



Impacto del reparto de par en la eficiencia mecánica de vehículos eléctricos

A. Menéndez¹, D. Álvarez¹, P. Luque¹, F. Fernández², A. Navarro², A. García¹

¹ Departamento de Construcción e Ingeniería e Fabricación, Universidad de Oviedo, garciamaralberto@uniovi.es

² Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Comunicaciones y de Sistemas, Universidad de Oviedo,

La energía mecánica necesaria para mover un vehículo se emplea en obtener un trabajo útil (aceleración y ascenso de pendientes en el trayecto) y en vencer resistencias al avance de diferente naturaleza. Estas incluyen resistencias aerodinámicas, resistencias asociadas a la rodadura en los neumáticos, resistencias asociadas la deriva y deslizamiento lateral y longitudinal en el neumático y pérdidas asociadas a toda la cadena cinemática del vehículo, desde el motor a las ruedas. Mejorar la eficiencia energética mecánica de un vehículo implica actuar sobre alguno de los factores que suponen resistencias al avance. Entre las estrategias que favorecen esta mejora se encuentran el diseño de vehículos con bajos coeficientes de arrastre aerodinámico, áreas frontales reducidas, el uso de lubricantes de altas prestaciones y neumáticos con baja resistencia a la rodadura. Parte de las pérdidas energéticas en el neumático están relacionadas con el deslizamiento longitudinal y la deriva lateral de este. En este contexto, un aspecto menos estudiado que impacta sobre el rendimiento del vehículo está relacionado con el control del par entregado a los neumáticos, especialmente durante el paso por curva. Este factor es particularmente relevante en vehículos que permiten gestionar de forma independiente el par aplicado a cada rueda de un eje motriz. En este trabajo se presenta un modelo que permite determinar las pérdidas mecánicas en el vehículo en función de la velocidad, el radio de curvatura y el reparto de par entre ruedas motrices. Para ello se ha empleado el software de simulación Adams Car. Además de evaluar las pérdidas energéticas, se ha analizado la estabilidad del vehículo con el objetivo de garantizar que no se comprometa su comportamiento dinámico. Los resultados obtenidos muestran como un adecuado reparto del par entre las ruedas puede conseguir reducir las pérdidas energéticas asociadas al neumático, incrementando así la eficiencia energética del vehículo en comparación con los sistemas convencionales de tracción, que entregan el mismo par a ambas ruedas de un mismo eje motriz.

1. Introducción

Una parte considerable de la energía producida hoy en día sigue dependiendo de los combustibles fósiles, siendo el sector del transporte el más dependiente de estos, representando el 37% de las emisiones de CO₂ de los sectores de consumo directo (7,1 Gt en 2020) [1]. Dentro del sector del transporte, el transporte por carretera representa actualmente más del 15% de las emisiones totales de CO₂. Para mejorar la eficiencia energética del transporte, reducir el uso de combustibles fósiles y frenar las altas emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes de los vehículos con motor de combustión interna, se están tomando medidas para promover el uso de vehículos eléctricos (VE) y vehículos de cero emisiones.

En un turismo ligero eléctrico, el 77% de la energía se utiliza efectivamente para mover el vehículo, mientras que el 23% restante se destina a superar diversas pérdidas energéticas [2]. La energía requerida para propulsar el vehículo se emplea para vencer la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica y la energía asociada a la inercia durante la aceleración. La energía de inercia es equivalente a la energía durante el frenado. Gracias al frenado regenerativo, una parte de la energía cinética se transforma nuevamente en energía electroquímica, mientras que el resto se disipa en forma de calor por fricción. Debido a que la densidad energética de las baterías sigue siendo baja en comparación con los combustibles fósiles [3], reducir las pérdidas de energía tendría un impacto significativo en la autonomía de los vehículos eléctricos.

Independientemente del tipo de propulsión, las resistencias al avance de un vehículo en carretera incluyen [4]:

- Fuerzas de resistencia a la rodadura
- Fuerzas aerodinámicas
- Fuerzas inerciales (durante la aceleración)
- Fuerzas de fricción interna
- Fuerzas gravitatorias (cuando se circula en una pendiente)

La resistencia a la rodadura de los neumáticos se debe principalmente a la pérdida de energía causada por la histéresis elástica del material de caucho [5]. De hecho, las pérdidas por histéresis representan entre el 80% y el 95% de la resistencia total a la rodadura. La mayoría de los esfuerzos en el diseño de neumáticos enfocados en la reducción de la resistencia a la rodadura se han centrado en este aspecto [6].

La disipación ocurre debido al comportamiento viscoso de los materiales del neumático al deformarse cíclicamente durante el rodamiento. Por lo tanto, el par de tracción o frenado aplicado a un neumático afecta directamente las tensiones y deformaciones, aumentando la resistencia a la rodadura. Además, durante las maniobras de giro, la fuerza lateral genera una deformación en el neumático que incrementa las pérdidas por histéresis y, por ende, la resistencia a la rodadura. Sin embargo, la resistencia a la rodadura solo se cuantifica en dirección longitudinal y en rodadura libre, por lo que solo se considera la disipación asociada a la histéresis debido a la deformación radial del neumático.

Hammarström [7] añadió la fuerza lateral (resistencia a la fuerza lateral) a las fuerzas de resistencia. Sin embargo, esta pérdida de energía asociada con las maniobras en curva se debe al deslizamiento en la huella de contacto y no considera el aumento debido a la histéresis. El aumento de la resistencia a la rodadura debido a la tracción y el frenado fue estudiado por Schuring [8]. Sin embargo, al igual que el autor anterior, no identifica las pérdidas de energía asociadas con el aumento de la histéresis.

Además, los estudios han demostrado que tanto la resistencia en curva como la resistencia aerodinámica de los neumáticos traseros provocan pérdidas de energía adicionales durante las curvas, dependiendo del radio de la curva y la velocidad del vehículo. Estas pérdidas pueden alcanzar hasta el 3,1% de la energía total, con un efecto más significativo en recorridos urbanos [9]. La mayoría de los métodos de estimación de autonomía o consumo en vehículos eléctricos no consideran la resistencia asociada a las maniobras en curva, lo que resulta en una sobreestimación de la autonomía en trayectos urbanos o en carreteras secundarias.

La vectorización del par es una estrategia de control que modula la entrega de par motor a cada rueda de forma independiente, utilizando actuadores mecánicos, eléctricos o hidráulicos, para generar momentos de guiñada adicionales que asistan al conductor en el control del vehículo, optimizando la dinámica lateral y longitudinal.

Si bien el enfoque inicial de la vectorización del par estaba orientado a mejorar la seguridad y el rendimiento del vehículo (mayor aceleración y velocidad en curvas), también puede mejorar la eficiencia energética del vehículo [10]. La distribución del par en las ruedas influye en las pérdidas energéticas en la cadena de tracción eléctrica, incluyendo pérdidas en el inversor, la batería, el motor eléctrico y la transmisión mecánica (si está presente), así como en los neumáticos. Esto se observa en el trabajo de Brown [11], quien aplicó un algoritmo de vectorización del par para reducir el consumo en trayectorias rectas, considerando el desempeño del sistema de propulsión.

Uno de los primeros autores en reconocer la relevancia de las pérdidas en curvas y en buscar minimizarlas mediante el desarrollo del control del momento de guiñada a través de la vectorización del par fue Kobayashi et al. [12]. Utilizaron un modelo de modelo de bicicleta lineal para obtener una expresión de la potencia total requerida para que un vehículo tome una curva. Posteriormente, validaron el modelo y lo emplearon para desarrollar una estrategia de control que minimiza la resistencia en curvas controlando el momento de guiñada. Estos mismos autores [13] demostraron que la minimización de las pérdidas de potencia debido al deslizamiento de los neumáticos ocurre cuando los vectores de velocidad de deslizamiento son iguales en las cuatro ruedas.

Posteriormente, Ikezawa et al. [14] usaron un modelo de bicicleta lineal para obtener una expresión explícita de la fuerza de resistencia lateral. Esta resistencia se incluyó en el cálculo de las pérdidas totales de energía, las cuales fueron minimizadas optimizando el perfil de velocidad bajo restricciones de tiempo. Luego, el modelo se extendió a un modelo de cuatro ruedas con neumáticos no lineales para evaluar el potencial del control del balanceo [15]. Posteriormente, se amplió a un modelo de seis grados de libertad, incluyendo el balanceo de la carrocería, con el fin de investigar posibles ahorros energéticos a partir de la dirección del eje trasero y a vectorización del par [16].

La expansión a modelos más complejos permite describir con mayor precisión la dinámica no lineal que puede experimentar un vehículo en situaciones de curvas cerradas. Esto fue analizado por Allonca [17], quien, utilizando un modelo multibody de 20 grados de libertad, desarrolló una metodología para reducir la resistencia en curvas mediante la optimización de los mecanismos de suspensión y dirección.

El objetivo de este trabajo es evaluar la potencial mejora de eficiencia energética del vehículo eléctrico mediante la vectorización del par. Para ello se empleará un modelo completo de vehículo, incluyendo un modelo detallado de la unidad propulsora eléctrica. El objetivo es evaluar la mejora en rendimiento en cuanto a comportamiento mecánico, si bien este será analizado conjuntamente con el sistema eléctrico de propulsión.

2. Detalles experimentales

2.1. Modelo de vehículo completo

Para evaluar el impacto que tiene en el consumo las diferentes estrategias de reparto de par, se emplea un modelo virtual de vehículo completo en el software Adams Car. Este modelo está compuesto por 9 subsistemas tal y como se muestra en la figura 1. Las características generales del vehículo simulado son:

- Batalla: 2500 mm
- Ancho de vía: 1475 mm
- Neumáticos: 185/55 R15
- Masa: 951 kg

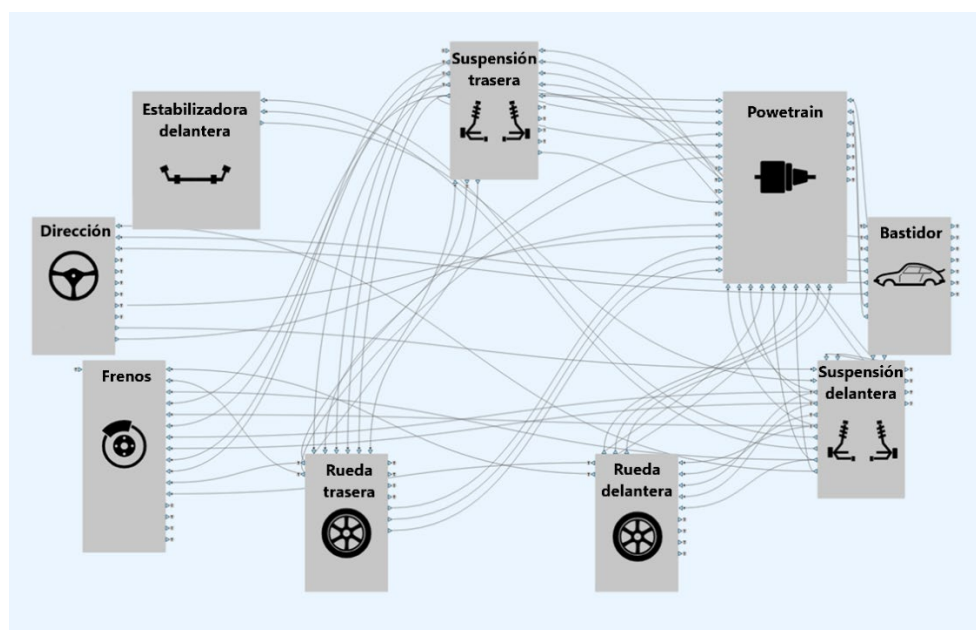


Figura 1: Diagrama de bloques de subsistemas del modelo de vehículo.

Excepto el subsistema de Powertrain, que ha sido desarrollado específicamente por el equipo investigador, el resto de subsistemas toman modelos ya implementados en las librerías estándar de Adams Car

En el caso de los neumáticos, el modelo incluye pérdidas asociadas a la tracción/frenada al paso por curva, de modo que se evalúa además de las resistencias a la rodadura, el incremento de resistencias al avance debidas al deslizamiento longitudinal y a la deriva del neumático en el paso por curva. Se ha considerado un modelo lineal de incremento de resistencias para cada uno de estos factores.

2.2. Modelo de sistema de propulsión

Embebido dentro del modelo de vehículo completo implementado en Adams Car, se ha desarrollado un modelo matemático de sistema de propulsión desarrollado por los autores en el entorno MatLab Simulink. El modelo de Simulink se compilla como una librería dentro del software de simulación Adams Car (Figura 2).

El modelo de sistema de propulsión se basa en un sistema de dos ruedas motrices con motores independientes por rueda, tomando como base el motor marca DUNASYN modelo DD5-14-10-POW-18600-B5 y como inversor el equipo AMKASYN inverter KW26-S5-FSE-2Q.

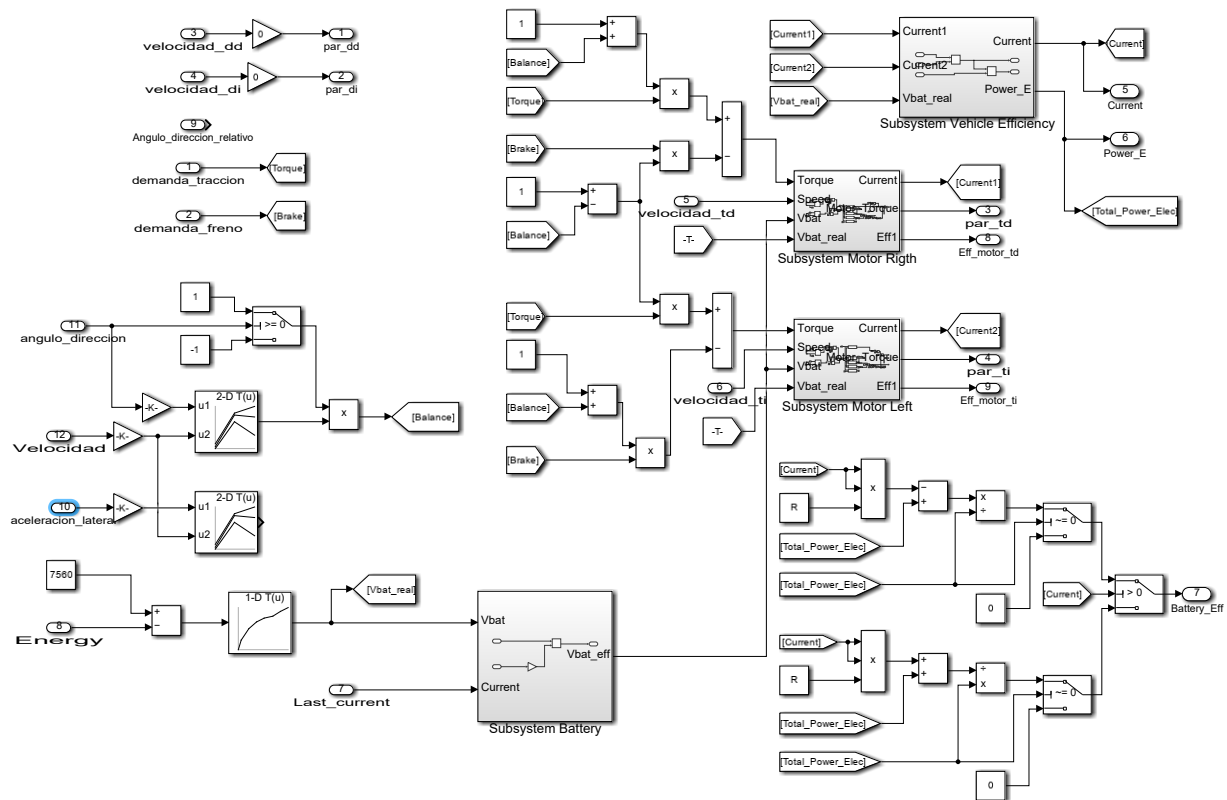


Figura 2: Modelo Simulink del sistema de tracción.

El modelo tiene las siguientes entradas (Figura 2):

- Comanda de par, entrada que va de 0 a 100, indicando el par deseado.
- Comanda de freno, entrada que va de 0 a 100, indicando el frenado requerido.
- Energía consumida. Dato que se actualiza en cada paso de simulación
- Angulo de dirección.

En función de la velocidad y el ángulo de dirección, el modelo establece un balance de reparto de par entre cada rueda tractora. Este balance se realiza mediante una función simétrica de ajuste. Los diferentes repartos de par entre rueda son analizados en este trabajo para determinar el reparto óptimo que minimice las pérdidas de energía en el vehículo.

El conjunto Motor + Inversor es a su vez un modelo de Simulink (Figura 3) embebido en el modelo general del sistema de tracción mostrado en la figura 2.

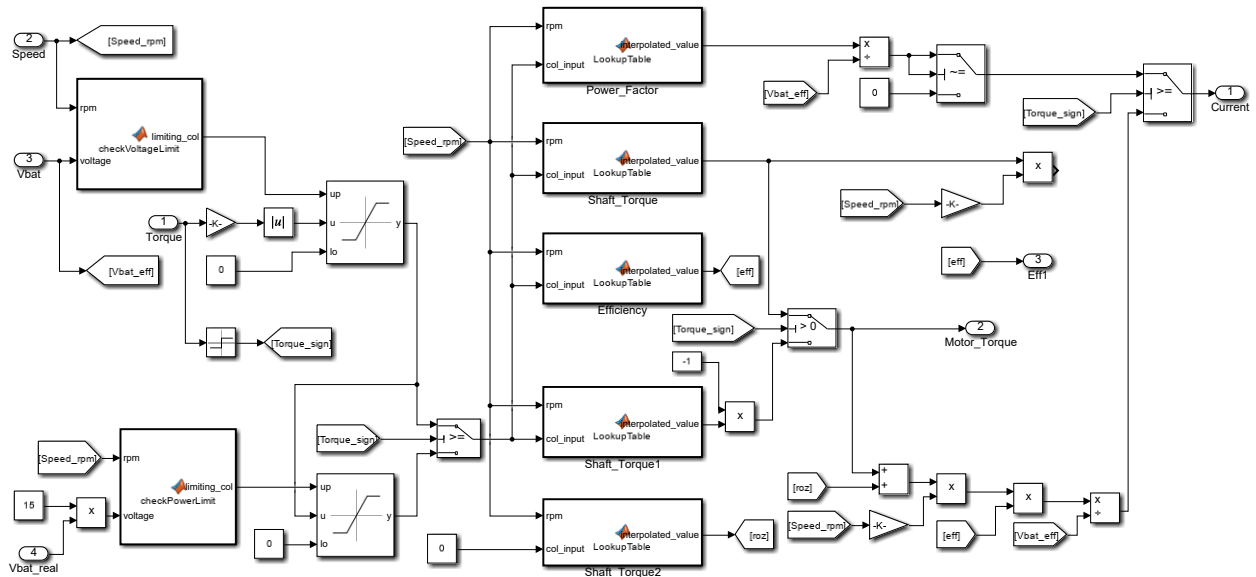


Figura 3: Modelo Simulink del Conjunto Motor + Inversor.

El modelo tiene en cuenta los mapas de rendimiento de motores e inversor, de manera que al simular las maniobras de vehículo completos se puede estimar la energía total necesaria en función del punto de funcionamiento del sistema de propulsión. Esto se realiza mediante una función de búsqueda en tabla, donde a partir de las gráficas de rendimiento facilitadas por los fabricantes de los equipos, el modelo hace por interpolación una estimación del rendimiento en cada instante de la simulación. La figura 4 muestra gráficamente la tabla de eficiencia de motor generada a partir de los datos del fabricante, ya dentro del modelo. El modelo también prevé la posibilidad de incorporar un modelo matemático de comportamiento del sistema de almacenamiento de energía, pudiendo tener en cuenta también el rendimiento energético del mismo, así como su degradación durante la simulación. Este aspecto no ha sido desarrollado por completo en este trabajo, si bien se prevé mejorar el modelo en esta línea.

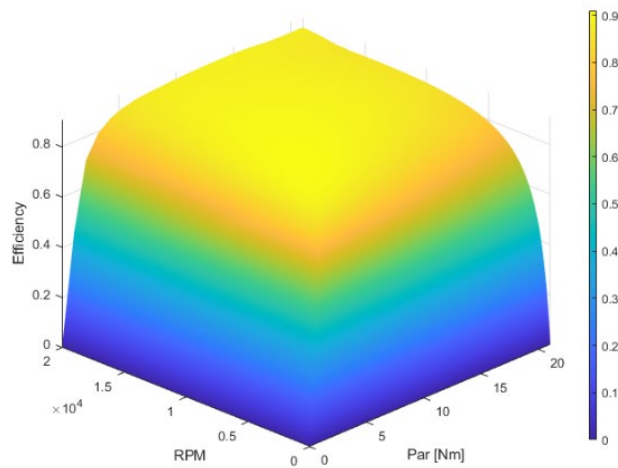


Figura 4: Mapa de rendimientos del motor. Elaboración propia a partir de datasheet del fabricante

2.3. Maniobra simulada

Para la evaluación de la potencial mejora de consumo se simulaban maniobras sencillas, representativas del paso por curva del vehículo. Concretamente, los resultados reportados corresponden con una maniobra de curva de radio constante de 45 m simulando el paso del vehículo a velocidad constante. Se realizan simulaciones de esta misma maniobra con diferentes repartos de par entre rueda interior y exterior.

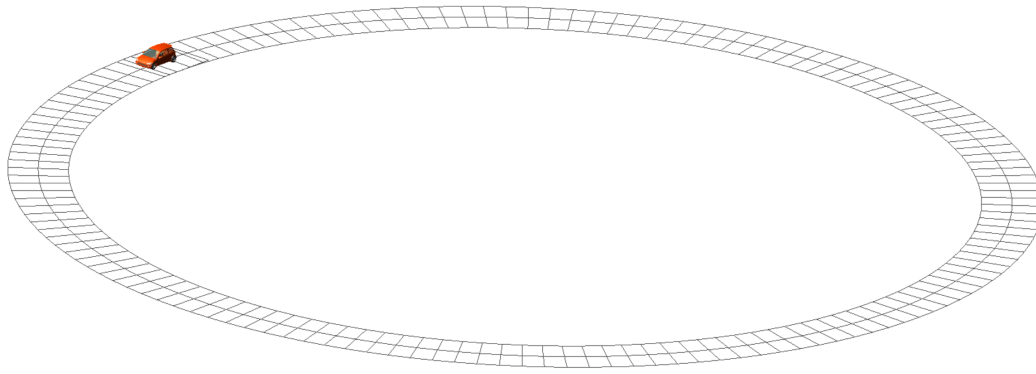


Figura 5: Vista 3D de trayectoria simulada: curva radio constante de 45 m.

3. Resultados y discusión

La maniobra de trayectoria curva de radio constante permite evaluar el rendimiento del vehículo completo en este tipo de maniobras comparando la potencia instantánea demandada por el mismo. Manteniendo velocidad de paso constante, y ensayando diferentes repartos de par entre rueda interior y exterior del vehículo, se obtienen diferentes potencias demandadas para mover el vehículo. La figura 6 muestra en el gráfico de la izquierda la potencia mecánica demandada en las ruedas del vehículo (suma de ambas ruedas motrices), mientras que la gráfica de la derecha muestra la potencia demandada en el acumulador del vehículo (baterías) para diferentes repartos de par.

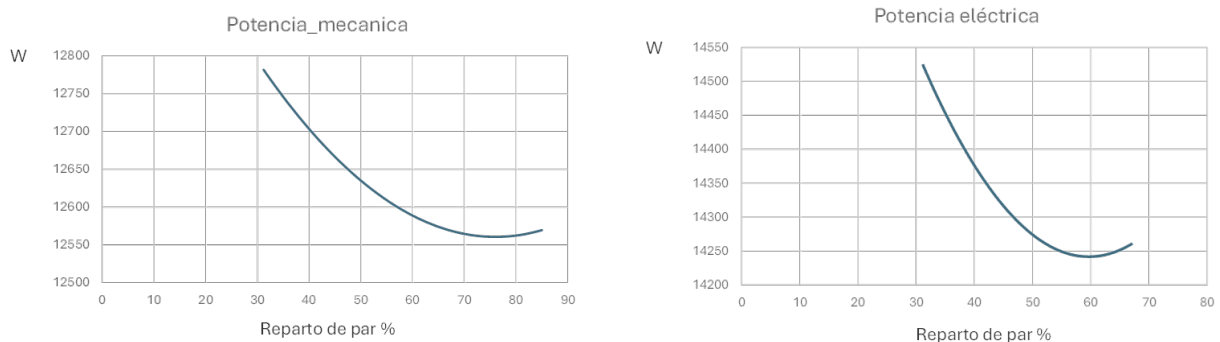


Figura 6: Potencia total demandada en ruedas (potencia mecánica) y en acumulador (potencia eléctrica) en función del reparto de par.

El análisis de la potencia mecánica en ruedas permite observar como la hipótesis de partida propuesta efectivamente tiene su impacto en el consumo de energía del vehículo en el paso por curva. En las condiciones simuladas, se aprecia como la mínima demanda de potencia se produce con un reparto de par del 76% en la rueda exterior. Esta reducción de la potencia necesaria para mover el vehículo (y en consecuencia menor energía necesaria) se produce por el efecto combinado de la modificación geométrica de fuerzas que se generan en el contacto del neumático con el pavimento y los efectos de deslizamiento longitudinal y deriva. Las componentes laterales y longitudinales de fuerza en el contacto, que modifican las resistencias al avance, están contempladas en la mayoría de los modelos de comportamiento de neumáticos observados en la bibliografía, mientras que el incremento de resistencias asociado a la deformación longitudinal y la deriva es una aportación que rara vez se encuentra cuantificada en la bibliografía, si bien su naturaleza es reconocida por múltiples autores. La ausencia de datos precisos sobre el comportamiento del neumático en lo referente a pérdidas energéticas asociadas a la deriva y la tracción en forma de histéresis por deformación lateral y longitudinal respectivamente, hacen que las conclusiones de este trabajo no sean precisas en términos cuantitativos.

La potencia eléctrica demandada es consecuencia directa de la potencia mecánica y el rendimiento del sistema propulsor. Los estudios tradicionales suelen considerar un valor de rendimiento constante para el sistema de propulsión, si bien este no es así, y varía en función de las condiciones de funcionamiento, tal y como indican los fabricantes. Implementar en el modelo las curvas de rendimiento de motor e inversor permiten profundizar en el Análisis del impacto que tiene la vectorización del par sobre el consumo del vehículo.

Comparando potencia mecánica con potencia eléctrica, en función del reparto de par, se observan patrones de funcionamiento similares, si bien el punto de funcionamiento óptimo (mínima potencia eléctrica) se ve desplazado hacia un reparto de par entrono al 59% en la rueda exterior. Este resultado es indicativo de la necesidad de plantear la simulación integral de todos los sistemas del vehículo para optimizar consumos. En estas condiciones de uso, el reparto de par que minimiza la potencia mecánica en las ruedas del vehículo hace trabajar a los motores eléctricos e inversor en unas condiciones de rendimiento relativamente bajo, de modo tal que el comportamiento óptimo en términos de rendimiento global del vehículo se ve desplazado hacia ese reparto del 59% de par en rueda exterior.

Tanto los valores absolutos de potencia demandada, como el reparto de par óptimo son muy sensibles a las características del vehículo, los neumáticos, el trayecto y las características del sistema de tracción eléctrico. Esto pone de manifiesto que la vectorización del par es una estrategia que reduce el consumo energético del vehículo, con estimaciones que oscilan entre el 2 y el 10% de mejora. El reparto de par óptimo para minimizar consumos debe calcularse en cada escenario, haciendo necesario que, para aprovechar todo el potencial, los vehículos dispongan de unidades de control con capacidad de implementar modelos predictivos (MPC). Par ello, la simulación precisa del vehículo resulta imprescindible, así como un conocimiento más profundo del comportamiento del neumático, especialmente en lo referente a pérdidas de energía por histéresis de deformación longitudinal y lateral.

4. Conclusiones y trabajos futuros

Como conclusiones de este trabajo, se puede extraer que una adecuada estrategia de reparto de par en vehículos que permitan el control del par independiente en cada rueda permite reducir potencialmente entre un 2 y un 10% el consumo de energía. Esta mejora en el rendimiento es función de las condiciones del trayecto, tipo de vehículo y velocidad de marcha.

El trabajo ha puesto de manifiesto la importancia que tiene el efecto de histéresis por deformación longitudinal y lateral del neumático en las resistencias al avance, si bien no se dispone de modelos de neumático precisos que cuantifique estos incrementos. Se detecta la necesidad de profundizar en la caracterización de los neumáticos para poder establecer de forma más precisa una predicción cuantitativa de la mejora que supone la vectorización del par en el consumo del vehículo.

La modelización del sistema de propulsión eléctrico, considerando su rendimiento en función de las condiciones de utilización, es una herramienta muy interesante para en el futuro diseñar estrategias de vectorización del par orientadas a la minimización de consumos, no solo limitadas a maniobras de paso por curva. Del mismo modo, incluir modelos precisos de comportamiento de baterías o sistemas de acumulación de energía permitirá optimizar aún más esas estrategias de vectorización del par.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto “Optimización del Consumo Energético en Vehículos Eléctricos-OCEVE” (SV-24-GIJÓN-1-17), financiado por el Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA).

6. Referencias

- [1] International Energy Agency (IEA)., “World Energy Outlook 2021” 2021.
- [2] Holmberg, K. and Erdemir, A., “The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars” *Tribol Int*, vol. 135, 389–396 (2019)
- [3] Ding, Y. et al., “Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives” *Electrochemical Energy Reviews*, vol. 2-1, 1–28 (2019)
- [4] C.F. Michelin. Société Technologie Michelin, “The tyre - Rolling resistance and fuel savings” 2003.
- [5] Yunfei Ge, et al., “Study on the influence of cornering characteristics of complex tread tires on rolling resistance based on finite element method” *Advances in Mechanical Engineering* (2023)
- [6] Gent, A.N. and Walter, J.D., *The Pneumatic Tire*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (2005)

- [7] Hammarström, U. et al., “Road surface effects on rolling resistance - coastdown measurements with uncertainty analysis in focus. Deliverable D5(a)” (2008)
- [8] Schuring, D.J., “Energy Loss of Pneumatic Tires Under Freely Rolling Braking and Driving Conditions” Tire Science and Technology, TSTCA, v. 4(1), 3-15 (1976)
- [9] Beckers, C. J. J. et al., “Assessing the impact of cornering losses on the energy consumption of electric city buses” Transp Res D Transp Environ, vol. 86 (2020)
- [10] Guo, N. et al., “Real-time predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicles for coordination of fuel economy and battery degradation” Energy, vol. 214, p. 119070 (2021)
- [11] Brown, W. B. “Torque vectoring to maximize straight-line efficiency in an all-electric vehicle with independent rear motor control” (2021)
- [12] Kobayashi, T. et al., “Direct yaw moment control and power consumption of in-wheel motor vehicle in steady-state turning” Vehicle System Dynamics, vol. 55-1, 104–120 (2017)
- [13] Kobayashi, T. et al., “Efficient direct yaw moment control: tyre slip power loss minimisation for four-independent wheel drive vehicle” Vehicle System Dynamics, vol. 56- 5, 719–733 (2018)
- [14] Ikezawa, Y. et al., “Range Extension Autonomous Driving for Electric Vehicle Based on Optimal Vehicle Velocity Profile in Consideration of Cornering” Elect Eng Japan, vol. 207-1, 43–54 (2019)
- [15] Sun, P. et al., “Exploring the Potential of Camber Control to Improve Vehicles’ Energy Efficiency during Cornering” Energies, vol. 11-4, p. 724 (2018)
- [16] Edrén, J. et al., “Energy efficient cornering using over-actuation Energy efficient cornering using over-actuation and SHC” [Online]. Available: <https://research.chalmers.se>.
- [17] Allonca, D. et al., “A new methodology to optimize a race car for inertial sports” Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol, vol. 233-, 312–323 (2019)