



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**MODELIZACIÓN DE LAS PÉRDIDAS
ENERGÉTICAS DE UN VEHÍCULO LIGERO DE
TRACCIÓN ELÉCTRICA**

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Aeroespacial

REALIZADO POR

José Joaquín García del Toro

TUTORIZADO POR

Francisco José Valero Chuliá

CURSO ACADÉMICO: 2019/2020

Agradecimientos

Con este Trabajo Final de Grado finaliza mi etapa universitaria y quiero agradecer a todos los profesores de la Universitat Politècnica de València, en especial a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID), que me han impartido clase y han compartido sus conocimientos conmigo para que llegase a ser el ingeniero que soñaba ser.

Quiero dar las gracias también a mi tutor, Francisco José Valero Chulià, por toda la ayuda prestada, su tiempo y dedicación, y por darme la oportunidad de realizar este trabajo.

Por último, quiero dar las gracias a todas las personas que han estado a mi lado: mi familia, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, y mis amigos, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

¡Va por todos vosotros!

Resumen

El análisis de la eficiencia de un mecanismo ha sido siempre una problemática muy tratada e investigada en el mundo del cálculo, de la física y de la ingeniería. Conocer el funcionamiento de un sistema y saber estimar cuál es su rendimiento son dos tareas fundamentales para tratar de averiguar dónde se producen las pérdidas energéticas, determinar su importancia y proponer mejoras en el dispositivo, tanto a nivel global como a nivel de componentes.

Los automóviles eléctricos aparecieron en la segunda mitad del siglo XIX, llegando a ser los primeros en producirse y comercializarse incluso antes que los vehículos con motor de combustión interna. Sin embargo, tras los grandes avances de la II Revolución Industrial, el uso de estos automóviles quedó prácticamente extinto y no sería hasta comienzos del presente siglo cuando el coche eléctrico se instaure como la gran alternativa ecológica a los combustibles derivados del petróleo.

En este trabajo final de grado, se muestra un detallado análisis de la eficiencia energética de un vehículo ligero de tracción eléctrica, así como el modelado de las diferentes pérdidas de potencia. A través de numerosos ensayos con diferentes trayectorias, se realizan mediciones de posición, cinemática y potencia de salida de las baterías. Posteriormente, se estima la potencia desarrollada por el vehículo en movimiento. Así, la diferencia entre ambas será la pérdida de potencia que sufre el móvil. Estas pérdidas se clasifican fundamentalmente en: rodadura, aerodinámicas, rendimiento del motor, transmisión eléctrica y transmisión mecánica.

Para el caso de las pérdidas en la rodadura, se propone un modelo cuadrático con la velocidad y el ángulo de deriva de los neumáticos; y para el modelo aerodinámico, se aproxima un coeficiente de resistencia para el vehículo. En el caso del rendimiento del motor y de las transmisiones, tras una búsqueda bibliográfica y mediante los ensayos realizados, se estima la eficiencia de estos procesos.

Por último, se compara la potencia perdida obtenida en esta modelización con la real. El orden de magnitud del error proporciona información de lo ajustado que está a la realidad este modelo de eficiencia energética. Finalmente, se determina su naturaleza; es decir, si está relacionado con alguna de las variables (cinemática, potencia de las baterías, etc.) o, por el contrario, si esta discrepancia parte de las mediciones realizadas en los ensayos.

Palabras clave: vehículo eléctrico, rendimiento, potencia, modelización, pérdidas

Abstract

The analysis of the efficiency of a mechanism has always been a highly treated and researched problem in the world of calculation, physics and engineering. Knowing how a system works and how to estimate its performance are two fundamental tasks to try to figure out where energy losses occur, determine its importance and propose improvements to the device, both at the global level and at the component one.

Electric cars appeared in the second half of the 19th century, becoming the first to be produced and marketed, even before vehicles with internal combustion engines. However, after the great advances of the Second Industrial Revolution, the use of these cars was virtually extinct, and would not be until the beginning of this century when the electric car was established as the great ecological alternative to petroleum-derived fuels.

This final grade work shows a detailed analysis of the energy efficiency of a light electric-traction vehicle, as well as modeling the different power losses. Through numerous tests with different trajectories, position, kinematic and battery output power measurements are performed. Subsequently, the power developed by the moving vehicle is estimated. Thus, the difference between the two powers will be the loss suffered by the car. These losses are mainly classified as: rolling, aerodynamics, engine performance, electrical transmission and mechanical transmission.

In the case of rolling losses, a quadratic model with the speed and drift angle of the tyres is proposed; and for the aerodynamic model, a resistance coefficient for the vehicle is approached. In the case of engine performance and transmissions, after a bibliographic search and through the tests carried out, the efficiency of these processes is estimated.

Finally, the lost power obtained in this modelling is compared with the real one. The order of magnitude of the error provides information on how tight this energy efficiency model is to reality. Finally, its nature is determined; that is, if it is related to any of the variables (kinematics, battery power, etc.) or, conversely, if this discrepancy is part of the measurements made in the tests.

Keywords: electric vehicle, performance, power, modeling, losses

Résumé

L'analyse de l'efficacité d'un mécanisme a toujours été un problème hautement traité et étudié dans le monde du calcul, de la physique et de l'ingénierie. Savoir comment fonctionne un système et estimer ses rendements sont deux tâches fondamentales pour essayer de déterminer où les pertes d'énergie se produisent, déterminer son importance et proposer des améliorations à l'appareil, à la fois au niveau local et au niveau des composants.

Les voitures électriques sont apparues dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, devenant les premières à être produites et commercialisées, avant même les véhicules avec des moteurs à combustion interne. Cependant, après les grandes avancées de la deuxième révolution industrielle, l'utilisation de ces voitures a été pratiquement éteinte, et ne serait pas jusqu'au début de ce siècle lorsque la voiture électrique a été établie comme la grande alternative écologique aux carburants dérivés du pétrole.

Ce travail de dernière année montre une analyse détaillée de l'efficacité énergétique d'un véhicule léger à traction électrique, ainsi que la modélisation des différentes pertes de puissance. Grâce à de nombreux tests avec différentes trajectoires, la position, la cinématique et les mesures de puissance de sortie de la batterie sont effectuées. Par la suite, la puissance développée par le véhicule en mouvement est estimée. Ainsi, la différence entre les deux sera la perte de puissance subie par le mobile. Ces pertes sont principalement classées comme: roulement, l'aérodynamique, le rendement du moteur, la transmission électrique et la transmission mécanique.

En cas de perte de roulis, un modèle quadratique avec la vitesse et l'angle de dérive des pneus est proposé; et pour le modèle aérodynamique, un coefficient de résistance pour le véhicule approche. Dans le cas des rendements et des transmissions du moteur, après une recherche bibliographique et à travers les essais effectués, l'efficacité de ces processus est estimée.

Enfin, la perte de puissance obtenue dans cette modélisation est comparée à la vraie. L'ordre de grandeur de l'erreur fournit des informations sur la façon dont ce modèle d'efficacité énergétique est proche de la réalité. Enfin, sa nature est déterminée; c'est-à-dire s'il est lié à l'une des variables (cinématique, puissance de la batterie, etc.) ou, inversement, si cet écart fait partie des mesures effectuées dans les essais.

Mots-clés: véhicule électrique, rendement, puissance, modélisation, pertes

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos	1
2.	Evolución histórica del vehículo eléctrico.....	2
2.1.	Inicios	2
2.1.1.	Época dorada	3
2.1.2.	Declive.....	4
2.1.3.	Renacimiento.....	4
2.2.	Estado del arte	5
2.2.1.	Estructura del vehículo eléctrico	7
2.2.1.1.	Baterías	8
2.2.1.2.	Motor eléctrico	11
2.2.1.3.	Inversor.....	13
2.3.	El futuro de la automoción eléctrica.....	14
3.	Tipos de pérdidas de potencia en automóviles.....	16
3.1.	Pérdidas en el motor eléctrico	16
3.1.1.	Independientes de la carga	16
3.1.2.	Dependientes de la carga.....	17
3.2.	Pérdidas en el inversor.....	18
3.3.	Pérdidas por rodadura y fricción del neumático.....	18
3.3.1.	Ángulo de deriva.....	20
3.4.	Pérdidas aerodinámicas	22
3.5.	Pérdidas en la transmisión mecánica	23
3.5.1.	Tren de engranajes	23
3.5.2.	Rodamientos	25
3.5.3.	Puente trasero rígido	26

3.6.	Pérdidas en el cableado	27
4.	Metodología	28
4.1.	Vehículo	28
4.2.	Ensayos.....	30
4.2.1.	Tipos de trayectoria	30
4.2.2.	Toma de datos.....	30
4.3.	Procedimiento analítico	31
4.3.1.	Consideraciones.....	31
4.3.2.	Fuerzas y balance de potencia	31
4.3.3.	Eficiencia del cableado, transmisión y motor.....	33
5.	Análisis de los resultados	35
5.1.	Trayectoria 1.....	35
5.1.1.	Posición y cinemática	35
5.1.2.	Balance de fuerzas y potencias.....	36
5.1.3.	Evaluación de pérdidas	37
5.1.4.	Análisis del error.....	39
5.2.	Trayectoria 2.....	41
5.2.1.	Posición y cinemática	41
5.2.2.	Balance de fuerzas y potencias.....	43
5.2.3.	Evaluación de pérdidas	44
5.2.4.	Análisis del error.....	46
5.3.	Trayectoria 3.....	48
5.3.1.	Posición y cinemática	48
5.3.2.	Balance de fuerzas y potencias.....	49
5.3.3.	Evaluación de pérdidas	50
5.3.4.	Análisis del error.....	52
5.4.	Trayectoria 4.....	54
5.4.1.	Posición y cinemática	54

5.4.2.	Balance de fuerzas y potencias	55
5.4.3.	Evaluación de pérdidas	56
5.4.4.	Análisis del error	58
5.5.	Trayectoria 5.....	60
5.5.1.	Posición y cinemática	60
5.5.2.	Balance de fuerzas y potencias	62
5.5.3.	Evaluación de pérdidas	63
5.5.4.	Análisis del error	65
5.6.	Trayectoria 6.....	66
5.6.1.	Posición y cinemática	66
5.6.2.	Balance de fuerzas y potencias	67
5.6.3.	Evaluación de pérdidas	69
5.6.4.	Análisis del error	71
5.7.	Trayectoria 7.....	72
5.7.1.	Posición y cinemática	72
5.7.2.	Balance de fuerzas y potencias	74
5.7.3.	Evaluación de pérdidas	75
5.7.4.	Análisis del error	77
6.	Conclusiones	79
7.	Futuros pasos	80
7.1.	Mejoras en la modelización de pérdidas	80
7.2.	Mejoras en la metodología de los ensayos.....	80
8.	Bibliografía.....	83

Índice de figuras

Figura 2.1: triciclo de Gustave Trouvé (izq.) y el Flocken Elektrowagen (dcha.) [1]	3
Figura 2.2: Oliver Fritchle y su “One Hundred Mile Fritchle” (1908). [2]	3
Figura 2.3: Nuevas matriculaciones de vehículos eléctricos en España 2008–2020. [3].....	5
Figura 2.4: Evolución de los puntos de recarga públicos en Europa 2008–2018. [3]	5
Figura 2.5: Evolución del precio de las baterías para vehículos eléctricos 2010–2030. [3].....	6
Figura 2.6: Vehículos eléctricos más vendidos en España en 2019. [3]	7
Figura 2.7: Tesla Model S (izq.) y Nissan Leaf (dcha.). [1]	7
Figura 2.8: Comparación de la estructura de un HEV, PHEV y BEV. [4].....	8
Figura 2.9: Par motor y potencia de un coche eléctrico y un Diésel. [7].....	12
Figura 2.10: Estructura de un vehículo con motor eléctrico y pila de hidrógeno. [5]	15
Figura 3.1: Curva de eficiencia típica de un inversor. [23].....	18
Figura 3.2: Esquema de la deriva de la rueda de un vehículo. [15]	20
Figura 3.3: Relación entre la deriva de la rueda y la fuerza lateral. [15].....	21
Figura 3.4: Esquema de fuerzas y momentos sobre un vehículo. [14].....	21
Figura 3.5: Engranaje cilíndrico recto (izq.) y engranaje cilíndrico helicoidal (dcha.). [18]	24
Figura 3.6: Engranaje cónico (izq.) y tornillo sin fin y corona (dcha.). [18].....	24
Figura 3.7: Rodamiento rígido de bolas (izq.) y rodamiento de rodillos (dcha.). [21]	25
Figura 3.8: Rodamiento de bolas de contacto angular. [22]	25
Figura 3.9: Esquema y despiece de un puente rígido. [22]	26
Figura 4.1: Frontal del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia]	28
Figura 4.2: Lateral del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia]	29
Figura 4.3: Parte trasera del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia].....	29
Figura 5.1.1: Trayectoria descrita en el ensayo 1. [Fuente propia]	35
Figura 5.1.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia].....	35
Figura 5.1.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia].....	36
Figura 5.1.4: Balance de fuerzas en el ensayo 1. [Fuente propia]	36
Figura 5.1.5: Potencia del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]	37
Figura 5.1.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]	38
Figura 5.1.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 1. [Fuente propia].....	39
Figura 5.1.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 1. [Fuente propia]	39
Figura 5.1.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 1. [Fuente propia]	40
Figura 5.1.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 1. [Fuente propia].....	40
Figura 5.1.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 1. [Fuente propia]	41
Figura 5.2.1: Trayectoria descrita en el ensayo 2. [Fuente propia]	42
Figura 5.2.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia].....	42
Figura 5.2.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia].....	43
Figura 5.2.4: Balance de fuerzas en el ensayo 2. [Fuente propia]	43

<i>Figura 5.2.5: Balance de potencias en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	44
<i>Figura 5.2.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	45
<i>Figura 5.2.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	45
<i>Figura 5.2.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	46
<i>Figura 5.2.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 2. [Fuente propia]</i>	46
<i>Figura 5.2.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	47
<i>Figura 5.2.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 2. [Fuente propia]</i>	47
<i>Figura 5.3.1: Trayectoria descrita en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	48
<i>Figura 5.3.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	48
<i>Figura 5.3.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	49
<i>Figura 5.3.4: Balance de fuerzas en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	49
<i>Figura 5.3.5: Balance de potencias en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	50
<i>Figura 5.3.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	51
<i>Figura 5.3.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	52
<i>Figura 5.3.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	52
<i>Figura 5.3.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 3. [Fuente propia]</i>	53
<i>Figura 5.3.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	53
<i>Figura 5.3.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 3. [Fuente propia]</i>	54
<i>Figura 5.4.1: Trayectoria descrita en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	54
<i>Figura 5.4.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	55
<i>Figura 5.4.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	55
<i>Figura 5.4.4: Balance de fuerzas en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	56
<i>Figura 5.4.5: Balance de potencias en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	56
<i>Figura 5.4.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	57
<i>Figura 5.4.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	57
<i>Figura 5.4.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	58
<i>Figura 5.4.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 4. [Fuente propia]</i>	58
<i>Figura 5.4.10: Comparación entre error y velocidad baja en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	59
<i>Figura 5.4.11: Comparación entre error y alta velocidad en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	59
<i>Figura 5.4.12: Comparación entre error y potencia en el ensayo 4. [Fuente propia]</i>	60
<i>Figura 5.5.1: Trayectoria descrita en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	61
<i>Figura 5.5.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	61
<i>Figura 5.5.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	61
<i>Figura 5.5.4: Balance de fuerzas en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	62
<i>Figura 5.5.5: Balance de potencias en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	62
<i>Figura 5.5.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	63
<i>Figura 5.5.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	64
<i>Figura 5.5.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	64
<i>Figura 5.5.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 5. [Fuente propia]</i>	65
<i>Figura 5.5.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	65

<i>Figura 5.5.11: Comparación entre error y batería en el ensayo 5. [Fuente propia]</i>	66
<i>Figura 5.6.1: Trayectoria descrita en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	66
<i>Figura 5.6.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	67
<i>Figura 5.6.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	67
<i>Figura 5.6.4: Balance de fuerzas en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	68
<i>Figura 5.6.5: Balance de potencias en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	68
<i>Figura 5.6.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	69
<i>Figura 5.6.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	70
<i>Figura 5.6.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	70
<i>Figura 5.6.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 6. [Fuente propia]</i>	71
<i>Figura 5.6.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	71
<i>Figura 5.6.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 6. [Fuente propia]</i>	72
<i>Figura 5.7.1: Trayectoria descrita en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	72
<i>Figura 5.7.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	73
<i>Figura 5.7.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	73
<i>Figura 5.7.4: Balance de fuerzas en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	74
<i>Figura 5.7.5: Balance de potencias en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	74
<i>Figura 5.7.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	75
<i>Figura 5.7.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	76
<i>Figura 5.7.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	76
<i>Figura 5.7.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 7. [Fuente propia]</i>	77
<i>Figura 5.7.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	78
<i>Figura 5.7.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 7. [Fuente propia]</i>	78
<i>Figura 7.1: VBOX de la empresa Racelogic. [4]</i>	82

Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa de los diferentes tipos de baterías. [6] 11

Tabla 2: Características del vehículo. [Fuente propia]..... 30

Tabla 3: Eficiencia estimada para el motor, cableado y transmisión. [Fuente propia] 33

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1: Resistencia de rodadura</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 2: Coeficiente de rodadura</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 3: Pérdida de potencia debida a la rodadura</i>	<i>20</i>
<i>Ecuación 4: Ángulo de deriva delantero y trasero</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 5: Resistencia aerodinámica.....</i>	<i>22</i>
<i>Ecuación 6: Potencia perdida debida a la resistencia aerodinámica.....</i>	<i>23</i>
<i>Ecuación 7: Potencia perdida debida al efecto Joule en el cableado.....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 8: Radio de giro de la curva.....</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 9: Velocidad de guiñada.....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 10: Ángulo de la trayectoria.....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 11: Superficie frontal del vehículo</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 12: Fuerza de movimiento del vehículo.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 13: Potencia de movimiento del vehículo.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 14: Potencia perdida del vehículo</i>	<i>33</i>

1. Introducción

1.1. Motivación

El presente trabajo final de grado ofrece la oportunidad de analizar la eficiencia de un vehículo, así como de sus diferentes componentes, una tarea tan fundamental como frecuente en el sector de la ingeniería.

Por otra parte, la necesidad de evolucionar hacia un modelo sostenible en los medios de transporte eleva el interés hacia la investigación de modelos más ecológicos. Un claro ejemplo de esto es el auge actual de los vehículos eléctricos.

Este trabajo es una prueba de los conocimientos adquiridos y las habilidades desarrolladas por el alumno en el Grado en Ingeniería Aeroespacial.

1.2. Objetivos

El principal alcance de este trabajo es modelizar las pérdidas energéticas que puede tener un vehículo de tracción eléctrica. A partir de los datos de potencia de salida de las baterías y de la potencia de movimiento del vehículo, se determinará la importancia de estas ineficiencias.

No obstante, la labor del ingeniero no queda aquí. Una vez extraídas, la siguiente meta es realizar un detallado estudio de estas y determinar cómo influyen en el conjunto. Esta parte es vital para analizar el correcto funcionamiento tanto del vehículo como de sus distintas partes, evitar futuros accidentes y proponer otros modelos más eficientes de los componentes.

Finalmente, como puede ocurrir en los ensayos experimentales, siempre cabe la posibilidad de que existan errores en las mediciones tomadas. Por tanto, otro de los objetivos del presente trabajo es plantear otros métodos de ensayo y de medición, con el fin de mejorar los datos extraídos y los resultados finales de la experimentación, de manera que tengan el mínimo error y se ajusten lo máximo posible a la realidad.

2. Evolución histórica del vehículo eléctrico

2.1. Inicios

En primera instancia, se puede pensar que el vehículo eléctrico es una modernidad. No obstante, este concepto ya surgió a finales del siglo XIX, durante los años 80. De hecho, fueron los primeros en desarrollarse, antes que el motor de combustión interna.

El primer automóvil eléctrico es atribuido a numerosos autores, de entre los que destacan el inventor húngaro Ányos Jedlik (1828), el herrero americano Thomas Davenport (1834), el profesor holandés Sibrandus Stratingh y su asistente Christopher Becker (1835), y el inventor escocés Robert Anderson (años 30, fecha incierta). Todos ellos diseñaron y construyeron sus modelos de motor y coche eléctrico de manera totalmente independiente.

No obstante, hasta la invención de la pila eléctrica por el francés Gaston Planté (1859) y su notable desarrollo por parte de Camille Alphonse Faure (1881), no se hizo viable la producción de estos automóviles. Fue ese mismo año cuando Gustave Trouvé probó su famoso triciclo, considerado el primer coche eléctrico del mundo (véase Figura 2.1 izquierda). Poco después, en 1884, preocupado por los efectos dañinos del humo y la contaminación de Londres, el inventor inglés Thomas Parker fundó la primera cadena productora de vehículos eléctricos en Wolverhampton, aunque la única documentación que así lo consta es una fotografía posterior a dicha fecha.

A pesar de los avances que realizaron Francia e Inglaterra, se considera al ingeniero alemán Andreas Flocken (1888) como el inventor del primer coche eléctrico “real”, el Flocken Electrowagen (véase Figura 2.1 derecha).

Otro hito histórico de este siglo lo realizó el piloto automovilístico belga Camille Jenatzy en 1899, cuando rompió por primera vez en la historia la barrera de los 100 km/h, alcanzando los 105.88 km/h. Este vehículo, con forma de torpedo, fue apodado el “Jamais Contente”.



Figura 2.1: triciclo de Gustave Trouvé (izq.) y el Flocken Elektrowagen (dcha.) [1]

2.1.1. Época dorada

Durante el principio del siglo XX, los vehículos eléctricos tuvieron su gran auge, sobre todo en Estados Unidos, donde llegaron a registrarse más de 30 mil automóviles. El más vendido fue el “*One Hundred Mile Fritchle*” (véase Figura 2.2). Las ventajas respecto a los vehículos de gasolina eran numerosas: no vibraba, el ruido era mínimo, el combustible inoloro y, sobre todo, su arranque era sencillo y no peligroso. Sin embargo, su velocidad y autonomía eran bastante limitadas, hasta un máximo de 65 km y por debajo de los 35 km/h, aunque la invención de la pila de hierro-níquel por Thomas Alva Edison (1910) albergaba algo de esperanza en este aspecto.



Figura 2.2: Oliver Fritchle y su “*One Hundred Mile Fritchle*” (1908). [2]

2.1.2. Declive

Simultáneamente a este auge, se gestaban numerosos factores que provocarían la gran caída posterior del vehículo eléctrico. Los más determinantes fueron: el diseño del silenciador por parte de los hermanos Reeves (1897), la invención del motor de arranque eléctrico por la compañía Detroit Motors (1912), la producción masiva en serie patentada por Henry Ford y el descubrimiento internacional de las grandes reservas de petróleo.

Todos estos acontecimientos impulsaron el desarrollo y abarataron los costes de los vehículos con motor de combustión interna, los que se conocen actualmente por el ciclo Diesel y el ciclo Otto (gasolina). Estos coches superaban las autonomías y velocidades de los automóviles eléctricos, haciendo desaparecer prácticamente a la industria competidora en la década de los 30. Esta quedó relegada únicamente a aplicaciones industriales, como elevadores, montacargas y, posteriormente, a los famosos carritos de golf.

2.1.3. Renacimiento

En la década de los 60, con el avance en las baterías de níquel–cadmio y derivadas del níquel, aparecieron numerosos nuevos conceptos de vehículo eléctrico, la mayoría propulsados por la famosa multinacional americana General Motors (GM). Sin embargo, ninguno de ellos tuvo la repercusión suficiente para comenzar la producción y se quedaron como meros prototipos.

No fue hasta los años 70 y principios de los 80, con la crisis del petróleo y con la aparición del *Lunar Roving Vehicle* (LRV) en la misión espacial Apollo 15, cuando se empezó a plantear nuevamente la vuelta al automóvil eléctrico, con el fin de no depender del petróleo extranjero.

Durante la década de los 90, grandes fabricantes como GM, Toyota, Chrysler, Ford y Honda lanzaron a la venta numerosos prototipos de automóviles: el Honda EV plus, el Toyota RAV4 o el GM EV1. A pesar de este gran lanzamiento y del nuevo interés en el transporte ecológico, el vehículo eléctrico no destacaba por su autonomía y rango de velocidad, además del tiempo de recarga de las baterías, por lo que quedaron fuera del mercado y relegados al transporte urbano o de corta distancia. Los automóviles convencionales seguían a la cabeza de la industria.

A pesar de ello, gracias a la invención y desarrollo de los transistores MOSFET (1959–69), los microprocesadores Intel (1971) y las baterías de ion–litio (años 80), los vehículos eléctricos dieron un salto notable de calidad en todos los aspectos con la entrada del siglo XXI, reduciendo sus precios y las pérdidas de potencia y aumentando la autonomía y la velocidad.

2.2. Estado del arte

Actualmente, la gran mayoría de fabricantes de automóviles apuestan por la transición al vehículo eléctrico y lanzan numerosos prototipos: el BMW i3, el Renault Zoe, el Tesla Model 3 o el Nissan Leaf, incluso marcas como Volkswagen lanzan modelos eléctricos de sus coches más vendidos, como el e–Golf o el Polo. Esta notable remodelación de la industria se ve reflejada en las estadísticas, como en las nuevas matriculaciones de turismos eléctricos (BEV) e híbridos (PHEV) en España o el incremento de puntos de recarga en Europa, como se puede apreciar en la Figura 2.3 y Figura 2.4, respectivamente.

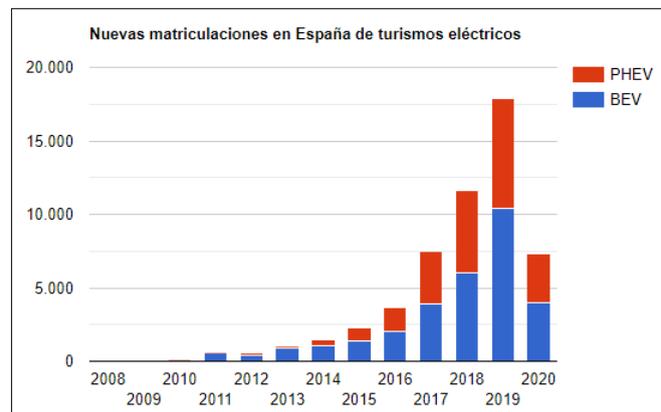


Figura 2.3: Nuevas matriculaciones de vehículos eléctricos en España 2008–2020. [3]

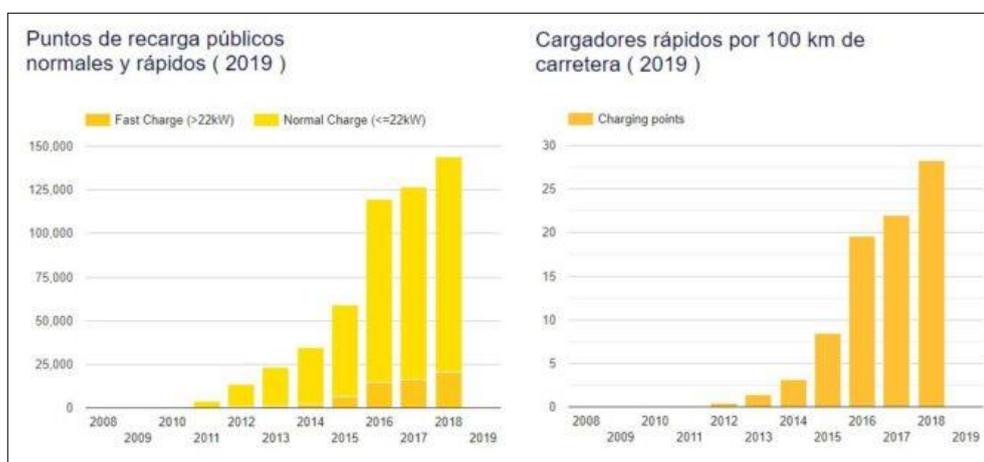


Figura 2.4: Evolución de los puntos de recarga públicos en Europa 2008–2018. [3]

No obstante, España sigue siendo uno de los países europeos pendientes de desarrollo en este aspecto. Por ejemplo, según la empresa Electromaps, Países Bajos lidera el ranking con 9.559 puntos, Francia le sigue con 8.585 y Alemania con 7.600. Para encontrar a España dentro de este ranking europeo, habría que remontarnos a la 19ª plaza, por detrás de países como Croacia, Malta o Portugal. Sin embargo, las grandes compañías eléctricas españolas, como son Iberdrola y Endesa, han lanzado sus proyectos para los próximos años de reforzar esta red de puntos de recarga e instalar 3 tipos de estaciones: de carga ultra rápida (350 kW) por cada 200 km, de carga súper rápida (150 kW) por cada 100 km y de carga rápida (50 kW) por cada 50 km. Con este nuevo Plan de Movilidad Sostenible, se prevé tener unos 150.000 puestos de uso público en las carreteras españolas.

Este gran auge en la movilidad eléctrica es debido a numerosos factores: la subida del precio del gasóleo y la gasolina, la necesidad de la independización del petróleo, pues los combustibles fósiles no son ilimitados y habrá que reservarlos para industrias de evolución más lenta, como la aviación; la importante protección medioambiental (reducción de emisiones, CO₂, etc.); la caída en el precio de las baterías, como se puede apreciar en la Figura 2.5, y las continuas mejoras en la potencia y autonomía de los vehículos eléctricos.

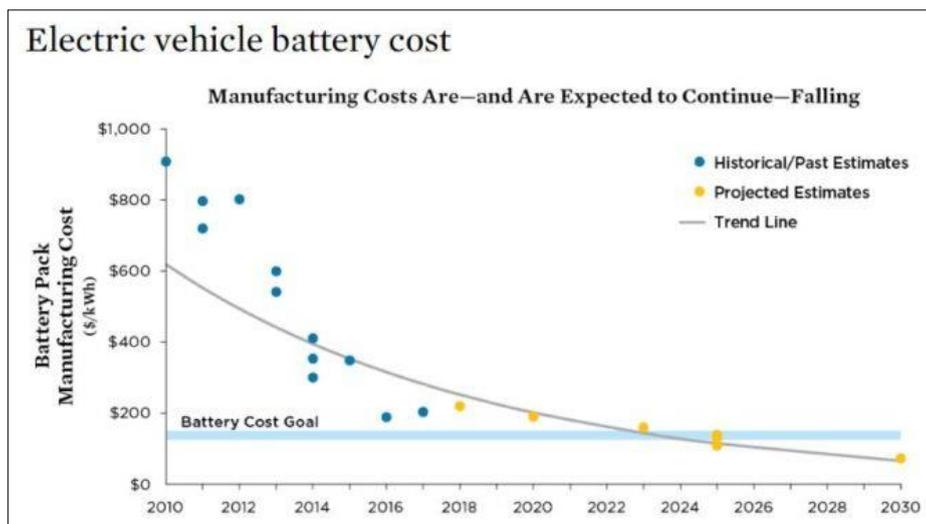


Figura 2.5: Evolución del precio de las baterías para vehículos eléctricos 2010–2030. [3]

En el año 2014, los vehículos eléctricos más vendidos en el mundo eran el Nissan Leaf (61.507), Tesla Model S (31.655), BMW i3 (16.052) y el Renault Zoe (11.323). En España, este ranking cambia ligeramente, apareciendo otros modelos como el Hyundai Kona, el Volkswagen e-Golf o los Smart.

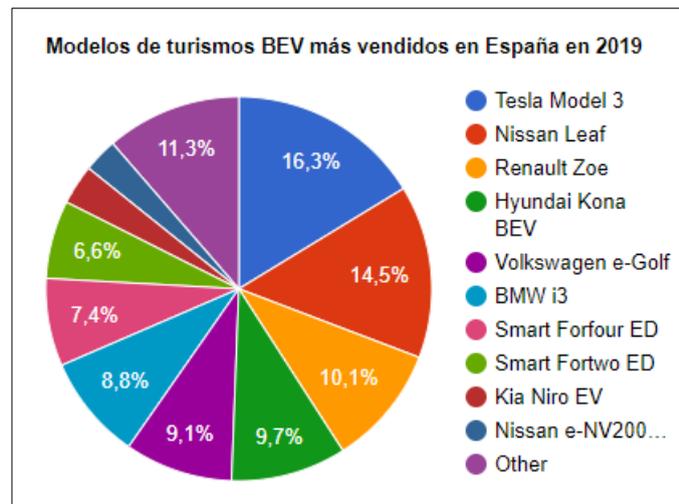


Figura 2.6: Vehículos eléctricos más vendidos en España en 2019. [3]

Esto cambió con la llegada del nuevo Tesla Model 3 en 2016, con el que la empresa registró un total de casi 400.000 reservas. Tales eran las expectativas que, en el año 2019, el Model 3 superó al Model S y se convirtió en el segundo vehículo eléctrico más vendido. A comienzos del presente año, se convirtió en el más vendido, superando al Nissan Leaf.



Figura 2.7: Tesla Model S (izq.) y Nissan Leaf (dcha.). [1]

2.2.1. Estructura del vehículo eléctrico

En la actualidad, la industria del automóvil cuenta con 3 grandes tipos de modelos eléctricos: los puros o por baterías (BEV), los híbridos (HEV) y los híbridos enchufables (PHEV). Los vehículos eléctricos puros están formados por baterías recargables mediante los puestos de recarga, mientras que los híbridos poseen también un motor de gasolina o gasoil. Dentro de esta clase, están los enchufables, que también poseen baterías recargables, y los híbridos estándar, que solo pueden recargarse mediante los frenos regenerativos y el motor eléctrico invertido.

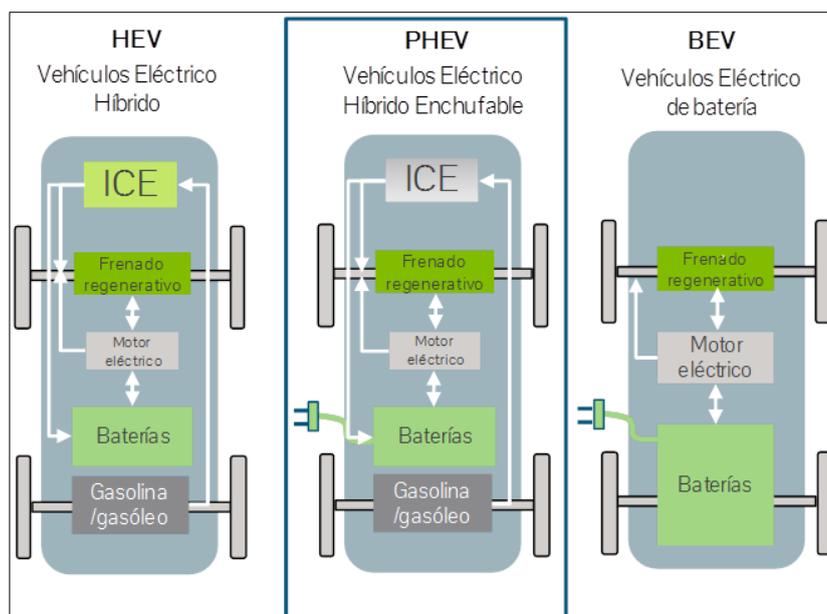


Figura 2.8: Comparación de la estructura de un HEV, PHEV y BEV. [4]

En general, cualquier coche eléctrico, sea híbrido o puro, está formado por: baterías, motor eléctrico, conversor DC/AC y sistema de frenado regenerativo. A continuación, se detallan un poco más cada una de estas partes.

2.2.1.1. Baterías

Las baterías de un vehículo eléctrico son un acumulador de la energía eléctrica producida mediante elementos electroquímicos. Es lo que determina la autonomía del automóvil, y en gran parte también su precio. La descarga se realiza por una reacción redox, mientras que para la carga se invierte la polaridad. El rendimiento de una batería es próximo al 100%. Los parámetros más importantes en una batería:

- Energía específica (Wh/kg): energía que puede suministrar una batería por cada kilogramo de ella. Mayor energía equivale a mayor autonomía y menor peso.
- Potencia (W/kg): capacidad de proporcionar potencia en la descarga. Mayor potencia, mejores prestaciones.
- Eficiencia (%): rendimiento de la batería, energía aprovechada.
- Coste: a mayor energía específica y mayor potencia, tendrá mayores prestaciones y mayor

autonomía, por lo que será más costosa.

- Ciclo de vida: se definen normalmente como ciclos de carga y descarga completos.
- Velocidad de recarga: tiempo que tarda en cargarse la batería completamente.

El principal objetivo hoy día es desarrollar una batería pequeña, de gran potencia y capacidad de almacenamiento, y fácilmente reciclables. Actualmente, existen numerosos tipos de baterías. Las más utilizadas son:

- Pb-ácido: la más utilizada y antigua, pues fue inventada en el siglo XIX. Ideal para vehículos pequeños, por su bajo coste y facilidad en el arranque, y eran muy usadas también para la iluminación y soporte eléctrico del vehículo. Sin embargo, estas baterías son bastante pesadas y lentas en la recarga, y junto con la toxicidad del plomo, hicieron que estas baterías se dejasen de lado.
- Ni-Cd: estas baterías tienen un gran rendimiento a bajas temperaturas, y están más orientadas a aviones, helicópteros o vehículos militares. Son más ligeras y duraderas que las de plomo y ácido; sin embargo, poseen efecto memoria (van perdiendo capacidad en cada recarga).
- NiMH: similares a las Ni-Cd, con un ánodo de NiOOH y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Son menos agresivas con el medio ambiente, reducen el efecto memoria y tienen mejor capacidad. Sin embargo, necesitan un constante mantenimiento, se deterioran a altas temperaturas y corrientes, generan demasiado calor y tienen una lenta recarga.
- Ion-Li (LiCoO₂): formada por un electrolito de sal de litio y electrodos de litio, cobalto y óxido. Es la mejor alternativa actual para los vehículos eléctricos. La principal ventaja es su alta energía específica (100–265 Wh/kg, el doble que una batería de Ni-Cd con 1/3 del tamaño). Además, también son altamente eficientes (80–90%), no tienen efecto memoria, no necesitan mantenimiento y son fácilmente reciclables. Sin embargo, estas baterías pueden explotar por sobrecalentamiento (aunque es bastante improbable que esto suceda, en caso de accidente sí es un factor a tener en cuenta) y necesitan almacenarse parcialmente cargadas y en ambiente frío para no perder mucha capacidad de recarga.

- LiFePO₄: variación de la batería ion-Li, cambiando el cobalto por el fosfato férrico (III). Por un lado, son más estables y seguras en su uso, y tienen mayor ciclo de vida y potencia. Sin embargo, tienen menor energía específica para su alto coste.
- Polímero de Li: otra variación de la batería ion-Li, aunque menos desarrollada. Tienen mayor energía específica y potencia, son más ligeras, eficientes y no tienen efecto memoria. No obstante, su mayor contra es su bajo ciclo de vida (aproximadamente 1'5 años), además de su alto coste y bajo desarrollo.
- ZEBRA: también llamada de sal fundida. Trabajan a 250°C, con un electrolito de cloroaluminato de sodio (NaAlCl₄). Tiene una gran energía específica y el mejor ciclo de vida de todas. Sin embargo, ocupan mucho espacio, su potencia es baja y el electrolito se solidifica, por lo que necesita un tiempo de fundición (2 días) para aprovechar la carga y alcanzar la temperatura óptima de funcionamiento.
- Al-aire: más que una batería, son unas “pilas de combustible”, ya que se sustituyen los electrodos de metal gastados por unos nuevos. Actualmente, se encuentran en fase experimental, aunque tienen un gran potencial. Teóricamente, su capacidad de almacenamiento podría ser de 10 veces una batería de ion-Li del mismo tamaño y tendría la mayor energía específica de todas las baterías. Sin embargo, durante su fase experimental, los científicos están encontrando problemas en la recarga y fiabilidad.
- Zn-aire: también se encuentran en fase experimental, aunque más avanzada que las pilas de Al-aire. Necesitan O₂ del ambiente para generar corriente. Poseen una alta potencia, fiabilidad y gran capacidad (3 veces una batería de ion-Li, con el mismo volumen y mitad de coste). Sin embargo, estas baterías no suelen ser recargables y, cuando lo son, requieren electrodos de platino o iridio, los cuales se degradan rápidamente.

A modo de resumen, en la Tabla 1 aparecen los distintos parámetros para cada una de estas baterías:

	Pb- Ácido	Ni- Cd	Ni- MH	ion- Li	Li- FePO4	Li- Pol	ZEBRA	Al-aire	Zn-aire
Energía específ (Wh/kg)	33- 42	40- 70	60- 120	100- 265	90- 110	130- 200	90	1300 (teórico 6000- 8000)	470 (teórico 1370)
Potencia específ (W/kg)	180	150	250- 1000	250- 340	> 300	10000	155	200	100
Ciclos de carga	500- 800	2000	500- 2000	400- 1200	2000- 7000	>1000	3000	(Por determinar)	(Por determinar)
Eficiencia	50- 95%	70- 90%	70%	80- 90%	90%	99.8%	92.5%	(Por determinar)	(Por determinar)

Tabla 1: Comparativa de los diferentes tipos de baterías. [6]

2.2.1.2. Motor eléctrico

El motor eléctrico es el encargado de convertir la energía eléctrica procedente de las baterías en energía mecánica, esta se distribuye a los ejes trasero y delantero y determina el movimiento del vehículo. Además, en numerosas ocasiones, este motor eléctrico puede invertirse y funcionar como un generador de energía eléctrica. El ejemplo más claro es el frenado regenerativo: cuando el automóvil deja de acelerar y/o comienza a frenar, parte de la energía mecánica pasa por el motor transformándose nuevamente en energía eléctrica y esta se almacena en las baterías, de manera que se recargan "solos" estando el vehículo en marcha.

Durante estas transformaciones, se pierde una determinada cantidad de energía. La eficiencia del motor eléctrico es la relación entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica), y suele rondar entre el 75% y el 95%. La salida se calcula en base al par y la velocidad requerida (es decir, la potencia requerida para mover el objeto conectado al motor) y la entrada en base al voltaje y la corriente suministrados al motor.

En comparación con un motor de combustión interna, cuyo rendimiento suele estar en torno al 25%, se aprecia una clara diferencia en favor del motor eléctrico. En la Figura 2.9, se puede ver una comparativa de la potencia y el par motor de un Nissan Leaf (eléctrico puro) y un Nissan Qashqai 1.6 (Diésel), con la misma potencia máxima.

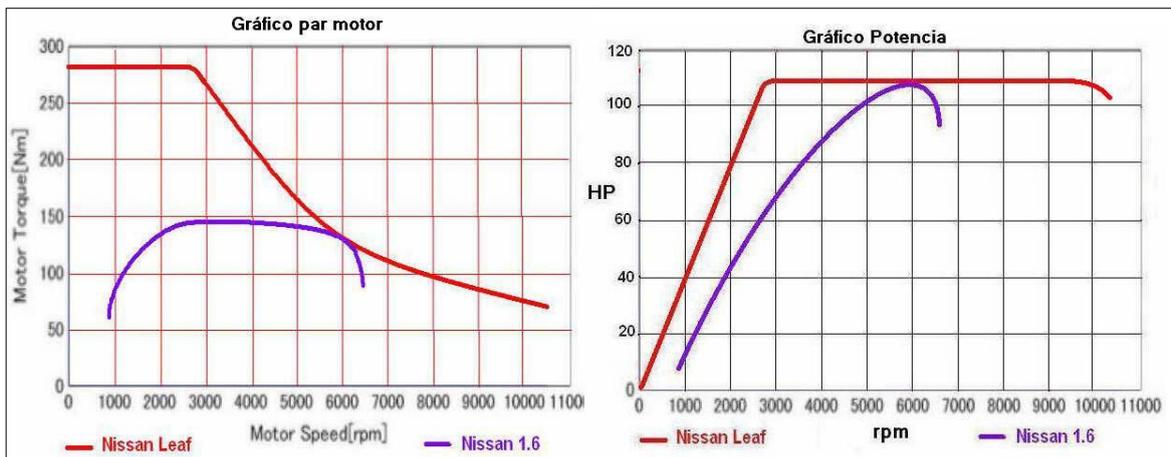


Figura 2.9: Par motor y potencia de un coche eléctrico y un Diésel. [7]

Como se puede apreciar, el par inicial del vehículo eléctrico es estable en el arranque y la aceleración, mientras que la potencia crece linealmente. Esto se traduce en la gran suavidad que se tiene en la conducción y el arranque con un motor eléctrico frente a uno de combustión interna. Esto hace también que la gran mayoría de vehículos eléctricos no tengan marchas y sean automáticos, reduciendo también la fatiga del conductor en cuanto al juego de pies con el embrague y el brazo derecho con las marchas.

Por último, cabe señalar los distintos tipos de motores eléctricos que existen actualmente y que son utilizados en vehículos. Los principales son:

- Asíncronos o de inducción: son los más antiguos (finales del siglo XIX) y más utilizados en la industria (aproximadamente el 80% de los motores eléctricos son de este tipo), por su robustez, escaso mantenimiento y bajo coste. Se compone de un estator, un rotor y un entrehierro, y actualmente van acompañados de un convertidor electrónico. Estos motores son los más usados en los vehículos eléctricos puros, como lo son el Tesla Roadster y el Tesla Model S.
- Síncronos de imanes permanentes (PMSM): convencionalmente, estos motores se han utilizado en aplicaciones de generación eléctrica, pero cada día se usan más como motor debido a su mayor densidad de potencia y mejor rendimiento (aproximadamente un 10%) que un motor asíncrono. Además, la utilización de imanes permanentes de alta energía reduce considerablemente su volumen (hasta un 30% más pequeños). En función de dónde se encuentren estos imanes, será un motor síncrono de imanes superficiales o de imanes interiores. Este tipo de motor se puede encontrar en el Toyota Prius (híbrido) o el Peugeot iOn.

- De flujo axial: estos motores son un tipo de PMSM, pero son integrados directamente en las ruedas del vehículo, de manera que se simplifica la transmisión entre estas y el motor y se optimiza el espacio del automóvil. El secreto de estos motores es el mayor aprovechamiento del cobre, de manera que la energía aprovechada proveniente de la batería tiene una eficiencia superior al 90%. Tienen una gran densidad de potencia, por lo que, con muy poco peso, son capaces de generar una elevada potencia. Sin embargo, los esfuerzos radiales son muy notables en estos motores y están pendientes de desarrollo.
- De reluctancia conmutada: es de tipo paso a paso y se basa en la reluctancia (oposición al flujo magnético) variable mediante un rotor, que tiende a alinearse con las bobinas del estator. Es ideal por su elevado par, robustez y sencilla fabricación. No obstante, el factor de potencia resultante es bajo y se necesitaría un sistema de detección de posición del rotor.
- De corriente continua sin escobillas (*brushless DC*): es un tipo de motor síncrono, similar al PMSM. Los imanes se alojan en el rotor y las bobinas en el estator, y al no llevar escobillas, la conmutación se realiza de manera electrónica y generan menos calor. Su funcionamiento es sencillo, alimentando de manera secuencial cada fase del estator sincronizadamente con el movimiento del rotor, y llegan a rendimientos cercanos al 90%. Aunque la alimentación en DC simplifica su electrónica, ya que no necesitan un convertor DC/AC, y tienen un sencillo mantenimiento, se necesitaría un sistema para detectar la posición del rotor. Actualmente, son más caros de fabricar que sus equivalentes con escobillas. Estos motores son la opción más utilizada en los vehículos híbridos, como el Honda Insight, y los expertos confían en que esto se extienda también a los eléctricos puros.

2.2.1.3. Inversor

Dado que la gran mayoría de motores en los vehículos eléctricos actuales trabajan con corriente alterna (AC) y que la corriente procedente de las baterías es continua o directa (DC), es necesario un intermediario entre ambos dispositivos: el inversor o convertor DC/AC. Dada su principal labor, la posición ideal del inversor sería lo más cercano posible del motor y las baterías para acortar

el cableado, de manera que se minimizase este peso extra y las posibles pérdidas en la distribución.

Existen dos principales categorías: por un lado, en función de los requerimientos de corriente de salida, un inversor puede ser monofásico o trifásico; y por otro, según su estructura, pueden ser analógicos o digitales. Dentro de esta última tipología, los analógicos son los más simples, pues solo consisten en una bobina que genera un campo magnético y un interruptor que corta la corriente y colapsa el campo, generando una onda pulsante variable en el tiempo y que induce corriente a su vez. Los digitales son algo más complejos, pues incluye un transistor que genera una onda rectangular y posteriormente un transformador, que aproxima su forma a una onda senoidal y produce la tensión de salida deseada.

Además, este componente posee su propia placa base. Así, el inversor gestiona la transmisión de la energía del motor a los ejes. Esta tecnología es muy importante sobre todo en la automovilística, como en las competiciones de Fórmula E. Gracias a estas categorías de deporte, se producen numerosos avances en todos los componentes del vehículo, tanto en baterías como motor o inversores, que favorecen al gran desarrollo de la automoción eléctrica.

2.3. El futuro de la automoción eléctrica

Tal y como numerosos expertos y fabricantes de turismos han afirmado, el futuro de los automóviles eléctricos pasa por el desarrollo del motor o pila de hidrógeno. En esta, el hidrógeno reacciona con el oxígeno del ambiente en un proceso llamado electrólisis inversa, en el cual se produce una gran cantidad de energía eléctrica, y como residuos, calor y agua. Por tanto, la única emisión que se liberaría al ambiente por el tubo de escape sería vapor de agua.

Respecto a las baterías actuales de los vehículos eléctricos, las pilas de hidrógeno poseen 3 grandes ventajas: la primera es el tiempo de recarga, ya que el depósito de hidrógeno es capaz de llenarse por completo en apenas 5 minutos, frente a los 30 minutos o varias horas que tardan las baterías actuales; en segundo lugar, la autonomía de una pila de hidrógeno es mayor (en torno a 500 km), aunque los vehículos de hoy día también sean capaces de lograr dicho alcance, necesitan grandes baterías, lo que aumenta el peso del vehículo y los tiempos de recarga; y por último, esta autonomía es independiente de la temperatura ambiente, por lo que tendrán la misma eficiencia tanto en invierno como en verano.

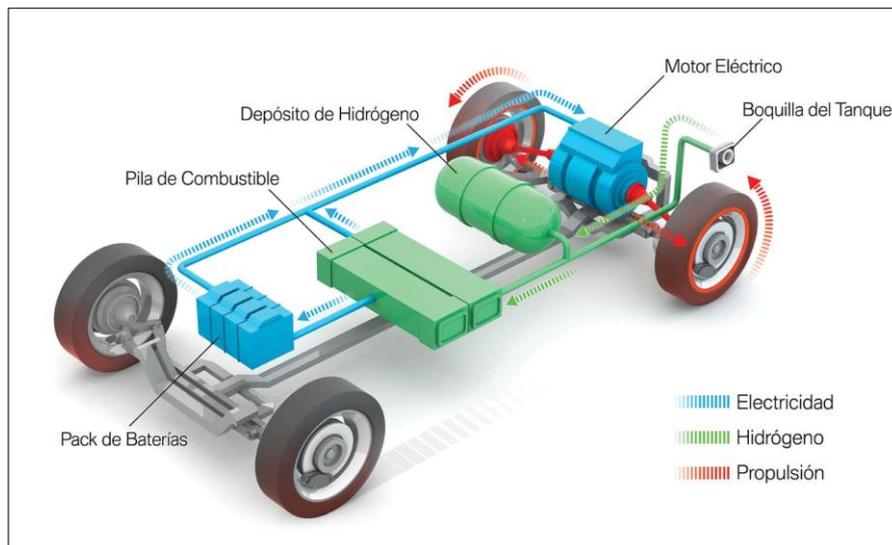


Figura 2.10: Estructura de un vehículo con motor eléctrico y pila de hidrógeno. [5]

Sin embargo, a pesar del gran potencial que tiene el motor de hidrógeno, es una alternativa pendiente de desarrollo. Aunque existen modelos disponibles a la venta en el mercado asiático, norteamericano y europeo, como el Hyundai Nexó o el Toyota Mirai, el principal problema es la gran escasez de puestos de repostaje. En España concretamente, solo existen actualmente 3 puestos de recarga activos (llamados hidrogeneras) en todo el territorio, situados en Albacete, Puertollano (Ciudad Real) y Huesca. Grandes capitales, como Valencia o Barcelona, no poseen en estos momentos de ninguna hidrogenera, y otras como Sevilla o Madrid se encuentran en construcción o inactivas. En otros países, como Alemania o EE. UU., no superan las 100 estaciones que posee, por ejemplo, Japón. Además, aún existe una baja demanda, por lo que los fabricantes no están interesados todavía en hacer una producción masiva de estos vehículos.

3. Tipos de pérdidas de potencia en automóviles

Considerando un vehículo como una máquina o conjunto de mecanismos, esta tendrá un rendimiento global, que será función de la potencia otorgada y la que desarrolla finalmente el coche. La relación entre estas dos variables es lo que se denomina eficiencia energética o rendimiento, y este parámetro determina las pérdidas en los diferentes procesos que ocurren dentro del vehículo.

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, para un automóvil eléctrico, la potencia de entrada la proporcionan las baterías, en forma de voltaje. A través del cableado, la batería transfiere este voltaje al inversor, que es el encargado de convertir la corriente DC procedente de las baterías en corriente AC con la que funciona el motor eléctrico. Dentro de este, se transforma la energía eléctrica en energía mecánica a través de sus diferentes etapas (estator, entrehierro y rotor). Finalmente, mediante el sistema de transmisión, la energía mecánica saliente del motor se transfiere a las ruedas del vehículo.

Todos estos procesos no son ideales y tienen a su vez sus respectivos rendimientos; así, la potencia de salida del motor no es idéntica a la que hay a la entrada y, a su vez, esta tampoco es la que proviene de las baterías por el transporte del cableado. Por ello, la finalidad de esta sección es clasificar y detallar cuáles son las pérdidas que afectan y determinan el rendimiento global del vehículo. A continuación, se exponen cada una de ellas.

3.1. Pérdidas en el motor eléctrico

Estas pérdidas son de carácter muy diverso, ya que pueden ser de naturaleza electromagnética, turbulenta, mecánica, etc. A su vez, se dividen en función de la dependencia o no respecto de la carga:

3.1.1. Independientes de la carga

- De hierro o núcleo: también se les conoce como pérdidas de vacío, ya que trabajando en estas condiciones, serían las únicas pérdidas existentes en el motor. A su vez, estas se dividen en pérdidas por histéresis magnética (la imantación de un material ferromagnético lleva retraso con respecto al campo magnético que la origina) y pérdidas por corrientes

parásitas o de Foucault (corrientes inducidas por la variación de la polaridad del flujo, que dependen del grosor del material).

- Fricción: rozamiento entre cojinetes, bujes, escobillas, etc., que se disipa en forma de calor. Son proporcionales a la velocidad del motor.

3.1.2. Dependientes de la carga

- Rozamiento: debido al aire que entra al motor desde el exterior y actúa contra la rotación de este, generando una resistencia aerodinámica. Están relacionadas con el cubo de la velocidad del vehículo.
- Efecto Joule: también llamadas pérdidas de cobre. Se localizan en los devanados del estator y rotor. Estas son consecuentes de la corriente que fluye a través de los conductores, produciendo un calentamiento debido a la resistencia que ofrecen. Al ser pérdidas de carácter eléctrico, son proporcionales al cuadrado de la intensidad por la resistencia del camino.
- Misceláneas: suelen ser errores en el diseño o la fabricación del motor, que no se pueden clasificar dentro de las categorías anteriores. Son difíciles de evaluar, aunque normalmente se toma como valor de referencia el 1% de la potencia de entrada al motor.

En general, las pérdidas de cobre son las más importantes, ya que representan entre el 50% y el 70% de las pérdidas del motor. Las pérdidas mecánicas (fricción y rozamiento) suelen ser menores, entre el 10% y el 20%, y el porcentaje restante representan las pérdidas en el núcleo, que suelen ser constantes. Como se ha explicado en el apartado 2.2.1.2, el rendimiento total de un motor eléctrico suele oscilar entre el 75% y el 95%, en función de las revoluciones y potencia máxima que sea capaz de desarrollar.

Por último, para minimizar estas pérdidas, se debe tener en cuenta que aumentar la eficiencia tiene un costo extra. Generalmente, esto suele implicar el uso de materiales más caros, procesos de fabricación más laboriosos, diseño más complejo del motor, etc.

3.2. Pérdidas en el inversor

El inversor, al ser un componente más simple que el motor, las pérdidas son menores. Fundamentalmente son debidas al sobrecalentamiento, disipando esta energía en forma de calor, y normalmente son función de la potencia de salida. Sin embargo, estas no son constantes ni lineales, sino que siguen una curva como la de la Figura 3.1.

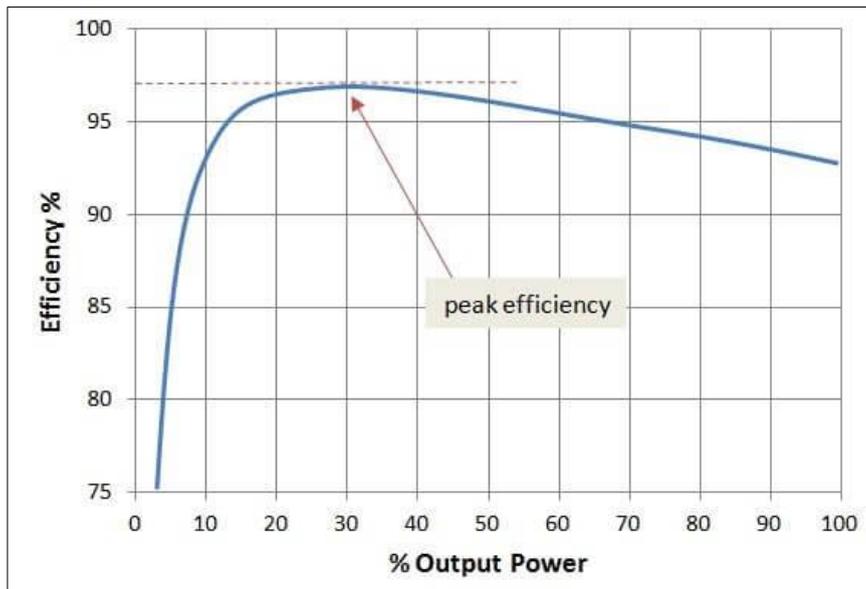


Figura 3.1: Curva de eficiencia típica de un inversor. [23]

Destaca que los rendimientos más altos (> 95%) se localizan para un rango de potencias intermedio (15–65%). Por ello, es recomendable que, si se quiere alimentar un sistema con una potencia determinada, se utilice un inversor del doble de capacidad.

3.3. Pérdidas por rodadura y fricción del neumático

La resistencia a la rodadura aparece cuando el vehículo se desplaza rodando sobre el asfalto. Estas pérdidas se dan principalmente por efectos no elásticos: el neumático se deforma por culpa de la superficie, y esta energía de deformación no se recupera al completo cuando desaparece el contacto entre la rueda y el suelo, pues se disipa en el ambiente en forma de calor. Esta conmutación de deformación y recuperación es llamado ciclo de histéresis.

A bajas velocidades, la rodadura es la fuerza resistiva más importante del vehículo. Existen numerosas causas por las cuales aparece esta fuerza:

- La energía perdida debido a la deformación lateral del neumático cerca de la zona de contacto con el asfalto, a la deflexión de la banda de rodadura o por un bache.
- Rozamiento de la zona de contacto con el asfalto.
- Deslizamiento del neumático en la dirección longitudinal o lateral.
- Ángulo de deriva del neumático (desarrollo en el apartado 3.2.1).
- Deformación de la superficie.
- Resistencia aerodinámica alrededor del neumático.

Esta fuerza es la suma de las resistencias a la rodadura de todas las ruedas del vehículo, y se formula de la siguiente manera:

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r W$$

Ecuación 1: Resistencia de rodadura

Donde los términos R_{xf} y R_{xr} hacen referencia a la resistencia a la rodadura de las ruedas delanteras y traseras, respectivamente, W es el peso del vehículo y f_r es el llamado coeficiente de rodadura.

Este parámetro adimensional recoge una infinidad de efectos y propiedades físicas difíciles de medir y expresar, tanto del neumático como de la superficie. De entre estas condiciones, destacan el rozamiento del neumático con el asfalto, la composición del caucho, la presión y temperatura del neumático, la rugosidad de la superficie, etc. No obstante, numerosos estudios han determinado que este coeficiente muestra una relación cuadrática con el ángulo de deriva de los neumáticos y casi cuadrática con la velocidad del vehículo.

Así, la expresión para determinar este coeficiente de rodadura es la siguiente:

$$f_r(\alpha, V) = f_0 + 0,002 \left(\frac{\alpha}{100}\right) + 0,1 \left(\frac{\alpha}{100}\right)^2 + 24,25 f_s \left(\frac{V}{100}\right)^{2.5}$$

Ecuación 2: Coeficiente de rodadura

Donde los parámetros f_0 y f_s son los parámetros adimensionales que engloban los fenómenos comentados previamente, α es el ángulo de deriva del neumático (en grados) y V es la velocidad del

vehículo (en metros por segundo).

Así, conociendo el coeficiente de rodadura y el peso del vehículo, se puede estimar la pérdida de potencia empleada en vencer a esta resistencia:

$$P_R = R_x \cdot V = f_r (\alpha, V) W V$$

Ecuación 3: Pérdida de potencia debida a la rodadura

3.3.1. Ángulo de deriva

El ángulo de deriva, o simplemente deriva, es el ángulo que forma la trayectoria deseada de la rueda y la que realmente está siguiendo; es decir, se trata de una desviación del rumbo de la rueda.

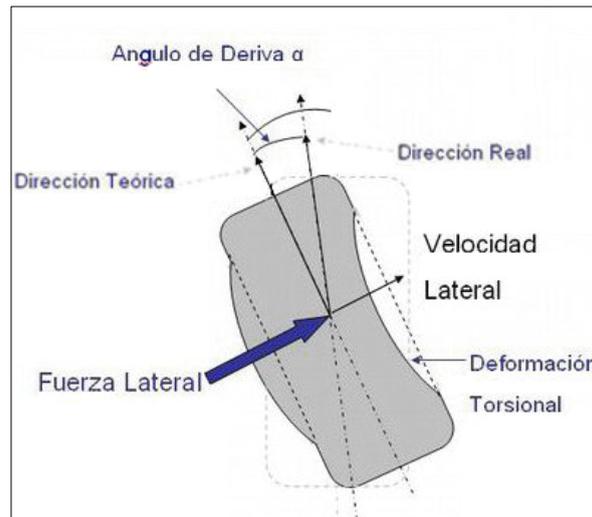


Figura 3.2: Esquema de la deriva de la rueda de un vehículo. [15]

Este ángulo da como consecuencia una fuerza lateral, que deforma el neumático, y crece linealmente con derivas pequeñas, como se puede apreciar en la Figura 3.3. A la pendiente de la curva en la zona lineal se le conoce como “*cornering stiffness*” o rigidez lateral, una característica propia del neumático. Para ángulos de deriva mayores, desaparece esta relación lineal y el neumático entra en la zona de deformación plástica o permanente, debido a la alta carga lateral que sufre.

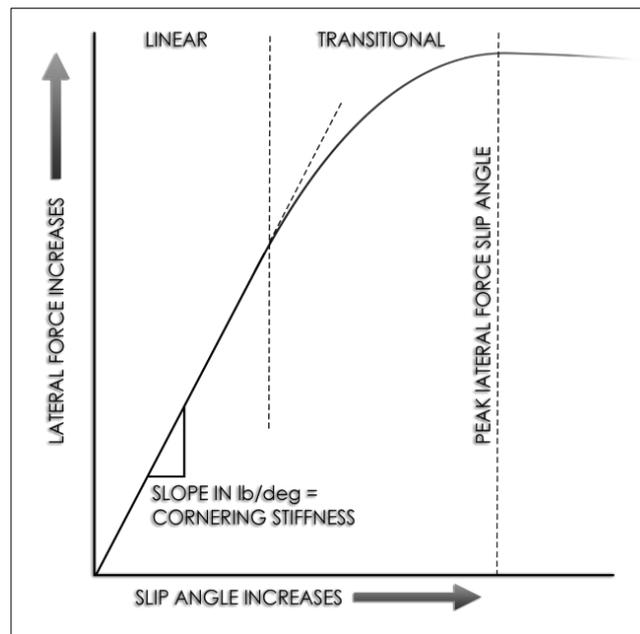


Figura 3.3: Relación entre la deriva de la rueda y la fuerza lateral. [15]

Para el estudio de la relación entre el coeficiente de rodadura y el ángulo de deriva, se debe atender al esquema de la Figura 3.4, conocido como el modelo de bicicleta. En él, se encuentran las distintas fuerzas, momentos y parámetros relevantes para el cálculo del ángulo de deriva.

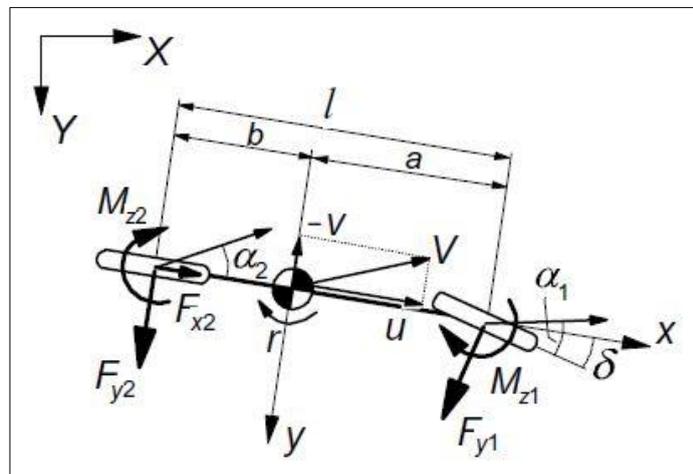


Figura 3.4: Esquema de fuerzas y momentos sobre un vehículo. [14]

Donde u y v son las componentes longitudinal y lateral, respectivamente, de la velocidad del vehículo V y r es la velocidad de giro o de guiñada; δ es el ángulo de trayectoria deseado y α es el ángulo de deriva; l es la distancia entre las ruedas delanteras y traseras o batalla, a y b es la distancia entre las ruedas y el centro de gravedad (CDG) del vehículo; F_x es la fuerza longitudinal, F_y es la fuerza lateral y M_z son los momentos actuantes sobre las ruedas, y los subíndices 1 y 2 hacen referencia a las ruedas delanteras y traseras, respectivamente.

Siguiendo este modelo de dos grados de libertad, en el que se asume que el vehículo realiza una trayectoria sobre una superficie plana, la deriva de las ruedas del vehículo se puede calcular mediante las siguientes expresiones:

$$\alpha_1 = \delta - \frac{1}{u}(v + ar) \quad \alpha_2 = -\frac{1}{u}(v - br)$$

Ecuación 4: Ángulo de deriva delantero y trasero

En el apartado 4, se detallarán los datos del vehículo, como la batalla o la cinemática, y el procedimiento a seguir para la obtención de las diversas variables.

3.4. Pérdidas aerodinámicas

La aerodinámica es la rama de la mecánica que estudia el movimiento y comportamiento de un cuerpo inmerso en un fluido gaseoso, como es el caso del aire. Por el hecho de desplazarse a través de este gas, un vehículo sufre una resistencia aerodinámica o “*drag*”, que se opone al movimiento de este. Esta fuerza tiene la misma dirección que la velocidad del vehículo, pero en sentido contrario, al igual que la fricción. La resistencia aerodinámica, a bajas velocidades, es la segunda fuerza más importante tras la rodadura. A partir de los 60–70 km/h, esta resistencia se vuelve realmente notoria. Esta fuerza puede calcularse a partir de una expresión bastante sencilla:

$$Drag = D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

Ecuación 5: Resistencia aerodinámica

Donde ρ es la densidad del aire, V la velocidad del vehículo, S es la superficie frontal de este y C_D es su coeficiente de resistencia, arrastre o penetración, denotado también como C_x .

Al igual que sucedía con la rodadura, este coeficiente de resistencia es difícil de estimar, por lo que se recurren a técnicas experimentales, como el túnel de viento y el análisis dimensional, y para más precisión, al CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Gracias a numerosos estudios a lo largo de los años, se tienen unos valores aproximados para toda clase de vehículos: coches, bicicletas, camiones, automóviles de Fórmula 1, etc.

Este coeficiente varía según la forma del vehículo, los accesorios que tenga (alergones, retrovisores, spoilers...) y, sobre todo, su sección frontal. Los automóviles actuales están diseñados para tener un coeficiente de resistencia entre 0.3 y 0.4. Algunos modelos, concebidos desde el punto de vista de la eficiencia aerodinámica, pueden llegar incluso a valores entre 0.2 y 0.25, como el Tesla Model 3 o el Honda Insight. En el otro extremo, vehículos más grandes como furgonetas o camiones, y vehículos de carrocería abierta, como descapotables, carritos de golf o motocicletas, pueden tener coeficientes cercanos a 0.8 o incluso 1–1.2.

Así, conociendo el valor de esta fuerza, se puede calcular la potencia necesaria que debe generar el vehículo para superar la resistencia aerodinámica:

$$P_D = D \cdot V = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_D$$

Ecuación 6: Potencia perdida debida a la resistencia aerodinámica

3.5. Pérdidas en la transmisión mecánica

La transmisión mecánica es un sistema intercambiador de energía mecánica, de manera que transforma la velocidad de rotación del eje de entrada en una velocidad de salida distinta, lo que se conoce como relación de transmisión. Este sistema es empleado muy extendidamente en automóviles y, además, es capaz de cambiar esta relación según se demande mayor par o mayor potencia; es lo que se conoce como las marchas del vehículo. En el caso de uno eléctrico, se ha observado en la Figura 2.9 que el elevado par que presentan hace que la mayoría sean coches de marchas automáticas, sin caja de cambios.

Actualmente, existen numerosos tipos de transmisiones: biela–manivela, correas, árbol de levas, poleas, etc. Concretamente, el vehículo que se describe en el apartado 4 posee una transmisión por un tren de engranajes y rodamientos.

3.5.1. Tren de engranajes

El tren o juego de engranajes se compone de numerosas ruedas dentadas, y es el tipo de transmisión más utilizado por su amplio rango de velocidades, relaciones de transmisión y potencias.

Su gran ventaja es que se obtiene la misma relación de transmisión que la otorgada por el motor, ya que los engranajes no patinan, como por ejemplo sí lo hacen las poleas. Además, poseen un alto rendimiento, su mantenimiento es mínimo y ocupan poco espacio. Sin embargo, puede generar ruidos y, al tratarse de una transmisión bastante rígida, necesita acoplamiento elástico para absorber la energía de un posible impacto, y esto eleva su coste.

Los engranajes más utilizados en la industria del automóvil son: cilíndricos, cónicos y el conjunto tornillo sin fin y corona.



Figura 3.5: Engranaje cilíndrico recto (izq.) y engranaje cilíndrico helicoidal (dcha.). [18]



Figura 3.6: Engranaje cónico (izq.) y tornillo sin fin y corona (dcha.). [18]

Este último, el de la Figura 3.6 derecha, es la forma más simple de un reductor de velocidad, un mecanismo que transmite el movimiento entre un motor y otro dispositivo que rota a menor velocidad. Sin embargo, debido al rozamiento en los flancos del diente, el conjunto tornillo sin fin y corona tiene el rendimiento más bajo de los engranajes nombrados previamente, que se sitúa entre un 40% y un 90%, dependiendo del ángulo de avance del tornillo, la potencia transmitida, la relación de transmisión y si tiene o no lubricación. Para el resto de engranajes, los rendimientos de cada etapa oscilan entre el 96% y el 99%, de manera que son los más utilizados para las transmisiones.

3.5.2. Rodamientos

Un rodamiento o cojinete de deslizamiento es un dispositivo mecánico, normalmente ubicado entre un eje y las piezas conectadas a este, cuyo objetivo es reducir la fricción de estos en su rodadura, servir de apoyo y facilitar el desplazamiento. Además, para motores eléctricos, tienen la gran ventaja de reducir el ruido y poseer una gran velocidad y fiabilidad. En general, los rodamientos suelen tener rendimientos similares a los engranajes, las únicas pérdidas que presentan son por disipación de calor. Por ello, se suelen utilizar conjuntamente en las transmisiones de vehículos.

Existen dos clasificaciones posibles para estos mecanismos: según su diseño, pueden ser de bolas, de rodillos o de agujas; y, según el esfuerzo que soportan, pueden ser axiales, radiales o combinación de ambos. Los más utilizados son: rígido de bolas, de rodillos o de bolas de contacto angular.

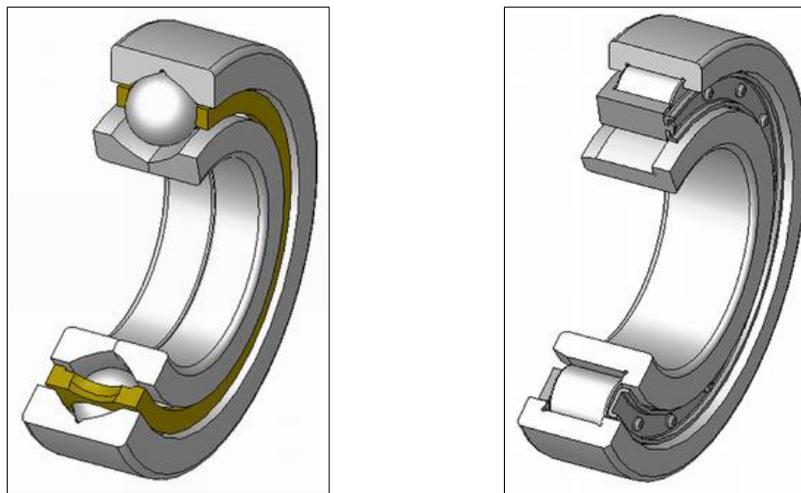


Figura 3.7: Rodamiento rígido de bolas (izq.) y rodamiento de rodillos (dcha.). [21]



Figura 3.8: Rodamiento de bolas de contacto angular. [22]

3.5.3. Puente trasero rígido

Un puente o eje rígido es un tipo de suspensión en automóviles en el que las ruedas están conectadas por una viga (eje). Se trata de una suspensión dependiente; es decir, cualquier desplazamiento de cualquiera de las dos ruedas repercute en la otra.

Las principales ventajas de este tipo de suspensión son su simplicidad y su menor coste. Además, al tener un solo eje, poseen una buena estabilidad sobre el terreno. Sin embargo, sobre pavimentos más irregulares esto podría ser una gran desventaja para la suavidad en la conducción, ya que se producen más vibraciones en el vehículo al ser ambas ruedas dependientes. Por otro lado, para alojar este tipo de suspensión, la carrocería debe tener una mayor altura, elevando así el centro de gravedad del vehículo y perjudicando a la aerodinámica y la estabilidad del mismo.

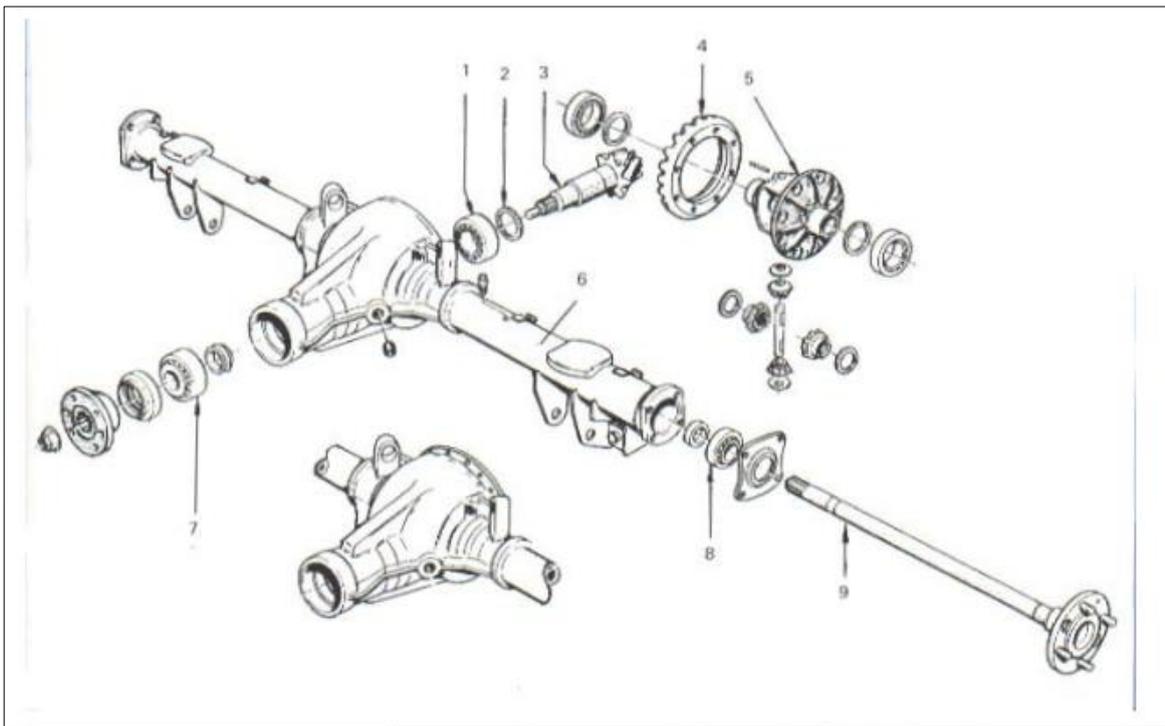


Figura 3.9: Esquema y despiece de un puente rígido. [22]

El funcionamiento de este eje rígido es bastante simple: el movimiento procedente del motor eléctrico, a través de la primera parte de la transmisión, llega a los cojinetes (piezas 1 y 7). Estos dan movimiento al piñón de ataque (pieza 3) y, a su vez, mueve la corona (pieza 4) y el conjunto diferencial (pieza 5). Todos estos elementos se alojan dentro de la carcasa del diferencial (pieza inferior). El movimiento del diferencial pasa a los rodamientos (pieza 8), que hace girar los semiejes o palieres (pieza 9), los cuales están alojados dentro de las trompetas (pieza 6), y finalmente comunican el movimiento a las ruedas.

El componente clave en un sistema de transmisión es el mecanismo diferencial, el cual permite el giro de las dos ruedas a distintas velocidades en las trayectorias curvas, ya que la rueda exterior realiza más trazado que la interior. De esta manera, el conjunto diferencial otorga un mayor número de vueltas a la rueda exterior y disminuye la velocidad de la rueda interior. Si no fuese así, las ruedas patinarían y no se podría realizar el giro.

Dado que este puente rígido se compone de ejes, rodamientos, cojinetes y demás componentes mecánicos que trabajan a altas velocidades, estos sufrirán sobrecalentamientos y parte de la energía mecánica se disipará en forma de calor.

3.6. Pérdidas en el cableado

Al igual que sucedía con los devanados del estator y el rotor del motor eléctrico, por el paso de la corriente a través de los conductores, se produce un aumento de la temperatura en los cables que conectan la batería con el inversor y este con el motor, disipando esta energía producida en forma de calor. Este fenómeno irreversible es lo que se conoce como el efecto Joule. Tal y como demostró este físico británico, la energía calorífica resultante del paso de la corriente eléctrica es función del cuadrado de la intensidad, de la resistencia que se opone y el tiempo que circula.

Así, la pérdida de potencia debida a la energía calorífica generada en el cableado del vehículo se puede calcular fácilmente según la expresión:

$$P_C = V \cdot I = R \cdot I^2$$

Ecuación 7: Potencia perdida debida al efecto Joule en el cableado

4. Metodología

4.1. Vehículo

Este vehículo, similar a un carrito de golf, posee un motor eléctrico de tipo asíncrono de inducción. Este es alimentado por un conjunto en serie de 8 baterías de plomo y ácido de 6V. El sistema de transmisión está basado en un tren de engranajes y rodamientos, y la potencia del motor llega a las ruedas por medio de un puente rígido con su conjunto diferencial, como el descrito en el apartado 3.4.3. Además, también posee un sistema de frenado regenerativo, de manera que en las deceleraciones, el motor eléctrico funciona como un generador (convierte energía mecánica en eléctrica) y parte de la energía cinética se recupera, recargando así las baterías. El motor se encuentra unido al eje trasero como masa no suspendida. En las siguientes imágenes se muestra en detalle el vehículo descrito.



Figura 4.1: Frontal del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia]



Figura 4.2: Lateral del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia]



Figura 4.3: Parte trasera del vehículo eléctrico de tracción ligera. [Fuente propia]

En la Tabla 2, se recogen los datos y dimensiones más relevantes del vehículo, como el peso, la batalla o la vía.

Masa en vacío (kg)	Masa total (kg)	Batalla (m)	Vía (m)	Altura (m)	a (m)	b (m)	hCDG (m)
693,2	832,4	1,7	1,35	2	0,5	1,2	0,5

Tabla 2: Características del vehículo. [Fuente propia]

4.2. Ensayos

4.2.1. Tipos de trayectoria

Durante la realización experimental, el vehículo siguió numerosas trayectorias con la finalidad de recopilar esta información. Así, los distintos ensayos a analizar se pueden clasificar en:

- Según la trayectoria descrita: si no se realiza ningún giro con el volante, se tratará de una trayectoria recta; por el contrario, si existe desplazamiento lateral, el vehículo seguirá una trayectoria curva.
- Según la cinemática: si el vehículo se encuentra acelerando o frenando, se tratará de un movimiento rectilíneo o curvo uniformemente acelerado (MRUA o MCUA); por el contrario, si la velocidad se mantiene constante, se tratará de un movimiento rectilíneo o curvo uniforme (MRU o MCU).

4.2.2. Toma de datos

Con el objetivo de estimar la eficiencia energética, es necesario recopilar cierta información del vehículo durante los ensayos.

Para determinar la cinemática, se instalaron unos acelerómetros para estimar la aceleración, tanto longitudinal como lateral. A partir de esta, integrando respecto del tiempo, se obtiene la velocidad, e integrando nuevamente, la posición.

En el caso de la potencia de salida de las baterías, se necesitaron un voltímetro para registrar el voltaje en bornes de entrada y salida de estas, así como una pinza amperimétrica para determinar la intensidad de corriente. Así, mediante la Ecuación 7, se estima la potencia de salida de las baterías.

Todos estos dispositivos de medición tienen una gran precisión, y sus datos se registran en una hoja Excel con una frecuencia de 100 Hz; es decir, cada 0,01 segundos.

4.3. Procedimiento analítico

4.3.1. Consideraciones

Previamente a la descripción de los cálculos realizados tras los ensayos, cabe señalar que se analizará la eficiencia energética del vehículo cuando esté se encuentre acelerando o a velocidad constante. Esto es debido a que se desconocen los parámetros relevantes del frenado regenerativo, por lo que no es posible estimar cuánta energía cinética es recuperada, transformada en potencia mediante el motor invertido y almacenada en las baterías cuando el vehículo decelera.

4.3.2. Fuerzas y balance de potencia

A través de la cinemática recogida en estos ensayos, se obtendrán las diferentes fuerzas que intervienen en la dinámica del automóvil. Estas son: la fuerza de movimiento del mismo, la resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura.

Para calcular esta última, el procedimiento es algo laborioso, pues para estimar el coeficiente de rodadura según la Ecuación 2, se necesita la deriva de las ruedas. A su vez, según la Ecuación 4, para obtener la deriva, se debe conocer:

- Radio de giro de la curva (R): atendiendo a la cinemática del vehículo, se puede obtener este radio a través de la aceleración normal como:

$$|a_n| = |a_y| = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{|a_y|}$$

Ecuación 8: Radio de giro de la curva

- Velocidad de guiñada (r): esta variable se relaciona con el radio de giro y la velocidad del vehículo mediante la expresión:

$$\frac{1}{R} = \frac{r}{V} \rightarrow r = \frac{V}{R}$$

Ecuación 9: Velocidad de guiñada

- Ángulo de la trayectoria (δ): conociendo la posición del vehículo, tanto en el eje X como en el eje Y, el ángulo de la trayectoria que describe se puede calcular a partir de dos instantes de tiempo, con sus respectivas posiciones (x_0, y_0) y (x_1, y_1) .

$$\tan \delta = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \rightarrow \delta = \text{atan} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right)$$

Ecuación 10: Ángulo de la trayectoria

En el caso de la resistencia aerodinámica, primero se ha de tener en cuenta que, al trabajar a bajas velocidades, esta no será tan importante como la resistencia a la rodadura. Para calcularla según la Ecuación 5, es necesario conocer una serie de parámetros:

- Densidad del aire (ρ): dado que los ensayos fueron realizados dentro del campus de la UPV, se considerará como valor de la densidad del aire la correspondiente al nivel del mar. Según la *International Standard Atmosphere* (ISA), esta es de $1,225 \text{ kg/m}^3$, a condiciones normales de presión (1 atmósfera) y temperatura (25° C).
- Sección frontal del vehículo (S): atendiendo a los datos de la Tabla 2, se puede estimar la superficie frontal del vehículo como:

$$S = \text{Vía} \cdot \text{Altura} = 2,7 \text{ m}^2$$

Ecuación 11: Superficie frontal del vehículo

- Coefficiente de resistencia (C_D): dado que no se disponen de los medios técnicos para estimar este coeficiente rigurosamente (túnel de viento y/o CFD), se ha optado por una búsqueda bibliográfica para conocer este coeficiente en vehículos similares. Así, se ha

llegado a la conclusión de adoptar un coeficiente de resistencia de valor 0,8, típico de vehículos con carrocería descubierta, como se ha descrito en el apartado 3.3.

Por último, para determinar la fuerza de movimiento del vehículo, se aplica la 2ª Ley de Newton teniendo en cuenta que las fuerzas que se oponen al avance son las dos ya detalladas anteriormente:

$$\sum F_i = F_{mov} - D - R_x = m a \rightarrow F_{mov} = m a + D + R_x$$

Ecuación 12: Fuerza de movimiento del vehículo

Así, se puede obtener la potencia de movimiento del vehículo como:

$$P_{mov} = F_{mov} \cdot V = m V a + D V + R_x V$$

Ecuación 13: Potencia de movimiento del vehículo

Por tanto, conociendo la potencia de salida las baterías, se puede hallar la potencia perdida con la expresión:

$$P_{perdida} = P_{baterías} - P_{mov}$$

Ecuación 14: Potencia perdida del vehículo

4.3.3. Eficiencia del cableado, transmisión y motor

Atendiendo a la descripción realizada en el apartado 3 de las diferentes pérdidas que presentan estos subsistemas del vehículo, en la Tabla 3 se recogen los valores escogidos para modelizar el rendimiento de estas partes.

Rendimiento del motor (η_m)	Rendimiento del cableado (η_c)	Rendimiento de la transmisión (η_t)
88 %	95 %	97 %

Tabla 3: Eficiencia estimada para el motor, cableado y transmisión. [Fuente propia]

No obstante, debe recordarse que se trata de una aproximación. Por ejemplo, el rendimiento del motor no es constante, ya que existen pérdidas que varían según la carga, como el efecto Joule, o según la velocidad del vehículo, como el rozamiento del motor con el aire que entra del exterior. De igual modo ocurre con el cableado, afectado también por el efecto Joule, y con los engranajes, ya que se requiere mayor o menor potencia en relación con la velocidad deseada. Esto se traduce en una variación en la velocidad de giro del motor y, consecuentemente, en el par, provocando un calentamiento y disipación de energía.

No obstante, al realizarse los ensayos a velocidades poco variables y menores, se puede asumir que el par es aproximadamente constante y, por tanto, también la eficiencia en la transmisión. Sin embargo, la potencia sí que varía mayormente con la velocidad y las pérdidas en el motor y el cableado son más fluctuantes.

En el siguiente apartado, se analizarán las diferentes trayectorias descritas por el vehículo descrito en esta parte del trabajo. Utilizando estas expresiones, se hallarán los valores de cada una de estas variables y se obtendrá el error cometido al modelizar estas pérdidas.

5. Análisis de los resultados

5.1. Trayectoria 1

5.1.1. Posición y cinemática

En el primer ensayo, la trazada descrita por el vehículo viene dada en la Figura 5.1.1.

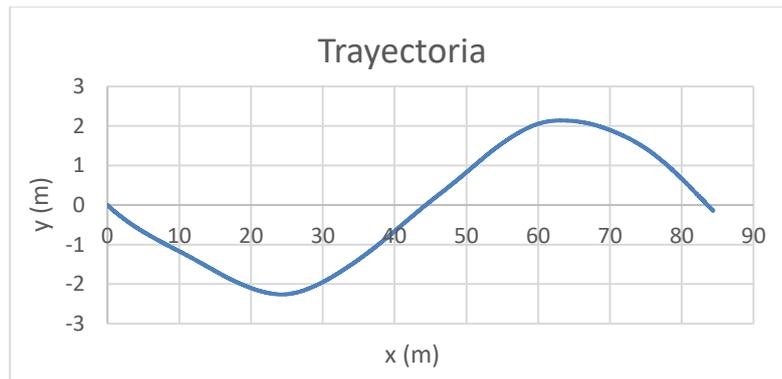


Figura 5.1.1: Trayectoria descrita en el ensayo 1. [Fuente propia]

Por otro lado, en la velocidad del vehículo vienen diferenciados 3 tramos: el primero, una gran aceleración hasta superar los 2 m/s; después, una velocidad aproximadamente constante en torno a los 2,2–2,3 m/s y, finalmente, una brusca caída de la velocidad hasta detenerse completamente.

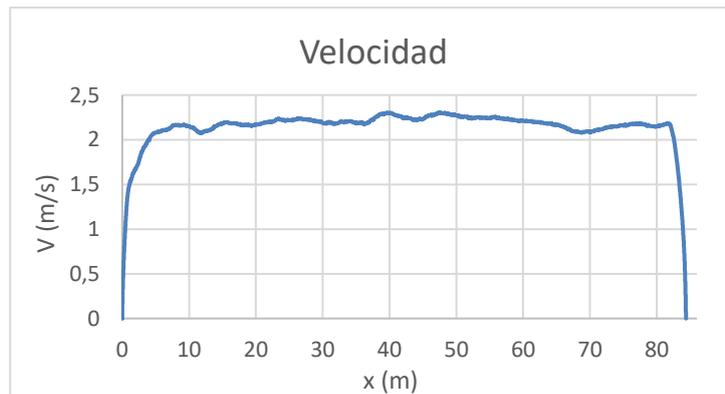


Figura 5.1.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]

En cuanto a la aceleración, se puede apreciar en la siguiente gráfica que la tangencial o longitudinal (en el eje X) es de un orden de magnitud bajo, ya que se intenta mantener una velocidad constante, y que los valores negativos se corresponden con una disminución en la velocidad del vehículo. Por otra parte, la aceleración normal suele ser menor que la tangencial excepto en las curvas, donde asciende levemente hasta los 0,15 m/s² (en valor absoluto), y los valores negativos

son representativos de una curva a derechas.

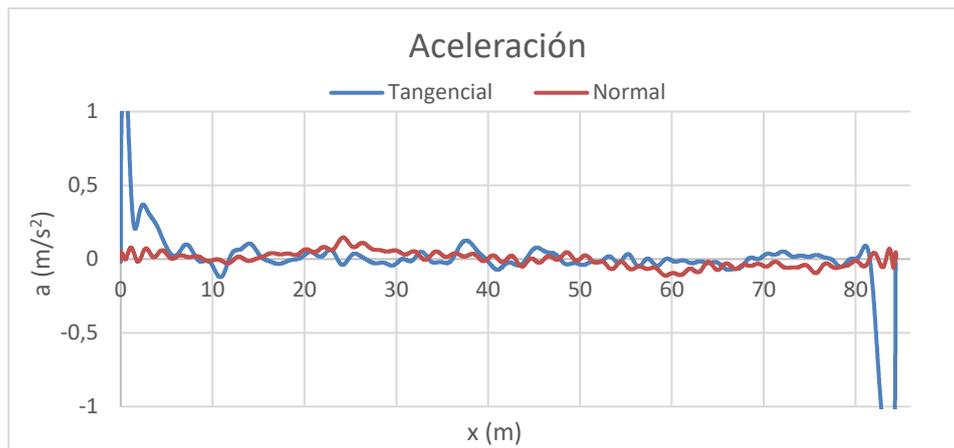


Figura 5.1.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]

5.1.2. Balance de fuerzas y potencias

Con estas distribuciones de velocidad y aceleración, se pueden estimar las distintas fuerzas que intervienen en la dinámica del vehículo:

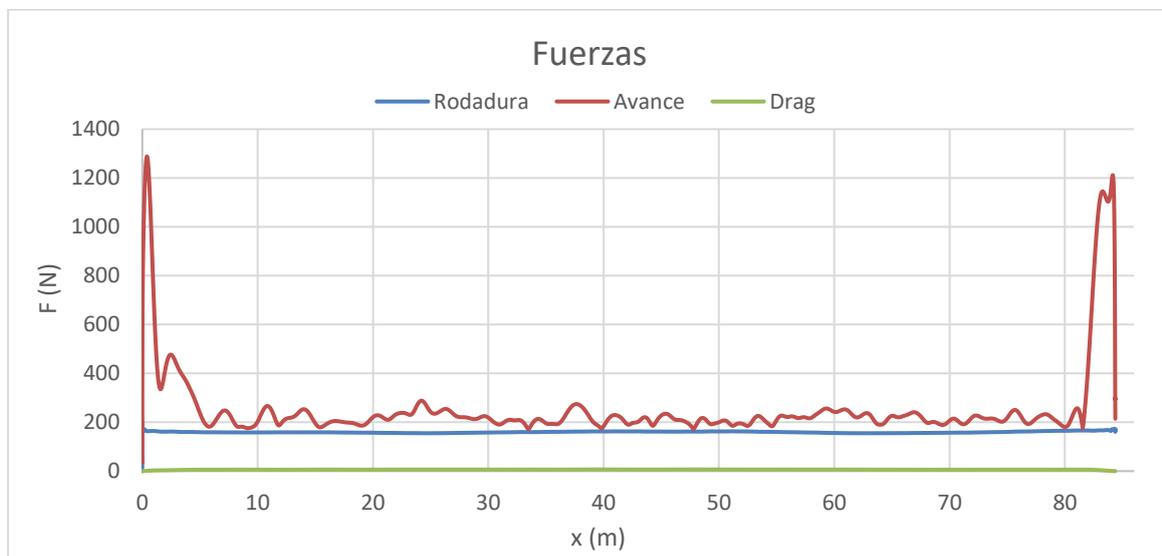


Figura 5.1.4: Balance de fuerzas en el ensayo 1. [Fuente propia]

Como se puede observar, la resistencia aerodinámica es mucho menor en comparación con la fuerza de avance, ya que el vehículo apenas supera los 10 km/h. En cambio, se puede apreciar que la resistencia a la rodadura es la más importante, pues es próxima a la de avance, y se mantiene aproximadamente constante.

Así, teniendo la fuerza de movimiento del vehículo, puede calcularse la potencia empleada y, comparándola con la potencia consumida (la de salida de las baterías), se obtiene la potencia perdida.

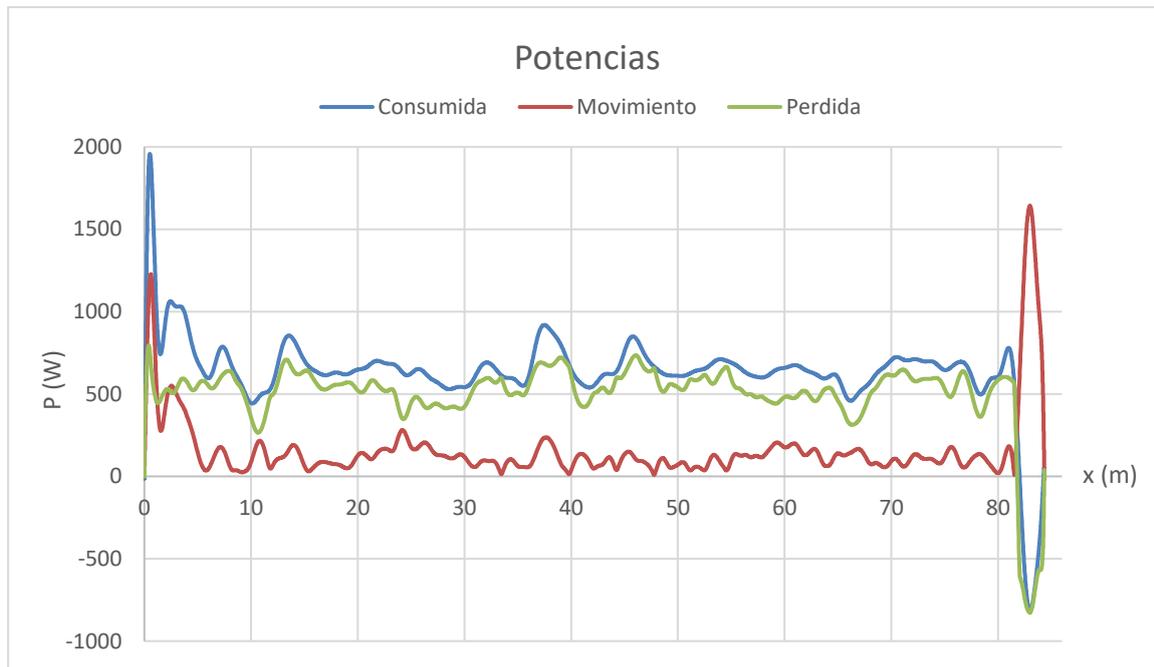


Figura 5.1.5: Potencia del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]

Llama la atención el orden de magnitud de la potencia perdida, ya que es muy cercana a la potencia suministrada por las baterías. En otras palabras, la potencia del movimiento del vehículo (potencia útil) es muy pobre, la gran mayoría es desaprovechada por las pérdidas energéticas.

5.1.3. Evaluación de pérdidas

Estas pérdidas de potencia, según el procedimiento a seguir descrito en el apartado 4.3, quedarían repartidas de la siguiente forma:

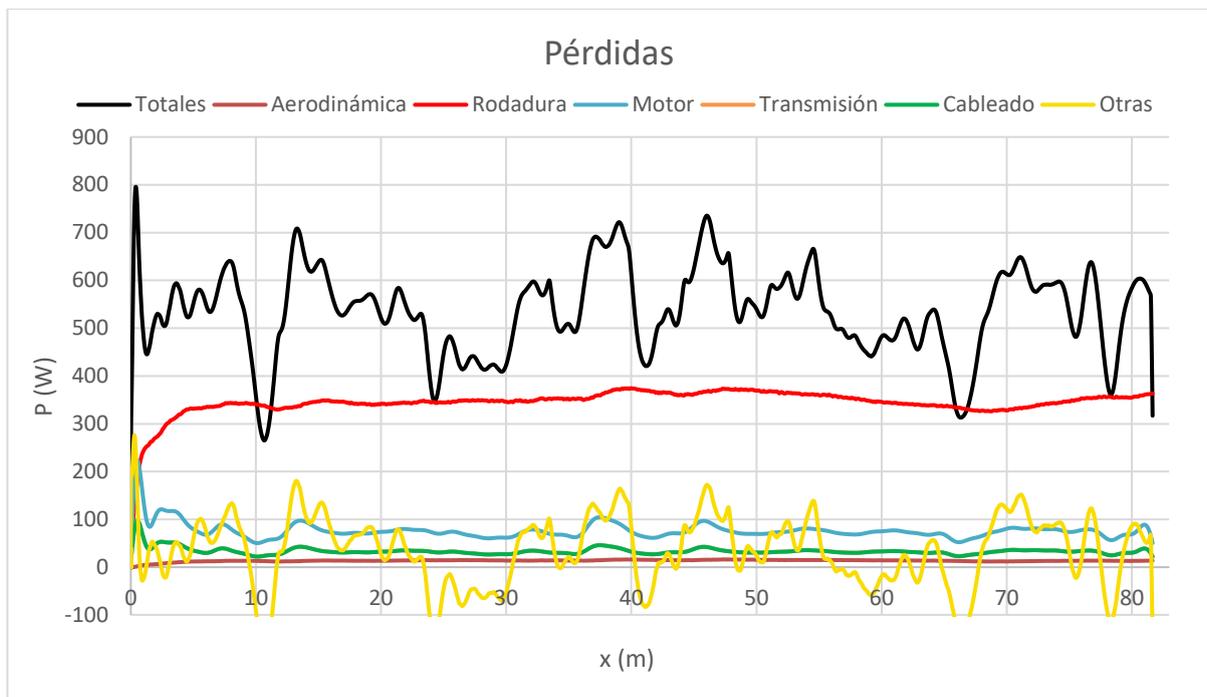


Figura 5.1.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 1. [Fuente propia]

Tal y como se podía intuir, la resistencia a la rodadura es la fuente de pérdidas más importante, entre 300 y 400 W de potencia y casi constante por efecto de la velocidad, ya que la deriva afecta en menor medida. En segundo lugar, se tienen las pérdidas eléctricas, como el rendimiento del motor o del cableado; y, por último, la resistencia aerodinámica y las pérdidas en la transmisión mecánica. Las llamadas “Otras pérdidas” no es más que la diferencia entre estas 5 modelizaciones y la potencia total perdida; es decir, el error cometido

Por otra parte, separando la anterior gráfica en dos tramos, se puede apreciar que el ajuste de las pérdidas realizado es más preciso cuando el vehículo describe una trayectoria rectilínea, donde el error apenas supera los 150 W, que en curva, alcanzando casi los 200 W.

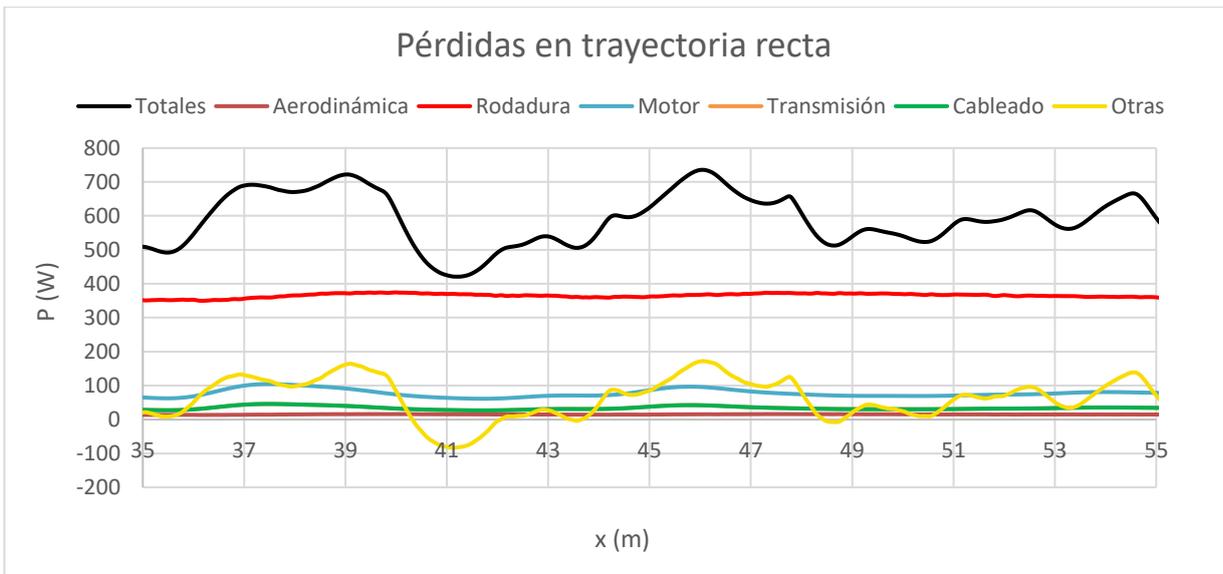


Figura 5.1.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 1. [Fuente propia]

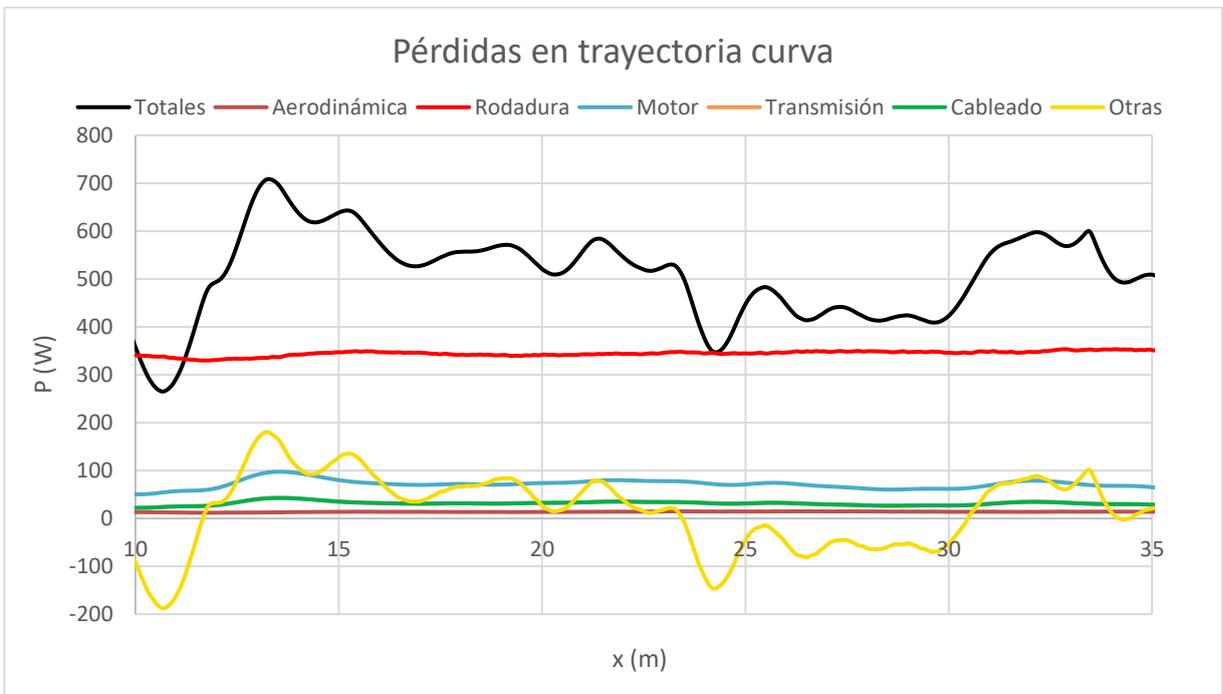


Figura 5.1.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 1. [Fuente propia]

5.1.4. Análisis del error

Omitiendo las zonas donde cae bruscamente hacia valores negativos (por la deceleración del vehículo), se puede ver que está por debajo de los 200 W, un valor no demasiado pequeño en comparación con la potencia total.

Esto puede apreciarse de manera más intuitiva si se visualiza la evolución del error a lo largo de toda la trayectoria, como en la Figura 5.1.9.

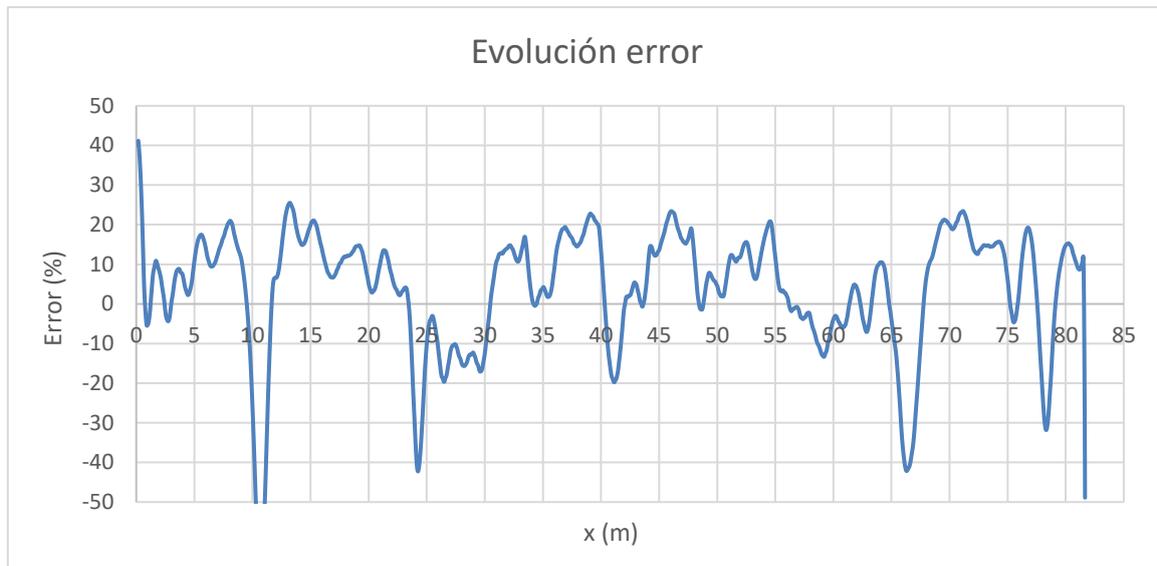


Figura 5.1.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 1. [Fuente propia]

Para este primer ensayo en concreto, la modelización no es tan precisa como cabía esperar en un primer instante, ya que una diferencia de un 20% por exceso o defecto es indicador de que aún existe margen de mejora. No obstante, teniendo en cuenta que no se conoce con total exactitud la composición ni el estado de los diversos subsistemas del vehículo (cableado, rodamientos, engranajes, gomas del neumático, etc.), se puede considerar una buena primera aproximación.

Finalmente, se tratará de determinar la naturaleza de este error, comparándola con dos variables: la salida de potencia de las baterías y la velocidad.

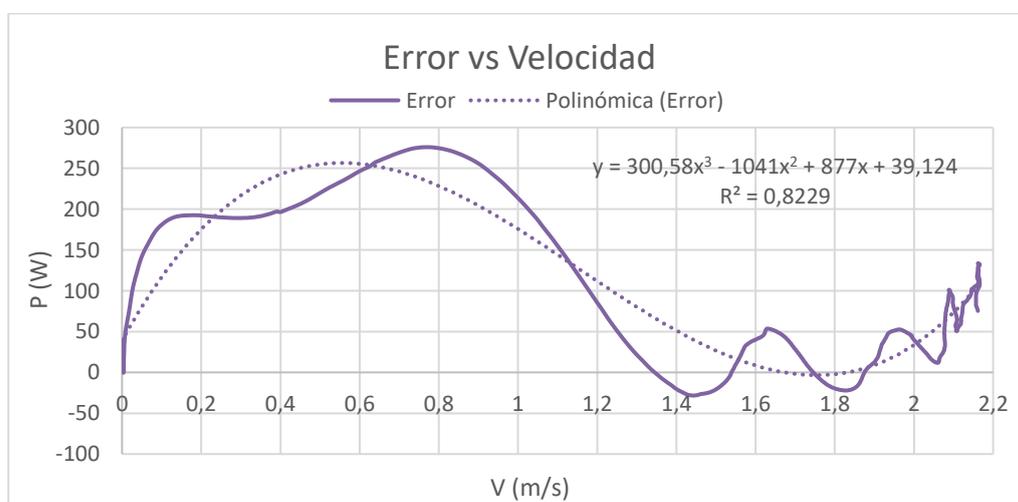


Figura 5.1.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 1. [Fuente propia]

En el caso de esta última, aunque mediante el ajuste por mínimos cuadrados presente un coeficiente de correlación (R^2) de 0,82, no es suficiente para garantizar completamente una relación entre el error cometido al modelizar la potencia con el cubo de la velocidad. Para confirmar esta tendencia, se debe atender al resto de ensayos para realizar una comparativa general.

Por el contrario, sí puede apreciarse una dependencia respecto a la potencia otorgada por las baterías. No obstante, se analizarán el resto de trayectorias para extraer unas conclusiones con mayor rigor.

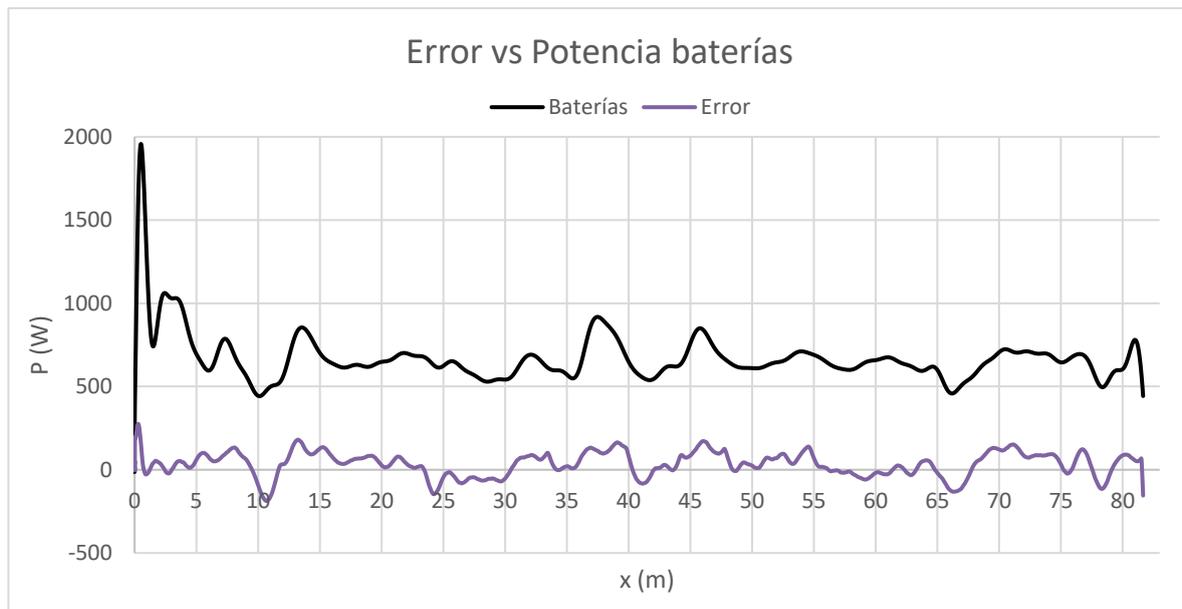


Figura 5.1.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 1. [Fuente propia]

5.2. Trayectoria 2

5.2.1. Posición y cinemática

En esta segunda prueba, el trazado descrito por el vehículo es similar a la anterior, pero con una curva más prolongada y suave al principio y un recorrido de menor alcance.

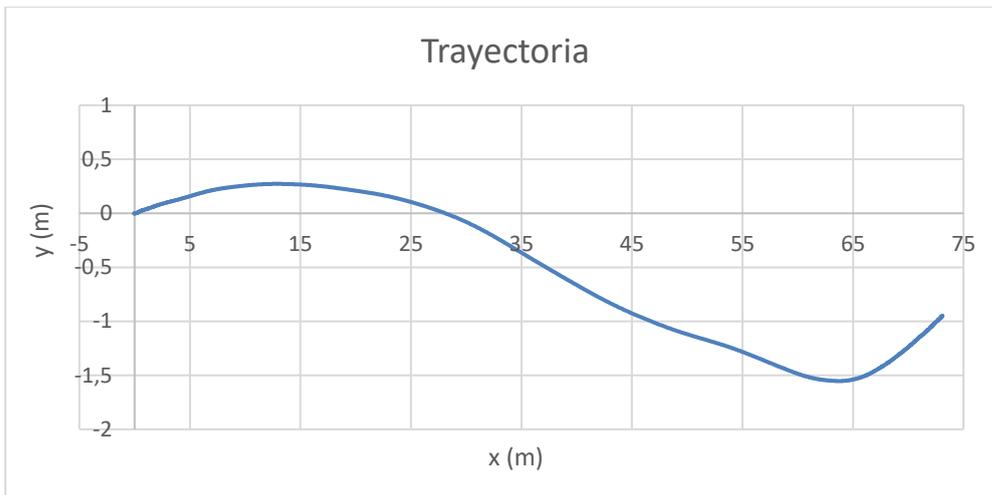


Figura 5.2.1: Trayectoria descrita en el ensayo 2. [Fuente propia]

Sin embargo, respecto a la velocidad, se aprecia un notable cambio. En este ensayo, no se busca mantener la velocidad sino una tasa de aceleración más o menos constante. También se puede ver que la velocidad máxima alcanzada es notablemente superior a la del primer ensayo, siendo esta de unos 25 km/h.

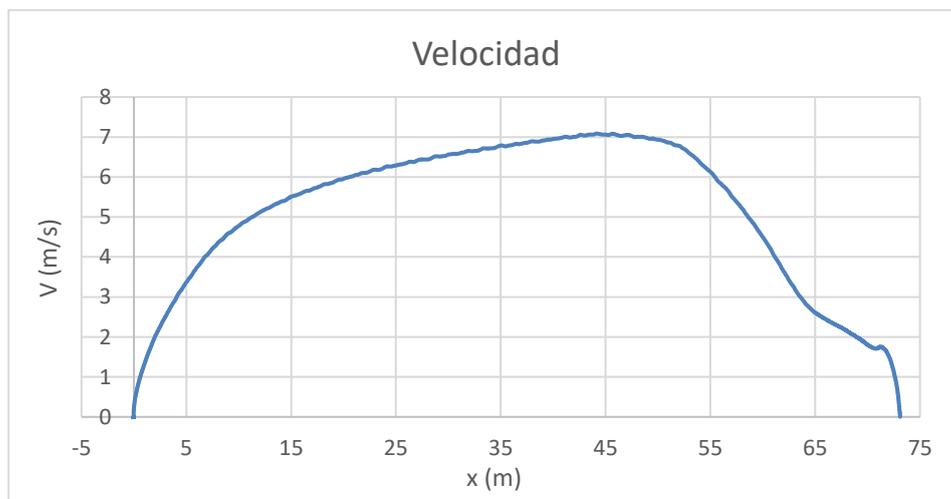


Figura 5.2.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia]

Esta distribución de velocidad implica una aceleración longitudinal o tangencial mucho mayor que para la trayectoria 1. En este caso, se alcanzan valores superiores a $1,5 \text{ m/s}^2$. En cuanto a la aceleración normal, puede verse que sigue sin ser importante, aunque dada la elevada velocidad en este ensayo, alcanza valores mayores que en el anterior, en torno a $0,2\text{--}0,3 \text{ m/s}^2$.

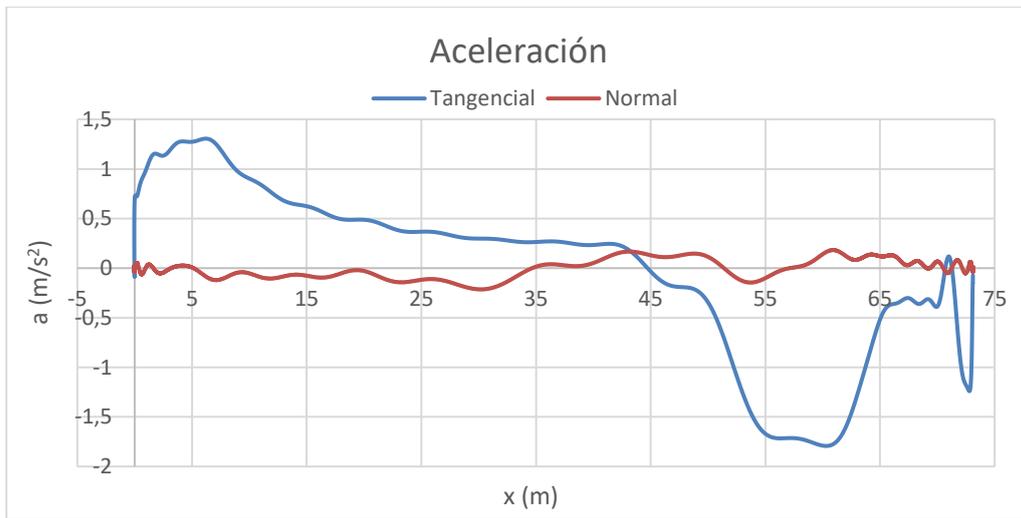


Figura 5.2.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia]

5.2.2. Balance de fuerzas y potencias

Con esta distribución de velocidad y aceleraciones, la fuerza de movimiento tendrá un aspecto muy similar al de la aceleración tangencial y, a diferencia del ensayo 1, es notablemente superior a las dos fuerzas resistivas. Al igual que en el caso anterior, se observa que la fuerza de rodadura se mantiene aproximadamente constante, mientras que la resistencia aerodinámica crece en importancia por la elevada velocidad que se alcanza.

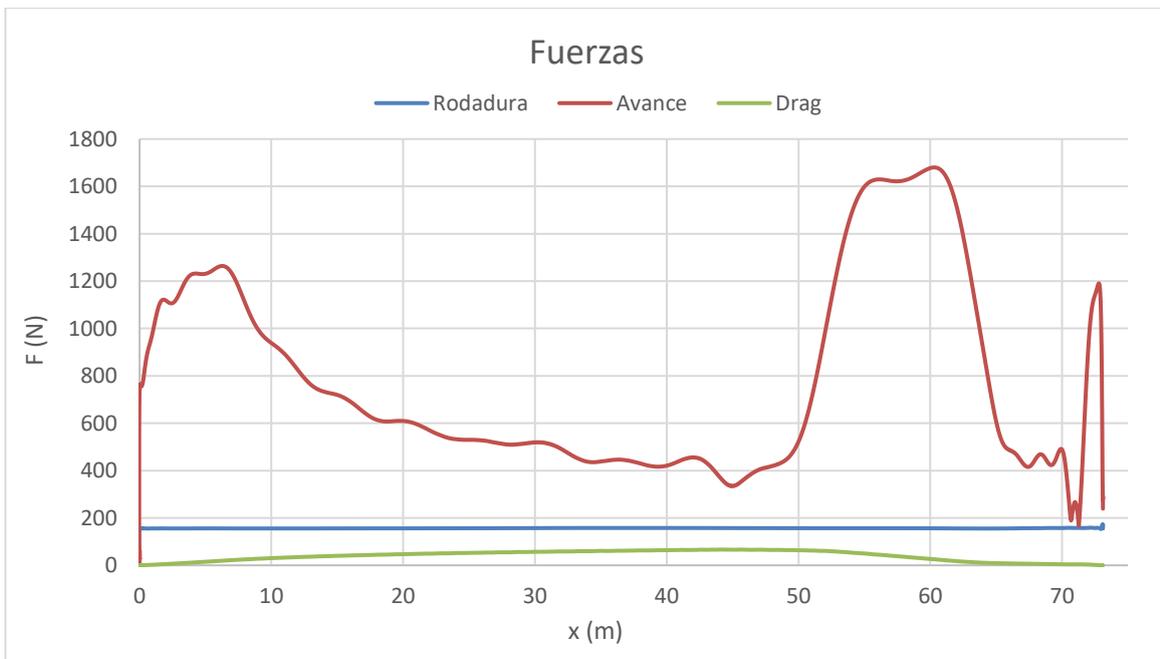


Figura 5.2.4: Balance de fuerzas en el ensayo 2. [Fuente propia]

De esta manera, las diferentes potencias que caracterizan esta trayectoria vienen dadas en la Figura 5.2.5.



Figura 5.2.5: Balance de potencias en el ensayo 2. [Fuente propia]

En comparación con el ensayo 1, puede verse que la potencia útil es bastante superior y, en consecuencia, no es tanta la potencia perdida. También destaca que, debido a la alta velocidad que alcanza el vehículo, la potencia del movimiento en el momento de la frenada es considerable.

5.2.3. Evaluación de pérdidas

En este segundo ensayo, cabe resaltar la mayor precisión que ha tenido la modelización, ya que el error cometido es notablemente inferior, como se verá en el apartado 5.2.4.

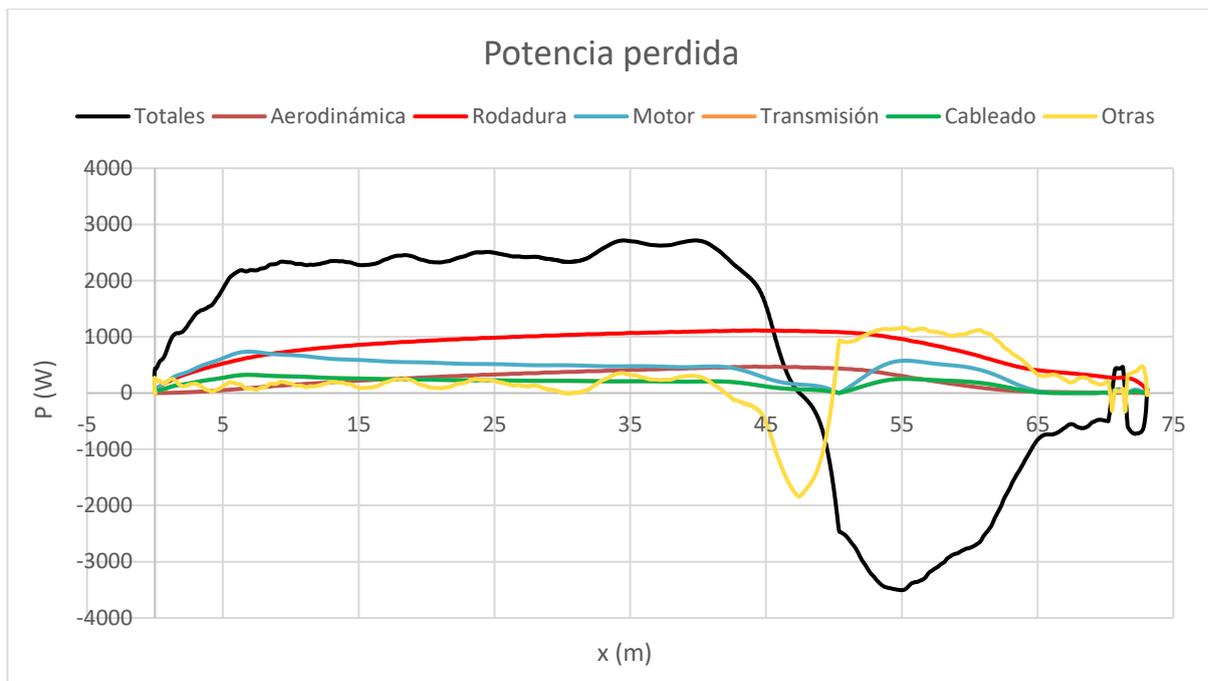


Figura 5.2.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 2. [Fuente propia]

En cuanto a los diferentes tipos de pérdidas, la resistencia a la rodadura sigue siendo la más considerable y, en este caso, sí se aprecia su aumento con la velocidad, llegando incluso a los 1000 W de potencia. Destaca también el rendimiento del motor y la resistencia aerodinámica, que adquiere mayor importancia debido a la mayor velocidad. Por otro lado, la diferencia entre las pérdidas en el cableado y la transmisión mecánica son pequeñas, por lo que se superponen en el gráfico.

Dividiendo la gráfica anterior en dos, una para la primera curva y la segunda para la trayectoria recta, se puede apreciar que esta curva se ajusta mejor en el primer caso.

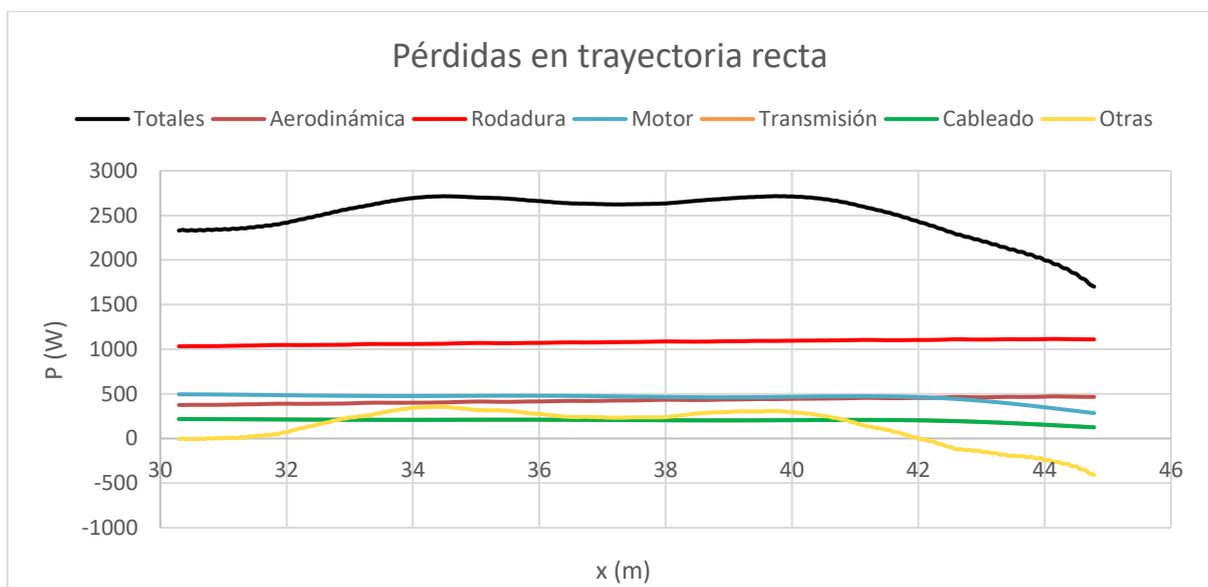


Figura 5.2.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 2. [Fuente propia]

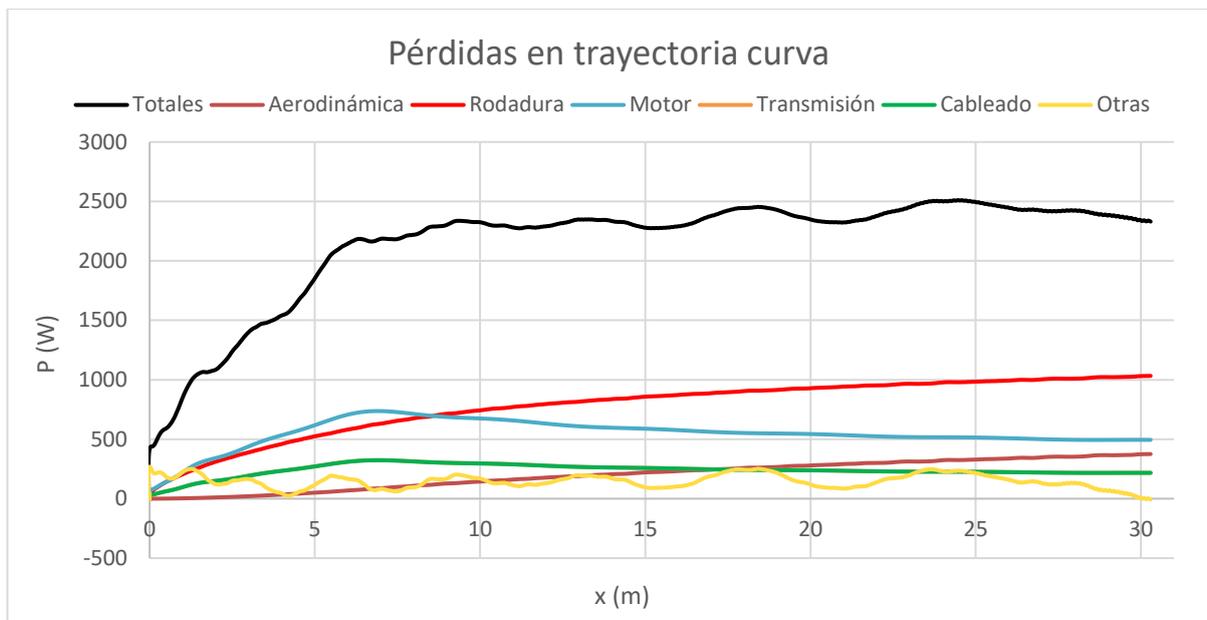


Figura 5.2.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 2. [Fuente propia]

Esto, en principio, es debido al efecto de la velocidad, ya que el coche incrementa su velocidad hasta aproximadamente los 45 metros, donde deja de acelerar y comienza a frenar previo a la segunda curva. Con los posteriores ensayos se confirmará esta tendencia de una mejor precisión a bajas velocidades.

5.2.4. Análisis del error

Tal y como se podía predecir comparando las gráficas de los dos ensayos, para este segundo trazado el error cometido al modelizar las pérdidas es mucho menor, inferior incluso al 10% en la mayor parte de la trayectoria (cuando la aceleración del vehículo es positiva).

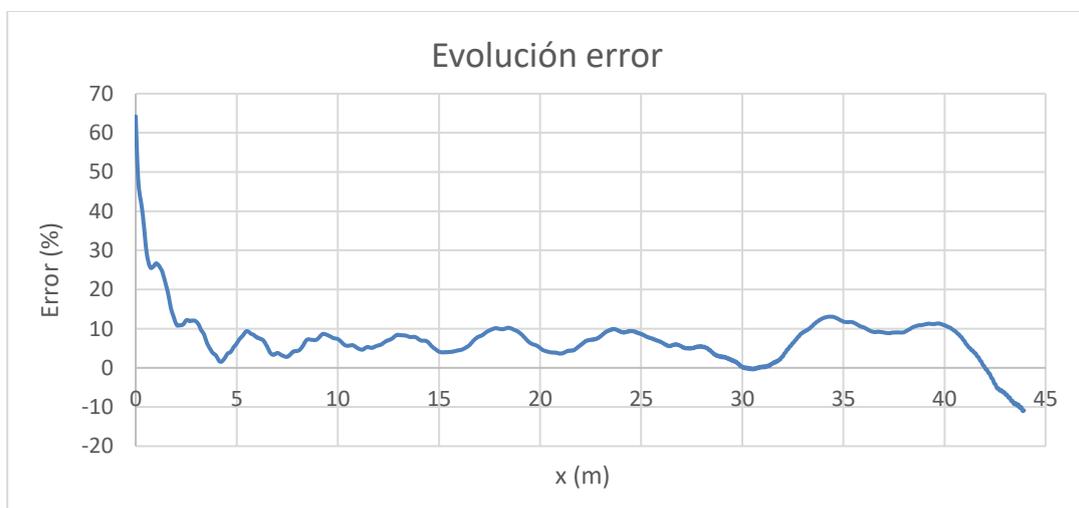


Figura 5.2.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 2. [Fuente propia]

Finalmente, en cuanto a la naturaleza del error, se puede ver que no guarda apenas relación con la velocidad tras el ajuste por mínimos cuadrados, a diferencia del primer ensayo.

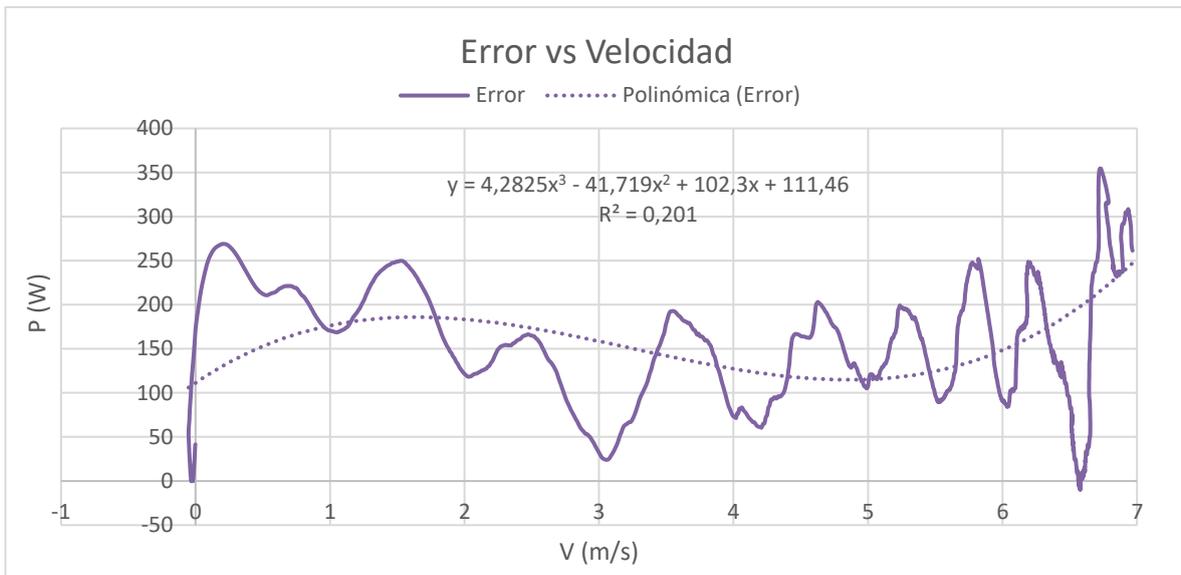


Figura 5.2.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 2. [Fuente propia]

De igual modo, si se compara con la potencia de salida de las baterías (véase Figura 5.2.11), se puede apreciar que el error también es independiente de esta variable, pues se mantiene más o menos constante a pesar de la variación de la potencia. Esto es lo contrario a lo que sucedía con la primera trayectoria, por lo que se podría deducir que el error cometido en esta modelización proviene de las mediciones, pero esta tendencia se contrastará con las siguientes trayectorias y se analizará en las conclusiones.

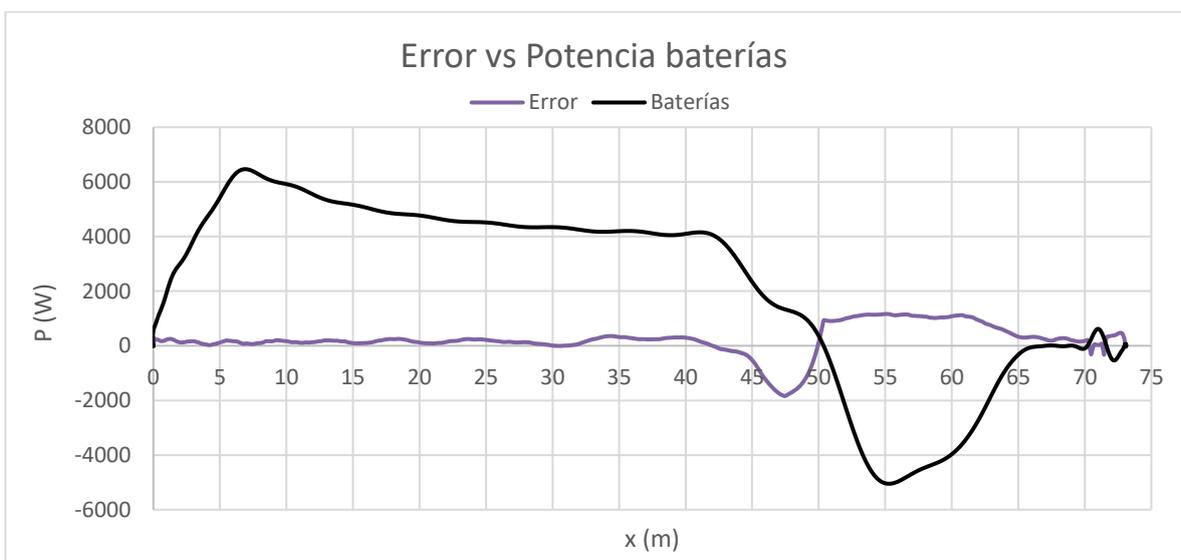


Figura 5.2.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 2. [Fuente propia]

5.3. Trayectoria 3

5.3.1. Posición y cinemática

Esta tercera trayectoria es muy similar al primer ensayo realizado, en cuanto al trazado descrito por el vehículo y la velocidad, ya que se realiza una aceleración rápida en los primeros instantes y se intenta mantener una velocidad constante de 2 m/s aproximadamente. La distancia total recorrida es inferior a los 85 metros, realizando una curva a derechas y otra a izquierdas, con un tramo recto entre ellas.

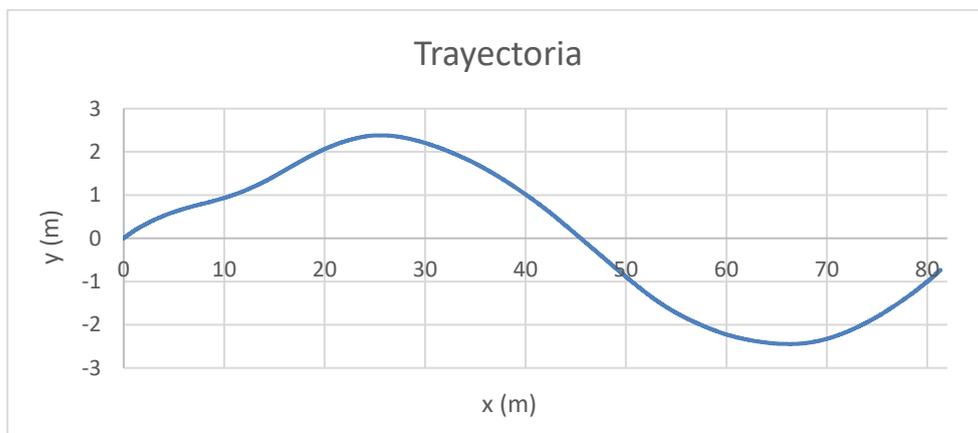


Figura 5.3.1: Trayectoria descrita en el ensayo 3. [Fuente propia]

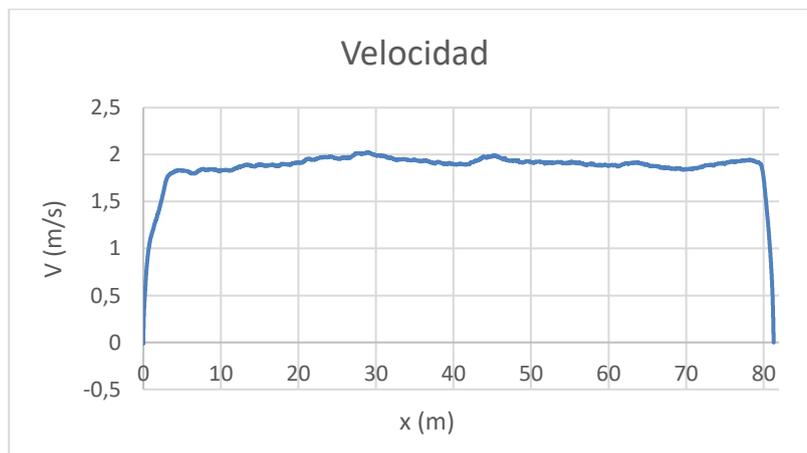


Figura 5.3.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]

Por tanto, las aceleraciones normal y tangencial registradas del vehículo también serán muy parecidas a la primera trayectoria realizada.

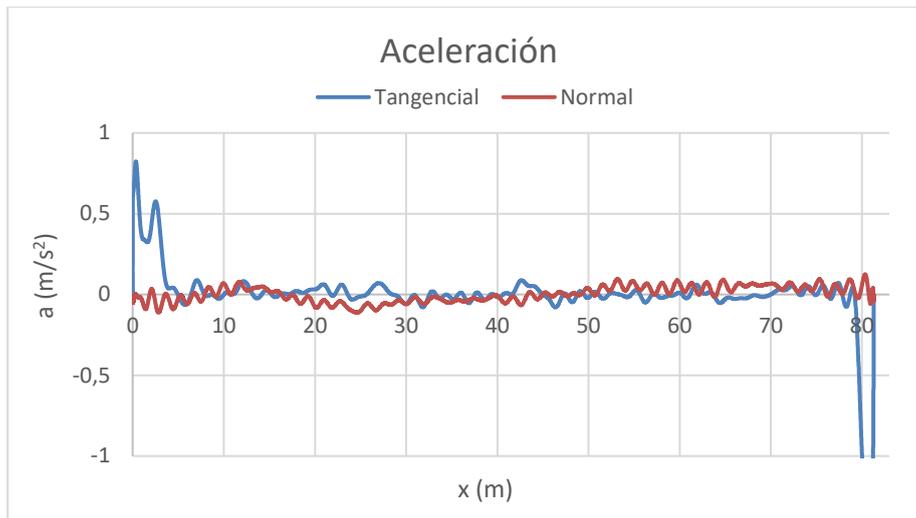


Figura 5.3.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]

Al tratar de mantener la velocidad constante, la aceleración en el eje longitudinal resulta ser muy pequeña y de poca variación, solo alcanza grandes valores en el arranque y la detención del vehículo. Por otra parte, la aceleración normal sigue siendo inferior aun en curvas, ya que estas se realizan de manera suave y a baja velocidad.

5.3.2. Balance de fuerzas y potencias

A través de la cinemática anterior, las distintas fuerzas que actúan en la dinámica del vehículo siguen las siguientes distribuciones:

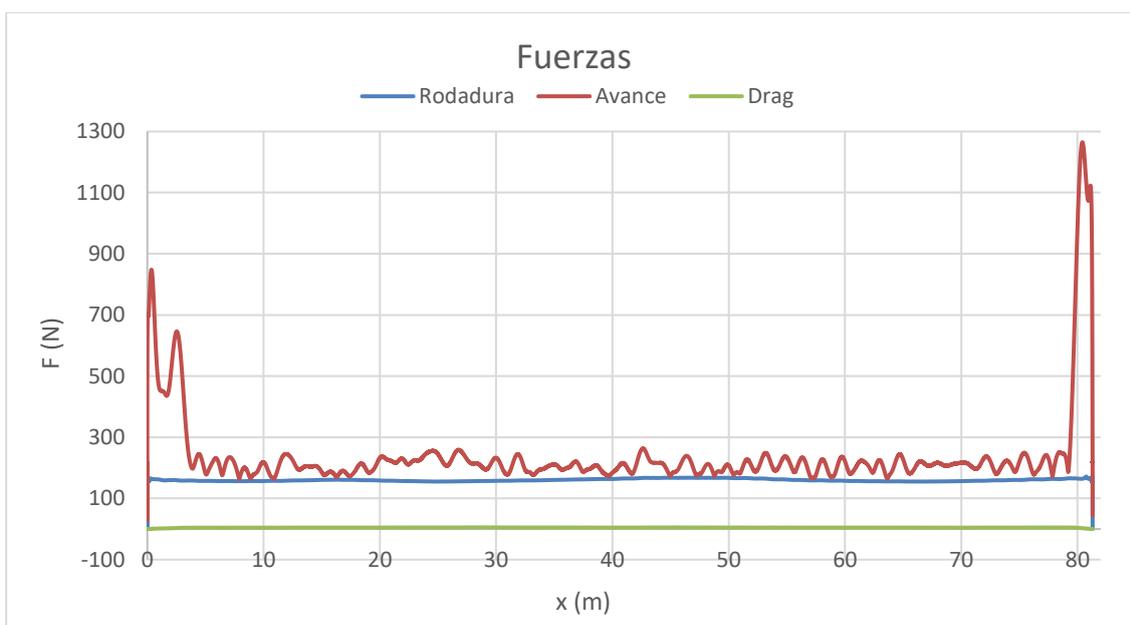


Figura 5.3.4: Balance de fuerzas en el ensayo 3. [Fuente propia]

Al igual que sucedía con la primera trayectoria, la resistencia aerodinámica no tiene un orden de magnitud importante en comparación con la resistencia a la rodadura, cuyo valor se sitúa sobre los 170 N. Además, la fuerza de movimiento es aproximadamente constante, en torno a un valor de 200 N, y no es demasiado superior.

Por tanto, en vista a la dinámica del vehículo, se puede deducir que la potencia útil será notablemente inferior a la potencia perdida, que se situará cerca de la otorgada por las baterías (potencia total), al igual que sucedía en el primer ensayo. En la Figura 5.3.5 se observan estas tendencias.

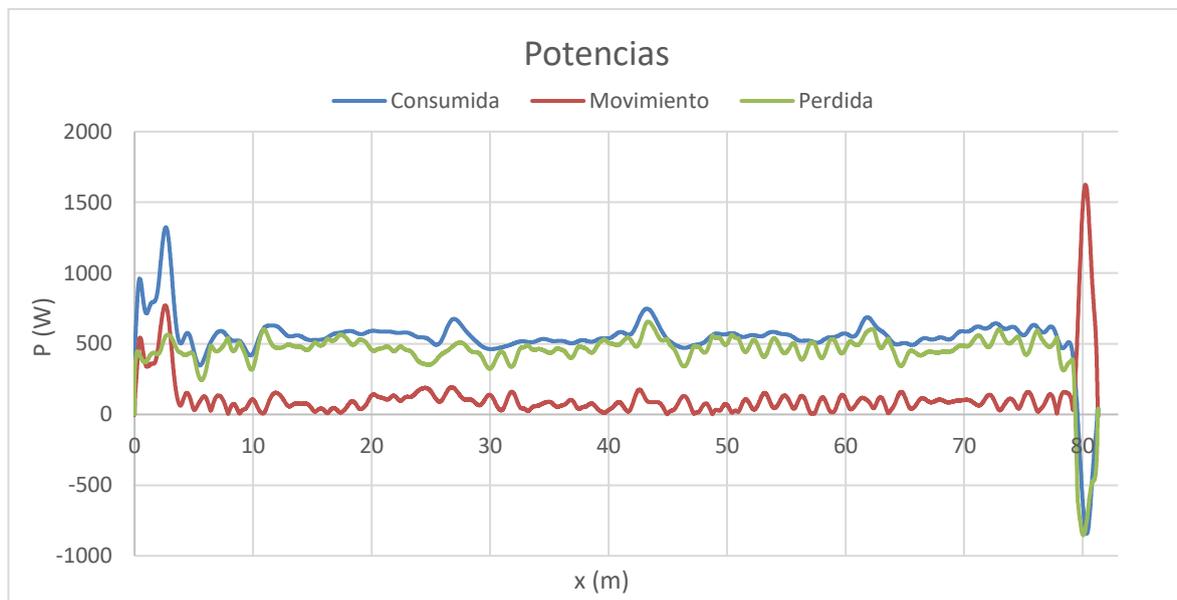


Figura 5.3.5: Balance de potencias en el ensayo 3. [Fuente propia]

5.3.3. Evaluación de pérdidas

Tras proceder según lo expuesto en el apartado 4.3, las diferentes pérdidas energéticas del vehículo quedan de la siguiente manera para este tercer ensayo:

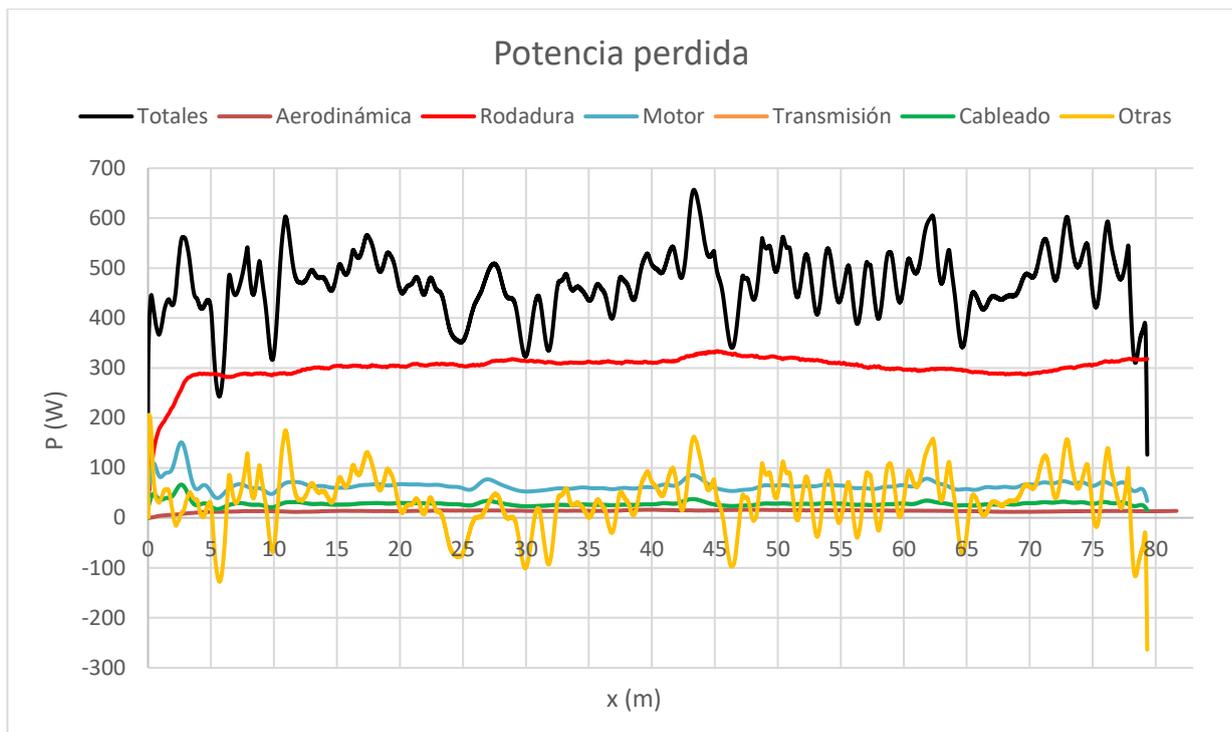


Figura 5.3.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 3. [Fuente propia]

Como cabía esperar en base a la dinámica del vehículo de la Figura 5.3.5, las pérdidas por la rodadura y rozamiento de los neumáticos es la más importante, en torno a los 300 W de potencia, seguido del motor y la transmisión eléctrica. Al igual que en la trayectoria 1, las pérdidas de potencia por la resistencia aerodinámica y la transmisión mecánica no son de gran valor, por la baja velocidad del vehículo.

Por otro lado, si se analizan por separado el tramo recto y la última curva de esta trayectoria, destacan 2 observaciones: la primera, que la resistencia a la rodadura es muy similar en ambos casos, ligeramente superior en recta; y la segunda, que la modelización posee una precisión similar en ambas partes, sin llegar a superar los 200 W de potencia.

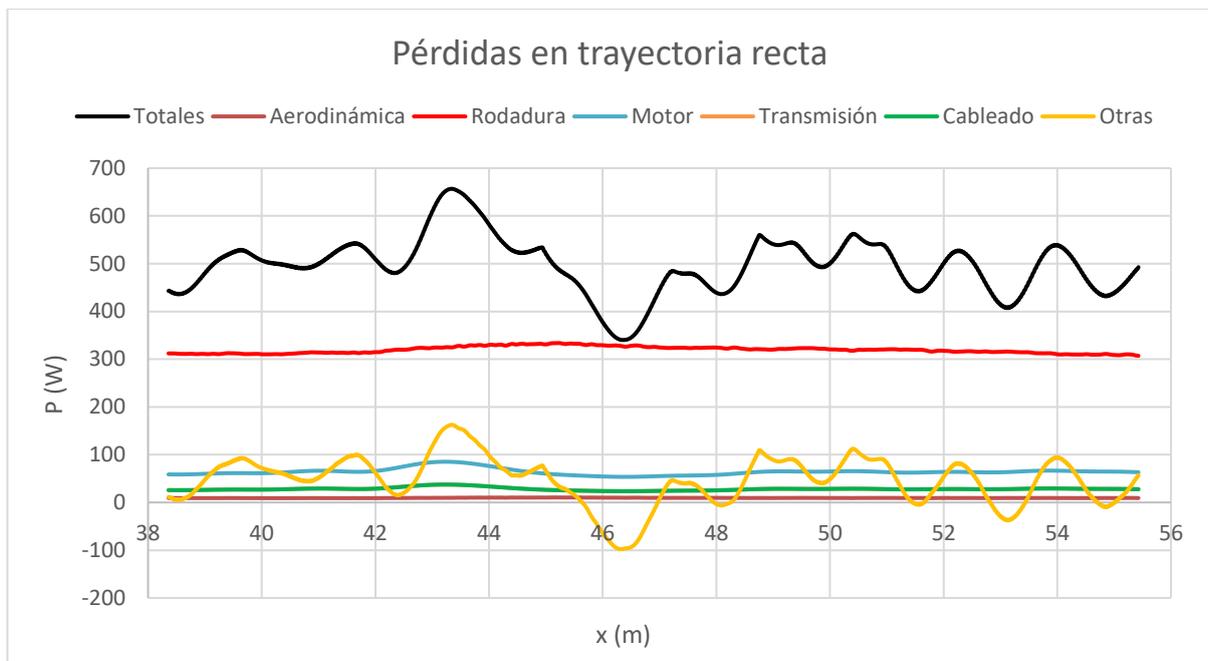


Figura 5.3.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 3. [Fuente propia]

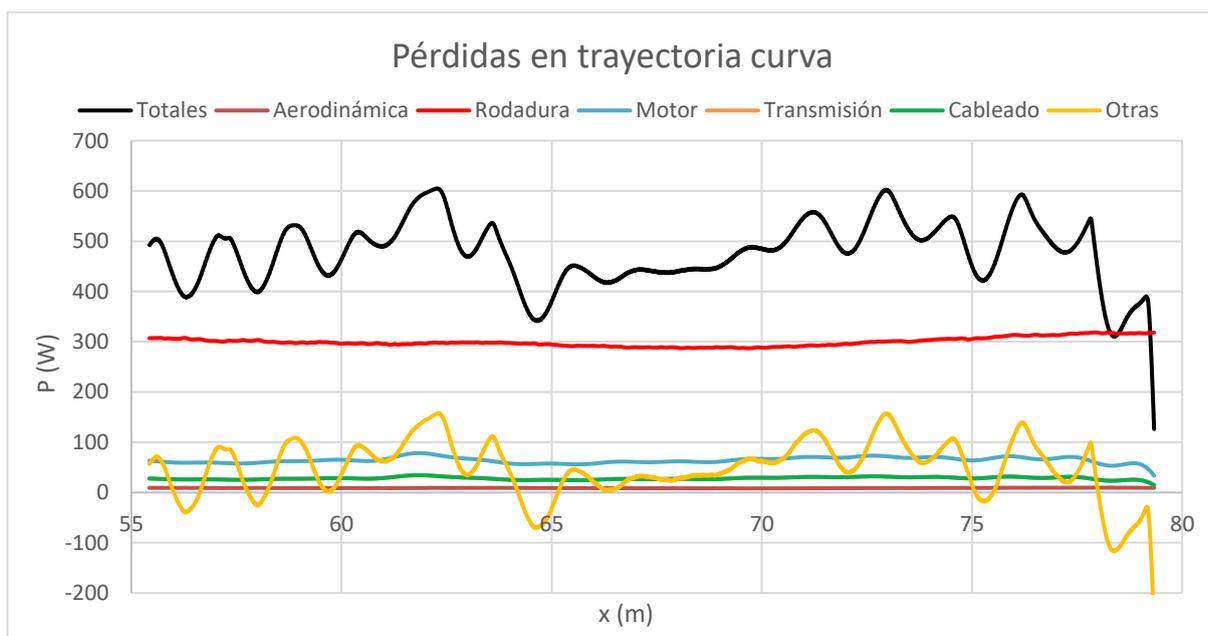


Figura 5.3.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 3. [Fuente propia]

5.3.4. Análisis del error

En cuanto al error en la modelización, se puede ver en la Figura 5.3.6 una gran variación en la amplitud de este, similar a lo mostrado en el primer ensayo. Si se atiende a la evolución a lo largo del trazado, se puede comprobar fácilmente que la aproximación no es tan exacta como en la trayectoria 2, pues ahora se dan picos de error ligeramente superiores al 20%.

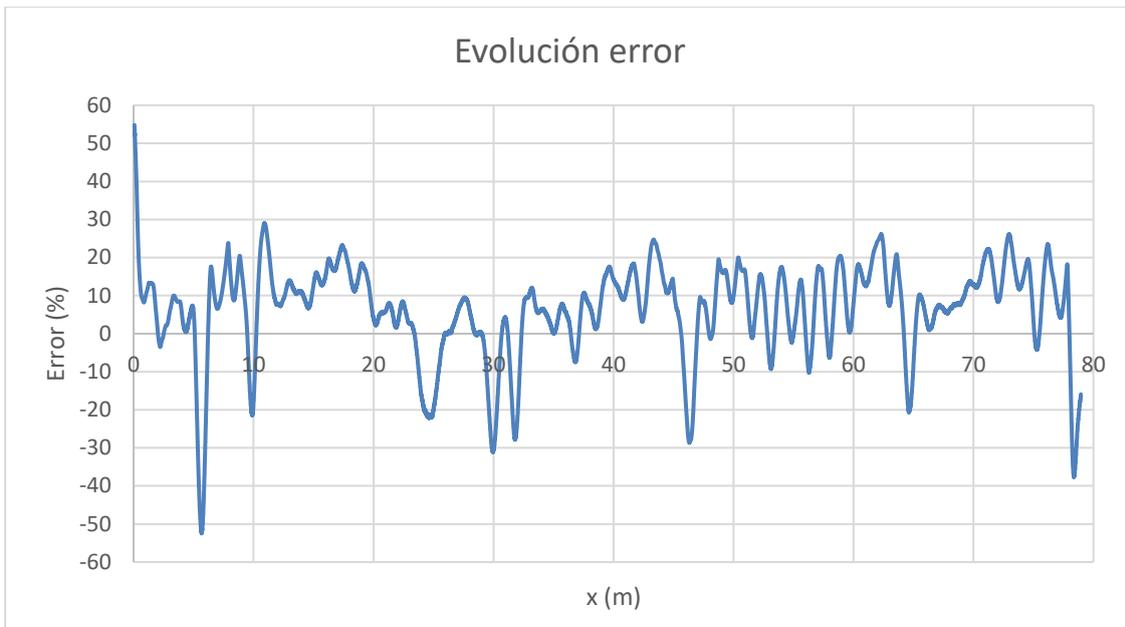


Figura 5.3.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 3. [Fuente propia]

Respecto a su relación la velocidad, como se puede ver en la Figura 5.3.10, no se puede extraer una clara dependencia con esta variable tras el ajuste, pues no es del todo preciso y se necesitan más datos para la comparación.

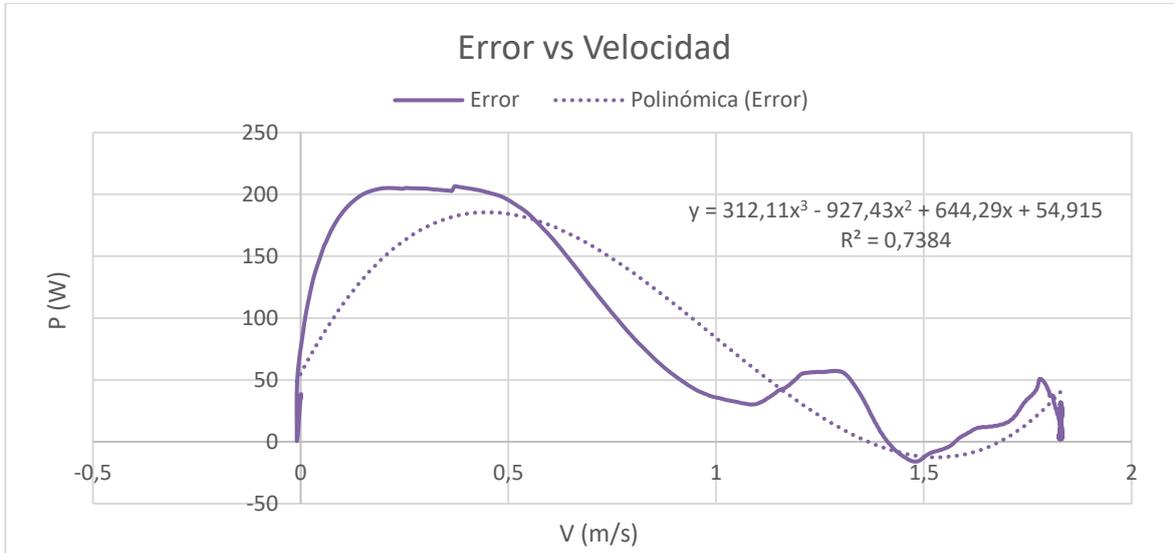


Figura 5.3.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 3. [Fuente propia]

En cambio, si se analiza respecto a la potencia total, sí que se tiene una clara relación entre ambas variables ya que describen curvas similares, al igual que sucedía en la primera trayectoria.

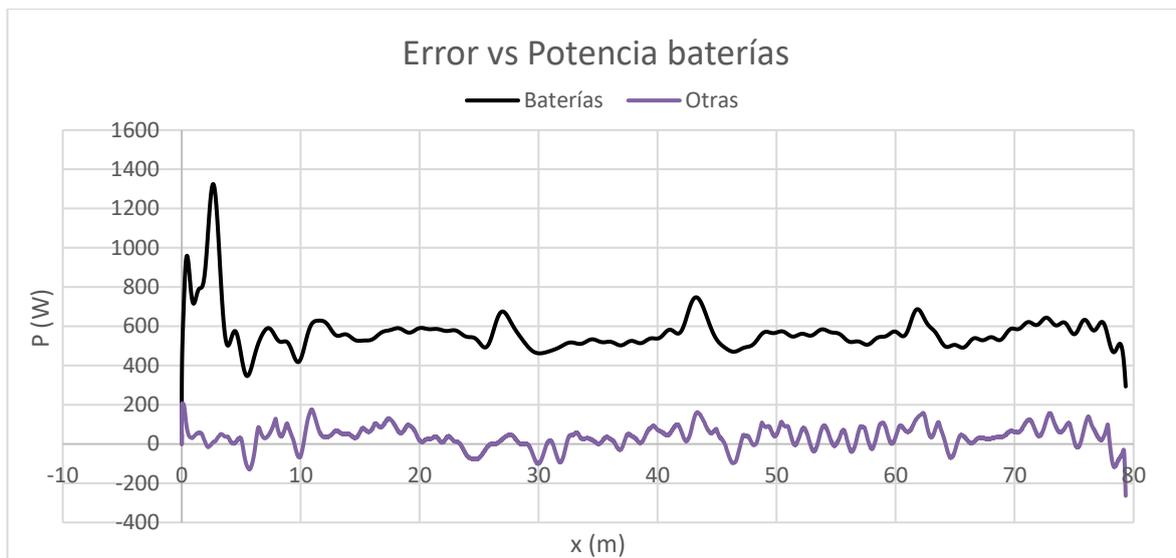


Figura 5.3.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 3. [Fuente propia]

5.4. Trayectoria 4

5.4.1. Posición y cinemática

En este cuarto ensayo, la trayectoria es similar a las anteriores, siendo la última curva bastante más corta y finalizando en una línea recta.

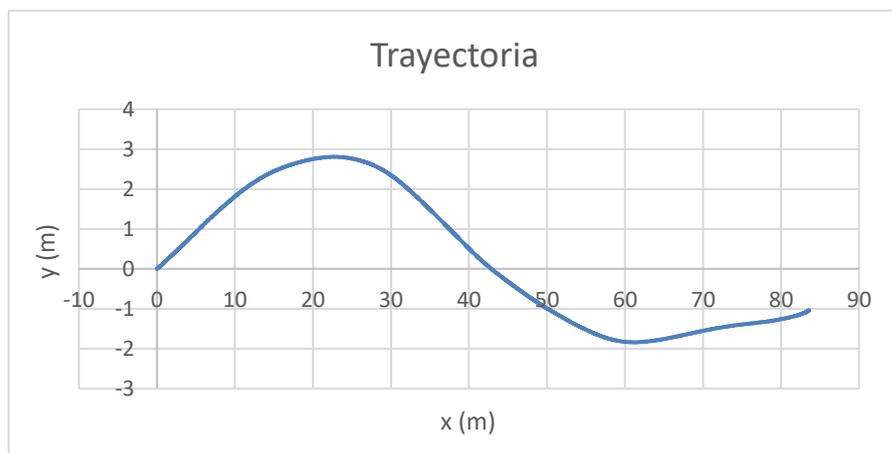


Figura 5.4.1: Trayectoria descrita en el ensayo 4. [Fuente propia]

La principal diferencia se observa en el perfil de velocidades, el cual es bastante irregular. En los primeros metros, se produce un rápido arranque. Posteriormente, a partir de los 10 metros, se produce un ascenso más relajado e irregular hasta una velocidad máxima de 10 km/h. Finalmente, tras recorrer 80 metros, se produce la deceleración brusca del vehículo hasta su detención.

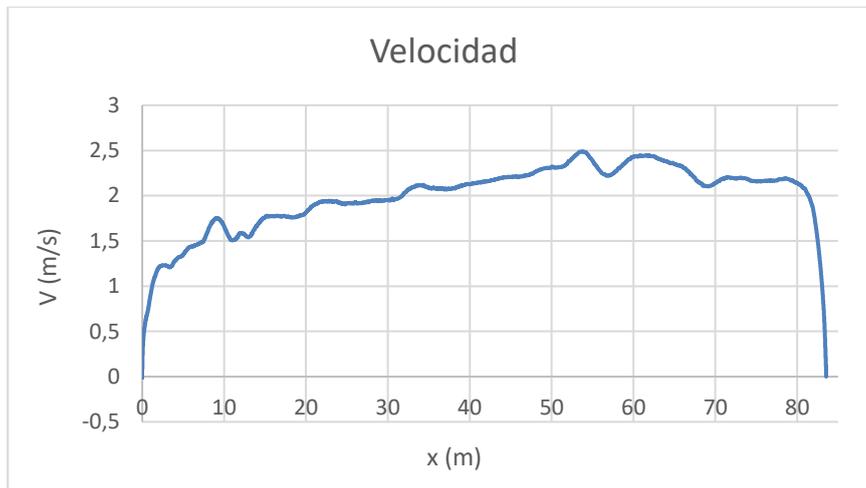


Figura 5.4.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]

Debido a esta distribución de velocidad tan irregular, se deduce una aceleración tangencial con las mismas características. No ocurre así con la componente normal, que es relativamente inferior por la suavidad de las curvas y la baja velocidad a la que se toman, y cuyo valor máximo se sitúa en torno a $0,2 \text{ m/s}^2$.

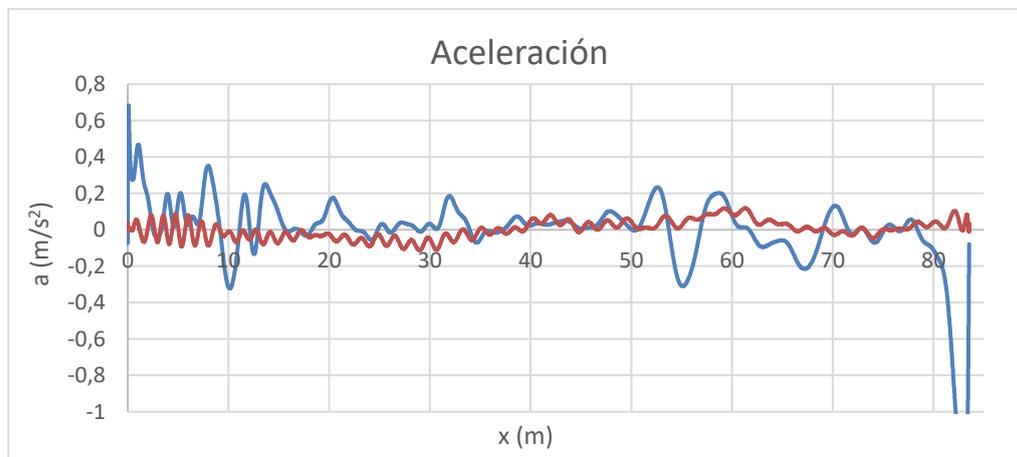


Figura 5.4.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]

5.4.2. Balance de fuerzas y potencias

En base a este perfil de aceleraciones, la fuerza de avance o de movimiento también tendrá un aspecto bastante irregular. Tal y como sucedía en anteriores trayectorias, esto conlleva una fuerza de rodadura importante y aproximadamente constante, mientras que la resistencia aerodinámica no es de gran valor debido a las bajas velocidades del vehículo.

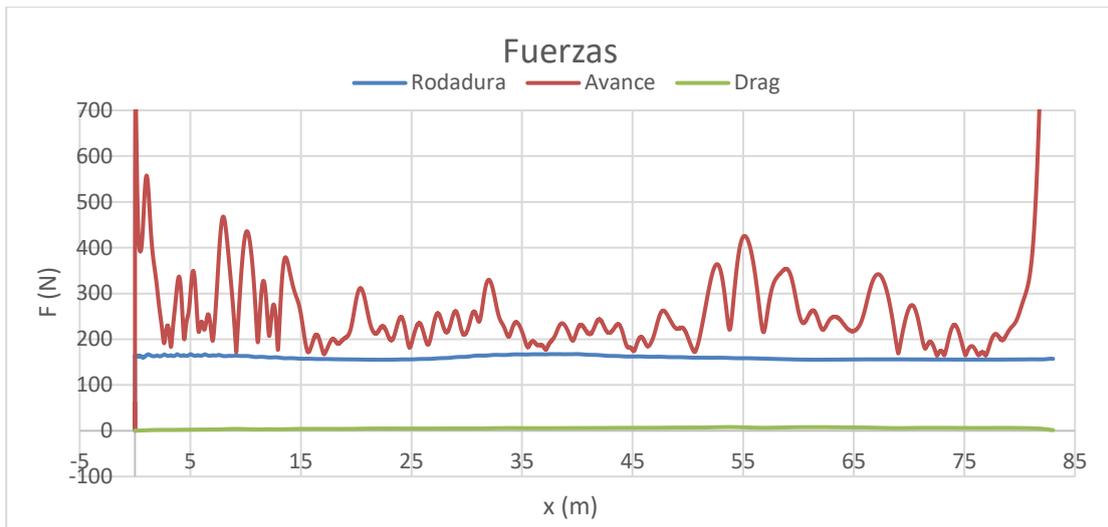


Figura 5.4.4: Balance de fuerzas en el ensayo 4. [Fuente propia]

Así, las diferentes potencias serán también bastante variables, y la potencia del movimiento estará muy por debajo del valor esperado, pues las pérdidas energéticas serán notorias.

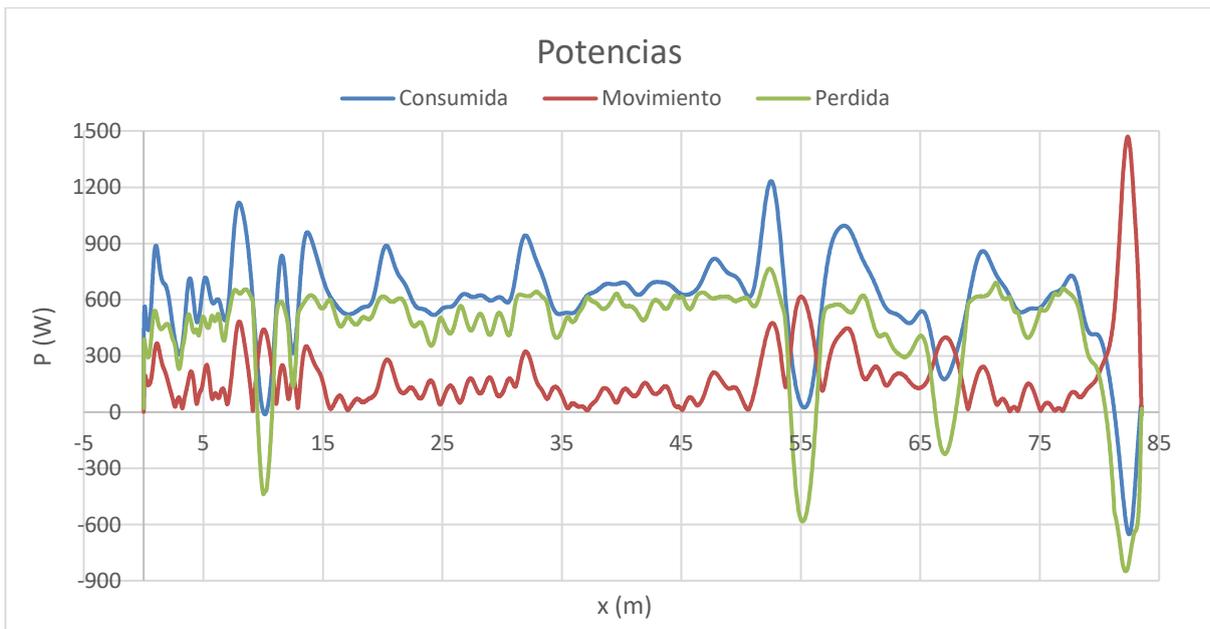


Figura 5.4.5: Balance de potencias en el ensayo 4. [Fuente propia]

5.4.3. Evaluación de pérdidas

Respecto a las pérdidas, se puede apreciar en la Figura 5.4.6 una tendencia similar a anteriores ensayos: la fuerza de rodadura es la más importante y, además, en este caso se incrementa por efecto de la velocidad. Respecto a los diferentes subsistemas del vehículo, estos tienen unas pérdidas bastante menores, pero de mayor consideración que la resistencia aerodinámica.

Por otro lado, se observa que el error es tan cambiante como la potencia de las baterías y que, cuando el vehículo se encuentra acelerando (entre los 15 y los 50 metros), su orden de magnitud es inferior a otras trayectorias ya descritas, situándose por debajo de los 100 W en trayectoria recta (véase Figura 5.4.7) y de los 200 W en la primera curva (véase Figura 5.4.8).

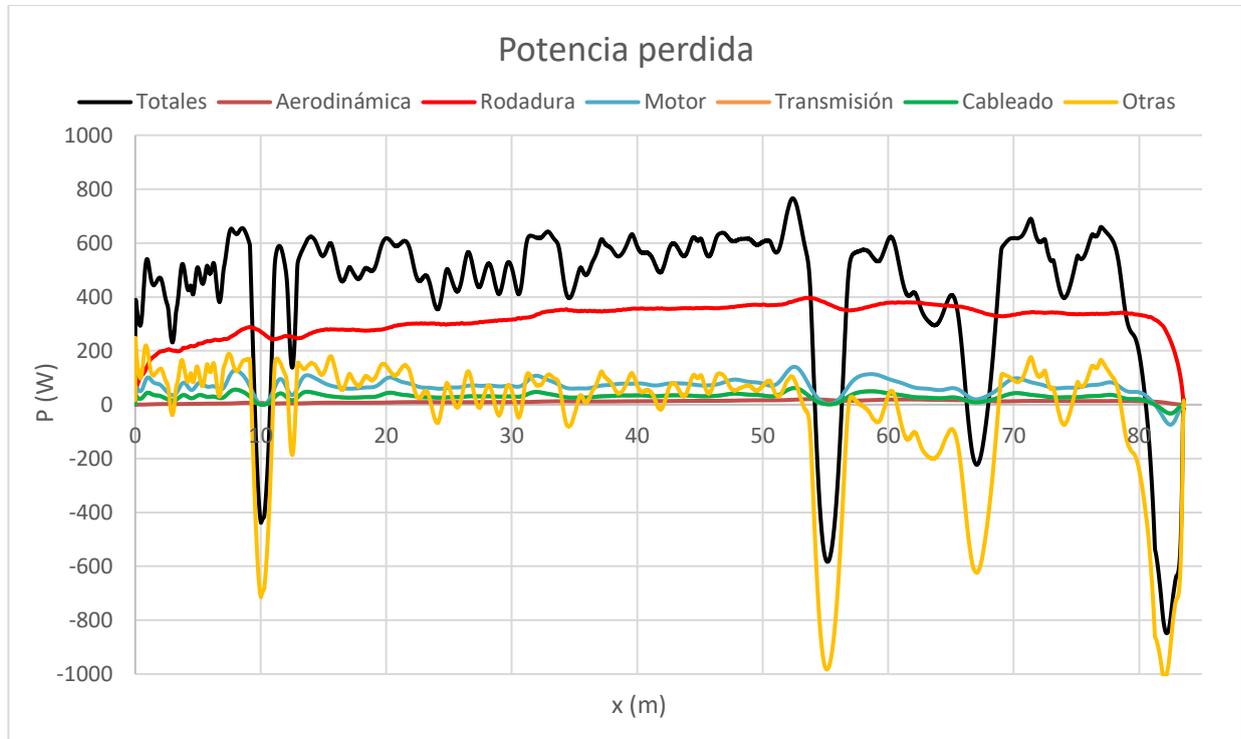


Figura 5.4.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 4. [Fuente propia]

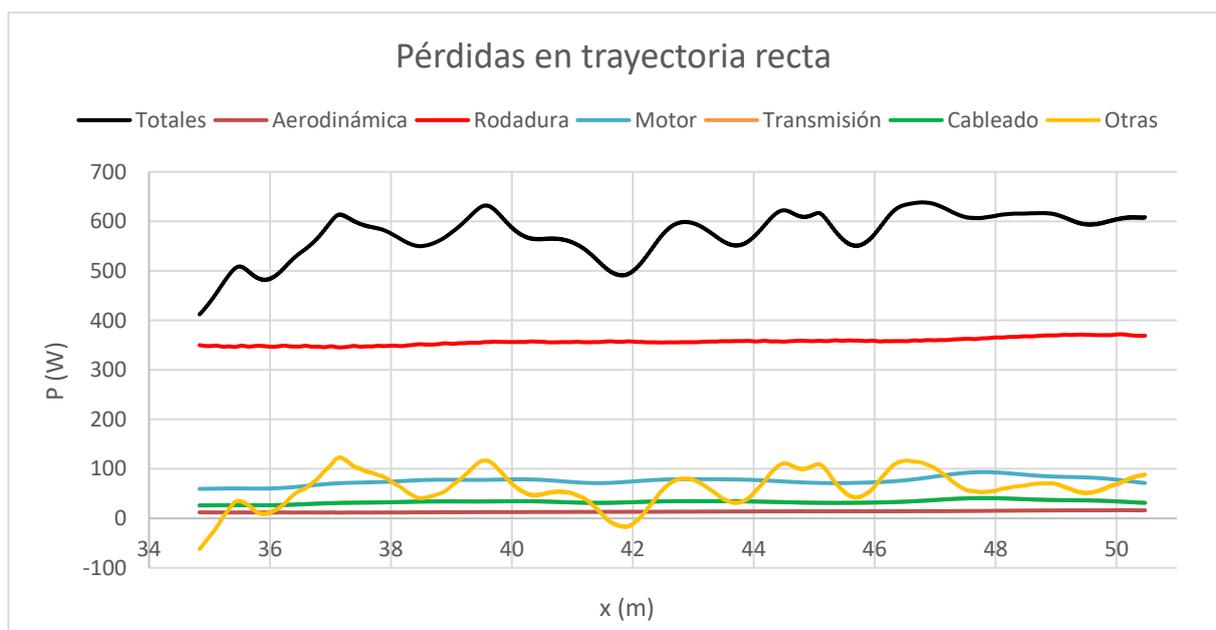


Figura 5.4.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 4. [Fuente propia]

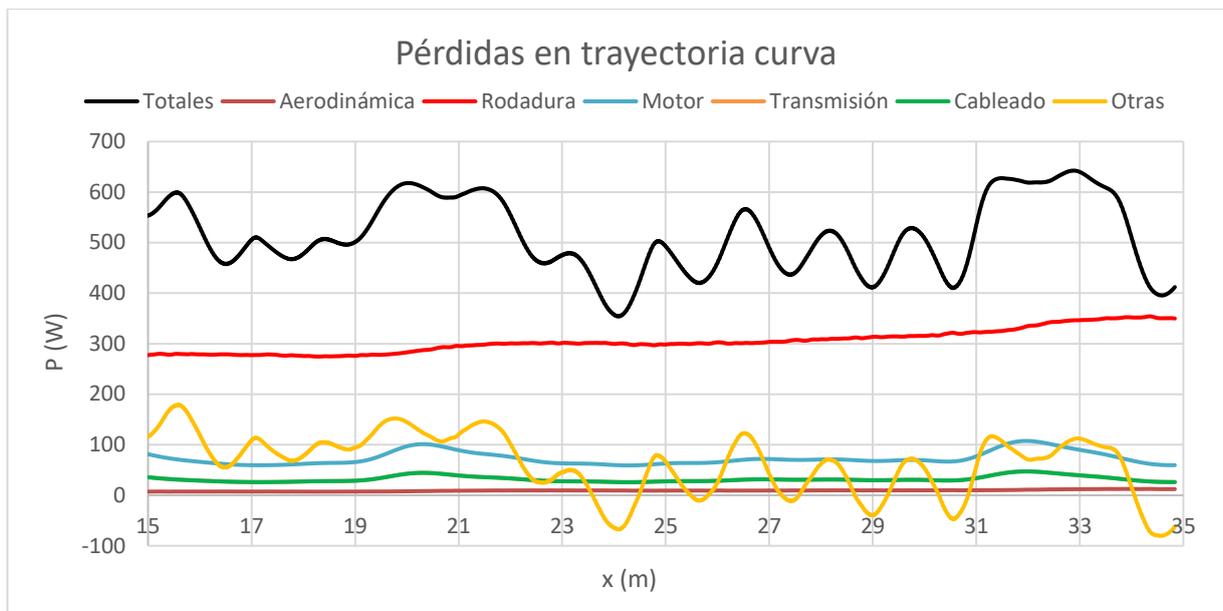


Figura 5.4.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 4. [Fuente propia]

5.4.4. Análisis del error

En base a los resultados obtenidos de pérdidas totales y la diferencia con la modelización, se puede intuir fácilmente que el error cometido será bastante cambiante a lo largo de la trayectoria. El valor máximo por exceso que se alcanza es de un 15%, mientras que por defecto se sitúa sobre el 30%. En conclusión, es un resultado bastante mejorable si se compara con la trayectoria 2, donde el error máximo no superaba el 10%.

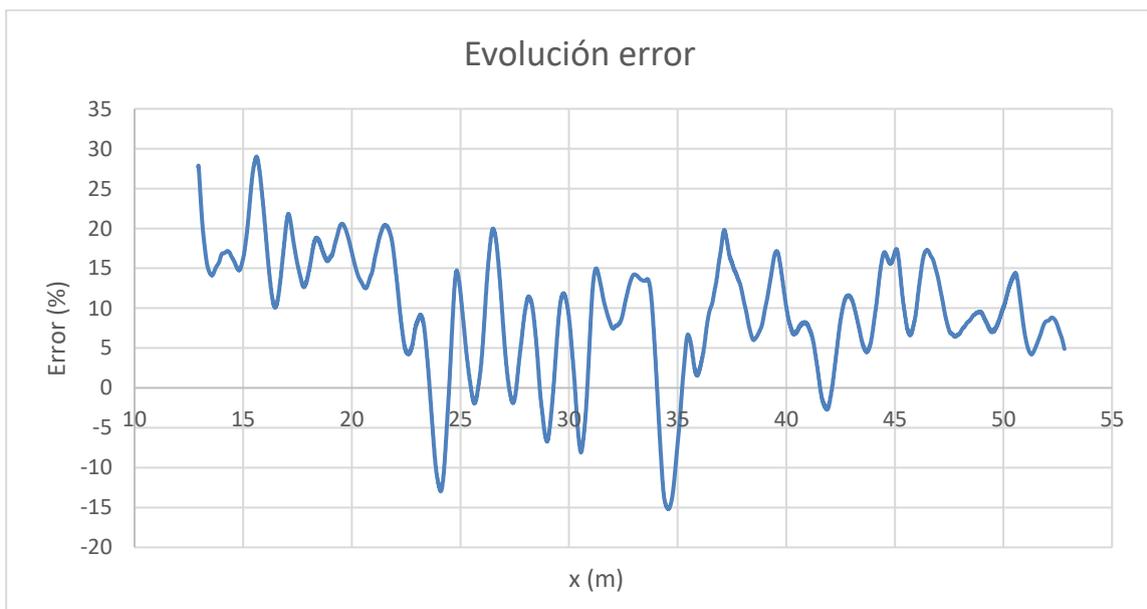


Figura 5.4.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 4. [Fuente propia]

Debido a estos resultados tan variables, la relación de este error con la velocidad del vehículo se estudiará en dos partes: para la aceleración inicial (véase Figura 5.4.10) y el tramo recto tras la primera curva, a una velocidad más alta (véase Figura 5.4.11).

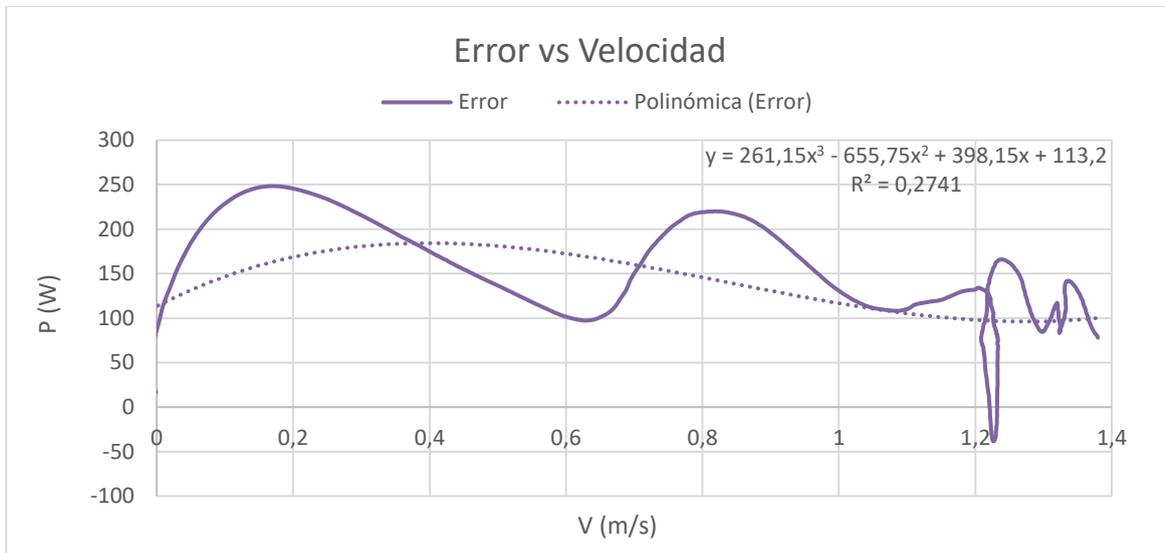


Figura 5.4.10: Comparación entre error y velocidad baja en el ensayo 4. [Fuente propia]

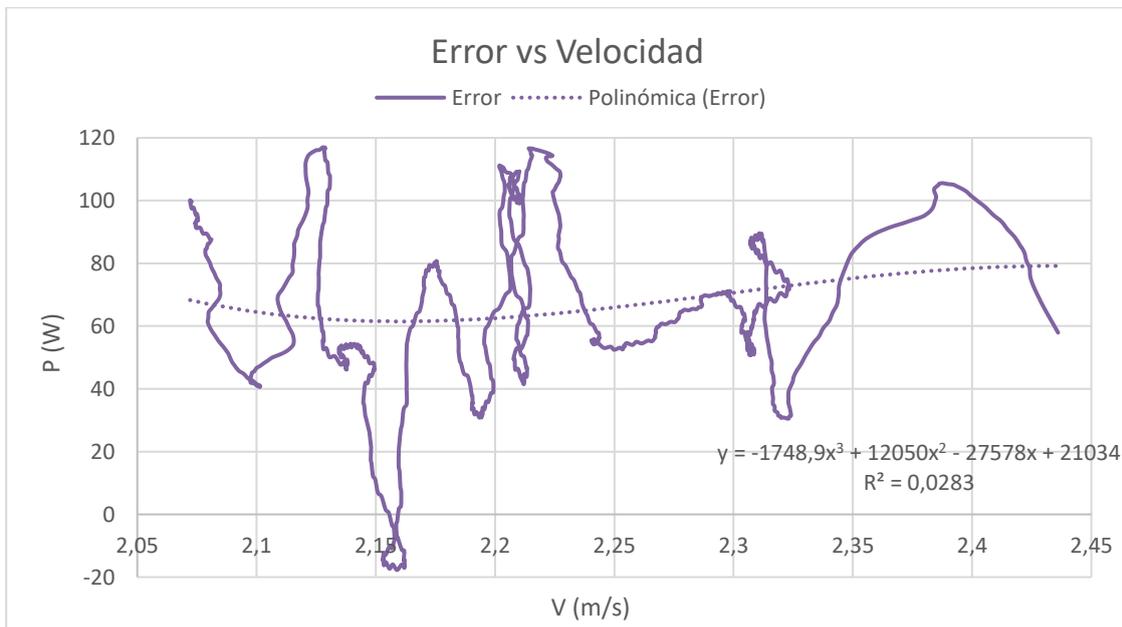


Figura 5.4.11: Comparación entre error y alta velocidad en el ensayo 4. [Fuente propia]

En cualquiera de los dos casos, se puede apreciar que, debido a esta distribución irregular de velocidad, la variación del error cometido en la modelización de las pérdidas no está justificada con esta variable.

No obstante, respecto a la potencia de salida de las baterías, se puede apreciar una tendencia similar, al igual que en anteriores trayectorias. Por otro lado, a partir de los 10–12 metros hasta aproximadamente los 53 metros (desde la primera curva, inclusive, hasta la segunda), se puede observar que el error se mantiene en valores positivos y no demasiado elevados.

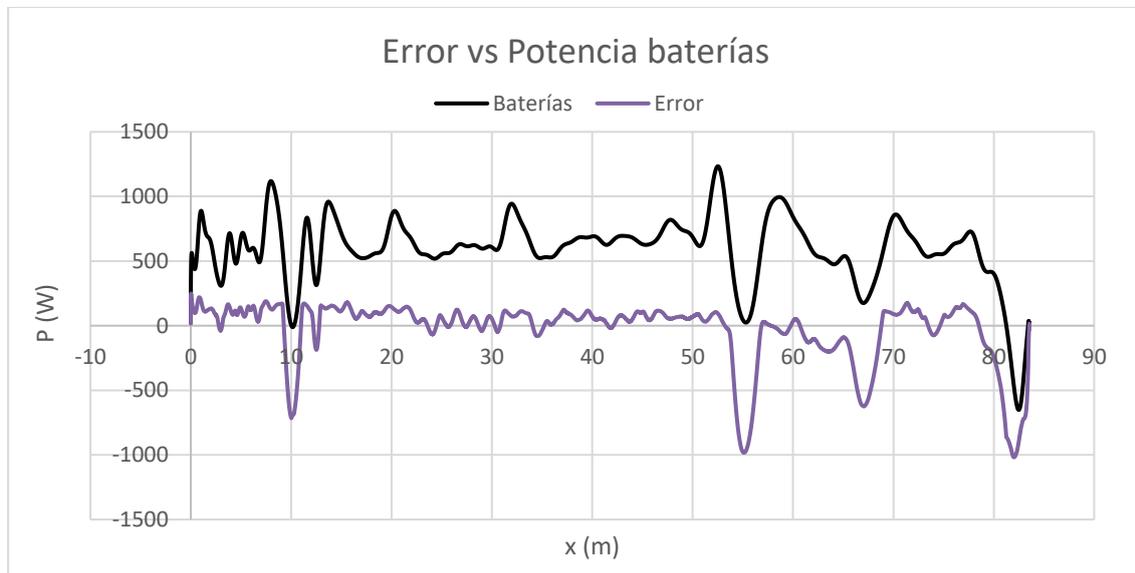


Figura 5.4.12: Comparación entre error y potencia en el ensayo 4. [Fuente propia]

5.5. Trayectoria 5

5.5.1. Posición y cinemática

En este quinto ensayo, el vehículo comienza con una trayectoria recta, acelerando hasta los 11 km/h. Entre los 25 y los 40 metros, realiza una curva a derechas a dicha velocidad constante. Posteriormente, sigue un MRU hasta pasados los 50 metros, donde describe una curva a izquierdas mientras que decelera suavemente. En el tramo de recta final, el vehículo pierde velocidad rápidamente hasta detenerse.

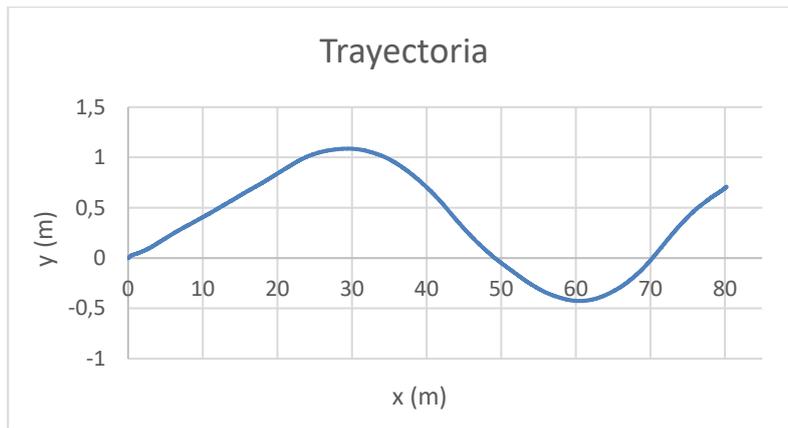


Figura 5.5.1: Trayectoria descrita en el ensayo 5. [Fuente propia]

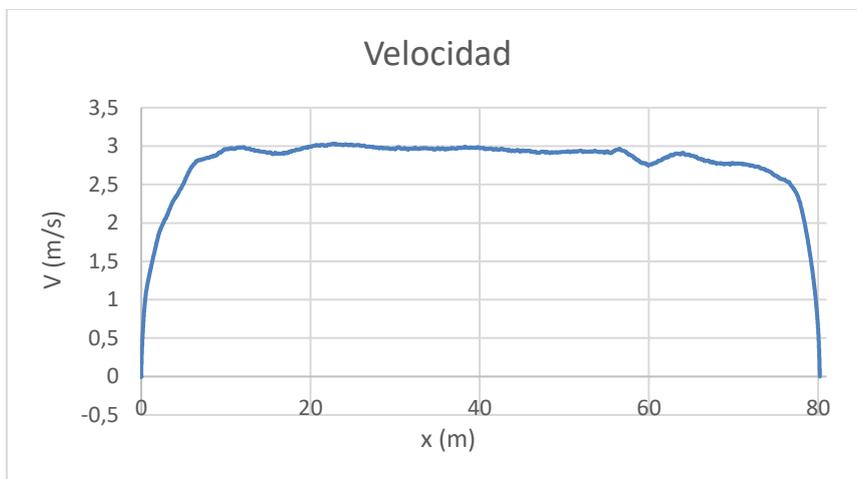


Figura 5.5.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]

En vista a lo comentado con la velocidad, se puede observar el perfil de aceleraciones correspondiente en la Figura 5.5.3. Cabe destacar que la componente normal es bastante limitada, no superando apenas los $0,1 \text{ m/s}^2$, al igual que la aceleración tangencial, que solo destaca al comienzo y final de la trayectoria.

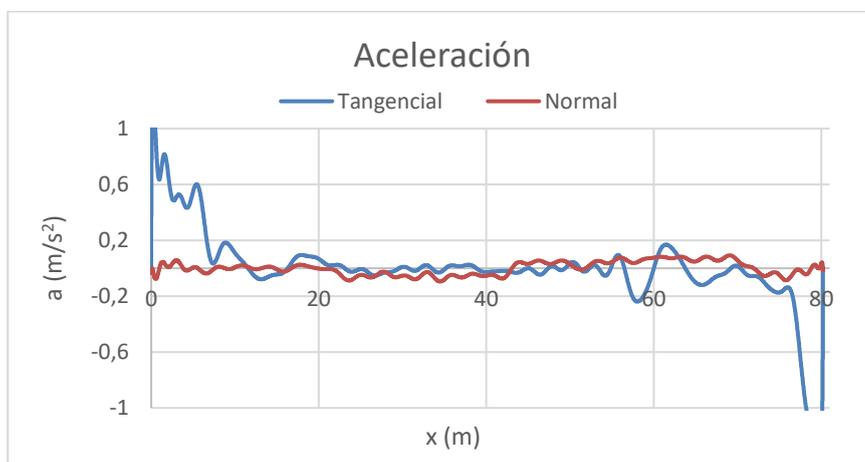


Figura 5.5.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]

5.5.2. Balance de fuerzas y potencias

Tal y como se ha observado en la distribución de aceleración, se puede deducir el siguiente balance de fuerzas. Puede apreciarse que la fuerza de rodadura es similar a la de avance, debido a la limitada aceleración que desarrolla el vehículo. Por otro lado, la resistencia aerodinámica, por efecto de la baja velocidad, apenas supera los 100 N.

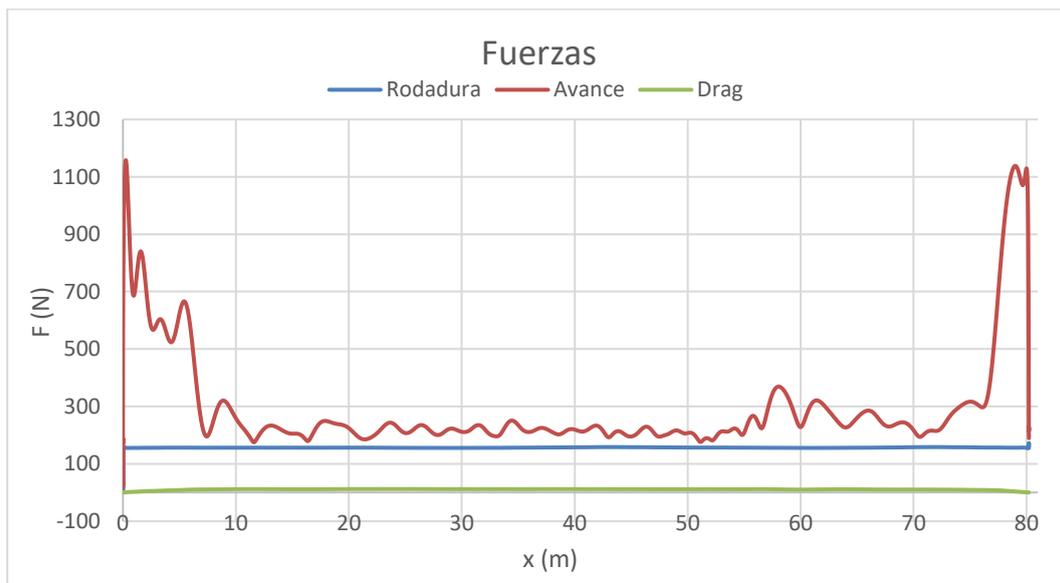


Figura 5.5.4: Balance de fuerzas en el ensayo 5. [Fuente propia]

Así, el balance de potencias resulta similar a los ensayos anteriores, donde la potencia útil o de movimiento resulta ser bastante inferior a la consumida, por lo que las pérdidas energéticas son considerables.

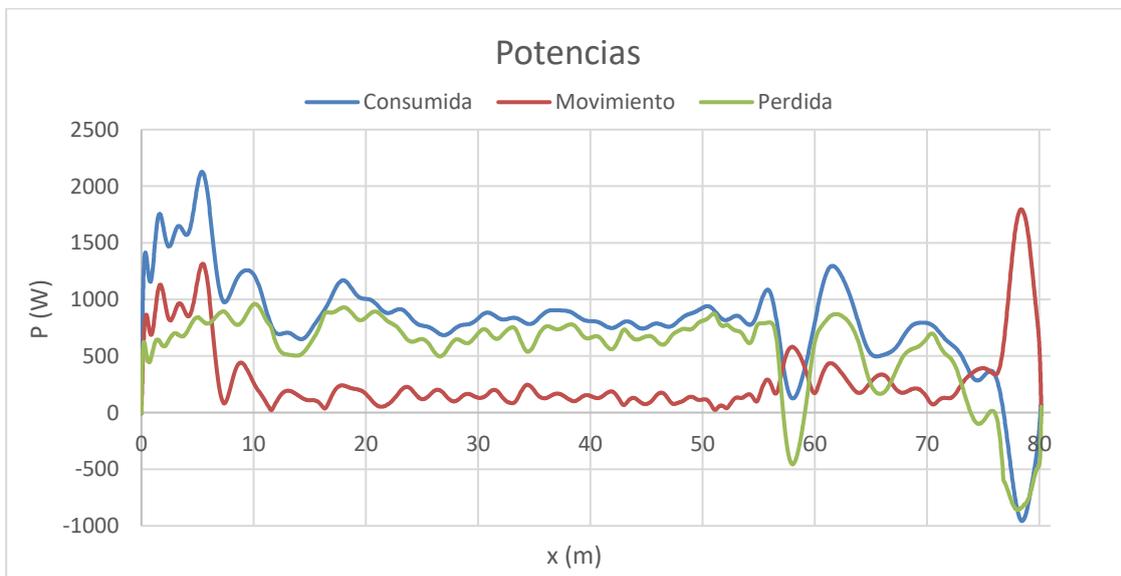


Figura 5.5.5: Balance de potencias en el ensayo 5. [Fuente propia]

5.5.3. Evaluación de pérdidas

En el análisis de la eficiencia, puede apreciarse que la resistencia a la rodadura es la fuente de pérdidas energéticas más importante. En segundo lugar, se tiene el rendimiento del motor y, finalmente, las pérdidas en el cableado, transmisión mecánica y la resistencia aerodinámica. En comparación con los ensayos anteriores, este balance resulta similar.

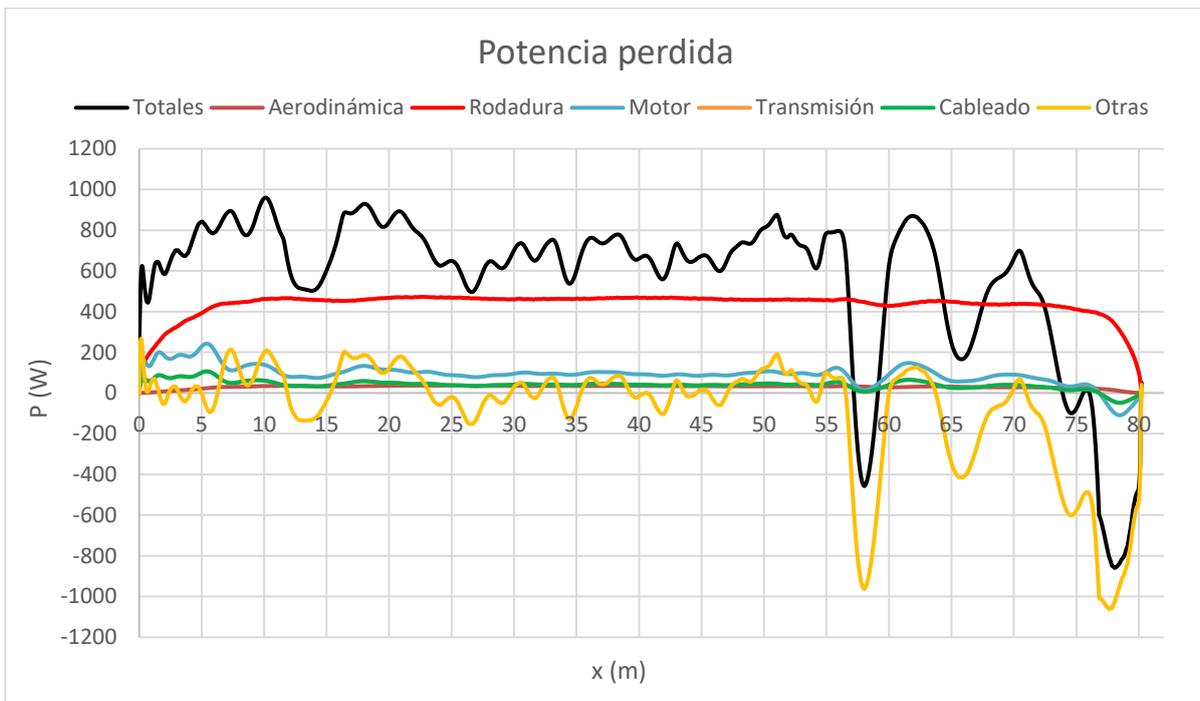


Figura 5.5.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 5. [Fuente propia]

En el tramo inicial, donde se describe un MRUA, se puede ver cómo se incrementa la resistencia a la rodadura conforme el vehículo adquiere velocidad. Por otro lado, las pérdidas en el motor y en las transmisiones se reducen levemente, mientras que la potencia perdida por la resistencia aerodinámica aumenta escasamente hasta llegar a la velocidad constante. En cuanto al error cometido en la modelización, se observa que el valor máximo que alcanza no supera los 200 W de potencia (en valor absoluto), aunque no es nada despreciable en comparación con las diferentes pérdidas energéticas.

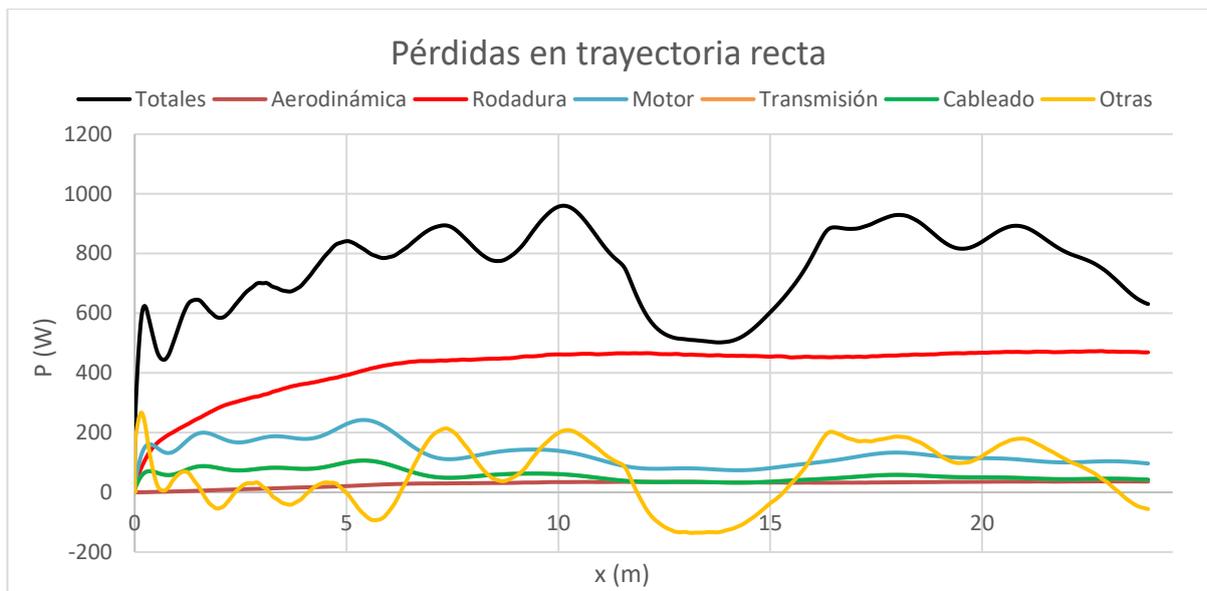


Figura 5.5.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 5. [Fuente propia]

Tras alcanzar una velocidad aproximadamente constante de 3 m/s, el vehículo realiza una curva a derechas manteniendo dicha celeridad. Esto se ve reflejado en la Figura 5.5.8 como una serie de valores constantes en las diferentes pérdidas energéticas, tanto en la resistencia a la rodadura y aerodinámica como en el motor y los diferentes subsistemas del automóvil. Debido a esto, el error cometido varía con la potencia perdida total, al igual que sucedía en las trayectorias previas.

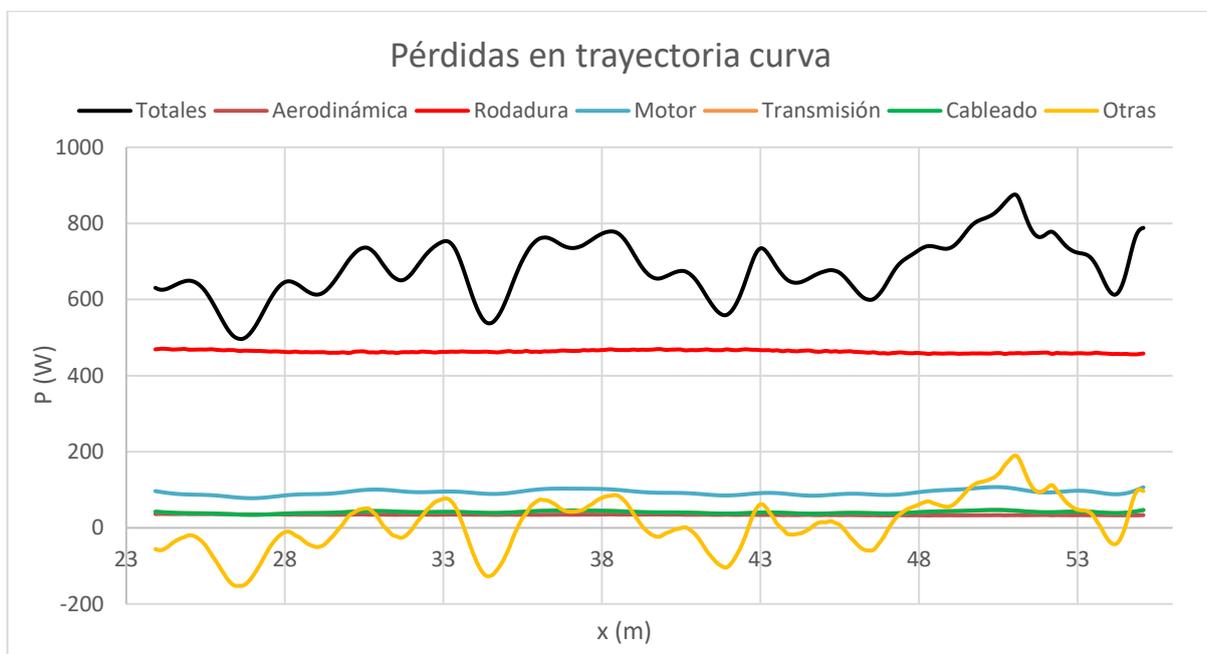


Figura 5.5.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 5. [Fuente propia]

5.5.4. Análisis del error

Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, en la Figura 5.5.9 puede apreciarse que el error en la modelización es bastante cambiante. Los valores máximos rondan el 20% de la potencia consumida, y se alcanzan en la recta inicial, cuando el vehículo se encuentra aun acelerando. A partir de la primera curva, su valor se reduce levemente hasta un 10%–15%. Al llegar al segundo giro, alrededor de los 55 metros, el vehículo comienza a decelerar.

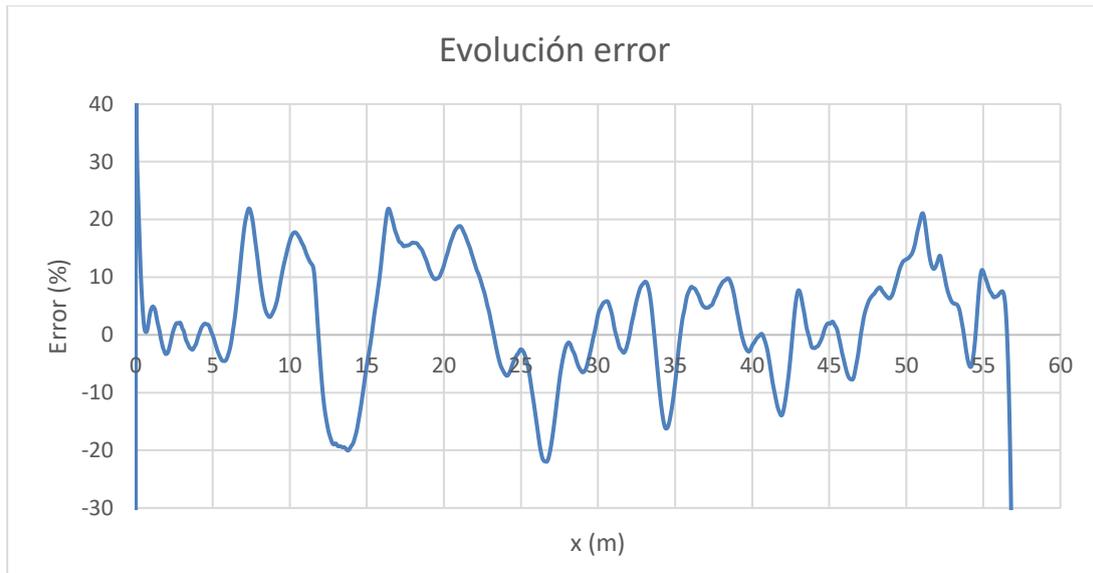


Figura 5.5.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 5. [Fuente propia]

En cuanto a la naturaleza del error, puede observarse en la Figura 5.5.10 la relación con la velocidad del vehículo. Tras el ajuste por mínimos cuadrados, no puede obtenerse una conclusión cierta sobre esta posible concordancia, ya que la curva es bastante irregular y no sigue una clara tendencia con el cubo de la velocidad.

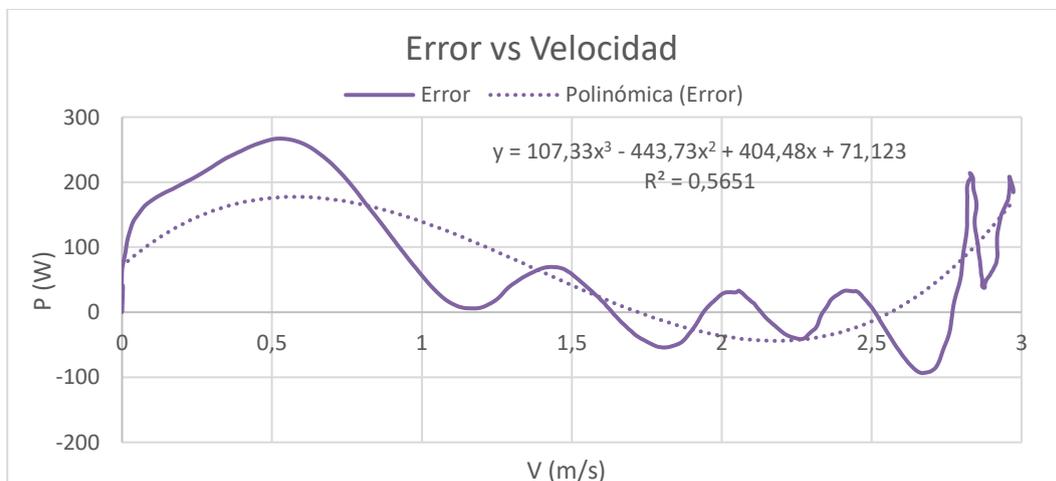


Figura 5.5.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 5. [Fuente propia]

Sin embargo, respecto a la potencia de salida de las baterías, puede observarse en la Figura 5.5.11 que ambas curvas son similares, por lo que se podría establecer una relación entre el error y la potencia de salida.

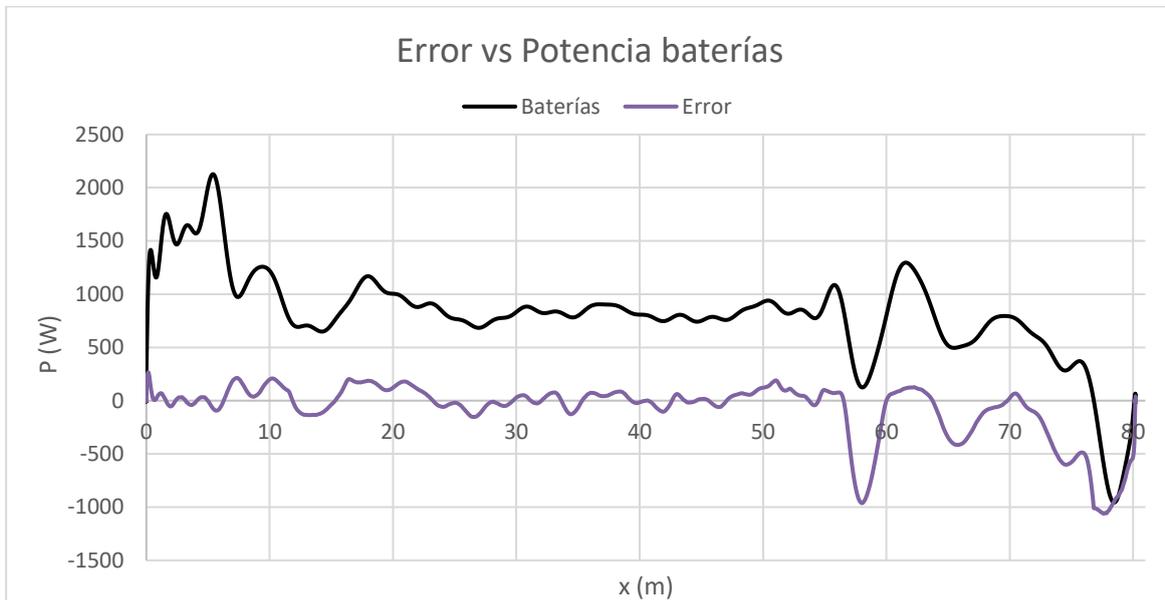


Figura 5.5.11: Comparación entre error y batería en el ensayo 5. [Fuente propia]

5.6. Trayectoria 6

5.6.1. Posición y cinemática

En este sexto ensayo, la trazada descrita por el vehículo es más irregular que en los casos anteriores. Se trata de una combinación de 3 curvas a izquierdas y otras 3 a derechas, junto con 4 tramos rectos. En total, el recorrido es de aproximadamente 75 metros.

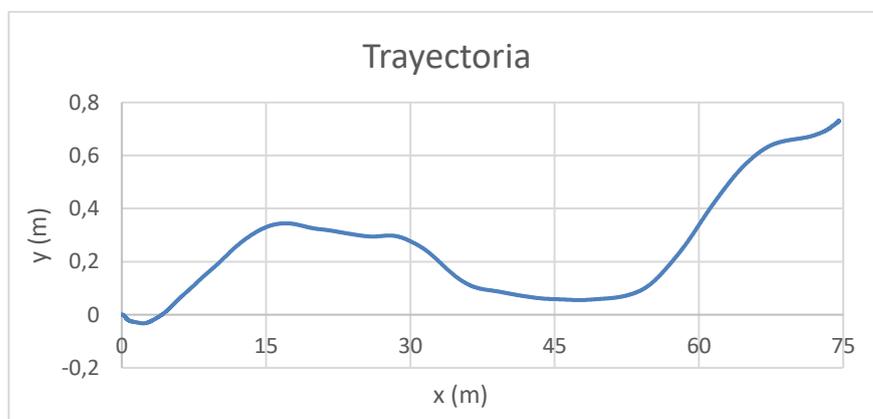


Figura 5.6.1: Trayectoria descrita en el ensayo 6. [Fuente propia]

En cuanto a la velocidad del vehículo, se puede apreciar una marcada aceleración en los primeros 15 metros de trayectoria. A partir de ahí, se intenta mantener la velocidad en torno a los 4 m/s (14,4 km/h) hasta aproximadamente los 65 metros, donde comienza a detenerse el vehículo.

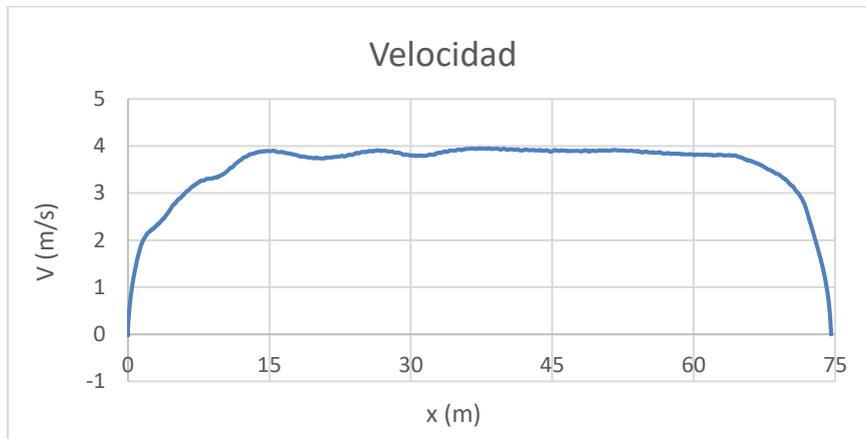


Figura 5.6.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]

En base a este perfil de velocidad, la curva de aceleración será similar a las trayectorias anteriores, con una componente longitudinal notable al principio y final del ensayo, mientras que la aceleración normal no sobrepasa los $0,2 \text{ m/s}^2$, debido a la suavidad de las curvas.

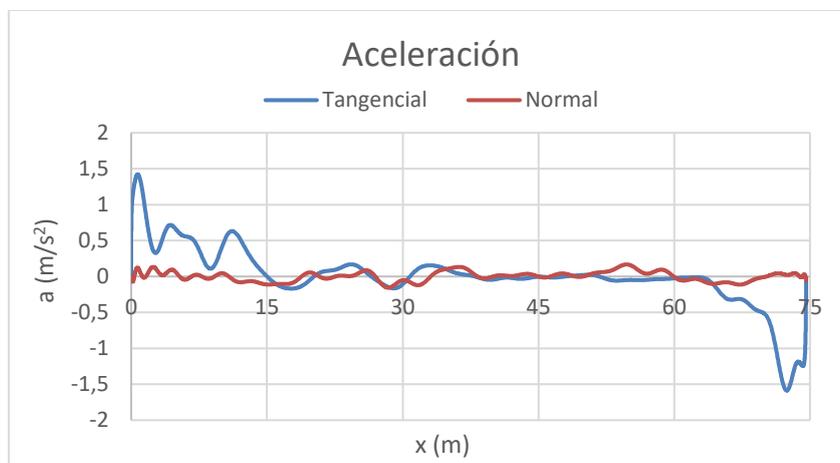


Figura 5.6.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]

5.6.2. Balance de fuerzas y potencias

Dado que la componente normal es notablemente menor que la tangencial al comienzo y final de la trayectoria, la fuerza de avance del vehículo vendrá marcada por esta última. Mientras que, en el tramo intermedio del ensayo (entre los 15 y 65 metros), será una combinación de ambas.

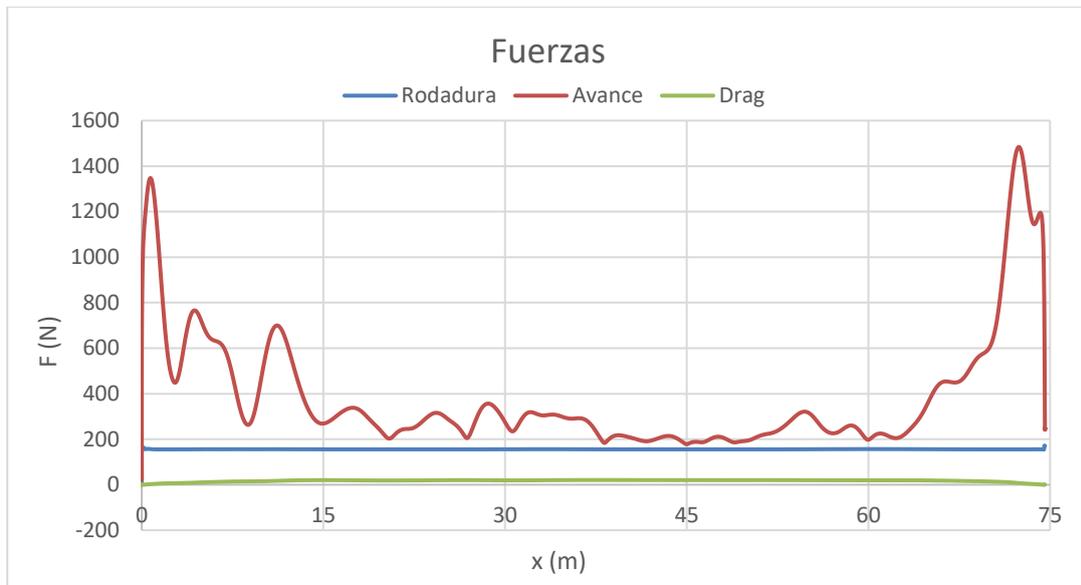


Figura 5.6.4: Balance de fuerzas en el ensayo 6. [Fuente propia]

Por otro lado, ya que la velocidad se mantiene aproximadamente constante en la mayor parte de la trayectoria, la fuerza de avance será sensiblemente cercana a la fuerza de rodadura, como ocurría en anteriores ensayos. Esto se traduce en que casi toda la potencia de salida de las baterías será disipada en pérdidas energéticas, como se puede apreciar en la Figura 5.6.5.

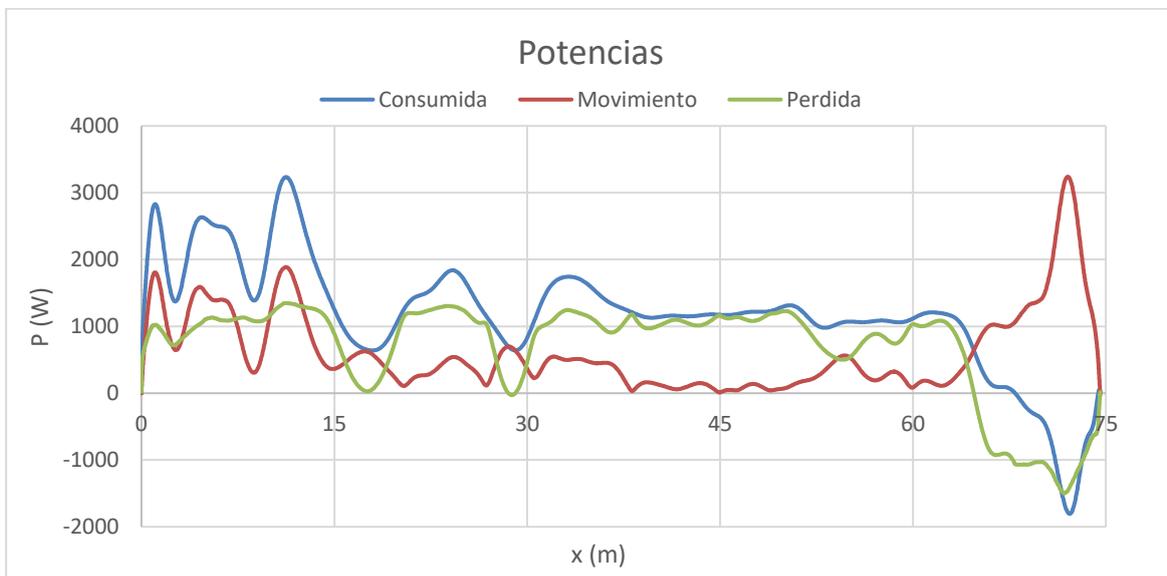


Figura 5.6.5: Balance de potencias en el ensayo 6. [Fuente propia]

5.6.3. Evaluación de pérdidas

Atendiendo a la Figura 5.6.6, la resistencia a la rodadura sigue siendo la principal pérdida de potencia, seguida de la eficiencia del motor y las transmisiones. No obstante, cabe destacar que la resistencia aerodinámica se sitúa a la par que estas últimas, dado que en este ensayo se alcanzan velocidades mayores, por lo que adquiere mayor importancia.

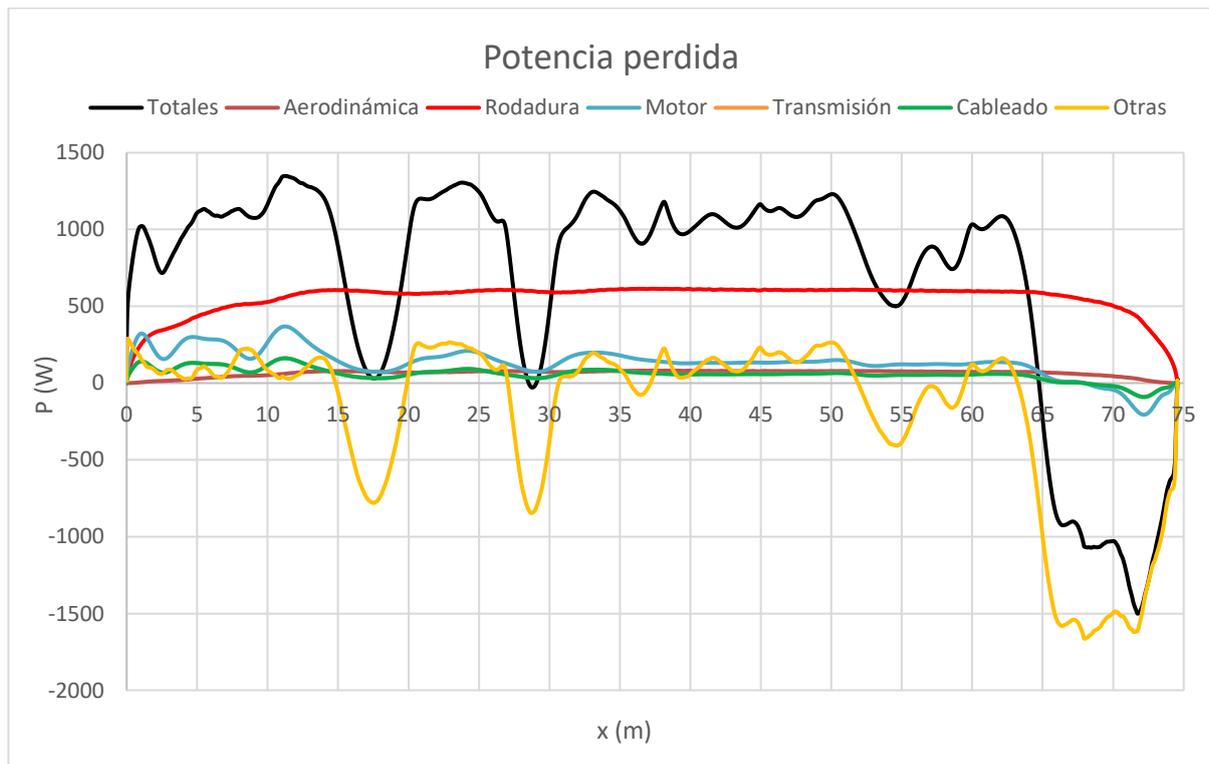


Figura 5.6.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 6. [Fuente propia]

Analizando la primera recta, que comprende los primeros 15 metros de trayectoria, se aprecia cómo la resistencia a la rodadura crece debido al incremento de velocidad del vehículo, al igual que la aerodinámica, pero más lentamente.

Por otro lado, cabe señalar que el error en la modelización se sitúa por debajo de los 200 W en este tramo, por lo que se trata de una buena aproximación, como se verá en el siguiente apartado.

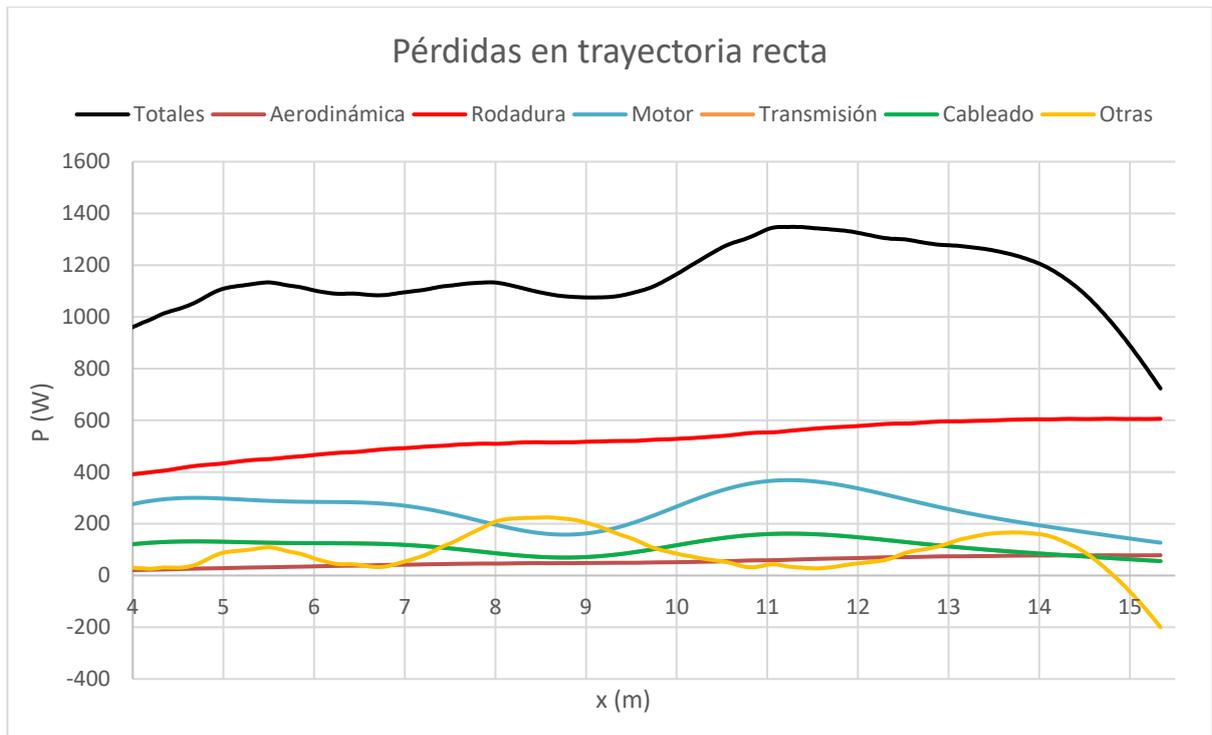


Figura 5.6.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 6. [Fuente propia]

Finalmente, entre los 30 y 50 metros, el vehículo describe una curva larga a derechas manteniendo la velocidad. En ella, puede verse que la potencia perdida por la rodadura permanece constante en los 600 W, mientras que las pérdidas aerodinámicas y de las transmisiones no superan los 100 W. En este caso, el error cometido oscila más que para el tramo recto, pero en cuanto a orden de magnitud resultan similares.

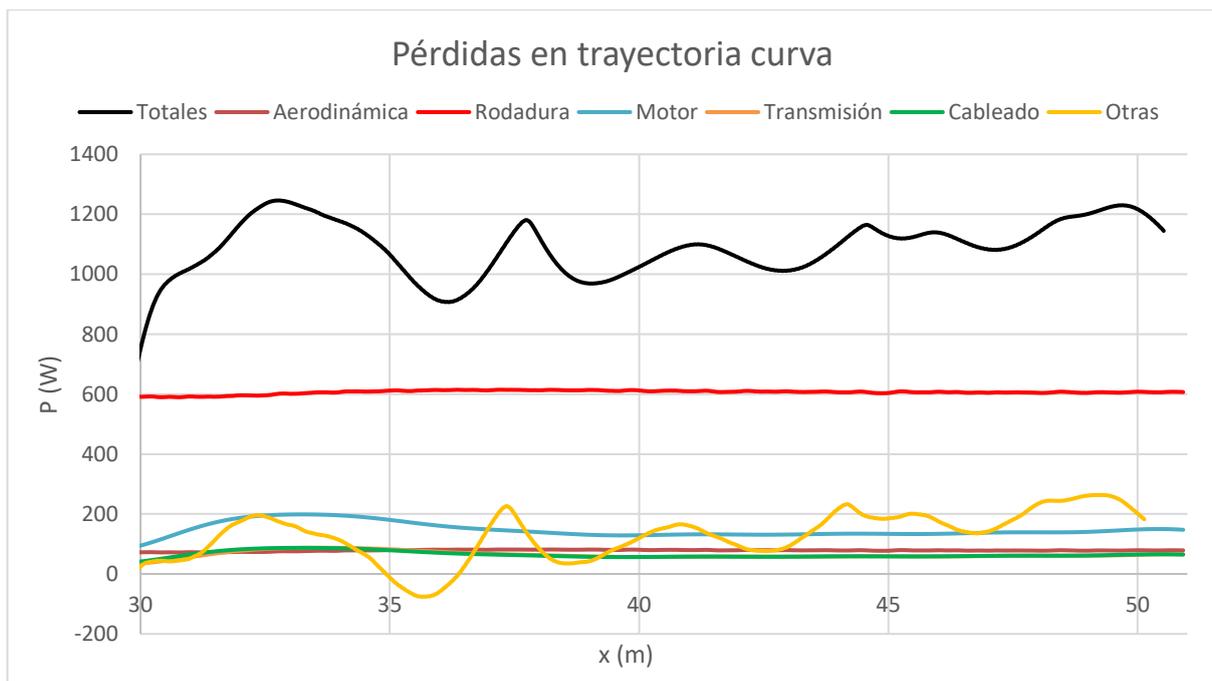


Figura 5.6.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 6. [Fuente propia]

5.6.4. Análisis del error

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, puede observarse en la Figura 5.6.9 que el error en la modelización durante los primeros 15 metros está por debajo del 10% respecto a la potencia consumida, con un pico del 15%, un orden de magnitud similar al obtenido en el segundo ensayo y que resulta bastante satisfactorio. Sin embargo, en la curva analizada previamente, este rango se eleva hasta el 20%, lo cual es mejorable.

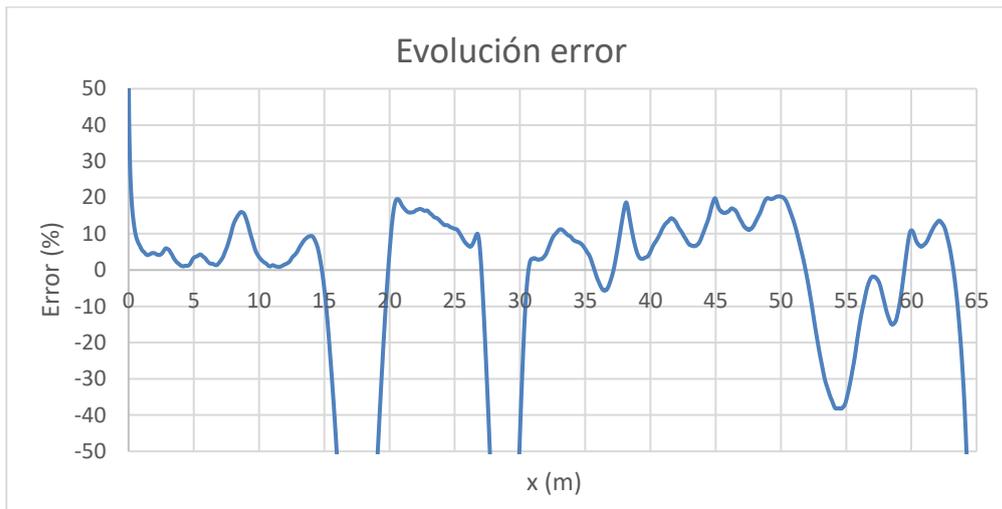


Figura 5.6.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 6. [Fuente propia]

En cuanto a la naturaleza del error, tras el ajuste por mínimos cuadrados respecto al cubo de la velocidad, el factor de correlación no indica que haya una clara relación con esta variable.

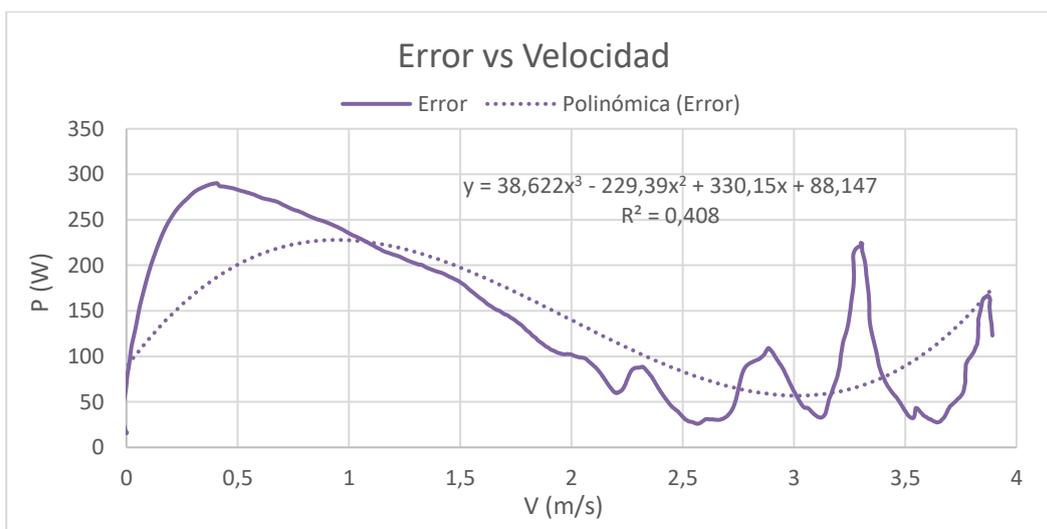


Figura 5.6.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 6. [Fuente propia]

No obstante, sí se puede observar una similitud entre el error y la potencia de salida de las baterías, que describen curvas similares a lo largo de toda la trayectoria, como sucedía en las trayectorias previas.

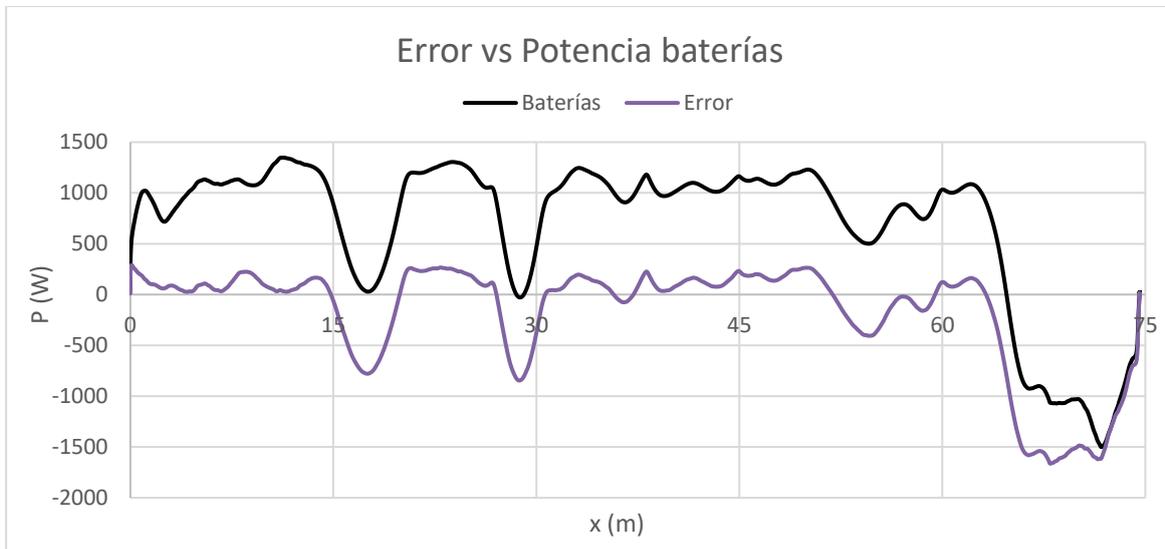


Figura 5.6.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 6. [Fuente propia]

5.7. Trayectoria 7

5.7.1. Posición y cinemática

En esta última trayectoria, se observa un recorrido parecido a los anteriores ensayos. En primer lugar, una recta de aproximadamente 20 metros, seguida de una curva a derechas. A continuación, otra recta de similar longitud para acabar con un giro a izquierdas más prolongado, siendo el recorrido total inferior a los 80 metros.

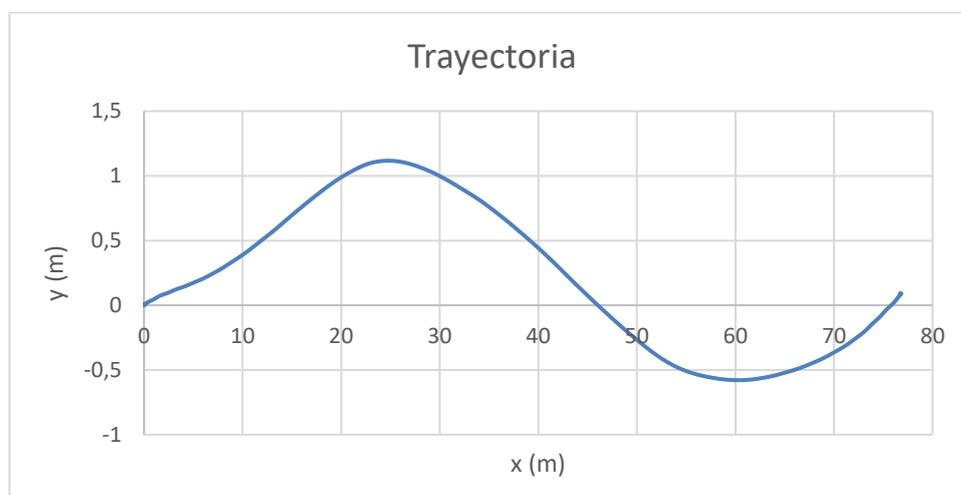


Figura 5.7.1: Trayectoria descrita en el ensayo 7. [Fuente propia]

En cuanto al perfil de velocidad, se aprecia una rápida aceleración al comienzo de la trayectoria. Posteriormente, se mantiene la velocidad en torno a los 3 m/s (11 km/h) y, tras recorrer unos 50 metros, finaliza el recorrido.

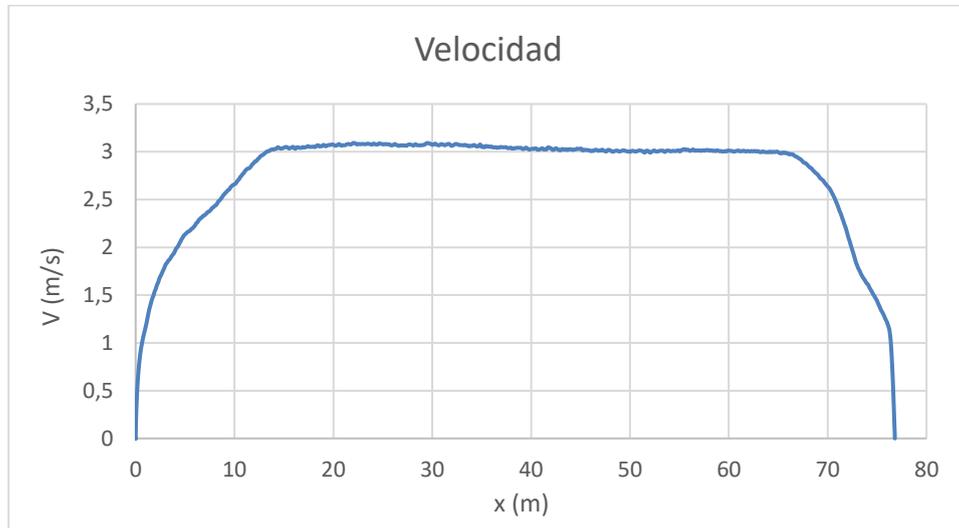


Figura 5.7.2: Velocidad del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]

Así, las componentes de la aceleración tendrán un aspecto similar a ensayos anteriores. Respecto a la normal, puede apreciarse que su valor máximo se da en la primera curva y es de 0,15 m/s², mientras que la tangencial es notablemente superior tanto en el arranque como en la detención del vehículo.

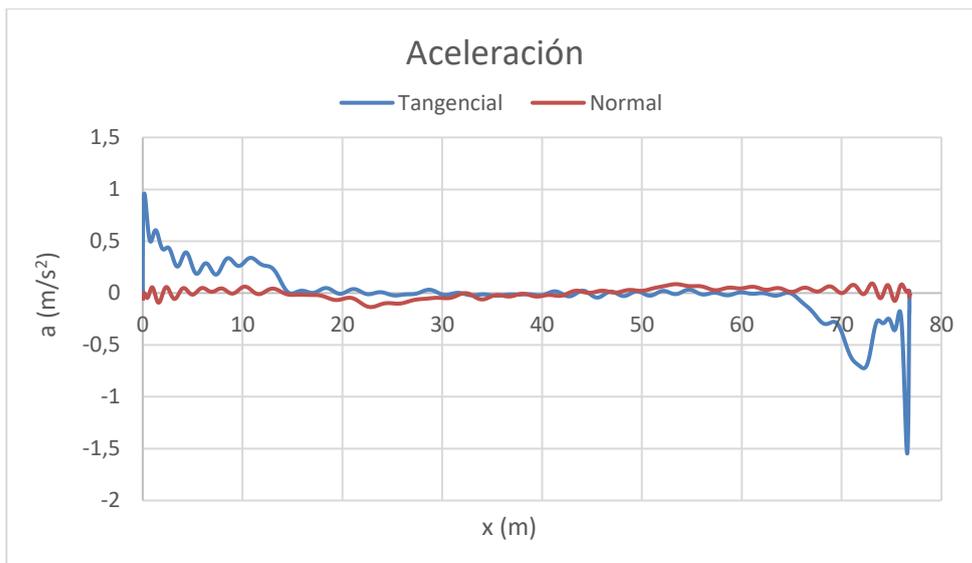


Figura 5.7.3: Aceleración del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]

5.7.2. Balance de fuerzas y potencias

Con la distribución de aceleración del apartado anterior, el balance de fuerzas que resulta es el siguiente:

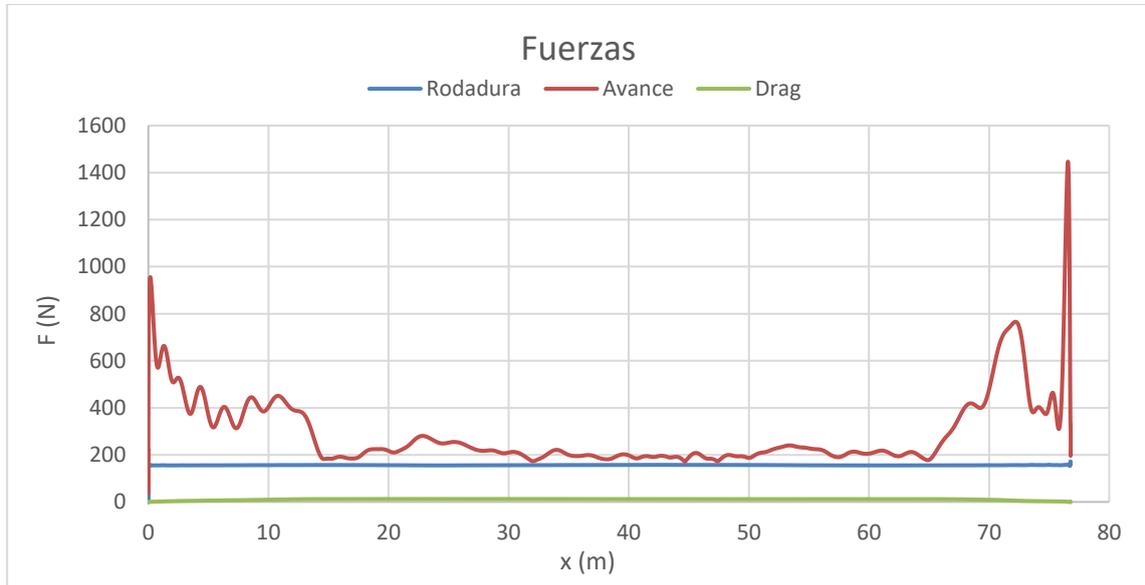


Figura 5.7.4: Balance de fuerzas en el ensayo 7. [Fuente propia]

Se puede observar que la fuerza de avance viene marcada fundamentalmente por la aceleración tangencial. Por otro lado, la resistencia a la rodadura permanece prácticamente constante y se sitúa cerca de la fuerza de movimiento. En cambio, la resistencia aerodinámica, debido a las bajas velocidades del vehículo, no resulta trascendente en este ensayo.

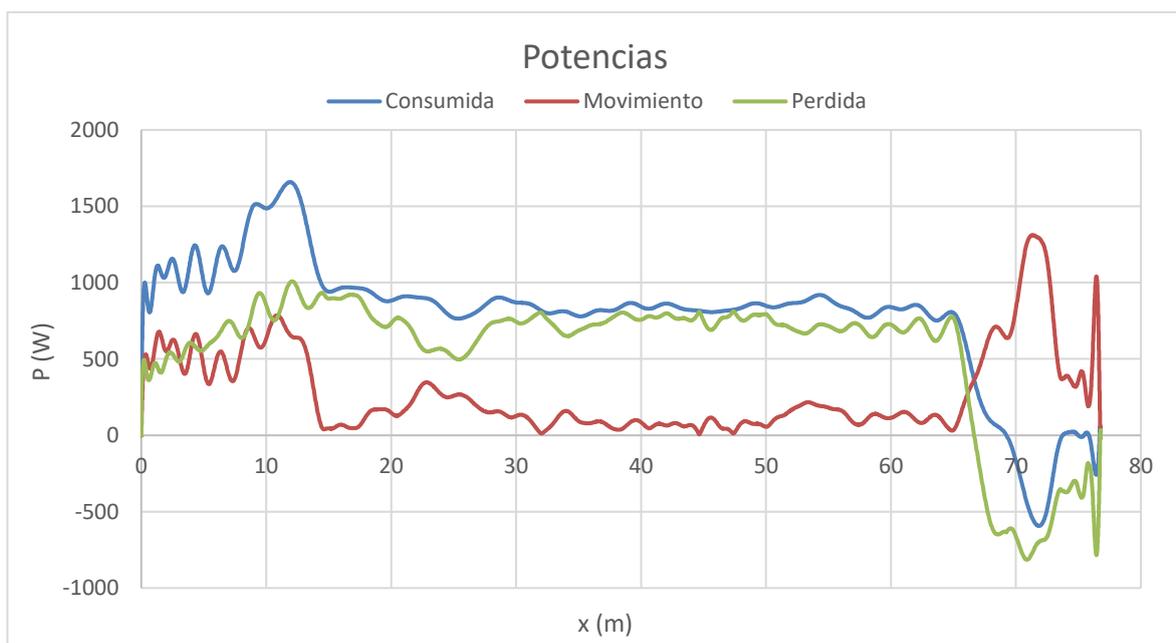


Figura 5.7.5: Balance de potencias en el ensayo 7. [Fuente propia]

Así, a partir de la primera curva hasta la frenada (15–65 metros), se espera que la potencia empleada en el movimiento sea notablemente inferior, mientras que la desaprovechada por efecto de las pérdidas energéticas sea de un orden similar a la potencia consumida.

5.7.3. Evaluación de pérdidas

En el análisis de la potencia perdida, se observa en la Figura 5.7.6 que la resistencia a la rodadura sigue siendo la principal fuente de pérdidas energéticas, alcanzando casi los 500 W con el incremento de la velocidad, seguida del rendimiento del motor. Finalmente, se tienen las pérdidas en las transmisiones y la resistencia aerodinámica del vehículo. En comparación con las trayectorias anteriores, este balance resulta similar.

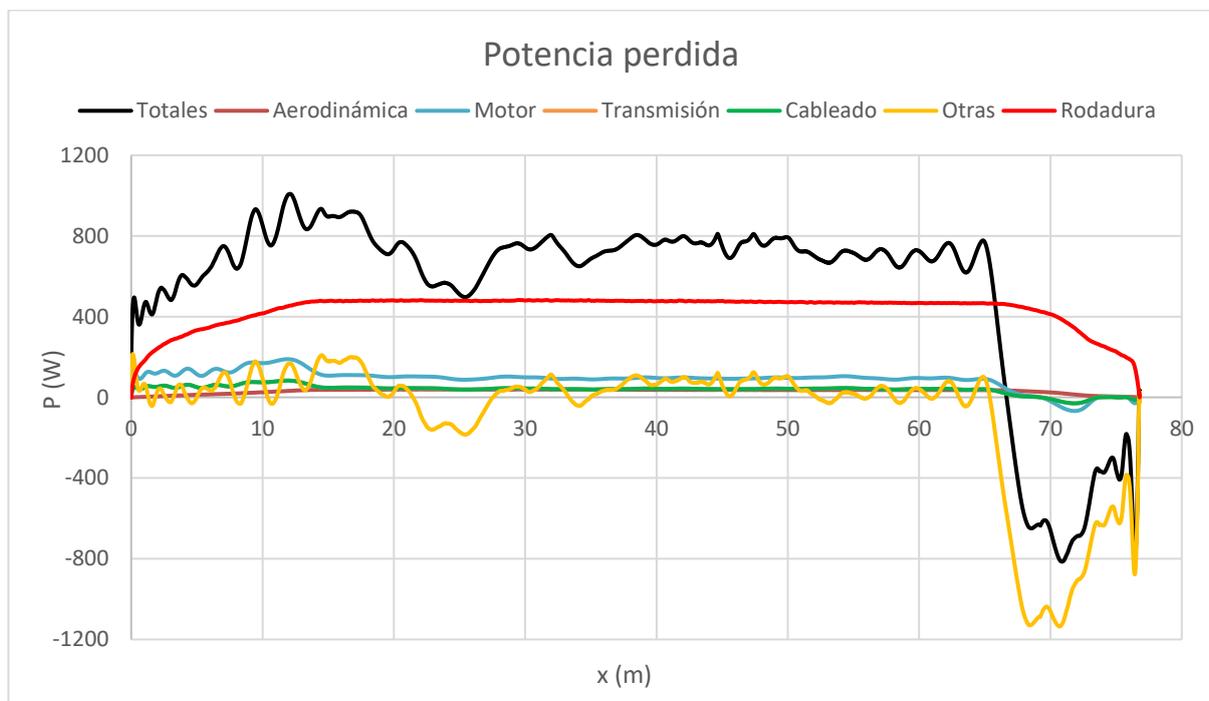


Figura 5.7.6: Desglose de pérdidas del vehículo en el ensayo 7. [Fuente propia]

Atendiendo a la Figura 5.7.7, se detallan las diferentes pérdidas en la trayectoria recta posterior a la primera curva. Se puede observar que permanecen prácticamente constantes, y la única variación que se aprecia es la del error cometido en la modelización, que apenas supera los 100 W. No obstante, es de un orden de magnitud similar a estas cuando debería ser menor, por lo que aún existe un margen de mejora.

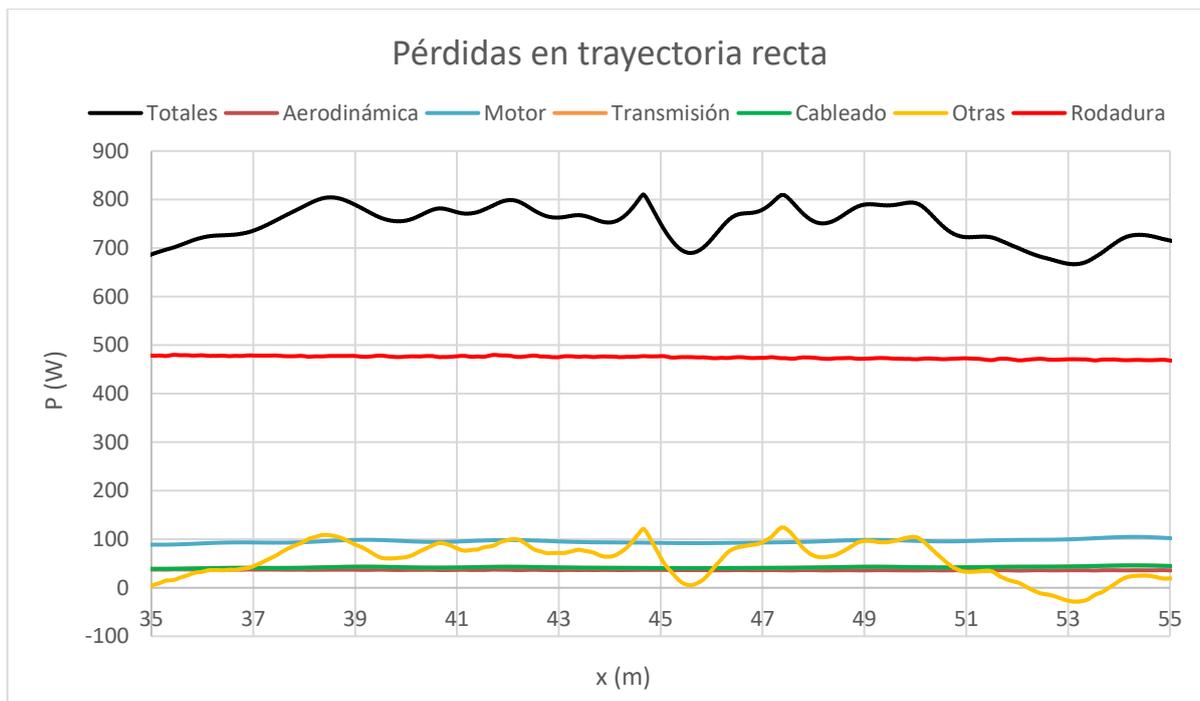


Figura 5.7.7: Pérdidas del vehículo en trayectoria recta en el ensayo 7. [Fuente propia]

En cambio, en la curva final de la trayectoria tras la recta comentada previamente, se puede apreciar que este error es inferior a las pérdidas en el motor, durante la mayor parte de la curva, y de un orden similar a las pérdidas en las transmisiones y por la resistencia aerodinámica. En el siguiente apartado se detallará más este aspecto.

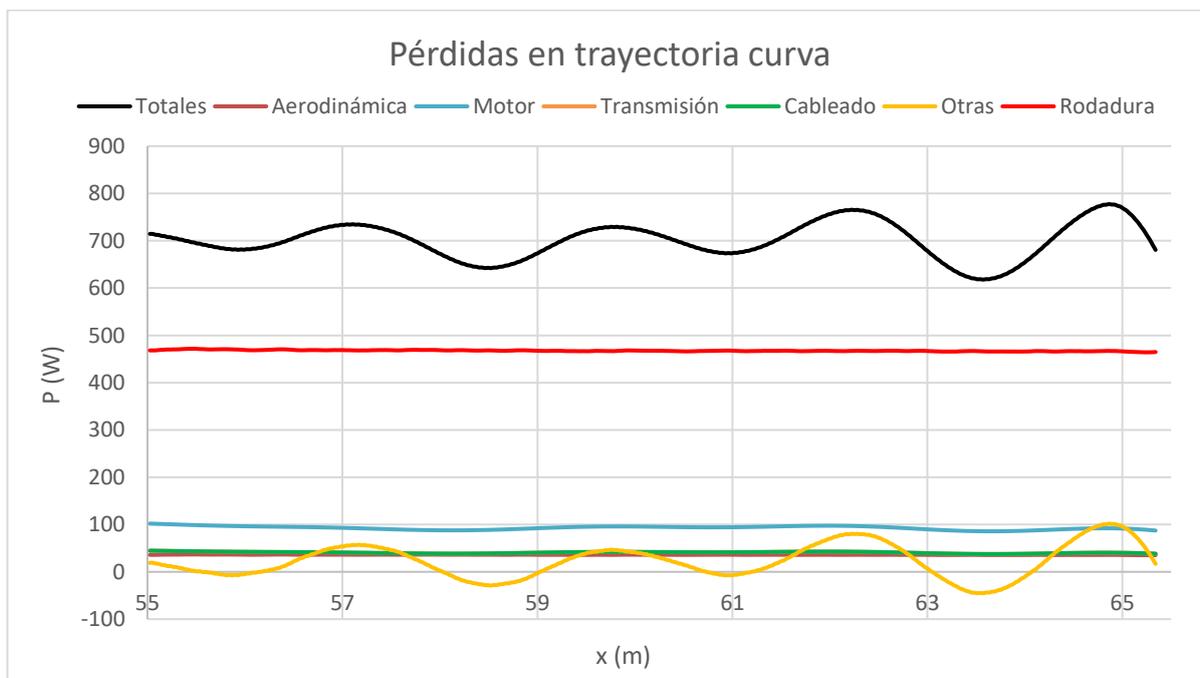


Figura 5.7.8: Pérdidas del vehículo en trayectoria curva en el ensayo 7. [Fuente propia]

5.7.4. Análisis del error

Tanto en la arrancada inicial como en la curva final de la trayectoria, se puede observar que el error apenas supera el 10%, un resultado tan bueno como el obtenido en la trayectoria 3. En cambio, no ocurre así cuando el vehículo llega a la primera curva, donde oscila entre el 20% y el 25%, debido a una ligera deceleración. Durante la trayectoria recta analizada en la Figura 5.7.7, se aprecia una situación intermedia a estos dos resultados, con un error cometido inferior al 15%. En general, se podría decir que los resultados son satisfactorios, pero aún tienen margen de mejora en algunas zonas.

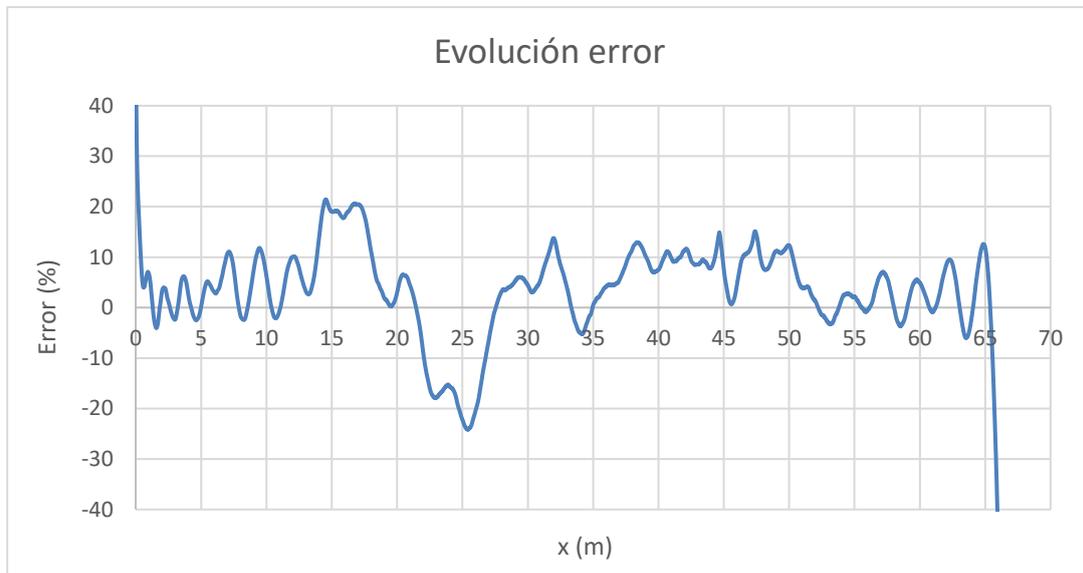


Figura 5.7.9: Evolución del error en la modelización del ensayo 7. [Fuente propia]

Respecto a su naturaleza, puede apreciarse en la Figura 5.7.10 que el error cometido apenas guarda relación con el cubo de la velocidad, según el ajuste de mínimos cuadrados realizado. Este resultado concuerda con los ensayos comentados previamente, donde tampoco se lograba tener una clara correlación entre ambas variables.

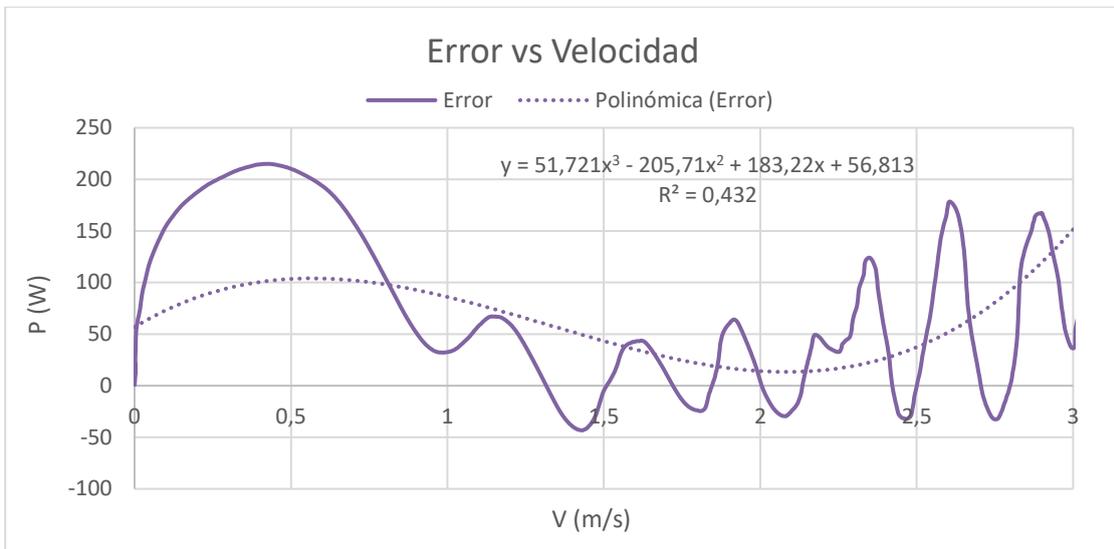


Figura 5.7.10: Comparación entre error y velocidad en el ensayo 7. [Fuente propia]

Finalmente, como cabía esperar en vista a los resultados previamente analizados de otras trayectorias, la naturaleza del error cometido en la modelización viene dada de manera más clara si se atiende a la potencia de salida de las baterías.

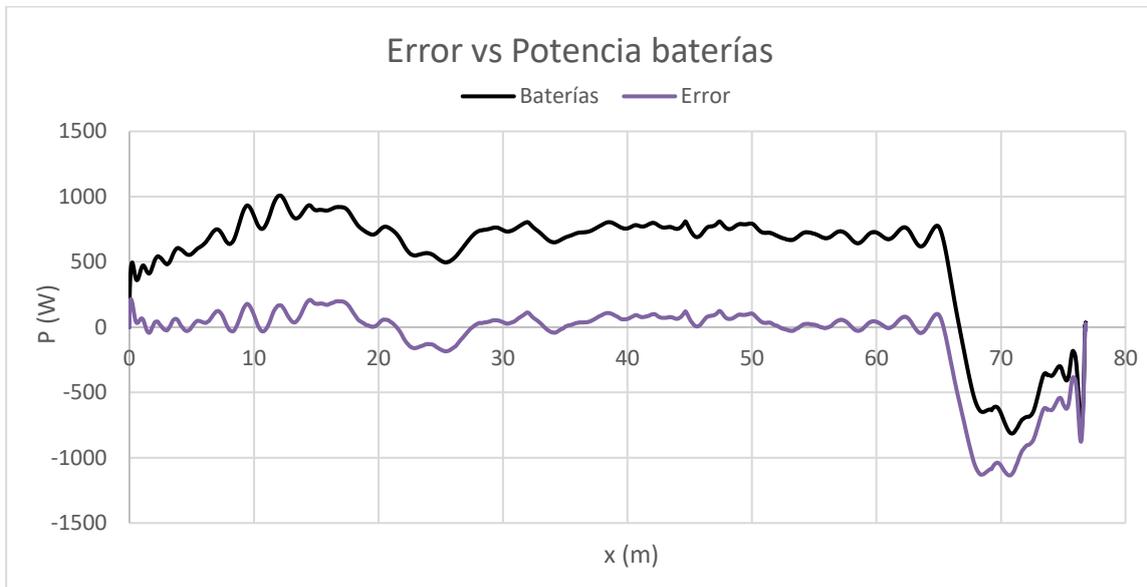


Figura 5.7.11: Comparación entre error y potencia en el ensayo 7. [Fuente propia]

6. Conclusiones

Tras el estudio de estos 7 diferentes ensayos, se pueden extraer numerosas conclusiones sobre la relación entre el comportamiento del vehículo y las diferentes pérdidas, así como de la modelización de estas y el error cometido.

Cuando la velocidad del vehículo es irregular, la modelización de pérdidas propuesta no obtiene buenos resultados, pues el error es bastante oscilante y el orden de magnitud se eleva hasta el 20% o superior. Por el contrario, cuando se encuentra acelerando o mantiene la velocidad constante, se mantiene por debajo del 10%, como se ha podido observar en el segundo ensayo y en este último. No obstante, por efecto de la velocidad constante, la potencia empleada para el movimiento del vehículo es notablemente inferior a la potencia total; es decir, se disipa casi la totalidad de la potencia de salida de las baterías.

Además, se ha observado que el trazado descrito también influye en los resultados. Por un lado, se puede verificar que la modelización se ajusta mejor en trayectoria recta, ya que el error cometido es más estable y de menor magnitud. En cambio, si se realiza una curva, dependerá de lo abierta o cerrada que sea, siendo más favorable en este primer caso.

Respecto a las diferentes modelizaciones, cabe destacar los buenos resultados obtenidos. Así, se puede llegar a la conclusión de que la fuerza de rodadura sobre las ruedas del vehículo es la más importante, seguida del rendimiento del motor. En cambio, la resistencia aerodinámica no resulta tan primordial debido a las bajas velocidades, así como la transmisión eléctrica y mecánica, cuyos rendimientos son elevados.

En cualquiera de estos casos, el error no muestra una clara relación con la velocidad del vehículo, tras el ajuste por mínimos cuadrados realizado en las distintas trayectorias, obteniendo unos coeficientes de correlación relativamente bajos. Por otro lado, comparando con la potencia de las baterías, se ha podido observar que describen curvas similares salvo en el segundo ensayo, donde se mantiene aproximadamente constante a lo largo de la trayectoria.

No obstante, tampoco se deben descartar errores pertenecientes a la metodología de los ensayos; es decir, en las mediciones. Finalmente, en el siguiente apartado, se comentan las posibles mejoras y procedimientos alternativos que se podrían adoptar en los ensayos, así como los próximos pasos para mejorar la modelización realizada.

7. Futuros pasos

7.1. Mejoras en la modelización de pérdidas

Dado que el estudio se ha realizado únicamente atendiendo a aceleraciones positivas o nulas (a velocidad constante), un paso fundamental para analizar completamente la dinámica y la potencia del vehículo es conocer el funcionamiento del frenado regenerativo. Con él, se podría determinar qué cantidad de energía mecánica es convertida en eléctrica y almacenada en las baterías, y verificar si el modelado de pérdidas propuesto en este trabajo se ajusta cuando el vehículo se encuentra decelerando.

Por otro lado, como se había comentado en el apartado 4.3.3, todas estas pérdidas de energía no son constantes, sino que dependen de numerosas variables. Por ello, otra potencial mejora sería modelar estos rendimientos tomados para el motor y las transmisiones en función de variables relevantes. Por ejemplo, las pérdidas en el motor eléctrico se podrían estimar en función de la velocidad del vehículo, para el efecto del rozamiento del aire que entra al mismo, o la intensidad de corriente que circula por él para el efecto Joule, al igual que la transmisión eléctrica. Con respecto a la transmisión mecánica, sería necesario conocer qué tipo de engranajes la componen. A partir de ellos, conociendo la potencia de entrada y de salida, se puede estimar las pérdidas por fricción entre estos, y la relación que tienen con el par exigido.

Finalmente, respecto a las pérdidas aerodinámicas, la problemática reside en estimar el coeficiente de resistencia aerodinámica o de arrastre. Para ello, existen actualmente dos alternativas: se podría realizar una prueba en túnel de viento con el propio vehículo o una maqueta a escala, o bien analizarlo mediante CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Sin embargo, se ha podido ver en el análisis de resultados del apartado 5 que, a bajas velocidades, esta fuerza no adquiere gran importancia, y cualquiera de estos dos métodos resultarían demasiado costosos.

7.2. Mejoras en la metodología de los ensayos

Con el objetivo de mejorar la calidad de los datos y poder obtener así una modelización más exacta, se proponen a continuación nuevas instrumentaciones y métodos para los ensayos.

Para las pérdidas en el cableado eléctrico y el motor, se debería seguir un procedimiento similar al descrito en el apartado 4.2.2: mediante un voltímetro y unas pinzas amperimétricas, se puede determinar la potencia a la entrada y salida del motor y al comienzo y final del cableado eléctrico,

aplicando la Ecuación 7.

En cuanto a la deriva de las ruedas, cabe resaltar que el modelo de bicicleta funciona bastante bien dentro de la región lineal entre el ángulo de deriva y la fuerza lateral; es decir, para ángulos pequeños (véase Figura 3.3). Sin embargo, el estado de los neumáticos o las condiciones del asfalto podrían tener un impacto no deseado y darse la situación no lineal. Con el fin de mejorar la precisión de esta parte de la modelización, existen dos posibles opciones: conocer las características de los neumáticos, como la presión de inflado o el coeficiente de rigidez, y elaborar un modelado más preciso de la resistencia a la rodadura en relación con el ángulo de deriva; o bien, instalar en el vehículo un ESP (*Electronic Stability Programm*), también conocido por otros nombres como VDC (*Vehicle Dynamic Control*) o DSC (*Dynamic Stability Control*).

Este sistema fue implementado por la compañía alemana Bosch durante los años 90, y se comercializó gracias a la empresa Mercedes en su serie Clase S. Su funcionamiento es aparentemente simple: compara la dirección deseada que quiere trazar el piloto mediante el volante, con la que realmente está realizando el vehículo y, en función de en qué ejes se esté produciendo la desviación, se utiliza el propio motor del vehículo para ajustar la velocidad de cada rueda y reducir la deriva. Sin embargo, su composición es algo más compleja. Un ESP básico se compone fundamentalmente de unos sensores (mide el ángulo de giro del volante y de las ruedas, la aceleración transversal y la velocidad de guiñada), una unidad de control (recopila la información y toma las decisiones oportunas) y los hidráulicos (actuadores que frenan las ruedas). Así, además de reducir la deriva de los neumáticos (y, por tanto, la potencia perdida en esta faceta), también se puede calcular con mayor precisión este ángulo mediante los datos recogidos por los sensores y la unidad de control. No obstante, esta opción resulta bastante más costosa que adoptar un nuevo modelo de pérdidas y, para este vehículo en cuestión, no sería muy recomendable.

Finalmente, en cuanto a la recopilación de datos de la cinemática, se podría optar por dos alternativas: utilizar la misma metodología descrita en el apartado 4.2.2, con acelerómetros de mayor precisión; o emplear la geolocalización GPS para determinar posiciones, velocidades y aceleraciones, sin necesidad de realizar integraciones.

Dentro de esta tecnología, destaca la empresa británica Racelogic y sus modelos VBOX (véase Figura 7.1).



Figura 7.1: VBOX de la empresa Racelogic. [30]

Estos dispositivos son capaces de recopilar datos sobre la posición y cinemática del vehículo, así como la distancia de frenada o los tiempos de vuelta. Además, permiten la incorporación de otros dispositivos, como cámaras, unidades inerciales o dataloggers, que almacenan la información con una frecuencia entre 5 y 100 Hz, según la gama.

En este caso, sí que convendría sopesar la utilización este tipo de aparatos, ya que suelen tener mayor precisión que un acelerómetro y, además, reduciría los errores numéricos en las sucesivas integraciones que determinan la cinemática del vehículo.

8. Bibliografía

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car#History
- [2] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos>
- [3] <https://www.eafo.eu>
- [4] <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/4-1-por-que-el-vehiculo-electrico/>
- [5] <https://www.bmw.com/es/innovation/coches-de-hidrogeno-asi-funcionan.html>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery
- [7] <https://www.nissan.com>
- [8] “Vehículos híbridos y eléctricos” – Jaime Rodríguez Arribas y Marcos Lafoz Pastor, Dpto. Ing. Eléctrica ETSII UPM.
- [9] <https://www.tesla.com/blog/induction-versus-dc-brushless-motors>
- [10] “Determinación de pérdidas eléctricas en motores de inducción modelados electromagnéticamente con el método de los elementos finitos” – Camilo Andrés Cortés, Wim Deprez, Johan Driesen y Jhon J. Pérez – Revista Ingeniería e Investigación VOL. 28 n°3 Diciembre 2008.
- [11] <https://www.mestreacasa.gva.es> Tema 4: “Motores de corriente continua”.
- [12] <https://www.electricaplicada.com/eficiencia-de-un-motor-electrico-y-los-valores-mas-comunes/>
- [13] “Fundamentals of Vehicle Dynamics” – Thomas D. Gillespie
- [14] “Tyre and Vehicle Dynamics” – Hans B. Pacejka
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Slip_angle
- [16] http://www.racesimonline.com/articulos/la_deriva.php
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Ohm
- [18] <http://www.mecapedia.uji.es>
- [19] https://es.wikipedia.org/wiki/Reductores_de_velocidad
- [20] <https://es.wikipedia.org/wiki/Engranaje>
- [21] <https://es.wikipedia.org/wiki/Rodamiento>
- [22] <https://www.nskeurope.es/es/products/>
- [23] <https://topbateriaexterna.com/inversor-de-corriente/>

- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
- [25] “Aerodinámica del automóvil de competición” – Simon McBeth
- [26] “Electric Vehicle Technology Explained” – James Larminie y John Lowry, 2ª edición
- [27] J. Ryu, J. Rossetter J.C. Gerdes, Vehicle slip and roll parameter estimation using GPS, In: Proceedings of the 6th International Symposium on Advance Vehicle Control, AVEC’02, 2002.
- [28] D.M. Bevly, J. Ryu, J.C. Gerdes, Integrating INS sensor with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll and tire cornering stiffness, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 7 (4) (2006), pp. 483-493.
- [29] https://es.wikipedia.org/wiki/Control_de_estabilidad
- [30] <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/velocidad-por-gps-vbox/>