g}\right]$

C_{af} = Rígidez de curva en el eje delantero $\left[\frac{N}{\circ}\right]$

C_{ar} = Rígidez de curva en el eje trasero $\left[\frac{N}{\circ}\right]$

Dadas las presiones de inflado de las llantas (32 PSI) y las relaciones de aspecto de las llantas del kart, los valores de rigidez de curva pueden ser estimados alrededor de las 1000 lb. Esta suposición es fuerte ya que no se cuenta con tablas o gráficas exactas para el tipo de llantas del kart, pero es necesaria para poder llegar a las simulaciones deseadas. Esta será una de las fuentes de error que se presume más significativa, pues la información disponible es realmente poca.

Relaciones de transmisión y cajas de cambios

La transmisión de potencia es un problema central en el desarrollo del proyecto, pues es el aspecto en el que más se puede optimizar el rendimiento actual. En el caso de este vehículo, la transmisión de potencia es un sistema relativamente sencillo, pues no es necesario (ni oficialmente permitido) tener algún tipo de dispositivo como un diferencial. Como el motor está ubicado en la parte trasera del vehículo, y el vehículo debe ser de tracción trasera, no existe tampoco la necesidad de un eje de transmisión (cardan). Estas condiciones hacen que la transmisión de potencia no sea un sistema difícil de instalar. La teoría necesaria para entender y diseñar los sistemas de transmisión de potencia será mostrada a continuación:

Los engranajes siguen ciertas ecuaciones y relaciones que permiten diseñar y construir sistemas útiles de transmisión de potencia. En general, un juego de engranajes sirve para modificar los parámetros de la transmisión de potencia. Ya sea por términos de torque, fuerza o velocidad de rotación, los juegos de engranajes permiten obtener el valor de diseño deseado a la salida del sistema, haciéndolos un recurso indispensable en prácticamente todas las máquinas móviles.

En el mundo del automovilismo esto no es la excepción. Las condiciones de salida de un motor deben ser modificadas para que el torque y la velocidad de rotación dada al eje impulsor sean las adecuadas y contribuyan positivamente al desempeño del vehículo en la aplicación deseada.

Se mostrará información básica sobre engranajes, todas obtenidas de “Shigley's Mechanical Engineering Design” [18].

Principalmente, los engranajes utilizan la siguiente nomenclatura:

d = Diámetro nominal efectivo [m]

N = Número de dientes

ω = Velocidad angular $\left[\frac{rad}{min}\right]$

T = Torque [Nm]

P = Paso diametral $\left[\frac{1}{Pulgada}\right]$

m = Módulo [mm]

Para que dos engranajes sean compatibles, ya sea por acción directa o por medio de una cadena o correa dentada, su paso diametral (o módulo, dependiendo del sistema que se desee implementar) debe ser el mismo. Esto asegurará que los dientes de ambos engranajes encajen adecuadamente, permitiendo que la transmisión de potencia sea posible. Por esta razón, es absolutamente necesario asegurar que estos valores sean idénticos a la hora de implementar engranajes o piñones.

Las siguientes relaciones permiten ver cómo se modifican las características del sistema al implementar juegos de engranajes o piñones [18]:

$$\frac{d_1}{N_1} = \frac{d_2}{N_2} \quad (9)$$

$$\omega_1 N_1 = \omega_2 N_2 \quad (10)$$

$$\omega_1 T_1 = \omega_2 T_2 \quad (11)$$

De estas tres ecuaciones se pueden derivar todas las relaciones relevantes para determinar las condiciones de operación de salida del sistema.

En el marco de este proyecto, tres tipos de sistemas de transmisión de potencia se tendrán en cuenta:

- Transmisión de una relación fija

Esta solución cuenta con un juego de dos piñones, en donde la relación entre ellos es fija para todos los puntos de operación del vehículo. Este tipo de sistema es el más simple, económico y fácil de utilizar ya que sólo requiere de dos piñones y una cadena, los cuales

generalmente van ubicados en ejes ya existentes. La gran desventaja frente a otras soluciones es que no puede maximizar la aceleración y la velocidad máxima al tiempo, lo que implica pérdida de tiempo de vuelta. A lo largo de todo el rango de funcionamiento del motor, sólo existirá un punto en el cual la relación de transmisión se encuentre en su punto óptimo; esto implica que, en todos los demás puntos de operación, el motor no estará funcionando en su configuración de mayor potencia entregada.

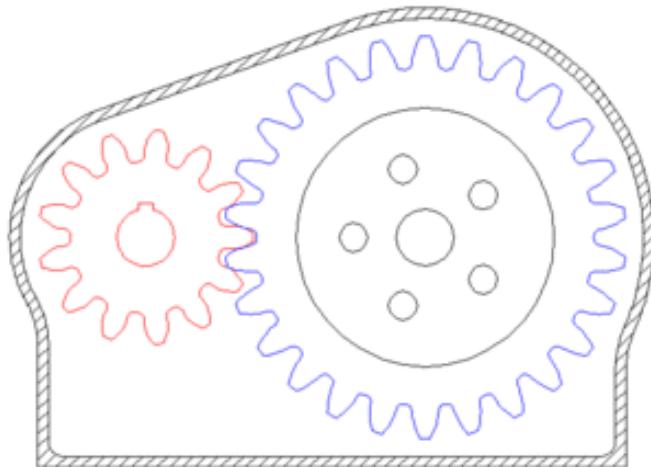


Ilustración 19: Transmisión de una relación fija

- Transmisión de varias relaciones fijas

Es el tipo de solución más usada en el mundo del automovilismo ya que permite tener buenos valores de aceleración, pero también velocidades tope altas. Existen transmisiones desde 2 relaciones diferentes hasta más de 20, dependiendo de la aplicación y las condiciones de operación. En general, el mayor inconveniente de este tipo de sistemas es que ocupan un gran espacio, requieren de mucha precisión al ensamblarse, requieren de actuadores o comunicación física con el piloto, y requieren la creación de semiejes intermedios.

Sin embargo, estas transmisiones tienen algunos inconvenientes:

- Discontinuidad

Dado que cada uno de los piñones ofrece una relación fija diferente, la relación total del vehículo va a “saltar” entre una y otra. Esto causa un incremento significativo del desgaste

de las diferentes piezas que transmiten la potencia (engranajes, ejes, rodamientos, etc). Así mismo, esta situación implica que la transmisión de potencia sólo será óptima en un punto infinitesimalmente pequeño por cada velocidad instalada. Así, un vehículo de seis marchas sólo estará transmitiendo su potencia de manera óptima (punto de mayor potencia del motor) en seis puntos infinitesimalmente pequeños. Esto, claramente, implica que la eficiencia de transmisión de potencia se ve seriamente afectada.

- Peso

Muy relacionado con lo expuesto anteriormente, el peso de las transmisiones de varias relaciones fijas es un parámetro importante y crítico. Debido a que un mayor número de relaciones implica un mejor rendimiento y una eficiencia mucho más alta de transmisión de potencia, implementar un gran número de piñones es una solución que suena atractiva y viable. Sin embargo, cada relación implementada genera un peso significativo extra, lo que en últimas afecta negativamente al desempeño global del vehículo.

Así, aunque con algunos factores negativos, estas transmisiones son las más usadas comercialmente, pues maximizan la relación desempeño/costo. Se muestra el ejemplo de una de las transmisiones comerciales más avanzadas implementada por Audi para todos los automóviles de su familia de gama alta [19].

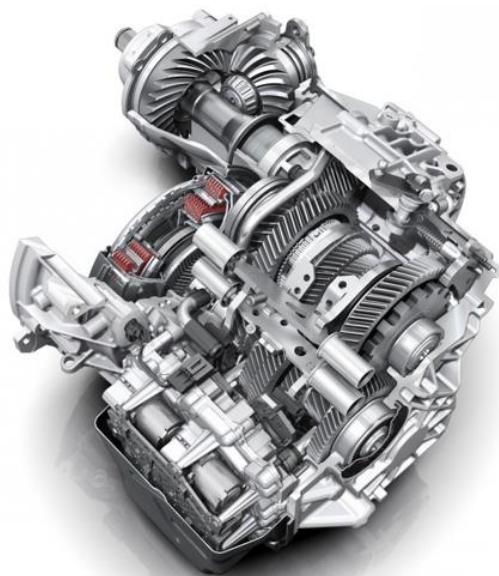


Ilustración 20: Transmisión S-Tronic de Audi con 7 velocidades

- Transmisión de una relación variable

Esta solución conocida comercialmente como CVT (Continuously Variable Transmission) es un tipo de transmisión muy diferente a las que normalmente se conocen y manejan en el mundo automotriz. La principal diferencia con las transmisiones convencionales (mecánicas o automáticas), es que una CVT no necesita cambiar de piñón o engranaje para realizar el cambio de relación. Esta característica permite que elementos como las dimensiones, el peso y los sistemas de control puedan simplificarse enormemente [20].

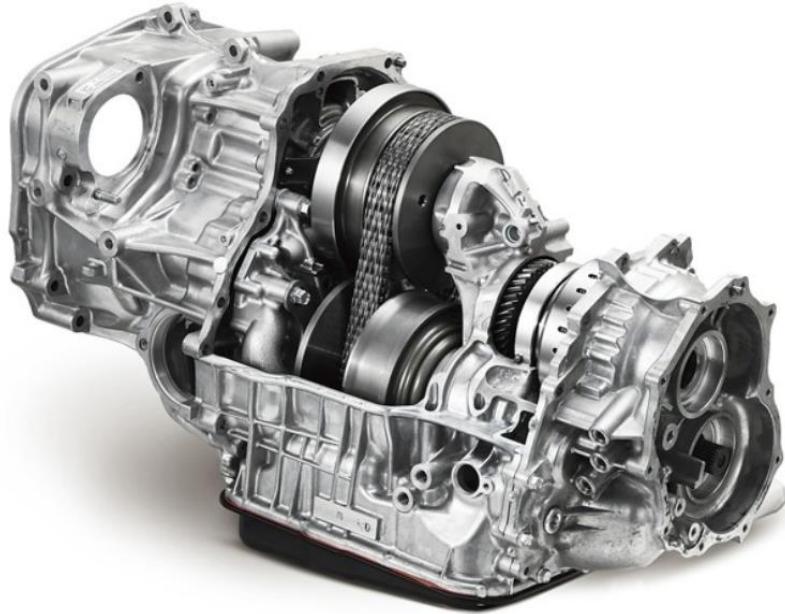


Ilustración 21: Vista isométrica de una transmisión CVT convencional

Los elementos principales que componen a una transmisión CVT son tres:

- Polea de entrada (Conductora o primaria)

Este elemento está mecánicamente conectado al eje de salida del motor y gira con la velocidad angular de este. Generalmente esta polea es la de mayor velocidad angular, por lo que es el elemento crítico de diseño de este tipo de transmisión.

- Polea de salida (Conducida o secundaria)

Este elemento está mecánicamente conectado al eje de entrada del eje de las llantas, o al diferencial, dependiendo del tipo de configuración del vehículo. La velocidad angular de

esta polea será igual que la velocidad angular de las llantas, por lo que su funcionamiento definirá la velocidad en pista del vehículo.

- Correa dentada o cadena de transmisión

Este elemento permite conectar a la polea de entrada con la polea de salida. El diseño de esta es crucial, pues debe asegurar que la potencia se transfiera efectivamente entre una y otra, pero también debe tener la flexibilidad necesaria para poder adaptarse a los cambios de geometría que implica la utilización de una CVT. Generalmente, se utilizan materiales poliméricos de alta resistencia para su manufactura.

El principio de funcionamiento de una CVT es mecánicamente sencillo pero muy ingenioso. El cambio constante de la relación de transmisión se da gracias a un constante cambio en el diámetro efectivo de cada una de las poleas de transmisión. Ya sea por medios mecánicos (resortes que se flectan según la velocidad angular) o medios electrónicos (sensores y actuadores que reaccionan a la velocidad angular), las poleas cambian continuamente el diámetro efectivo sobre el cual rueda la correa de transmisión, permitiendo que la relación de trasmisión cambie, también, de manera continua y suave [21].

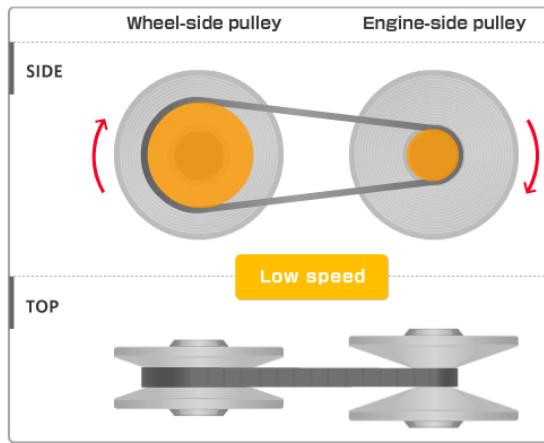


Ilustración 22: Configuración de un CVT para bajas velocidades

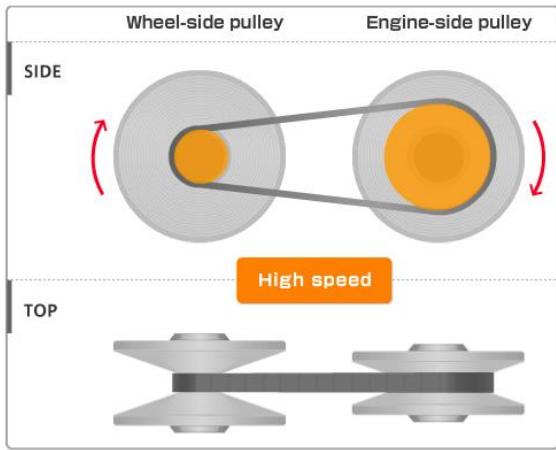


Ilustración 23: Configuración de una CVT para altas velocidades

Como se puede ver en las ilustraciones anteriores, las poleas son capaces de cambiar sus diámetros efectivos por medio del ensanchamiento y encogimiento de sus dimensiones. Dado que la geometría interna de las poleas es en forma de cono, cambiar el ancho de la polea genera que la correa corra más “abajo” o más “arriba”, lo que implica que la relación de transmisión es afectada.

Así, una transmisión CVT es una opción que debe ser tenida en cuenta si se desea mejorar el rendimiento de un vehículo, pues sus características permiten tener un bajo peso, facilidad en el acoplamiento y operación, y simplicidad en los sistemas de control y accionamiento. Sin embargo, antes de intentar este tipo de solución, es importante evaluar el espacio y las estructuras disponibles en el vehículo, dado que el kart, al ser una máquina tan pequeña y con espacios reducidos, puede no tener las dimensiones necesarias para la implantación de este tipo de transmisión.

V. Trabajo previo

Trabajo en la Universidad de los Andes

A lo largo de algunos años, diferentes estudiantes han venido trabajando en el desarrollo del vehículo en el cual este proyecto se enfoca. El kart eléctrico de la Universidad de los Andes fue creado y ha sido construido en el marco del grupo de desarrollo “Fórmula SAE”, liderado por el profesor Andrés González Mancera. Este grupo, parte del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad, tiene diferentes campos de estudio y desarrollo. Desde la simulación y diseño de partes aerodinámicas hasta la construcción y ensamblaje de vehículos, el grupo ha tenido numerosos proyectos. Todos los proyectos están enfocados a crear conocimiento local de los sistemas y fenómenos que implican los vehículos eléctricos de competencia.

En el presente proyecto se trabajará en el kart eléctrico que se ha venido desarrollando en la universidad desde hace unos años. Los principales trabajos que se han realizado en este vehículo son los siguientes:

- Diseño de un tren de potencia para un kart eléctrico [22]
- Construcción, ensamblaje y caracterización de un kart eléctrico [23]

Estos dos proyectos de grado, ejecutados por Mariana Córdoba y Felipe Rivera respectivamente, se trabajó en el diseño y construcción del kart eléctrico.

A continuación, se muestran algunos de los elementos de estos proyectos que son útiles para el desarrollo del presente proyecto. Todos los datos y gráficas fueron obtenidos de las fuentes ya mencionadas [22] [23].

- Motor

El motor escogido para el desarrollo del kart es de referencia ME1117 sin escobillas. Los datos técnicos principales son [23]:

Tipo	Potencia continua [kW]	Potencia máxima [kW]	Velocidad angular máxima [RPM]	Voltaje de operación [V]
Brushless	4,47	14,17	5000	48
Peso [kg]	Torque continuo [Nm/A]	Torque máximo [Nm]	Precio [COP]	Eficiencia máxima [%]
9,98	0,135	38	1'968.000	90

Tabla 4: Características generales del motor

Estos datos generales son los que permitirán desarrollar un modelo del vehículo para su posterior evaluación.



Ilustración 24: Motor ME1117 que actualmente utiliza el kart eléctrico

- Baterías

El kart actualmente cuenta con 16 celdas individuales de 3V cada una, organizadas en cuatro baterías de 12V. El voltaje total del sistema es de 48V. Las características generales de las baterías son [23]:

Voltaje [V]	Capacidad [Ah]	Dimensiones [mm]	Peso por batería [kg]	Tipo	Rango de voltaje [V]	Temperatura de operación [°C]
12,8	100	125x280x234	12,8	LiFeMnPo4	11,2 / 14,4	-20 / 65

Tabla 5: Características generales de las baterías



Ilustración 25: Batería de cuatro celdas que utiliza el kart

- Sistemas de control

El kart cuenta con un sistema de control completamente funcional que permite manejar la comunicación entre las baterías y el motor de manera eficiente y eficaz. El sistema consta principalmente de una central grande llamada BMS, y módulos que van acoplados a cada una de las celdas de baterías.



Ilustración 26: Central de control de baterías BMS instalada en el kart

- Transmisión de potencia

Se diseñó un sistema de transmisión de potencia simple de una relación fija con las siguientes dos variantes [23]:

Dientes piñón	Dientes Engranaje	Relación de transmisión
20	64	3,2
20	68	3,4

Tabla 6: Relaciones de transmisión disponibles en el kart eléctrico

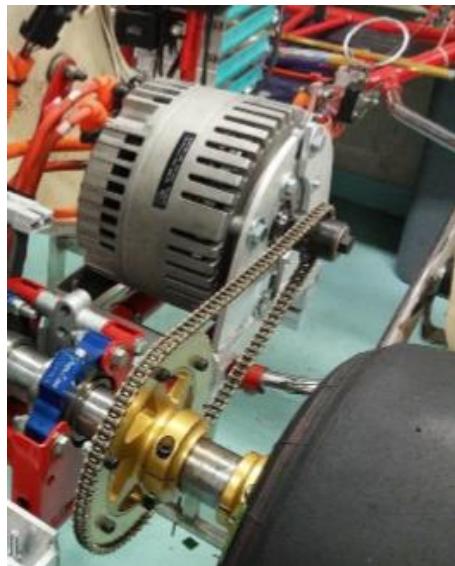


Ilustración 27: Sistema de transmisión actual en el kart eléctrico

- Distribución de los elementos

Los elementos que no se modificaron de un kart normal siguieron en el mismo lugar en donde estaban. Sin embargo, elementos como el motor, las baterías y los controladores tuvieron que ser ubicados. A continuación, se muestra una imagen de la distribución general de estos elementos [23]:



Ilustración 28: Distribución general del kart eléctrico

Como se puede observar, el espacio que dejó el motor de combustión interna fue utilizado para ubicar el motor eléctrico. El controlador del motor eléctrico, que es el componente electrónico más voluminoso, fue ubicado en el espaldar de la silla del conductor. El control

de la batería, junto con otros componentes electrónicos importantes, fue ubicado en la parte inferior del timón. Una de las baterías se encuentra allí mismo, en el medio de las piernas del piloto, mientras que las otras tres baterías se ubicaron en la parte posterior del vehículo. El cableado general es mucho más complicado que en un kart convencional, por lo que se debieron resolver varios problemas espaciales.

Componentes como los frenos, dispositivos de aceleración, dirección, llantas, chasis, barras estabilizadoras y carrocería general se mantuvieron invariables.

- Resultados de pruebas

El vehículo fue llevado al kartódromo de Tocancipá y fue probado con el tope de su rendimiento. El piloto fue John Portilla, estudiante de Ingeniería Mecánica en la Universidad de los Andes y piloto profesional de Kart, por lo que los parámetros obtenidos pueden ser considerados como muy fiables y comparables a los obtenidos en karts de combustión interna. Los resultados fueron los siguientes [23]:

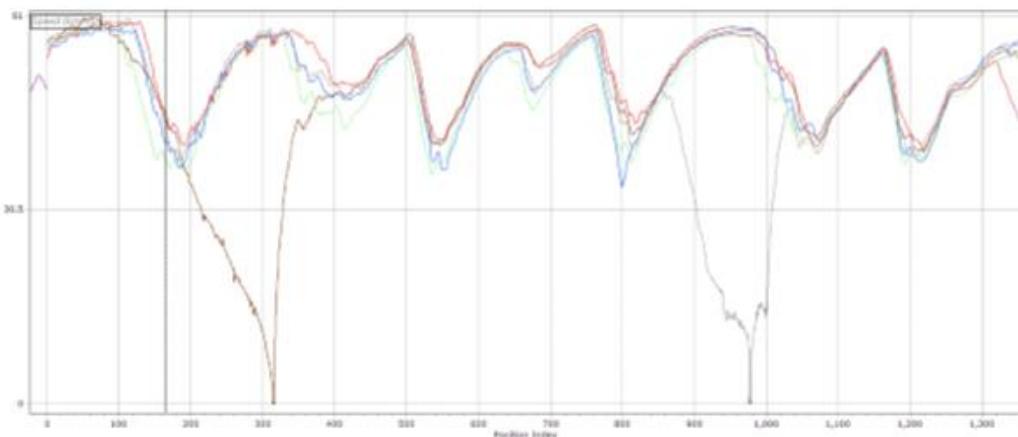


Ilustración 29: Velocidad del kart en varias vueltas al kartódromo de Tocancipá

	Lap	Time	Delta	VMax
	4	02:41.86	+01:34.12	60,590
	5	02:05.29	+57.54	60,790
	6	01:07.75	00.00	60,170
	1	01:14.42	+06.67	60,210
	2	01:11.59	+03.84	59,870
	3	01:09.98	+02.23	59,160

Ilustración 30: Tiempos de vuelta en las pruebas

VI. Posibilidades de mejora

Cambio en la distribución del peso

Como se vio en la sección IV, los componentes nuevos del kart eléctrico fueron ubicados en lugares que tal vez no sean los más indicados para efectos de peso y balance. Para esto, se hizo un estudio a grandes rasgos de los elementos más significativos del vehículo, para poder encontrar el estado actual del kart. En términos del eje longitudinal del vehículo, el cálculo se muestra a continuación.

Componente	Masa (kg)	Peso (N)	Datum (mm)	Momento (Nmm)	CG (mm)	CG (%)
Chasis	47,5	465,975	1041	485036,6393	1040,907	65%
Motor	10,1	99,081	1300	128805,3	1300	82%
Batería 1	6,6	64,746	445	28811,97	445	28%
Batería 2	6,6	64,746	1545	100032,57	1545	97%
Batería 3	6,6	64,746	1545	100032,57	1545	97%
Batería 4	6,6	64,746	1545	100032,57	1545	97%
Controlador	3,4	33,354	1300	43360,2	1300	82%
Llantas D	3	29,43	350	10300,5	350	22%
Llantas T	3	29,43	1383	40705,78077	1383,139	87%
Piloto	60	588,6	985	579771	985	62%
Total	153,4	1504,854		1616889,1		
CG					1074,449149	67%

Tabla 7: Cálculo actual del CG longitudinal del kart

Como se puede observar, este valor del centro de gravedad está muy lejos del ideal (entre 52% y 54% [15]), por lo que el kart está experimentando un fuerte fenómeno de sobreviraje. Por culpa de esta condición, el tren trasero está sufriendo cargas mucho más pesadas que el tren delantero, por lo que la pérdida de grip del tren trasero es recurrente. Esta condición genera que la velocidad máxima en curva se disminuya drásticamente, y que el comportamiento dinámico del kart en las curvas sea más problemático.

Esto se confirmó con la retroalimentación que realizó el piloto John Portilla después de las pruebas de rendimiento. Declaró que, efectivamente, el vehículo está muy cargada en la parte posterior, lo que no le permite tener un buen manejo del mismo.

Para intentar mejorar un poco esta situación, se evaluó cuáles de los componentes existentes podrían ser reubicados sin realizar una gran modificación en la estructura del kart. Se decidió que la solución más fácil y efectiva a realizar era la reubicación de las baterías. Estos elementos son fáciles de mover y tienen pesos significativos, por lo que una reubicación a lugares más delanteros del vehículo podría significar una mejora considerable. Se propuso realizar las siguientes modificaciones:

- Mover batería 2 a soporte derecho, justo adelante del motor
- Mover batería 3 a soporte izquierdo al lado del conductor
- Mover batería 4 a soporte izquierdo al lado del conductor

Con estas modificaciones, el cálculo del CG queda de la siguiente manera:

Componente	Masa (kg)	Peso (N)	Datum (mm)	Momento (Nmm)	CG (mm)	CG (%)
Chasis	47,5	465,975	1041	485036,6393	1040,907	65%
Motor	10,1	99,081	1300	128805,3	1300	82%
Batería 1	6,6	64,746	445	28811,97	445	28%
Batería 2	6,6	64,746	500	32373	500	31%
Batería 3	6,6	64,746	800	51796,8	800	50%
Batería 4	6,6	64,746	900	58271,4	900	56%
Controlador	3,4	33,354	1300	43360,2	1300	82%
Llantas D	3	29,43	350	10300,5	350	22%
Llantas T	3	29,43	1383	40705,78077	1383,139	87%
Piloto	60	588,6	985	579771	985	62%
Total	153,4	1504,854		1459232,59		
CG					969,6838299	61%

Tabla 8: Cálculo del CG después de las modificaciones propuestas

Como se puede observar, existiría una mejoría del 6% en cuanto al corrimiento del CG hacia adelante. Cualitativamente hablando, esto sugiere una mejoría importante, pues el objetivo es llevar este valor lo más cercano al rango de 52-54 % antes mencionado. Así, el desplazamiento de estos elementos se llevará a cabo.

Para poder ubicar la batería 2, se diseñó un soporte muy similar al soporte del motor diseñado previamente [23], pues los apoyos son las mismas dos barras del chasis. Sin

embargo, para ubicar las baterías 3 y 4, fue necesario diseñar un nuevo tipo de soporte, pues sólo se tiene una barra de chasis disponible. Habrá tres conexiones entre el chasis y el soporte; una de ellas se hizo no colineal con las demás, para que se impida físicamente la rotación alrededor de la barra del chasis. A continuación, su muestra el lugar del kart en donde se ubicará el soporte, y una visualización de cómo se verá el soporte una vez esté construido:

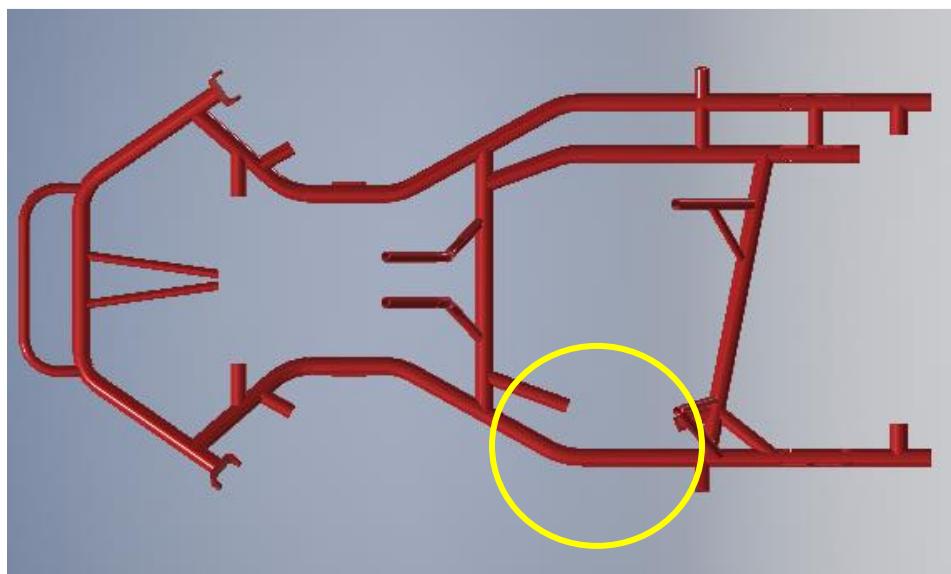


Ilustración 31: Lugar del chasis en donde se ubicará el soporte de baterías.

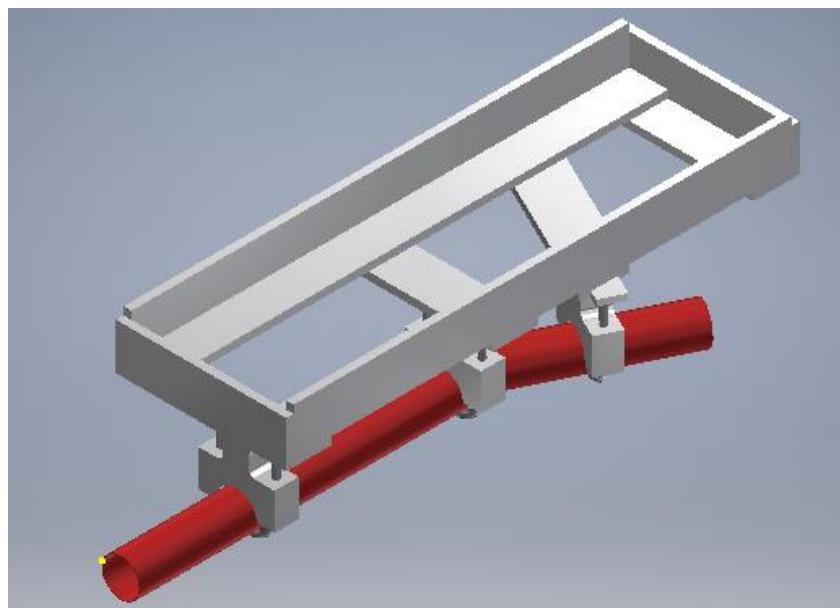


Ilustración 32: Visualización del soporte montado al chasis

Mantenimiento

Después de las pruebas realizadas el año pasado, algunos elementos del kart deben ser reparados. A continuación, se muestran algunos de los componentes principales que necesitan mantenimiento urgente, para asegurar el funcionamiento seguro y eficaz del vehículo:

- Sistema eléctrico
 - Optoaislador de salida (Top Optical Isolator):

El componente se encuentra completamente dañado, lo que impide que varios elementos del kart funcionen correctamente. Las baterías no pueden ser cargadas con el cargador correspondiente debido a este problema. Se debe comprar de nuevo el par de optoaisladores al proveedor.

- Batería del pack delantero:

La primera celda de batería del pack delantero está dañada. Su voltaje está en 0V, lo cual indica que ya está completamente dañada y es necesario cambiarla. Aunque el kart puede funcionar sin esta celda, es evidente que la autonomía del vehículo se ve seriamente afectada por su ausencia.

- Cableado display:

Existe alguna falla en el cableado del display pues no funciona. Se presume que hay un cable cortado.

- Cableado general:

Existen varios cables en estado precario, desconectados, pelados o simplemente muy largos y enrollados. Se necesita un recableado más robusto, especialmente en el área del BMS y el display.



Ilustración 33: Estado del cableado general

- Sistema de frenos
 - Calibración

Los frenos necesitan ser recalibrados para su funcionamiento óptimo. Esto incluye: cambio de pastillas, cambio de líquido de frenos y ajustar todos los parámetros de funcionamiento de los frenos, para que no exista rozamiento indeseado.

- Freno delantero izquierdo

El freno delantero izquierdo tiene algún tipo de fuga, por lo que se debe revisar las líneas y el funcionamiento interno del freno.

- Estructura
 - Soporte motor

El soporte del motor se desplaza hacia atrás debido a las fuerzas de la potencia transmitida, por lo que debe ser fijado definitivamente. Adicionalmente, se debe buscar una solución al hecho de que la parte inferior de este elemento roce continuamente con el piso de la pista.

- Soporte controlador

El controlador se encuentra acoplado al respaldo de la silla de una manera poco fiable y eficiente. Se debe buscar la manera de reubicar este elemento.

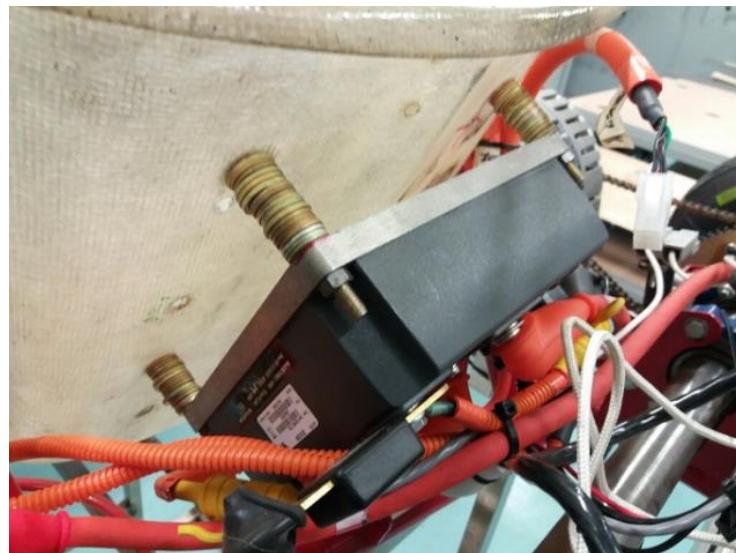


Ilustración 34: Soporte actual de controlador del motor

- Soporte baterías

Se debe reforzar el soporte de las baterías, tanto delanteras como traseras, para evitar que se salgan de lugar con la vibración de la operación del kart. El aseguramiento de las baterías debe realizarse con elementos más robustos y fijos, ya que en la actualidad se utilizan zunchos plásticos para este fin.



Ilustración 35: Estado actual del soporte de la batería delantera

- Botón parado de emergencia

Se debe crear un soporte para que este elemento quede asegurado de manera robusta.

- Borneras

Se deben fijar las borneras del costado derecho del kart para que no queden sueltas.

Además, se les debe agregar una protección contra golpes y agua ya que en este momento estas se encuentran totalmente desprotegidas.



Ilustración 36: Estado actual de las borneras

- Altura del eje trasero

Algunas partes del vehículo rozan con la pista cuando el kart está en funcionamiento, lo cual es un inconveniente estructural y de desempeño. Afortunadamente, las chumaceras que soportan el eje trasero tienen una graduación que permite subir un poco el chasis en la parte trasera. Se ejecutará esta acción para solucionar el problema.

Todos estos elementos serán reparados, reubicados o cambiados para poder tener el máximo rendimiento posible del vehículo. Las soluciones se mostrarán gráficamente en secciones más avanzadas del documento.

VII. Simulaciones

Parametrización del circuito

En primer lugar, se hizo una parametrización del circuito real. Se tomó como referencia el plano provisto por las autoridades del autódromo [24] para cuestiones de forma de circuito. Se utilizó la imagen aérea provista por el software Google Maps© para la medición de distancias.

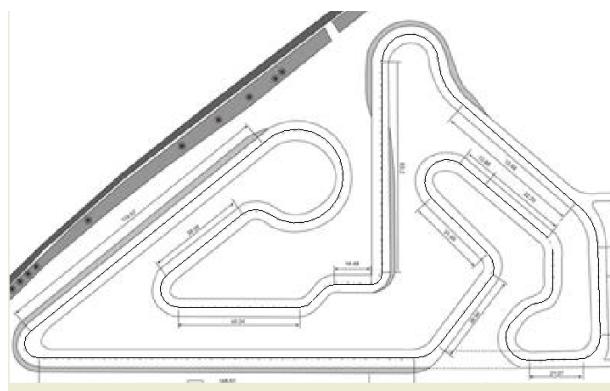


Ilustración 37: Plano del kartódromo Juan Pablo Montoya

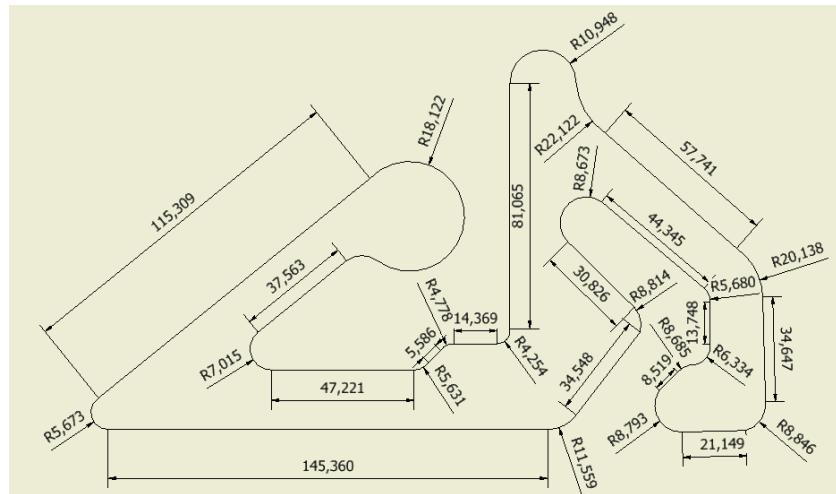


Ilustración 38:Parametrización del kartódromo Juan Pablo Montoya

El software OptimumLap® es capaz de dibujar estas parametrizaciones y proporcionar información muy interesante del circuito. A continuación, se muestran los resultados.

Kartódromo Juan Pablo Montoya, Tocancipá, Colombia

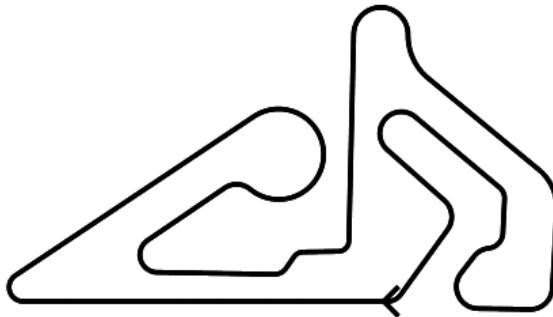


Ilustración 39: Resultado de la parametrización en OptimumLab

Statistics

Statistic	Value
Total Track Length	1001,25 m
Percent Left Corners	10,17 %
Percent Right Corners	21,16 %
Percent Straights	68,67 %
Average Corner Radius	9,42 m
Minimum Corner Radius	4,25 m
Longest Straight	145,36 m

Ilustración 40: Datos del circuito según OptimumLap

Parametrización de trayectoria

El primer paso para poder realizar una simulación del vehículo es poder pasar a términos numéricos las características geométricas del circuito.

Según la información oficial del autódromo de Tocancipá, la recta principal del kartódromo tiene 148,61 metros [24]. Sabiendo este valor, es posible hacer una aproximación geométrica de todos los sectores de la pista. Sin embargo, es evidente que para poder realizar una simulación fiable de la vuelta no se puede utilizar la configuración geométrica real de la pista; por el contrario, se debe utilizar la trazada ideal de tránsito del circuito.

Afortunadamente, gracias a las pruebas realizadas en trabajos anteriores, la trazada ideal está documentada [23]:

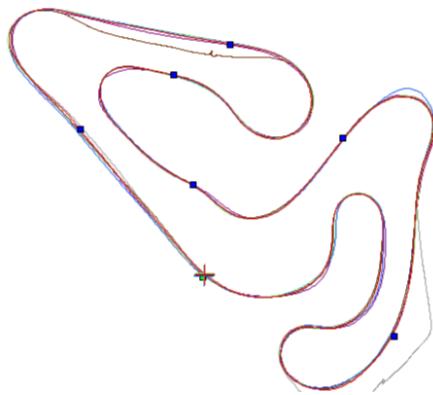


Ilustración 41: Trazada ideal del kartódromo de Tocancipá

Así, por medio de la escala gráfica y la división del circuito en rectas y curvas delimitadas, se puede parametrizar la trazada que transitará el vehículo de la siguiente manera:

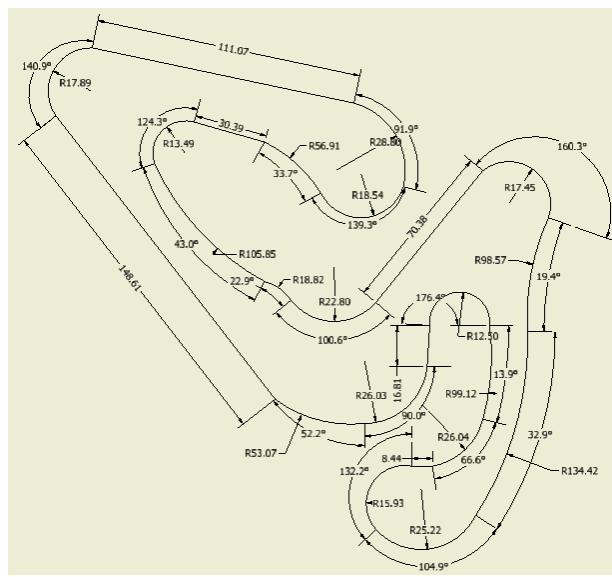


Ilustración 42: Parametrización del kartódromo de Tocancipá

El primer intento de la parametrización arrojó una longitud total de 1135 metros, lo cual estaba desfasado unos 100 metros de la longitud total publicada [24]. Sin embargo, los

datos GPS de trabajos anteriores establecieron que la distancia recorrida por el vehículo en una vuelta fue de 982 metros. Así que se tomaron los valores obtenidos de distancia por cada segmento, y se multiplicaron por un factor menor a 1 para que la distancia total recorrida fuera acorde con los valores tomados por GPS. Una vez hecho esto, se recalcularon los valores de radio de cada una de las curvas.

Sección	Radio [m]	Grados [°]	Longitud [m]
1	0,00	0	0,87
2	15,48	140,9	38,06
3	0,00	0	96,10
4	24,92	91,9	39,97
5	16,04	139,3	39,00
6	49,24	33,7	28,96
7	0,00	0	26,29
8	11,67	124,3	25,32
9	91,58	43	68,73
10	16,28	22,9	6,51
11	19,73	100,6	34,64
12	0,00	0	60,89
13	15,10	160,3	42,24
14	85,28	19,4	28,88
15	116,30	32,9	66,78
16	21,82	104,9	39,95
17	13,78	132,2	31,80
18	0,00	0	7,30
19	22,53	66,6	26,19
20	85,76	13,9	20,81
21	10,82	176,4	33,30
22	0,00	0	14,54
23	22,52	90	35,38
24	45,92	52,2	41,83
25	0,00	0	127,72
Total			982,05

Tabla 9: Parametrización por segmentos del kartódromo de Tocancipá

Parámetros del vehículo

Para realizar correctamente las simulaciones, fue necesario determinar, investigar o asumir diferentes parámetros del vehículo. A continuación, se muestra una tabla de aquellos parámetros y su procedencia:

Parámetro	Unidad	Valor	Procedencia
Masa	Kg	147	Medida directamente
Coeficiente de fricción	Adimensional	0.75-0.9	Asumida por llanta con desgaste [23]
Área frontal	m^2	0.575	Asumida de kart estándar [16]
CG longitudinal	m	1.074	Calculado
CG vertical	m	0.5	Calculado
Gravedad	m/s^2	9.78	Asumida de datos meteorológicos [25]
Densidad del aire	kg/m^3	0.95	Asumida de datos meteorológicos [25]
Rigidez de curva	lb	300	Asumido de relación de aspecto y presión de inflado [15]
Coeficiente de drag	Adimensional	0.804	Asumida de kart estándar [16]
Coeficiente "basic"	Adimensional	0.01	Asumido [15]
Coeficiente "speed effect"	Adimensional	0.005	Asumido [15]
Distancia entre ejes	m	1.03	Medido directamente

Tabla 10: Parámetros utilizados en las simulaciones

Adicionalmente, fue necesario encontrar la curva de potencia del motor, pues este valor es crucial en la simulación del desempeño.

Gracias a curvas de potencia de motores del mismo tipo y marca, se pudo llegar a una curva que cumple con los valores máximos continuos reportados por el fabricante. Cabe aclarar que estos valores no fueron tomados de una caracterización directa del motor.

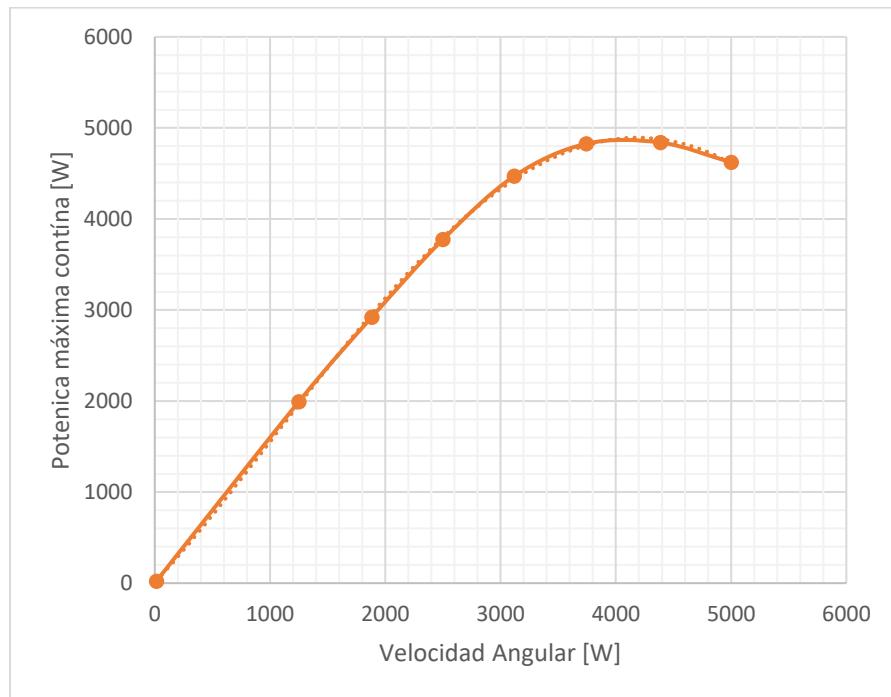


Ilustración 43: Curva de potencia del motor

Una aproximación con un polinomio de tercer grado permitió tener una ecuación que calcula el torque de acuerdo a la velocidad angular del motor:

$$\begin{aligned} P = & 3,037 * ((4,564538677 * 10^{-8} * \omega^3) + (1,056995459 * 10^{-4} * \omega^2) \\ & + (1,53209191 * \omega) - 1,895523696 \quad (9) \end{aligned}$$

Modelo por el Software Matlab ©

Por medio del software Matlab se creó una simulación del vehículo operando en la pista de Tocancipá. En una vista general, la simulación separa el recorrido de la vuelta en una serie de elementos finitos para luego, en cada uno de estos elementos, evaluar y calcular los efectos de los fenómenos físicos sufridos por el vehículo. A continuación, se hará una breve

explicación del código implementado, partiendo las etapas en diferentes archivos y funciones creadas.

performance.m

Este es el código principal de la simulación, y es el encargado de llamar a todas las otras funciones, recoger la información y operarla. En primer lugar, este código divide a cada uno de los segmentos del circuito en 100 partes más pequeñas para poder operar en cada uno de ellos. A cada segmento se le asigna una velocidad base, la velocidad máxima del kart a las rectas, y la velocidad máxima de curva para las curvas. Gracias a esta velocidad y a otros parámetros ya definidos, el código puede determinar cuáles son las velocidades teóricas, sin tomar en cuenta el rendimiento, alcanzables en cada sección. En el primer segmento de la pista (final de la recta principal), se asume que el vehículo va a su velocidad máxima, y de ahí en adelante, se obtiene información utilizando la velocidad del elemento finito justamente anterior. El código utiliza esta velocidad para llamar a todas las otras funciones y así poder evaluar la ecuación (1) para obtener la aceleración instantánea del vehículo. Teniendo la aceleración, la velocidad inicial, y el diferencial de distancia, es posible encontrar la velocidad final, la cual es asignada a ese elemento finito, y utilizada por el siguiente elemento finito para el mismo proceso. Así, el código avanza por todos los segmentos de la pista, siempre cuidando que los valores de velocidad encontrados no superen a los valores de velocidad críticos en las curvas encontrados anteriormente. Cabe resaltar que el punto de inicio de frenada y el punto de aplicación de la potencia en curvas fueron establecidos de acuerdo a lo expresado por el piloto oficial del kart John Portillo, quien tiene amplia experiencia en la conducción de este tipo de vehículos. Finalmente, el código asigna la velocidad del último elemento del circuito al primer elemento del circuito e itera de nuevo, asegurando así la coherencia y cohesión de la información obtenida. De este archivo, luego, se obtienen todos los valores y gráficas que permiten interpretar y comparar los datos. Este código utiliza a las funciones curva.m / traccion.m / drag.m / rolling.m de manera directa.

*Revisar anexo 1

curva.m

Este código toma los parámetros físicos y geométricos del vehículo y la característica geométrica de la curva para calcular la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo en ella. Dado que el CG longitudinal del kart se encuentra detrás de la mitad, se asume que el vehículo experimentará sobreviraje. La función utiliza las ecuaciones (7) y (8) para poder calcular cual es la velocidad máxima a la cual el vehículo puede transitar sin llegar a ser inestable, y sin presentar una pérdida definitiva de grip. Esta es la función responsable de determinar la velocidad a la cual el vehículo debe frenar en cada una de las curvas del circuito.

*Revisar anexo 2

traccion.m

Este código es responsable de calcular la fuerza de tracción que puede ejercer el motor en cada momento. El código toma el valor de potencia entregada por el motor en esa configuración de velocidad angular y también toma el valor de la velocidad actual del vehículo para determinar cuál es la fuerza que puede ejercer el motor por medio de la ecuación (2). Esta función utiliza las funciones potencia.m (potenciacvt.m en el caso de la transmisión CVT) y traccionmax.m para obtener los valores teóricos y máximos de potencia del motor.

*Revisar anexo 3

potencia.m & potenciacvt

Este código utiliza la velocidad angular de operación del motor para obtener la potencia entregada por el mismo. Para este fin, utiliza la ecuación (9) previamente determinada por la linealización polinómica. Para el caso de la transmisión CVT, también calcula la nueva velocidad angular de operación del motor, para así obtener los valores reales de potencia en ese caso.

*revisar anexo 4

traccionmax.m

Esta función utiliza la ecuación (5) para determinar cuál es la fuerza de tracción máxima, limitada por agarre mecánico, que puede generar el motor. La función traccion.m utiliza estos valores para limitar sus resultados.

*Ver anexo 5

drag.m

Esta función permite calcular la fuerza de arrastre aerodinámico experimentada por el vehículo en cada apunto de operación. Se vale de la ecuación (4) para calcular estos valores y asistir al código principal.

*Ver anexo 6

rolling.m

Esta función permite calcular la fuerza de rozamiento causada por los elementos móviles del sistema mecánico del kart. Utiliza la ecuación (3) para calcular los valores correspondientes y asistir al código principal.

*Ver anexo 7

Estado Actual

Tras la primera iteración, el tiempo estimado del código fue de 68.9 segundos. Tomando como referencia los datos obtenidos de la Ilustración 30: Tiempos de vuelta en las pruebas la diferencia entre los datos reales y los datos simulados fue de tan sólo 1.5 segundos aproximadamente. Es un gran resultado pues dado que el tiempo de vuelta es de 78 segundos, tener 1.5 de error es realmente bajo. Tan sólo un 0.5% de hecho. Sin embargo, en aras de tener una simulación más cercana a la realidad para usos futuros, se modificó el valor del cual una mayor incertidumbre se tenía, y es el coeficiente de fricción de las llantas. Originalmente se utilizó 0.8 dado que es el valor de unas llantas de kart desgastadas, pero tan sólo con cambiarla a 0.85, el resultado del tiempo fue muy cercano al real:

```
Tiempo =
```

```
67.7387
```

A continuación, se muestra la gráfica de velocidad del kart

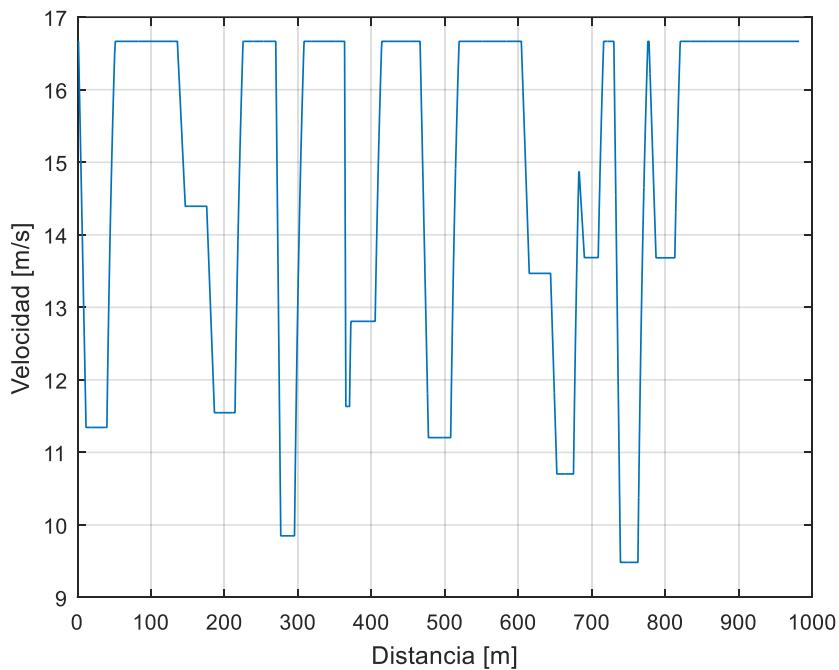


Ilustración 44: Velocidad simulada del kart en una vuelta

Como se puede observar, las secciones de aceleración del kart son muy abruptas. En un comienzo, se pensó que podía ser un error de estimación de la simulación. Sin embargo, tomando en cuenta las opiniones del piloto, la relación de transmisión de esos momentos hacía que el kart alcanzara su velocidad máxima muy rápidamente. Así, se puede afirmar que la simulación es una muy buena aproximación para modelar y evaluar el rendimiento del kart, por ende, una herramienta útil para determinar lo que posibles mejoras causarían en el rendimiento.

Relaciones de transmisión fijas

Se utilizó la simulación referenciada anteriormente para evaluar cómo afectan las diferentes relaciones de transmisión. Únicamente, se modificó el código base para que evaluara diferentes relaciones de transmisión.

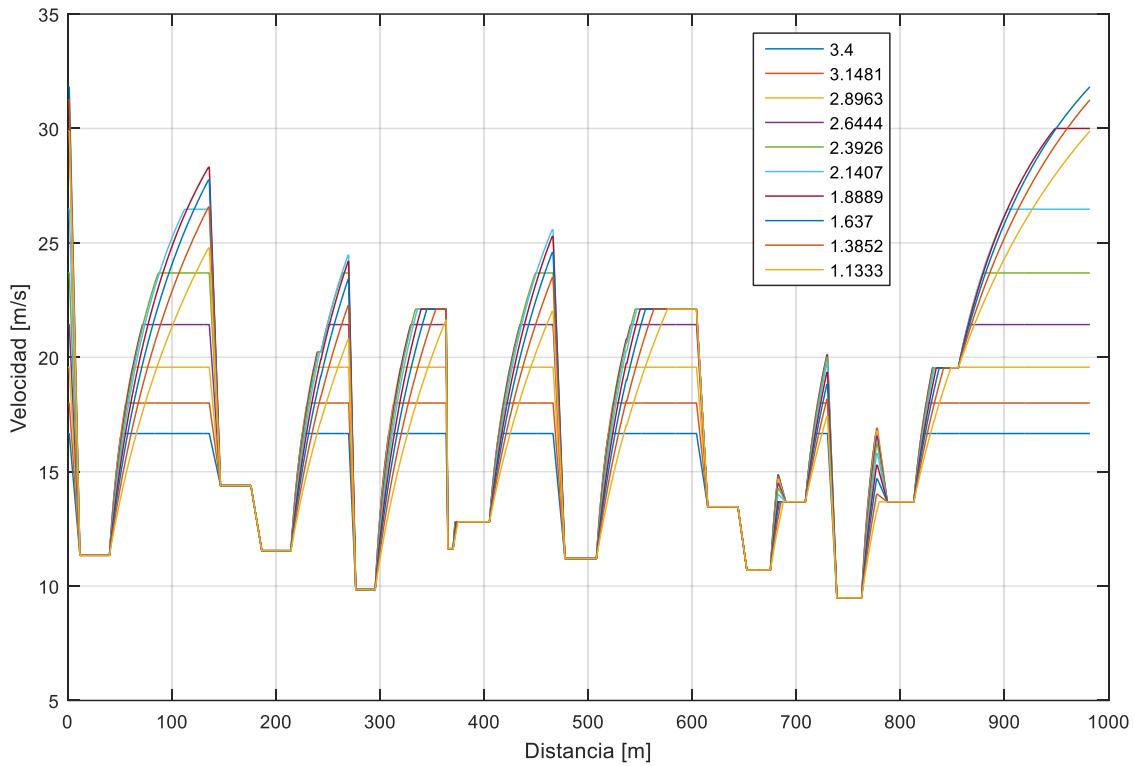


Ilustración 45: Velocidad del vehículo en el circuito con diferentes relaciones de transmisión

Esta ilustración muestra como variaría la velocidad en el circuito al tener diferentes relaciones de transmisión. Como es previsible, relaciones de transmisión altas, como la actual, tienen una mejor respuesta de aceleración, pero alcanzan su velocidad máxima en varias secciones del circuito. Por el otro lado, las relaciones de transmisión pequeñas no aceleran de una manera tan buena, pero logran alcanzar valores punta muchos más altos, y esto ocurre en mucho menos lugares en el circuito. Analizando estas velocidades en elementos finitos, permitirá estimar un tiempo de vuelta óptimo esperado para cada una de las relaciones propuestas, el cual es la variable objetivo en cuanto al mejoramiento del rendimiento del vehículo.

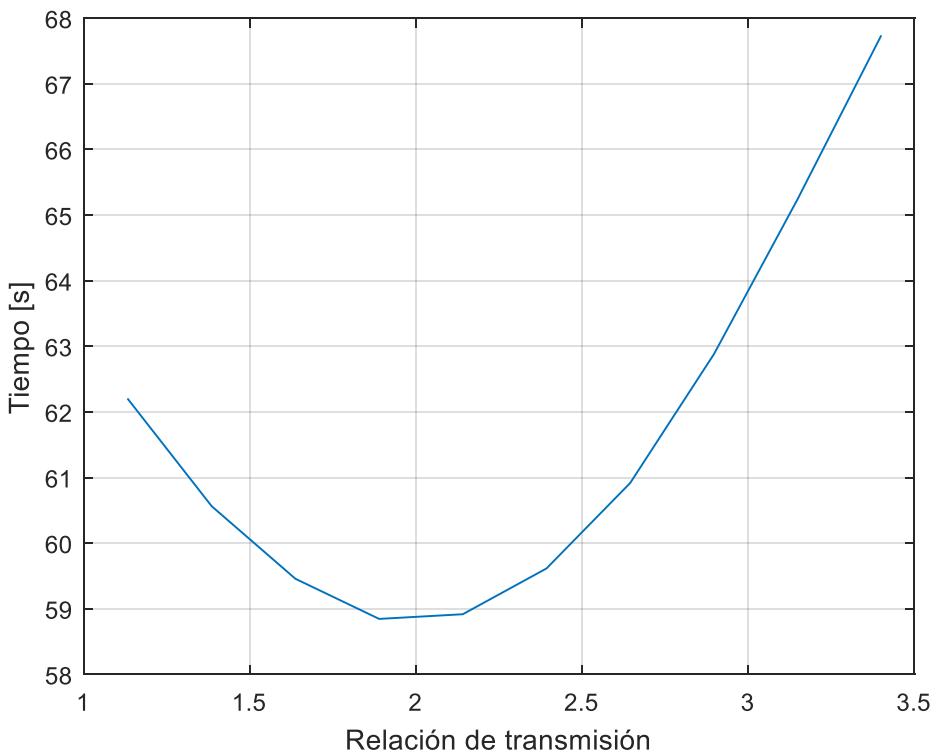


Ilustración 46: Tiempo de vuelta estimado al variar la relación de transmisión

Esta ilustración es clave para el proceso de diseño de la solución. Gracias a la simulación, se pudo obtener el tiempo óptimo previsto de vuelta para un rango de relaciones de transmisión. Como se puede observar, es posible optimizar el tiempo de vuelta utilizando relaciones de transmisión cercanas a un valor de 2; más específicamente, una relación de 1.9 brindaría, en teoría, el rendimiento en pista máximo. Se puede observar que el tiempo que podría alcanzarse al utilizar esta configuración ronda los 58 segundos altos. Es interesante observar que tanto relaciones de transmisión muy altas, como relaciones de transmisión muy bajas causan tiempos de vuelta muy elevados. Esto es un resultado esperado, ya que para encontrar un buen performance es necesario tener un balance entre aceleración y velocidad máxima.

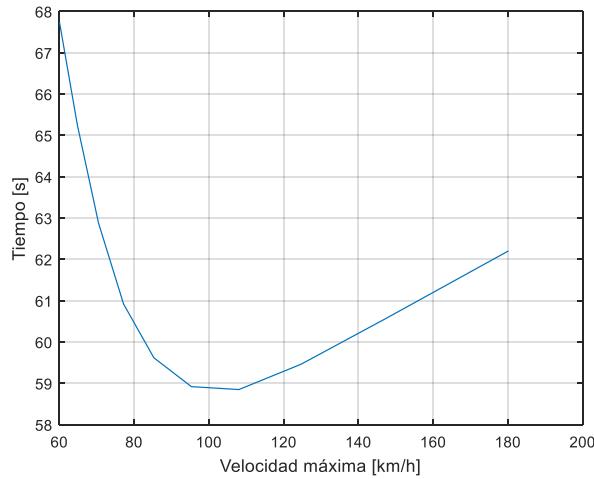


Ilustración 47: Tiempo de vuelta estimado al variar la velocidad máxima teóricamente alcanzable por el kart

Así mismo, se puede observar cómo varía el tiempo de vuelta dependiendo de la velocidad máxima teórica que podría alcanzar el vehículo. Se evidencia que la optimización del tiempo de vuelta se da cuando el vehículo tiene una velocidad máxima teórica de alrededor de 100 km/h. Con la relación de transmisión propuesta de 1.9, se espera alcanzar la velocidad máxima del vehículo únicamente en la recta principal del circuito, durante aproximadamente los últimos 50 metros. Esto permitirá tener el balance ideal entre la aceleración después de las curvas y la velocidad máxima en rectas. EN la siguiente gráfica se muestra claramente que la relación de transmisión escogida permitiría alcanzar velocidades de 106 km/h aproximadamente.

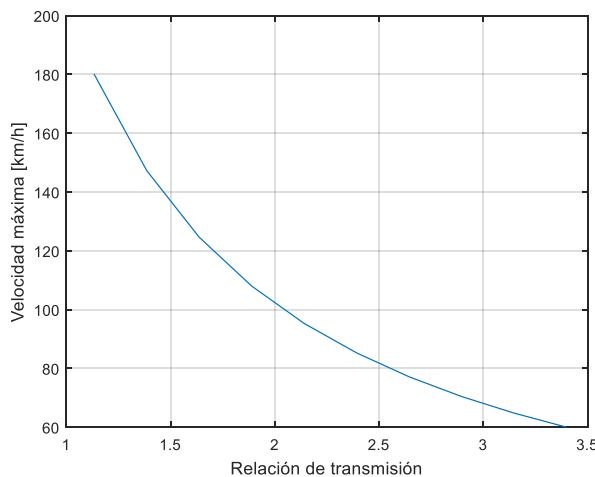


Ilustración 48: Velocidad máxima teórica alcanzable al variar la relación de transmisión

Utilización de transmisión CVT

Ahora, se utiliza la simulación para evaluar el desempeño del vehículo si utilizara una transmisión CVT. Se utiliza la función potenciacvt.m en vez de la función potencia.m.

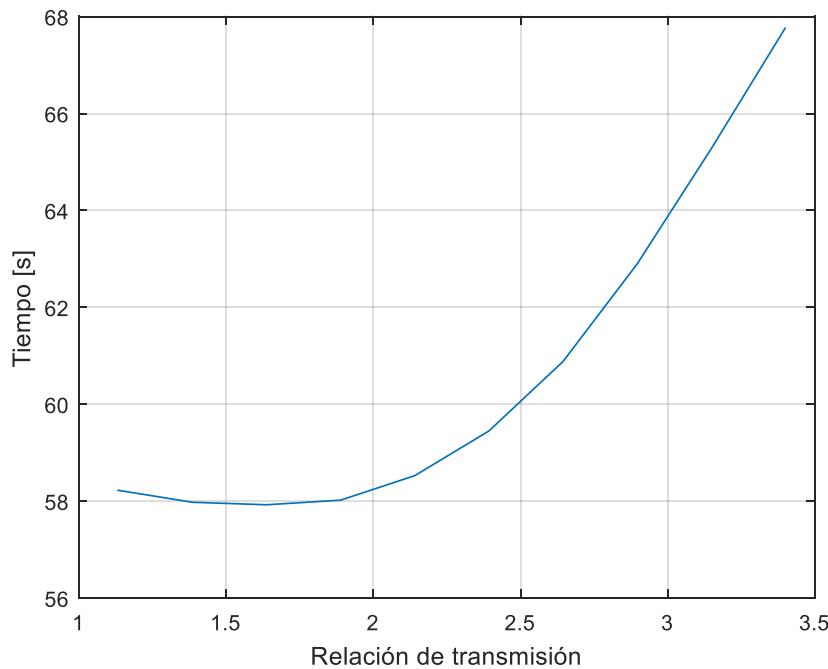


Ilustración 49: Tiempos de vuelta para diferentes relaciones de transmisión base para la caja CVT

Para optimizar el tiempo de vuelta, se debería utilizar una relación de transmisión base (la relación que se obtiene para la velocidad máxima del vehículo) alrededor del valor de 1.5. Con esta configuración, el vehículo sería capaz de alcanzar tiempos de 57 segundos altos, lo que implica una amplia mejoría del rendimiento comparado a lo que se tiene actualmente.

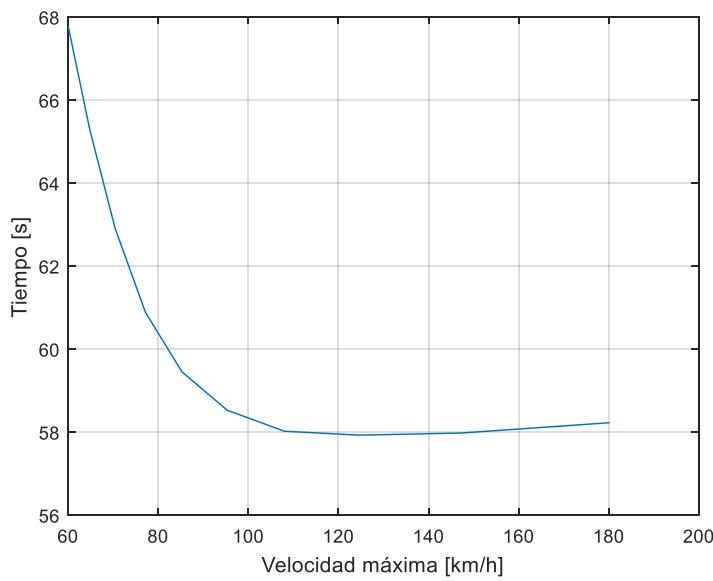


Ilustración 50: Tiempo de vuelta estimado dependiendo de la velocidad máxima teóricamente alcanzable

Así mismo, se observa que existe un rango amplio de velocidades máximas teóricas que optimizarían el tiempo de vuelta. Específicamente, una velocidad de 127 km/h sería la ideal para el desempeño del vehículo. A continuación, se muestra cómo sería la velocidad del vehículo en una vuelta. Nótese que la velocidad máxima nunca es alcanzada a lo largo del circuito.

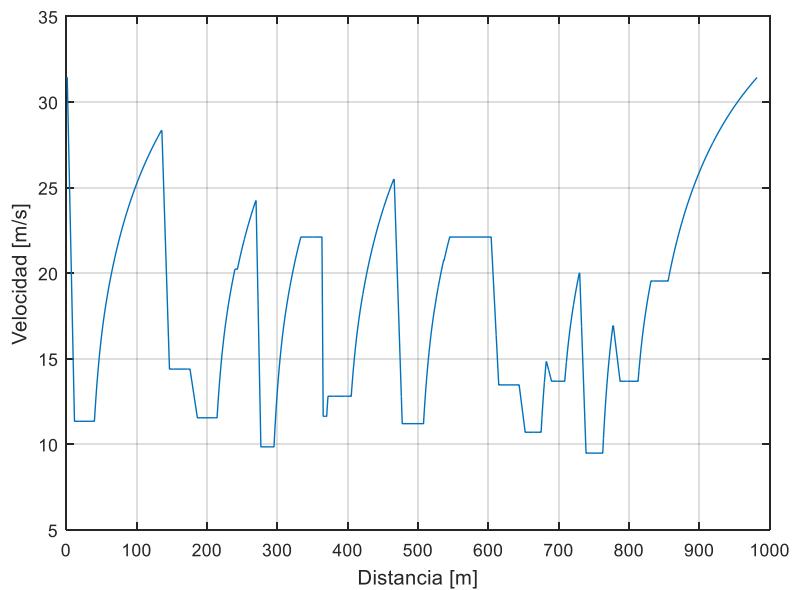


Ilustración 51: Velocidad en una vuelta con la caja CVT

Modelo por el software OptimumLap ©

Es posible modelar el kart eléctrico en el software mencionado. A continuación, se muestran los datos ingresados y las gráficas obtenidas. Cabe aclarar que esta configuración responde a las soluciones ya propuestas (cambio en el CG y cambio en la relación de transmisión).

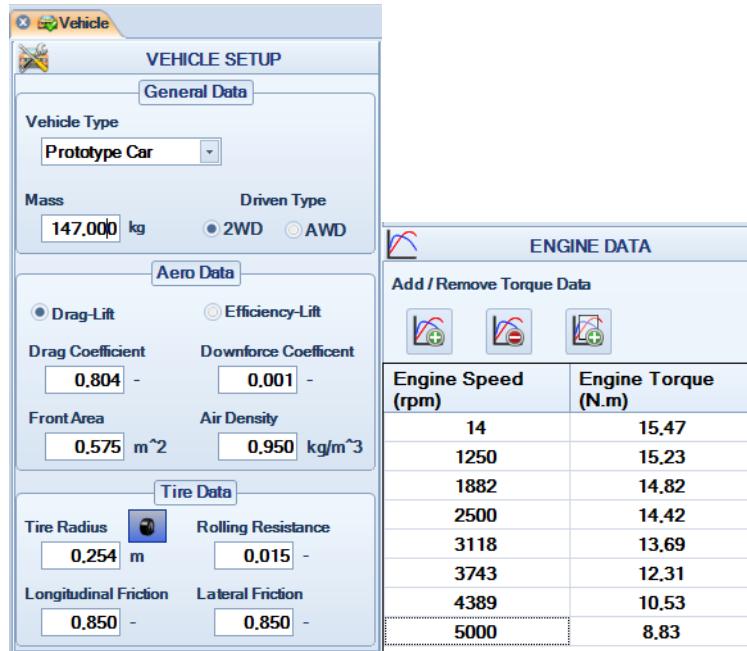


Ilustración 52: Datos suministrados al programa

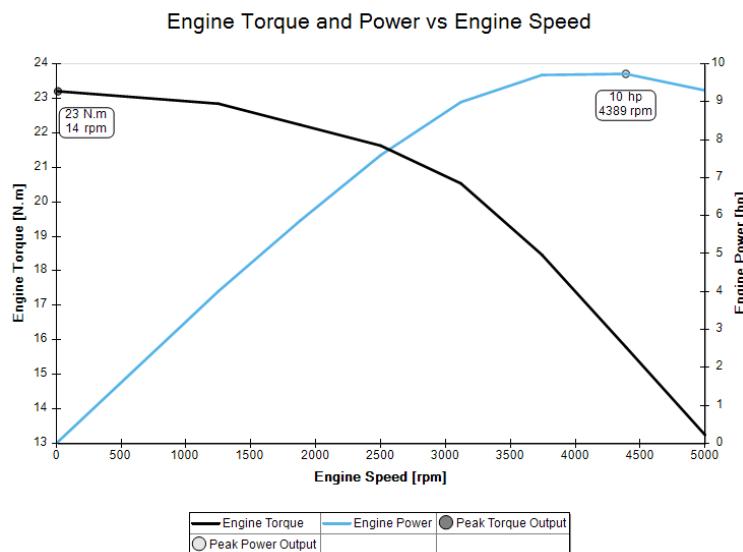


Ilustración 53: Torque y potencia

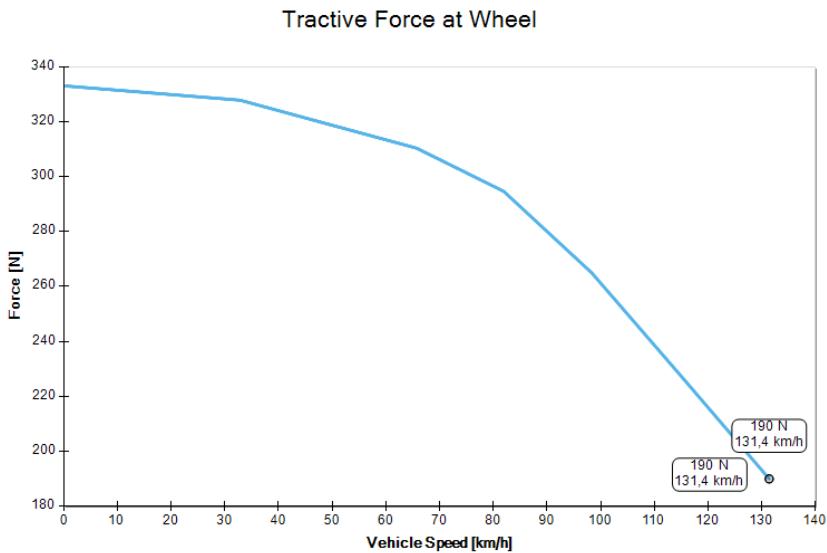


Ilustración 54: Fuerza tractiva en las llantas del eje trasero

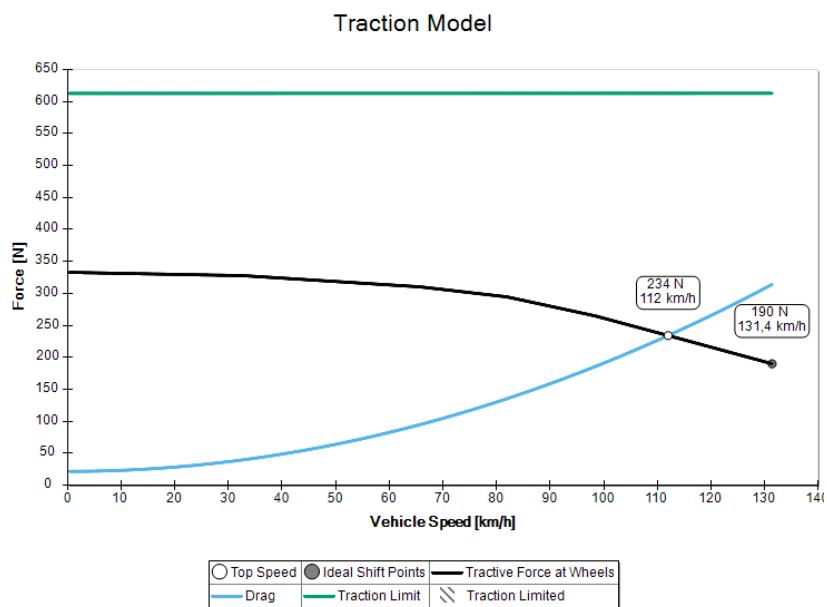


Ilustración 55: Modelo de tracción

Vehicle Configuration

Parameter	Value
	Total Mass
	147 kg
	Max Torque
	23,2 N.m @ 14 rpm
	Type of Fuel
	Lithium
	Type of Transmission
	Sequential Gearbox
	Max Power
	9,74 hp @ 4389 rpm
	Power Mass Ratio
	0,07 hp/kg
	Downforce @ 100 km/h
	0,21 N
	Drag @ 100 km/h
	191,08 N

Ilustración 56: Ficha técnica del vehículo

Performance Metrics

Metric	Value
	Top Speed
	111,99 km/h
	Time for 0 to 100 km/h
	19,94 s
	Time for 100 to 0 km/h
	3,35 s
	Lateral Acceleration - Skidpad 50 m
	8,34 m/s^2

Ilustración 57: Datos de rendimiento del vehículo

Los datos que y gráficas que muestra el programa son muy útiles. Primero que todo, se pueden observar las características generales del vehículo, las cuales son necesarias para su presentación como vehículo de competencia eventualmente. La curva de potencia y torque es también muy útil. Las dos ilustraciones sobre tracción pueden llegar a ser de vital importancia en futuros trabajos. Es importante notar que se evidencia un fenómeno que ya se había detectado en la simulación por Matlab y es el siguiente: el límite de tracción por deslizamiento lineal nunca se alcanza. Los datos de desempeño son acordes a lo esperado en cuanto a la velocidad máxima. Sin embargo, el muy alto tiempo de 0-100 hace sospechar que algunos elementos de la simulación no son del todo correctos.

A continuación, se muestra una comparación entre la configuración original del kart y la configuración propuesta en este proyecto.



Ilustración 58: Velocidad del vehículo en una vuelta (comparación)

Aunque el comportamiento es el esperado, se observa que el tiempo estimado entre las dos configuraciones es prácticamente igual (68,43s para la configuración original y 68,19s para la configuración optimizada). Este resultado no es esperado, y contradice a las simulaciones realizadas anteriormente. Se esperará la experimentación para validar los resultados.



VIII. Soluciones implementadas

Cambio en la distribución del peso

Como se enunció en la sección de

Posibilidades de mejora, el cambio en la distribución del peso fue implementada efectivamente. Como se mostró allí, las tres baterías que estaban ubicadas en la sección más posterior del vehículo fueron reubicadas en estaciones más delanteras, para intentar correr el centro de gravedad longitudinal más hacia adelante. A continuación, se muestra la antigua y nueva configuración de estos elementos, teniendo en cuenta que las baterías son representadas por los rectángulos azules

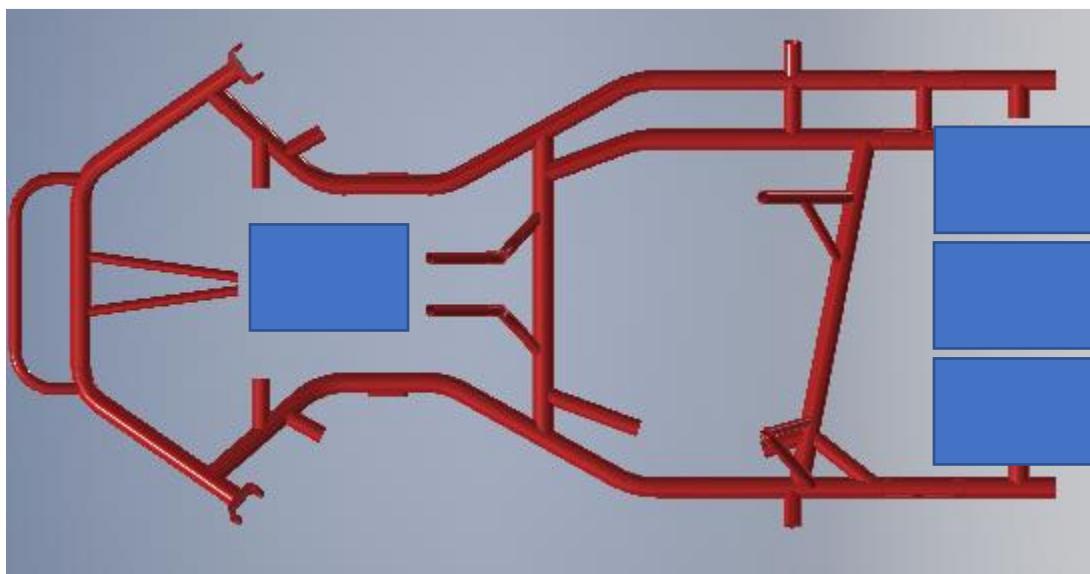


Ilustración 59: Configuración de baterías antigua

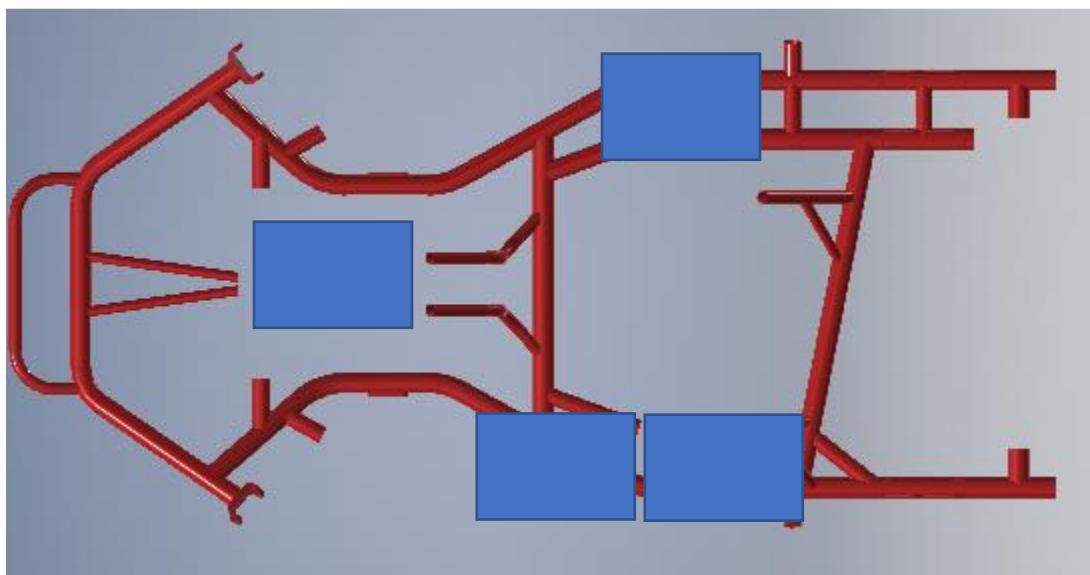


Ilustración 60: Configuración nueva de baterías

Relación de transmisión

Dados los resultados de las simulaciones, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Solución	Ventajas	Desventajas	Tiempo estimado [s]
Relación de transmisión fija	-Facilidad de construcción, instalación y ensamblaje.	-No permite maximizar el rendimiento en varios puntos de operación.	58.85
Varias relaciones de transmisión fijas	-Permite optimizar el rendimiento en algunos puntos de operación	-Inviabilidad de instalación debido a sus grandes dimensiones	58.5
Relación de transmisión variable (CVT)	-Permite optimizar el rendimiento en una gran sección de operación	-Necesidad de la creación de dos semiejes extra para su instalación	57.93

Tabla 11: Comparación de las posibles soluciones para la transmisión de potencia

Por cuestiones de viabilidad de instalación en el tiempo previsto, se escoge la opción de una relación fija. Se propone escoger la relación que maximiza el rendimiento del vehículo, basándose en las simulaciones realizadas. Aunque es la solución con el tiempo de vuelta más alto, es evidente que las demás soluciones no aportan una mejoría demasiado notable a la que se obtendría con esta (1 segundo de diferencia en el caso más ideal). Sin embargo, estas otras soluciones sí implicarían un tiempo de trabajo muchísimo mayor, debido a la necesidad de diseño y construcción de muchos más componentes, los cuales deberían ser montados en espacios muy reducidos, dadas las estrechas dimensiones del vehículo.

Con los resultados obtenidos en la sección anterior, se puede determinar que una relación de transmisión cercana al valor de 1.9 sería la más beneficiosa en términos de rendimiento

para el vehículo. En este orden de ideas, se hizo un estudio de los componentes mecánicos disponibles en el mercado para analizar cuáles podrían cumplir con los objetivos de diseño propuestos. Se encontró que existe una línea de piñones y cadenas utilizadas normalmente en motores de combustión interna de entre 15 y 20 caballos de fuerza, que ofrecen una muy amplia gama de tamaños y número de dientes disponibles. Así, se compró un piñón de 21 dientes y uno de 40 dientes. El material de los piñones es acero 1040 con tratamiento térmico en los dientes para tener un valor de dureza favorable, y la cadena es de tipo estándar.

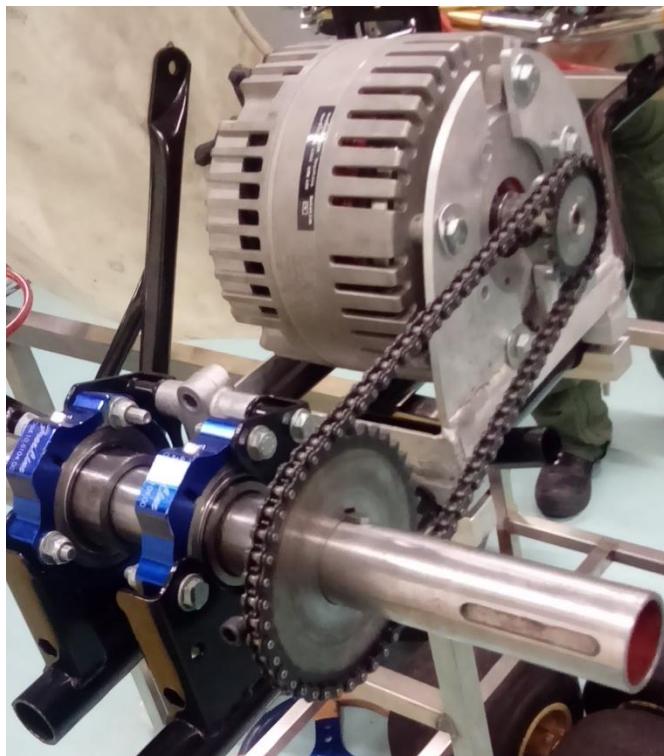


Ilustración 61: Nuevo juego de piñones y cadena

Utilizando las herramientas de simulación, se pudo llegar a las siguientes gráficas características del vehículo. Estas pueden llegar a ser de utilidad en trabajos futuros, pues dan parámetros de operación importantes como potencia, torque y las fuerzas de resistencia tanto mecánica como aerodinámica.

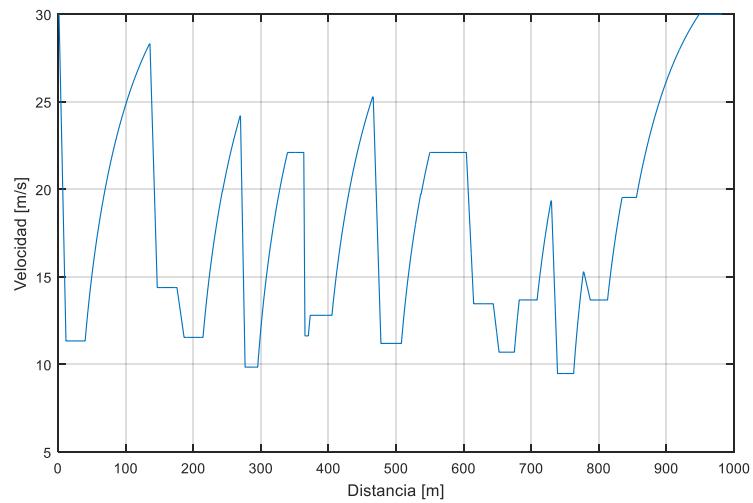


Ilustración 62: Velocidad en una vuelta con la nueva relación de transmisión

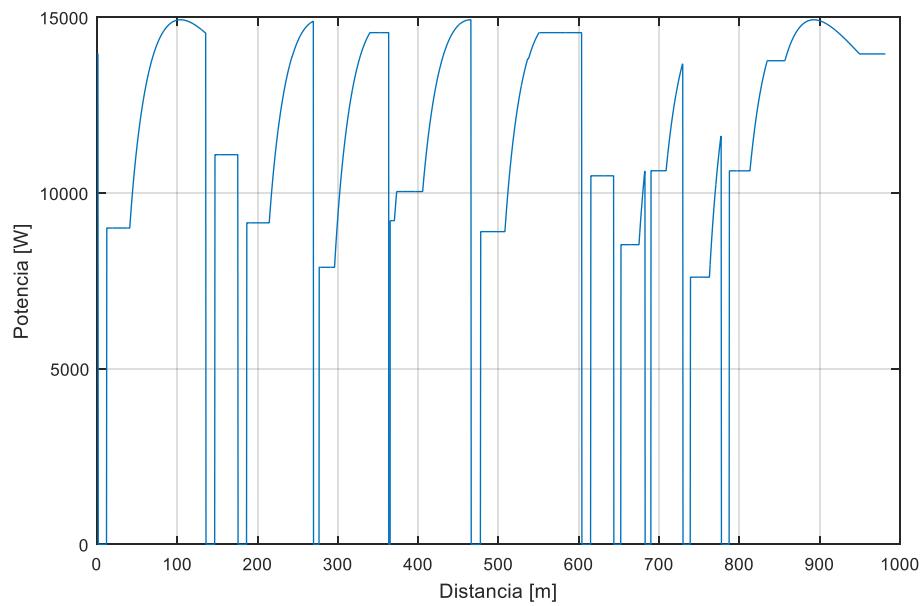


Ilustración 63: Potencia suministrada por el motor en una vuelta con la nueva relación de transmisión

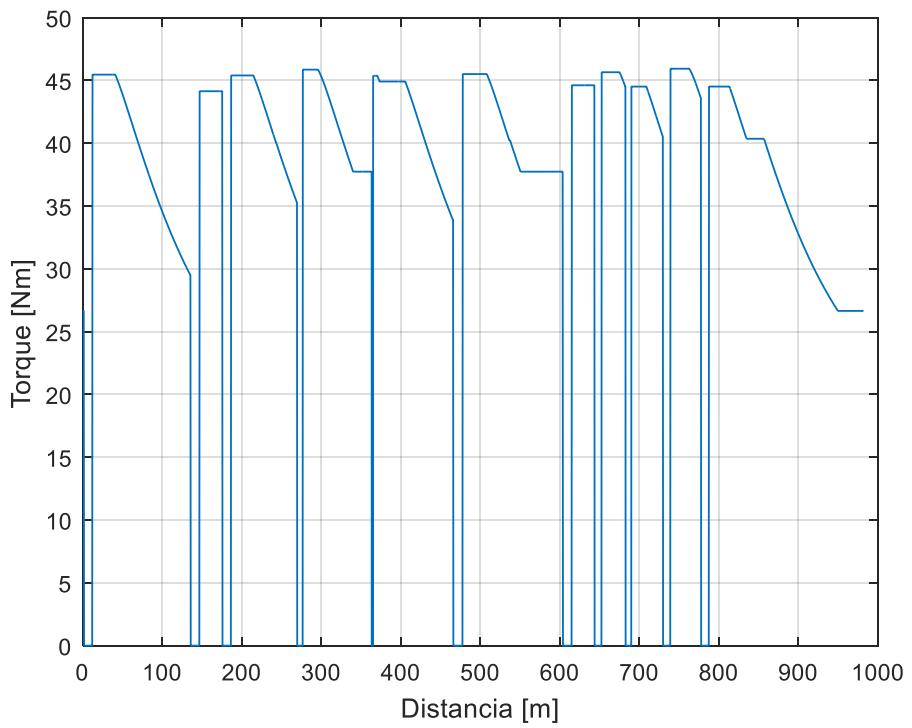


Ilustración 64: Torque suministrado por el motor en una vuelta con la nueva relación de transmisión

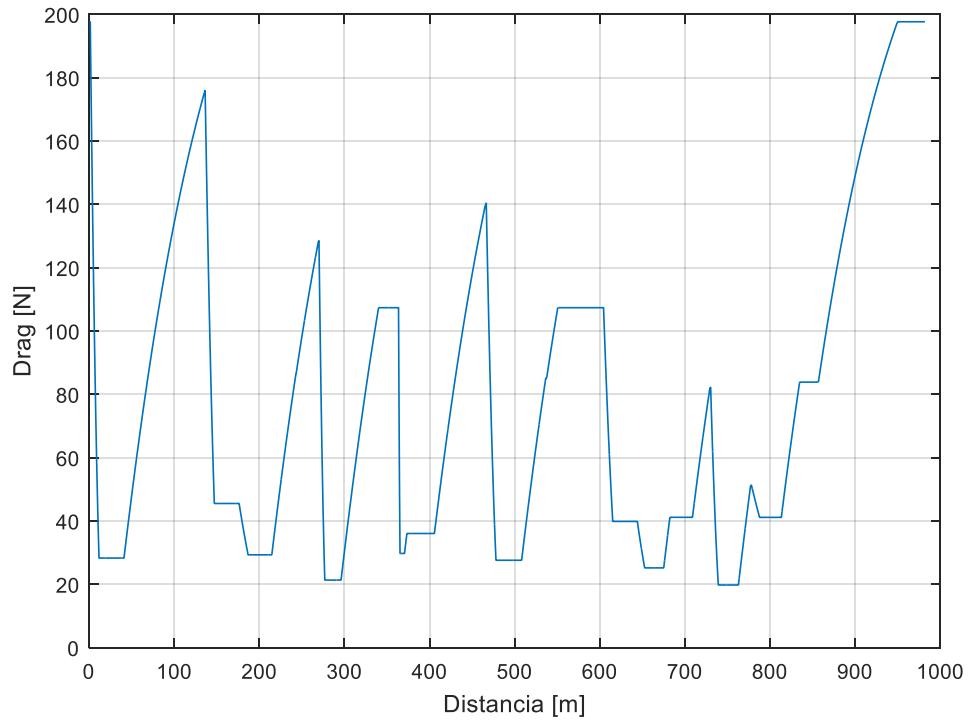


Ilustración 65: Drag aerodinámica en una vuelta con la nueva relación de transmisión

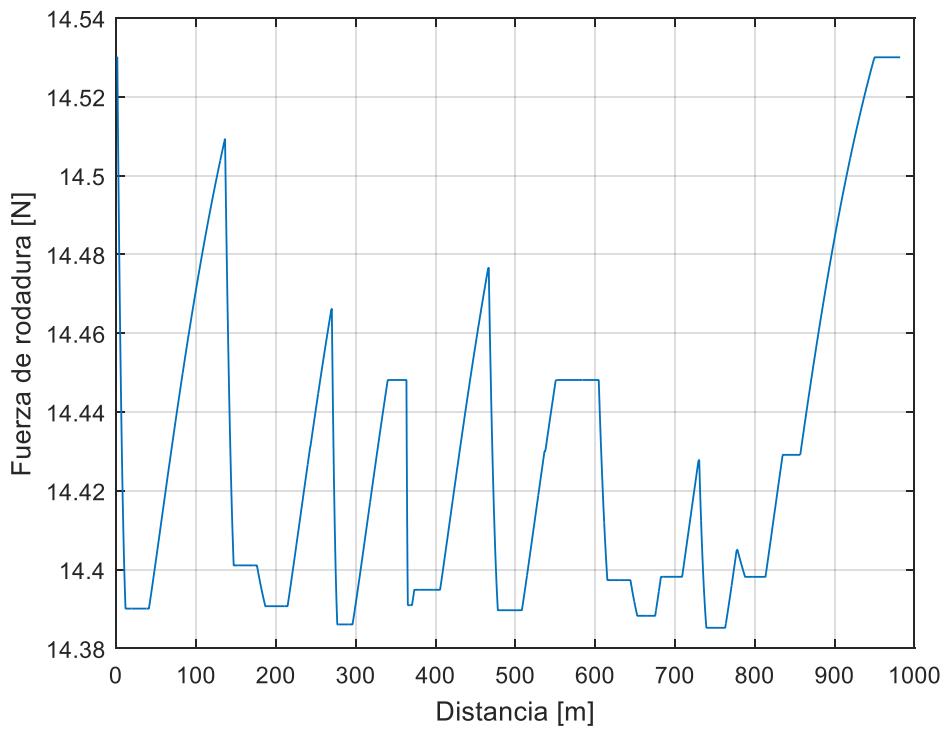


Ilustración 66:Fuerza de rodadura en una vuelta con la nueva relación de transmisión

IX. Pruebas

Después de terminar los trabajos necesarios, fue posible tener el vehículo en un estado completamente funcional. Así, se pudo hacer un día de pruebas en el kartódromo de Tocancipá. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

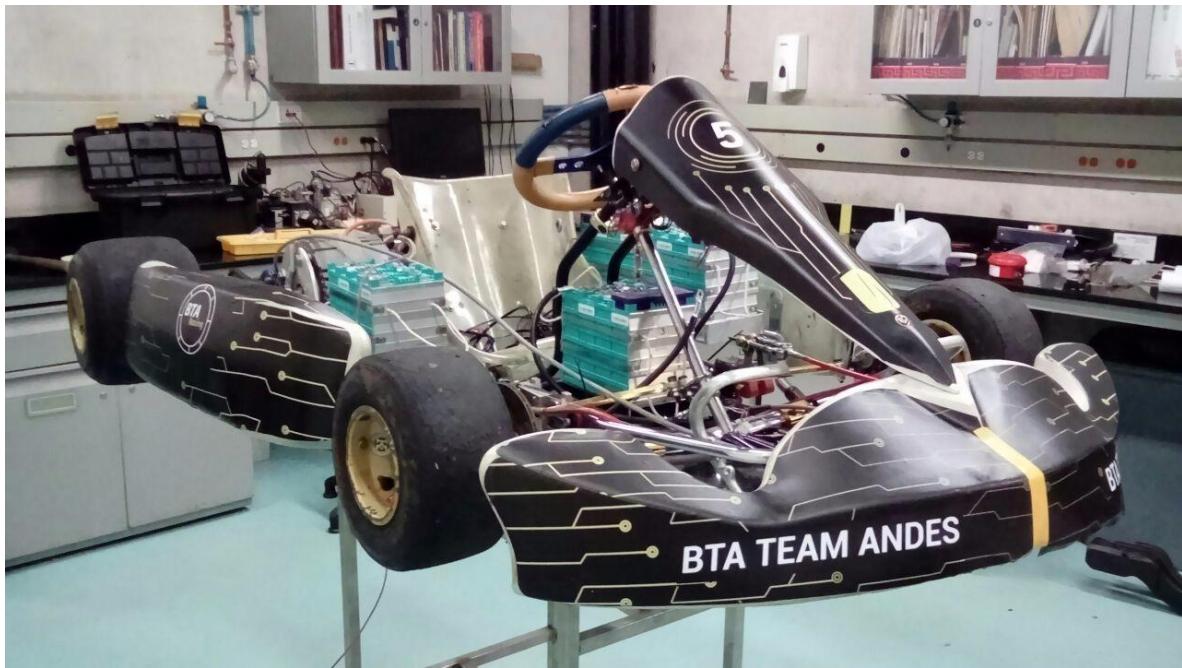


Ilustración 67: Vehículo completamente terminado y listo para ser probado

En primer lugar, se muestran los datos GPS de las vueltas. Es evidente el gran parecido con el circuito parametrizado en la sección de simulaciones. En esta instancia, se constata que los parámetros utilizados para simular el circuito virtualmente fueron correctos.

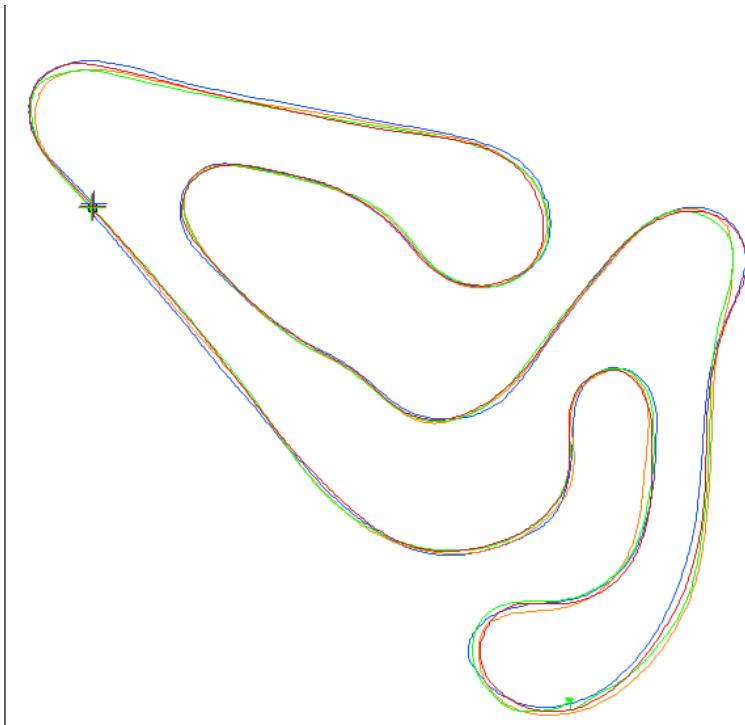


Ilustración 68: Información GPS del kartódromo de Tocancipá

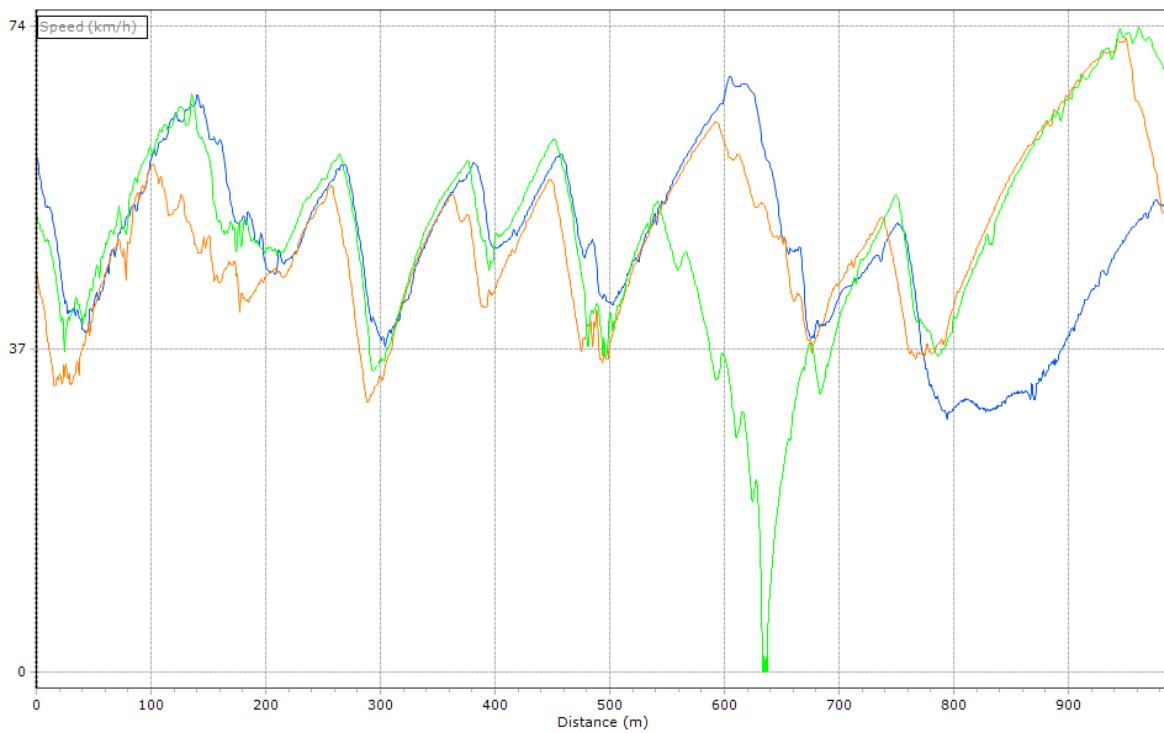


Ilustración 69: Vueltas iniciales de las pruebas

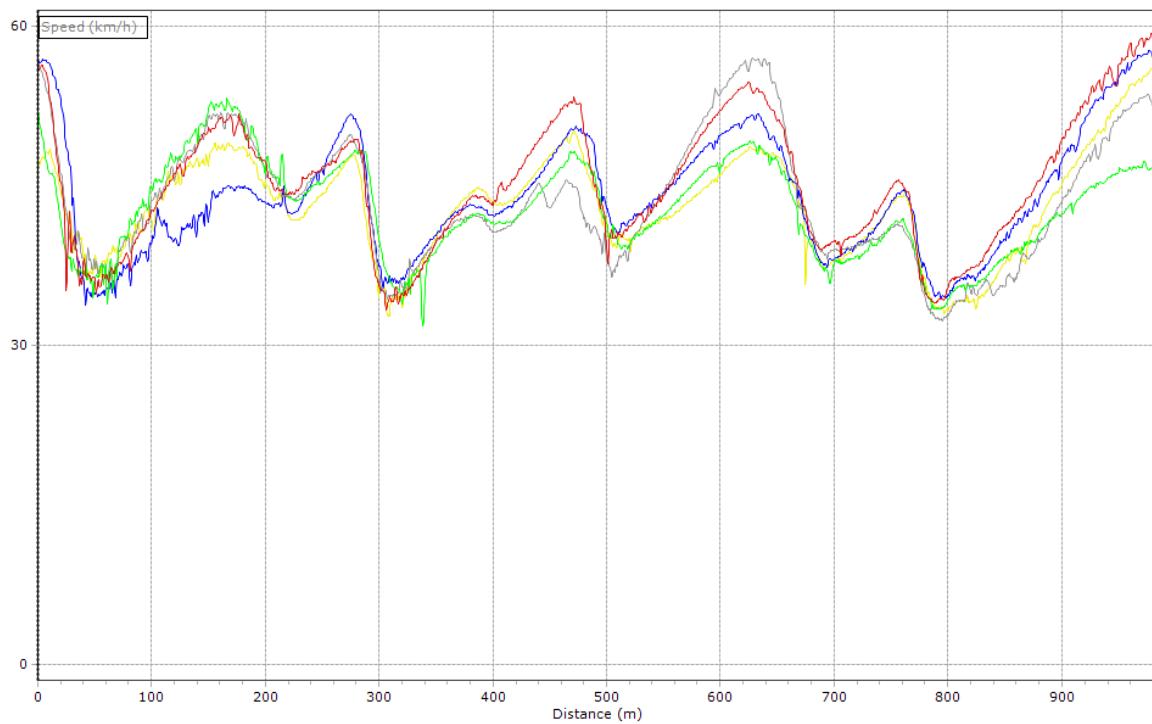


Ilustración 70: Vueltas posteriores de las pruebas

En estas pruebas se realizaron un total de 18 vueltas. El mejor tiempo de vuelta fue establecido justo en el primer giro cronometrado y fue de 01:13.77. En las pruebas existieron algunos problemas de conexiones que fueron rápidamente resueltos, y un inconveniente con el ajuste de una llanta que también fue resuelto sin mayores contratiempos.

El estado del vehículo después de las pruebas es exactamente igual al estado en el que las comenzó, y no existen daños ni desgastes significativos que requieran mantenimiento posterior.

X. Análisis de resultados

Como se pudo observar en las gráficas anteriores, existen comportamientos dinámicos que no llegan a ser del todo coherentes.

Después de la retroalimentación del piloto profesional que realizó las pruebas del vehículo, se determinó que el motor del kart entraba en algún tipo de modo en el que no entregaba toda la potencia disponible. Estas declaraciones fueron comprobadas por los datos obtenidos, ya que, en lugares como rectas, en donde el vehículo debía acelerar, su velocidad aparece limitada a valores muy bajos.

Después de investigación y análisis, se descubrió el que el inconveniente provino principalmente del controlador del motor. Este componente soporta una carga de trabajo muy alta y, al parecer, tiene una protección integrada contra la temperatura. Esta protección hace que, una vez superada una cierta temperatura, el controlador entre en un estado de baja potencia en el cual el motor eléctrico entrega sólo un porcentaje de la potencia que debería entregar. Esto es evidenciable en la comparación entre la Ilustración 69 y la Ilustración 70. Para facilidad de comparación, se expone una vuelta en cada uno de los modos. En esta gráfica, la línea naranja es del funcionamiento en modo normal, y la línea morada es del funcionamiento en modo protegido.

En la parte superior de la gráfica se expone la velocidad a lo largo de la distancia recorrida, mientras que en la parte inferior se encuentra la evolución de la diferencia de tiempos de las vueltas. Como se puede observar, existe una gran diferencia en el desempeño tanto en aceleración como en velocidad máxima, lo que causa la diferencia en el tiempo de vuelta de 8.758 segundos.

Es evidente que este problema que no había sido contemplado fue la gran limitante de las pruebas realizadas, pues permitió hacer únicamente una vuelta limpia, la primera.

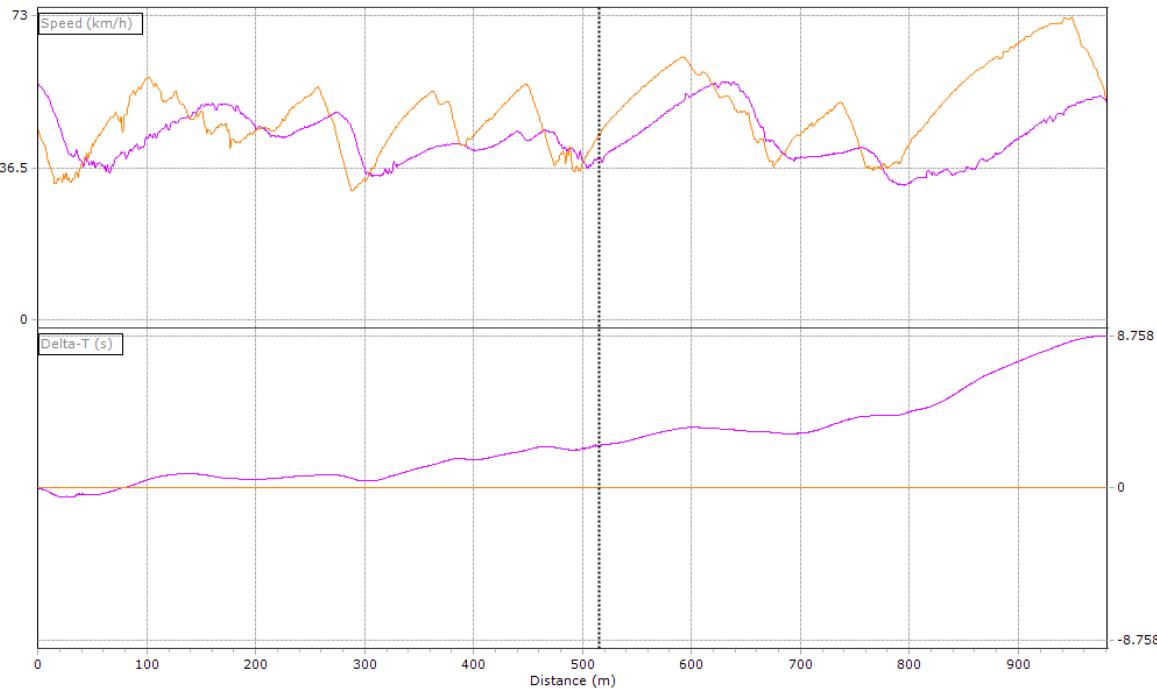


Ilustración 71: Diferencia entre el modo normal de operación (naranja) y el modo de protección (morado)

Ahora bien, dado que el objetivo principal de este proyecto era mejorar el rendimiento del vehículo, se compararon los datos obtenidos con los datos existentes de la anterior iteración.

En primer lugar, se observa una gran mejoría en una de las características que se deseaba optimizar: la velocidad máxima. Como se puede observar en gráficas anteriores, la velocidad máxima alcanzada por el vehículo fue de 73 km/h, tomando en cuenta que sólo fue marcada en la primera vuelta cronometrada, sin haber podido calentar las llantas ni permitir al piloto encontrar su balance de rendimiento.

En la gráfica siguiente se muestra la comparación entre esta primera vuelta de pruebas siendo la línea naranja (la más rápida de la sesión) y la mejor vuelta de los datos que se tenían anteriormente siendo la línea negra. Las diferencias más significativas se notan en la menor velocidad de curva actual, causada por el hecho de ser la primera vuelta, y la mucho más alta velocidad tope al final de la recta principal, resultante de los cambios de la configuración de la relación de transmisión.

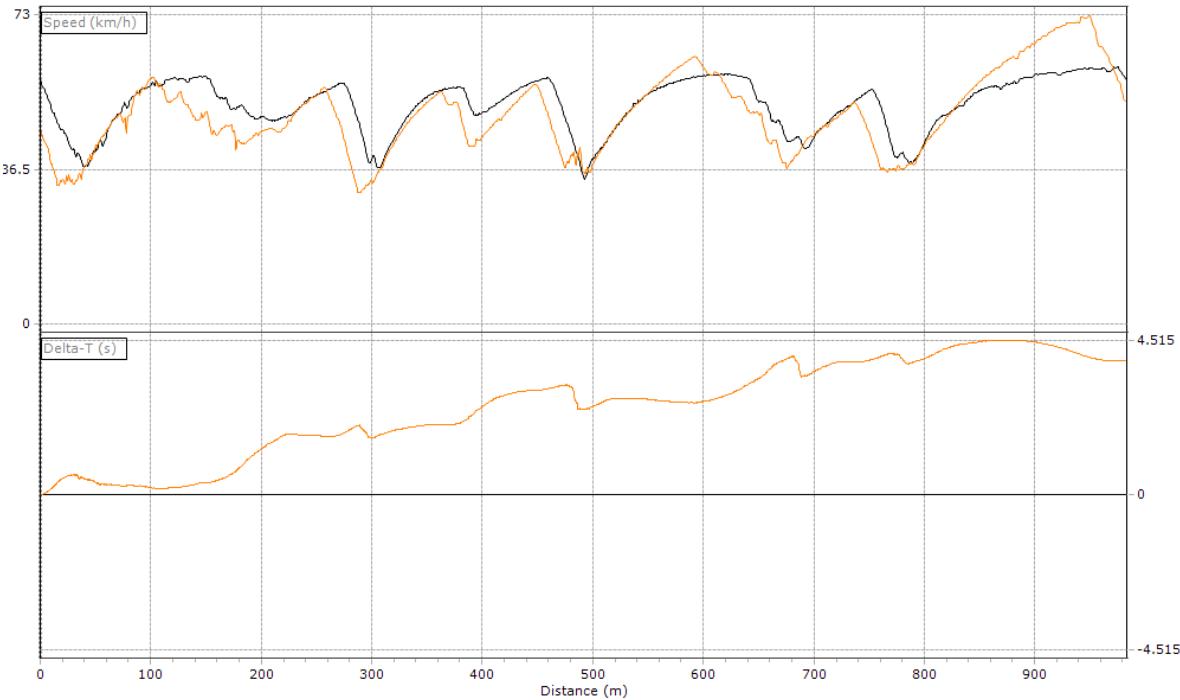


Ilustración 72: Comparación entre las vueltas más rápidas de la configuración anterior (negro) y la configuración actual (naranja)

La diferencia entre estas dos vueltas fue de 3.94 segundos, siendo más rápida la de la configuración anterior.

Información destacable es el hecho de que, en la recta principal, sección entre los 800 metros y el final de la vuelta, la nueva configuración permitió recortar casi un segundo entero a la vuelta más rápida de la configuración anterior.

La segunda vuelta de la sesión aportó mucha más información prometedora, ya que, habiendo tomado ritmo y temperatura de llantas, el piloto pudo aprovechar el nuevo rendimiento del vehículo al máximo. En la próxima gráfica se muestra la segunda vuelta de la sesión (color azul) contra la vuelta más rápida de la configuración anterior (color negro).

Lastimosamente, un inconveniente con el ajuste de una conexión de cables principales en el metro 630 del circuito obligó al vehículo a detenerse momentáneamente, lo que causó que no existiera un tiempo de vuelta real.

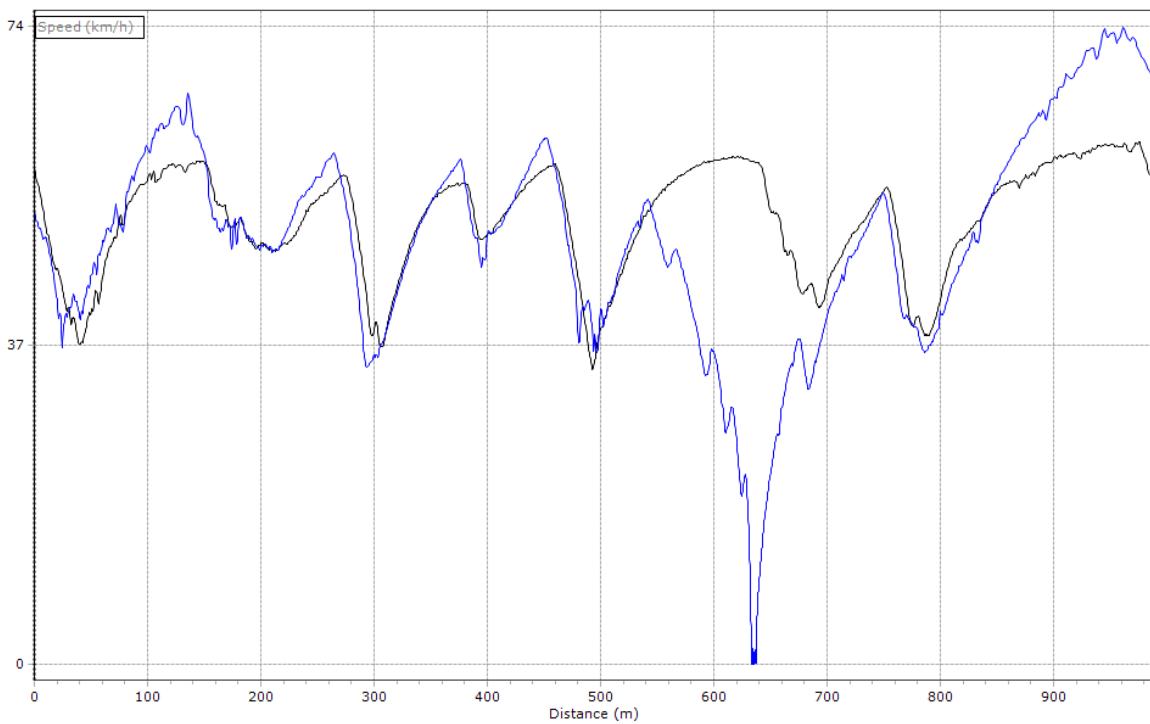


Ilustración 73: Segunda vuelta de la sesión (azul) y mejor vuelta de la configuración anterior (negro)

Es evidente que la nueva configuración aporta mejoras tanto en la aceleración como en la velocidad máxima del vehículo. Tramos como la aceleración en el metro 220, la aceleración en el metro 410, en el metro 500 y en el metro 700 muestran que la pendiente en la gráfica de velocidad de la configuración actual es más inclinada que en el caso de la configuración antigua. Esto demuestra que la aceleración de la configuración actual es mejor. Principalmente, esto puede deberse a la reorganización del peso para tener un centro de gravedad longitudinal más centrado, ya que esto permite que la aceleración en curva pueda ser mayor. Este es uno de los objetivos que se cumplió en el proyecto.

Adicionalmente, se puede observar que en tramos de rectas como el metro 100, el metro 250, el metro 370, el metro 450 y claramente el metro 900, la velocidad máxima del vehículo fue ampliamente mejorada. En todos estos tramos, la nueva configuración permitió al vehículo alcanzar velocidades mucho más altas que permiten mejorar el rendimiento competitivo. Esto es causa de la mejora en la relación de transmisión realizada, y cumple el objetivo del proyecto.

Por último, se muestra la última vuelta de la sesión en la que el vehículo estuvo en el modo normal de operación, la cual coincide con la vuelta inmediatamente posterior a la primera entrada a los pits.

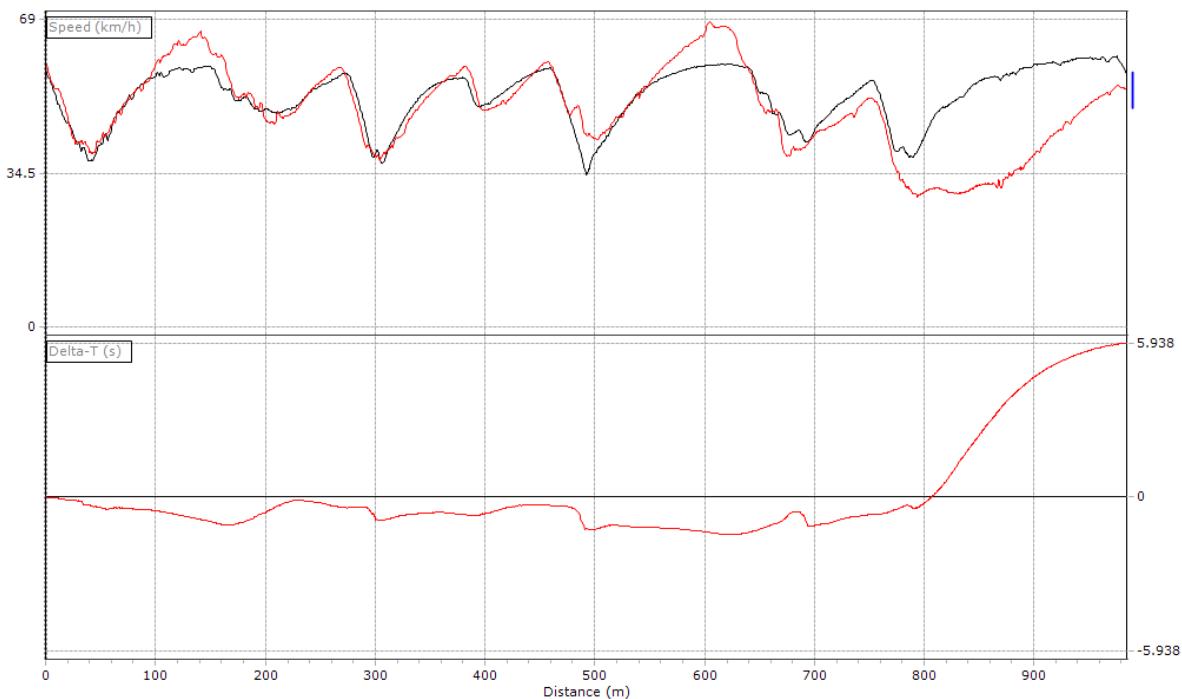


Ilustración 74: Última vuelta en la que el vehículo estuvo en modo normal (rojo) y mejor vuelta de la sesión anterior (negro)

Esta vuelta muestra que la nueva configuración del vehículo permitió una mejora real del rendimiento del mismo. Hasta el metro 650 de la vuelta, se muestra claramente que la nueva configuración estaba permitiendo una mejora en el tiempo de vuelta de unos 2 segundos, claramente visible en la parte inferior de la gráfica (Delta T). Esto, sumado a la ventaja que obtiene la nueva configuración en la recta principal, permite asumir que la nueva configuración puede lograr vueltas 5 segundos más rápidas que la configuración anterior, tomando en cuenta que esta información es de una vuelta con los neumáticos fríos.

Adicionalmente, en esta vuelta se ve claramente como entra el modo de protección de temperatura del controlador. A partir del metro 630, se ve claramente que la potencia entregada por el motor se disminuye drásticamente. Tanto la aceleración como la velocidad

máxima del vehículo se ven drásticamente afectadas desde este punto, haciendo que el performance definitivo del vehículo esté comprometido.

Todas las vueltas desde este punto en adelante fueron recorridas con la protección activada como se puede evidenciar en la Ilustración 70. El rendimiento del vehículo bajo esta condición es muy malo y por ende no es comparable para efectos de análisis.

Con los resultados obtenidos se puede ver claramente que el rendimiento del vehículo ha sido mejorado. Tanto el comportamiento en curva del vehículo como las prestaciones de aceleración y velocidad máxima han sido visiblemente optimizadas respecto a la primera iteración, por lo que el proyecto debe considerarse como exitoso. Sin embargo, el tema de la protección de temperatura fue un inconveniente mayor que no permitió tener datos de tiempo de vuelta consistentes y fiables, por lo que la comparación real y legítima con las simulaciones realizadas no puede llevarse a cabo. Es probable que los tiempos que se obtengan sin la protección de temperatura sean cercanos a los previstos por las simulaciones, pero esto es especulación hasta que el problema de temperatura pueda ser resuelto.

XI. Conclusiones

Con los parámetros básicos del vehículo fue posible crear un modelo que responde al desempeño real. Este modelo permitió evaluar diferentes soluciones y sus implicaciones en el rendimiento del vehículo.

Con datos GPS e imágenes satelitales se pudo recrear el kartódromo Juan Pablo Montoya de Tocancipá de manera virtual. Esto permitió tener un ambiente para evaluar las prestaciones del vehículo con las características precisas del circuito.

Las simulaciones permitieron escoger una nueva relación de transmisión para el tren de potencia del vehículo, la cual mejoró efectivamente la velocidad máxima en el circuito, sin afectar de ninguna manera la aceleración del vehículo.

La reorganización de las baterías permitió tener un centro de gravedad longitudinal más cercano al centro del vehículo, lo que mejoró la aceleración en curva del vehículo.

Se realizaron mejoras menores y mantenimiento general, lo cual dejó al vehículo completamente funcional y listo para ser probado.

Las mejoras implementadas en el vehículo mejoraron su desempeño general, validando la información de las simulaciones.

El tiempo de vuelta obtenido no fue un reflejo del desempeño real del vehículo debido a complicaciones no contempladas, por ende, no pudo ser comparado con los tiempos previstos en las simulaciones.

Para poder tener datos más fiables y hacer comparaciones directas con las simulaciones, se debe solucionar el problema de protección de temperatura del controlador.

XII. Trabajo Futuro

El trabajo futuro del vehículo tiene dos componentes principales. Los inconvenientes que se deben resolver para tener un correcto performance, y las características que deben ser investigadas para lograr mejores simulaciones.

Problemas a resolver

- El principal problema encontrado en las pruebas de rendimiento fue la protección de temperatura del controlador del motor. Este debe ser el primer paso en trabajos futuros pues el rendimiento del vehículo está completamente limitado por ello. En primero lugar, se debe investigar cuáles son las temperaturas en las que la operación se desarrolla de manera normal y también la manera en la que la protección funciona.
- Luego de tener la información completa sobre el trabajo de la protección de temperatura, es necesario diseñar un sistema que permita mantener la temperatura de operación de este componente en los límites indicados. Esto puede lograrse con algún tipo de intercambiador de calor que refrigerue el componente constantemente durante toda la operación del vehículo.
- Mejoras menores como el cambio de neumáticos por unos nuevos o aditamentos aerodinámicos pueden ayudar a mejorar un poco más el performance.

Investigación para simulación

- Es necesario tener la curva de torque y potencia del motor. Para ello, se necesita caracterizar el motor en un montaje controlado.
- Sería excelente poder obtener el valor del coeficiente de fricción de las llantas específicas del vehículo en temperatura de operación normal. Este valor es crucial para las simulaciones.
- Determinar positivamente los puntos normales de frenada y aceleración en cada curva e implementarlos a las simulaciones permitirían resultados más acertados.

- Valores que se asumieron como el coeficiente de drag, coeficientes de rodadura y constantes de rigidez podrían ser determinados para afinar un poco más los resultados de las simulaciones.
- El programa OptimumLab© puede ser utilizado para obtener muchos datos de interés, pero se deben tener valores fiables de la potencia y torque del motor para poder obtener resultados reales.

XIII. Bibliografía

- [1] Galeon, «Historia del Karting,» Galeón Hispavista, 2017. [En línea]. Available: http://kartingmotor.galeon.com/historia_karting.htm. [Último acceso: 13 Abril 2017].
- [2] Comission Internationale de Karting, «Our History,» Comission Internationale de Karting, 2017. [En línea]. Available: <http://www.cikfia.com/inside-cikfia/history/our-history.html>. [Último acceso: 13 Abril 2017].
- [3] D. Sperling, Future Drive: Electric vehicles ans sustainable transportation, Washington D.C.: Island Press, 1995.
- [4] Sustainable Mobility, «La historia del coche eléctrico: un largo proceso de desarrollo,» Diariomotor Tecmovía, 19 Julio 2011. [En línea]. Available: <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/07/19/la-historia-del-coche-electrico-un-largo-proceso-de-desarrollo/>. [Último acceso: 13 Abril 2017].
- [5] «EV1 - Behind the Scene,» EV1, 2016. [En línea]. Available: <http://www.ev1.org/>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [6] General Motors Corporation, «GM EV1 Specs,» 2001. [En línea]. Available: http://www.evchargernews.com/CD-A/gm_ev1_web_site/specs/specs_specs.htm. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [7] Formula 1, «Power unit and ERS,» 2017. [En línea]. Available: https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/Energy_Recovery_Systems.html. [Último acceso: 14 Abril 2017].

- [8] Jalopnik, «How Formula One's Amazing New Hybrid Turbo Engine Works,» 22 Enero 2014. [En línea]. Available: <http://jalopnik.com/how-formula-ones-amazing-new-hybrid-turbo-engine-works-1506450399>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [9] Renault Sport F1 Team, «R.S.17 technical specification,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.renaultsport.com/formula-1-rs17.html>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [10] FIA, «WEC World Endurance Championship,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.fiaawec.com/en/>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [11] FIA, «Formula E Technical Specifications,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.fia.com/fia-formula-e-championship-technical-regulations-2016-2017>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [12] Formula E, «The Formula E battery: Q&A with Craig Wilson,» FIA, 9 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.fiaformulae.com/en/news/2014/september/the-formula-e-battery-a-q-a-with-craig-wilson.aspx>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [13] S. Chowdhury, «Formula E: Does it have a future in a world dominated by F1?,» BBC Sport, 10 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.bbc.com/sport/motorsport/26482236>. [Último acceso: 14 Abril 2017].
- [14] CIK-FIA, «Karting Technical Regulation,» 17 Enero 2017. [En línea]. Available: http://www.cikfia.com/fileadmin/content/REGULATIONS/Technical/Technical%20Regulations/2017/Web_RT_2017.pdf. [Último acceso: 15 Abril 2017].
- [15] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
- [16] M. E. Biancolini, «Evaluation of Aerodynamic drag of go kart by means of coast down tes and CFD analysis,» *Vergata University*.

- [17] Gaadi-guide, «Understeer and Oversteer,» 2012. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/gaadiguide/technology/welcome-to-technical-section/understeer-and-oversteer>. [Último acceso: 18 Abril 2017].
- [18] R. G. Budynass y J. K. Nisbeth, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, New York: Mc Graw Hill, 2012.
- [19] Audi, «Audi Technology Portal,» [En línea]. Available: https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/transmission-technologies/s-tronic_en. [Último acceso: 7 Mayo 2017].
- [20] MotorPasion, «Caja de cambios automática CVT,» MotorPasion, [En línea]. Available: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/asi-funciona-una-caja-de-cambios-automatica-cvt>. [Último acceso: 7 Mayo 2017].
- [21] Honda, «Continous Variable Transmission (CVT),» 2014. [En línea]. Available: <https://www.honda.co.nz/technology/driving/cvt/>. [Último acceso: 7 Mayo 2017].
- [22] M. Córdoba Parra, *Diseño de un tren de potencia par aun kart eléctrico*, Bogotá: Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de los Andes, 2016.
- [23] F. Rivera Osorio, *Construcción, ensamblaje y caracterización de un kart eléctrico*, Bogotá: Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de los Andes, 2016.
- [24] Autódromo de Tocancipá, «Ficha Técnica del kartódromo Juan Pablo Montoya,» Autódromos S.A., 2017. [En línea]. Available: <https://www.autodromodetocancipa.com/autodromo/page/ficha-tecnica-kartodromo-juan-pablo-montoya/>. [Último acceso: 7 Mayo 2017].
- [25] IDEAM, «Datos metereológicos Bogotá,» 2017. [En línea]. Available: www.ideam.gov.co. [Último acceso: 7 Mayo 2017].

XIV. Anexos

Anexo 1: Performance

```
%% Recorrido y parámetros para diferentes relaciones de transmisión
dientes=linspace(68,22.6666,10);
ng=(dientes/20);
for pp=1:10
    vmaxima(pp)=204/ng(pp);
end
for ss=1:length(vmaxima)

%% Definición parámetros, interfaz y adquisición de la información
m=147;%Masa total (kg)
mu=0.85;%Coeficiente de fricción de las llantas
cgx=66;%Porcentaje en eje longitudinal del CG (%)
b=cgx;
cgy=50;%Porcentaje en eje lateral del CG (%)
g=9.78;%Aceleración de la gravedad (m/s^2)
L=1.03;%Longitud total de kart (m)
vmaxtot=vmaxima(ss)/3.6;%Velocidad máxima alcanzable (m/s)
W=m*g; %Peso del kart (N)
h=0.5; %Altura del CG de Kart (m)
rho=0.95; %Densidad del aire en Bogotá (kg/m^3)

%% Definición de la Pista y Velocidades base
%Crea una matriz que contiene la posición, el radio, los grados y la
%longitud de cada segmento de la pista
seg=1:length(Radio);
V=zeros(length(seg),2);
for i=1:length(seg)
    A(1,i)=i;
    A(2,i)=Radio(i);
    A(3,i)=Grados(i);
    A(4,i)=Longitud(i);
    if(Radio(i)==0) %Asigna la velocidad base a las rectas
        V(i,1)=vmaxtot;
        V(i,2)=vmaxtot;
    end
    if(Radio(i)~=0) %Asigna la velocidad base a las curvas
        [vprom,vmax]=curva(m,mu,cgx,cgy,Radio(i),g,L);
        V(i,1)=vprom; %Velocidad promedio en la curva
        V(i,2)=vmax; %Velocidad máxima en salida y entrada de curva
    end
    if(V(i,1)>vmaxtot) %Establece la velocidad máxima para curvas
        V(i,1)=vmaxtot;
    end
    if(V(i,2)>vmaxtot) %Establece la velocidad máxima para curvas
        V(i,2)=vmaxtot;
    end
end

%% Descomposición de los sectores por elementos finitos
n=100;
```

```

VR=zeros(length(seg),n); %Matriz de velocidades para cada segmento en
cada partición
VR(1,:)=V(1,2); %Asigna la velocidad máxima al punto de mayor velocidad
en la pista
for k=2:length(seg)
    VR(k,1)=VR(k-1,n); %Asigna la velocidad de salida del segmento
    anterior al primer punto del segmento
    if V(k,1)<=VR(k-1,n)%Discrimina únicamente a los segmentos de curva
        brake=linspace(VR(k-1,n),V(k,1),28);
        for s=2:29
            VR(k,s)=brake(s-1); %Asigna la velocidad en la zona de
            frenada
            [DA(k,s)]=drag(rho,VR(k,s-1)); %Calcula la fuerza de arrastre
            aerodinámico en la zona de frenado
            [RX(k,s)]=rolling(VR(k,s-1),W); %Calcula la fuerza de
            resistencia por rodadura en la zona de frenado
            Fx(k,s)=0; %Asigna la fuerza del motor en la zona de frenado
            ac(k,s)=(Fx(k,s)-RX(k,s)-DA(k,s))/(m); %Calcula la
            desaceleración del vehículo en la zona de frenado
        end
        for w=30:n
            [DA(k,w)]=drag(rho,VR(k,w-1)); %Calcula la fuerza de arrastre
            aerodinámico
            [RX(k,w)]=rolling(VR(k,w-1),W); %Calcula la fuerza de
            resistencia por rodadura
            [Fx(k,w),P(k,w),T(k,w)]=traccion(mu,W,b,L,h,g,VR(k,w-
            1),vmaxtot); %Calcula la fuerza del motor
            ac(k,w)=(Fx(k,w)-RX(k,w)-DA(k,w))/(m); %Calcula la
            aceleración del vehículo
            VR(k,w)=sqrt(((VR(k,w-1))^2)+(2*ac(k,w)*(Longitud(k)/n)));
            %Asigna la velocidad del vehículo
            if VR(k,w)>V(k,1)
                VR(k,w)=V(k,1); %Limita la velocidad máxima en curva
            end
        end
    end
    if V(k,1)>VR(k-1,n) %Discrimina únicamente a los sectores de recta
        for q=2:n
            [DA(k,q)]=drag(rho,VR(k,q-1)); %Calcula la fuerza de arrastre
            aerodinámico
            [RX(k,q)]=rolling(VR(k,q-1),W); %Calcula la fuerza de
            resistencia por rodadura
            [Fx(k,q),P(k,q),T(k,q)]=traccion(mu,W,b,L,h,g,VR(k,q-
            1),vmaxtot); %Calcula la fuerza del motor
            ac(k,q)=(Fx(k,q)-RX(k,q)-DA(k,q))/(m); %Calcula la
            aceleración del vehículo
            VR(k,q)=sqrt(((VR(k,q-1))^2)+(2*ac(k,q)*(Longitud(k)/n)));
            %Asigna la velocidad del vehículo
            if VR(k,q)>V(k,1) %Limita la velocidad máxima en recta
                VR(k,q)=V(k,1);
            end
        end
    end
end

%%Adaptación de los datos iniciales asumidos a los encontrados en los
%%sectores finales

```

```

VR(1,:)=VR(length(seg),n);
frenada=linspace(VR(length(seg),n),VR(3,1),28);
for qq=1:28
    VR(2,qq)=frenada(qq); %Modifica la velocidad en la primera frenada
    del circuito
end
for uu= 1:2
    for tt= 1:n
        [DA(uu,tt)]=drag(rho,VR(uu,tt)); %Modifica la fuerza de arrastre
        aerodinámica en la primera parte del circuito
        [RX(uu,tt)]=rolling(VR(uu,tt),W); %Modifica la fuerza de
        resistencia por rodadura en la primera parte del circuito
    end
end
P(1,:)=P(length(seg),n);
T(1,:)=T(length(seg),n);

for u=2:length(seg) %Asigna los nuevos valores finales de segmentos a los
primeros puntos de los segmentos siguientes
    DA(u,1)=DA(u-1,n);
    RX(u,1)=RX(u-1,n);
    P(u,1)=P(u-1,n);
    T(u,1)=T(u-1,n);
end
VTOT=sum(VR')/n;
for m=1:length(seg)
    t(m)=Longitud(m)/VTOT(m); %Encuentra tiempos parciales por segmentos
end
Tiempo(ss)=sum(t) %Encuentra tiempo total
for e=1:k
    for o=1:n %Crea un sólo vector para cada variable con los valores
totales de la vuelta
        Velocidad(((e-1)*100)+o),ss)=VR(e,o);
        Potencia(((e-1)*100)+o),ss)=P(e,o);
        Torque(((e-1)*100)+o),ss)=T(e,o);
        Drag(((e-1)*100)+o),ss)=DA(e,o);
        Rolling(((e-1)*100)+o),ss)=RX(e,o);
        Tinf(((e-1)*100)+o),ss)=t(e)/n;
    end
end
for e=2:k
    for o=1:n
        Aceleracion(((e-1)*100)+o)=(Velocidad(((e-1)*100)+o)-
        Velocidad(((e-1)*100)+o)-1))/(Tinf(((e-1)*100)+o)); %Crea un sólo
vector de aceleración
    end
end

for e=1:k
    for o=1:n
        X(((e-1)*100)+o),ss)=Longitud(e)/n; %Crea un sólo vector de
distancias
    end
end
for b=2:length(X)
    X(b,ss)=X(b,ss)+X(b-1,ss);
end

```

```
end
```

Anexo 2: Velocidad en curva

```
function [vprom,vmax]=curva(m,mu,cgx,cgy,r,g,l)
fn=m*g; %Fuerza normal del vehículo
x=(cgx/100)*l; %Ubicación del CG en eje x desde línea Datum
frF=mu*fn*((1-x)/l); %Fuerza lateral soportada por el eje delantero
frR=mu*fn*(x/l); %Fuerza lateral soportada por el eje trasero
vprom=sqrt((r*(frF+frR))/m);
vmax=vprom*1.5;

L=3.28*l; %Longitud de eje (ft)
G=32.2;
Cal=300; %Cornering Stiffness (lb)
K=(frF/Cal)-(frR/Cal); %Understeer Gradient (°/g)
vcrit1=sqrt(-57.3*L*G/K); %Velocidad crítica (ft)
vcrit=vcrit1/3.128;
if vprom>vcrit
    vprom=vcrit;
end
if vmax>vcrit
    vmax=vcrit;
end
end
```

Anexo 3: Tracción

```
function [Fx,P,T]=traccion(mu,W,b,L,h,g,v,vmaxtot)
[P,T]=potencia(v,vmaxtot);
Fx=P/(v);
Fxmax=traccionmax(mu,W,b,L,h);
if (Fx>Fxmax)
    Fx=Fxmax;
end
```

Anexo 4: Potencia

```
function [P,T]=potencia(v,vmaxtot)
omega=5000*v/vmaxtot;
if (omega>5000)
    omega=5000;
end
P=3.037*(-0.0000004564538677*omega^3)+(0.0001056995459*omega^2)+(1.53209191*omega)-1.895523696;
T=P/(omega^2*pi/60);
end
```

Anexo 5: Tracción máxima

```
function [FxMax]=traccionmax(mu,W,b,L,h)
```

```
FxMax=(mu*(W*b/L)) / (1 - ((h/L)*mu));  
End
```

Anexo 6: Drag

```
function [DA]=drag(rho,v)  
CD=0.804; %Coeficiente de Drag  
A=0.575; %Area frontal proyectada [m^2]  
DA=0.5*rho*(v^2)*CD*A;  
end
```

Anexo 7: Rodadura

```
function [RX]=rolling(v,W)  
fo=0.01; %Basic Coefficient  
fs=0.005; %Speed effect Coefficient  
fr=fo+(3.24*fs*(0.44704*v/100)^2.5); %Coeficiente de resistencia a la  
rodadura  
RX=fr*W;  
end
```