

MODELADO Y CONTROL DE PAR PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON CUATRO MOTORES EN RUEDA

David Marcos¹, Carlos Montero, Miguel A. Ridao, Carlos Bordons, Eduardo F. Camacho
Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática.
Escuela Superior de Ingeniería.
Camino de los Descubrimientos S/N, 41092 Sevilla,
¹dmarcos@us.es

Resumen

Los últimos desarrollos en sistemas de control han hecho posible manipular los pares en cada rueda de manera independiente, de forma que se mejore el manejo de los vehículos eléctricos. Estos vehículos suelen emplear motores en rueda que pueden ser controlados independientemente. Este artículo presenta un vehículo eléctrico a tracción total como plataforma de desarrollo para investigación. Se ha implementado en CAD un modelo dinámico basado en la conexión de los dispositivos mecánicos en el vehículo, así como un modelo dinámico utilizando la herramienta Simmechanics de Matlab/Simulink. Este modelo se ha validado usando datos de experimentos reales y se puede utilizar para probar nuevos controladores de distribución de par antes de su implementación.

El vehículo tiene un sistema de control en tiempo real que integra el controlador de par para los cuatro motores. Este sistema de control satisface la demanda del conductor calculando el par que ha de ser suministrado por cada uno de los cuatro motores. Se presentan resultados experimentales que muestran la bondad de este vehículo como plataforma de pruebas para controladores de distribución de par avanzados.

Palabras clave: Coche eléctrico, Modelado, Control dinámico.

1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que la introducción del vehículo eléctrico (VE) en la sociedad está siendo más lenta de lo contemplado en las previsiones realizadas hace pocos años, las perspectivas continúan siendo favorables para los próximos años debido a la evolución técnica que está permitiendo solucionar las mayores limitaciones de los vehículos eléctricos, como son la autonomía, gracias a nuevos tipos de baterías (LiPo, Li-ion, etc.) y la posibilidad de combinarlas con otros tipos de elementos de potencia como los super-condensadores o pilas de combustible [1, 6], y la vida útil y la velocidad de carga de las baterías. Otros dos aspectos importantes que deben afectar a la mejora en las



Figura 1: FOX vehicle.

ventas de vehículos eléctricos serán, por un lado, unos precios cada vez más competitivos frente a los vehículos con motor de combustión interna (VCI), y por otro lado, que también son esperables cambios en la percepción del consumidor que le lleven a valorar más la eficiencia energética y la sostenibilidad en el momento de adquirir un vehículo.

La utilización de VE abre nuevas posibilidades en el control de vehículos, como por ejemplo nuevos sistemas para el control de tracción, estabilidad o de gestión de potencia cuando están presentes fuentes adicionales a las baterías.

Los VCI tradicionales tienen un solo motor conectado a las ruedas motrices por elementos mecánicos. Un diferencial distribuye el par mecánico por igual entre las ruedas motrices, que pueden ser dos (las delanteras o las traseras) o las cuatro. Sin embargo, en los vehículos eléctricos la transmisión mecánica se simplifica al no necesitar caja de cambios. Esto hace posible la utilización de un motor eléctrico en cada una de las ruedas, de modo que se puede controlar el par que se aplica a cada una de las ruedas, con lo que se puede conseguir un mejor comportamiento dinámico tanto en conducción normal (sustituyendo al diferencial), como en situaciones de emergencia (control de estabilidad)[7, 4, 2].

En este artículo se presenta un vehículo eléctrico experimental con motores en las cuatro ruedas. Está concebido como una plataforma de pruebas

para sistemas de control en vehículos, tales como control de tracción o gestión de potencia. Se ha desarrollado un modelo dinámico, que ha sido validado con datos reales. En este trabajo también se presenta un controlador para el reparto de par y sus pruebas experimentales.

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección 2 presenta una breve descripción con las principales características del vehículo. En la sección 3 se detalla el modelo dinámico del vehículo, así como las pruebas de validación. Los resultados experimentales para distintas condiciones de conducción se muestran en la Sección 4, para finalizar con las conclusiones en la sección 5.

2 DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

FOX es un vehículo basado en el chasis del Silver Car S2, un vehículo de competición con motor de gasolina. Se ha modificado para poder colocar los nuevos elementos y para añadir el asiento del copiloto. La carrocería es la misma que la del S2 original. La Figura 1 muestra el FOX completamente montado. El vehículo está dotado de cuatro motores eléctricos *brushless* en las ruedas. La potencia para los motores es suministrada por baterías conectadas a un bus DC de 72 V.

2.1 Motores

Como se indicó anteriormente, el vehículo dispone de cuatro motores de 7 kW. cada uno. Las curvas características suministradas por el fabricante se muestran en la Figura 2.

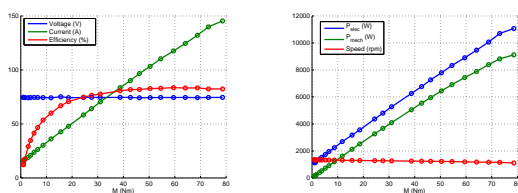
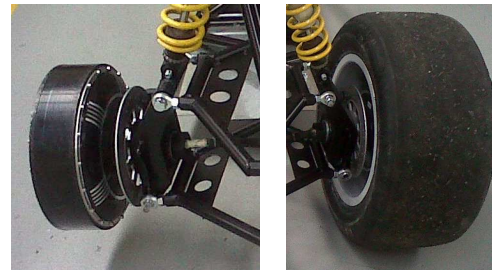


Figura 2: Curvas características de los motores.

La Figura 3(a) muestra el motor trasero izquierdo montado sobre la articulación de la suspensión. Tal como aparece en la Figura 3(b), la rueda está acoplada directamente al motor. El control de cada motor se realiza a través del controlador de un convertidor electrónico de potencia.

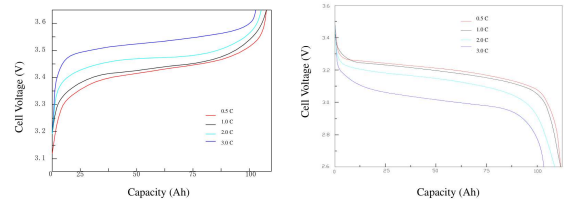
2.2 Baterías

Los motores están alimentados por baterías de LiFeMnPO4 agrupadas en seis *packs* de cuatro



(a) Motor trasero izquierdo. (b) Rueda trasera derecha.

Figura 3: Detalle de los motores en las ruedas.



(a) Curvas de carga. (b) Curvas de descarga.

Figura 4: Curvas de carga y descarga de las baterías

celdas. En la Figura 4 se muestra su curva característica. Las especificaciones más importantes suministradas por el fabricante se pueden ver en la Tabla 1. El control de las baterías se lleva a cabo con un BMS comercial.

Tabla 1: Especificaciones de las baterías.

Tensión Nominal	12.8V (4X 3.2 V)
Capacidad Nominal	100 Ah
Dimensiones	270 X 140 X 241 mm
Intensidad Max Carga	3C
Intensidad Max Descarga	3C (continuous) / 10C (pulsed)
Cycle Life	>2000 (80%DOD)

2.3 Sensores

Teniendo en cuenta el objetivo del FOX como prototipo para pruebas de control, se le han instalado un completo conjunto de sensores de distinto tipo. La selección de los sensores se ha basado en un doble objetivo. En primer lugar, como ajuste de parámetros y validación para los modelos del vehículo de se realicen, y en segundo lugar, para obtener en tiempo real las distintas señales del vehículo necesarias para los controladores que se diseñen.

En los siguientes párrafos se describen brevemente los sensores instalados:

2.3.1 Sensores para el comportamiento del vehículo

- Sensores del recorrido de la suspensión. Se colocan en paralelo a los amortiguadores, midiendo así la compresión de los mismos en cada momento. De esta forma se puede estimar la fuerza vertical en cada rueda, imprescindible para modelar los esfuerzos en las ruedas.

Características principales:

Tipo de medición: divisor de tensiones
 Fuerza de actuación: 2'45 N (horizontal)
 Alcance: hasta 150 mm
 Máx. velocidad de trabajo: 10 m/s (trasero), 1000 mm/s (delantero)

- Unidad de Medición Inercial (IMU). La IMU utilizada es del modelo 3DM-GX3-35 fabricada por Microstrain. Mide las aceleraciones lineales y angulares para los tres ejes, así como el campo magnético. Incluye además un receptor GPS, con el que se tendrá una medida externa de la posición.

Rangos principales:

Acelerómetros:	$\pm 5g$
Giróscopos:	$\pm 300^\circ/s$
GPS (velocidad):	500m/s
Error de alineación:	$\pm 0.05^\circ$
Precisión GPS (velocidad):	0.1m/s

2.3.2 Sensores para dispositivos del conductor

- Acelerador: 0 a 5 V, proporcional a la posición del pedal.
- Pedal de freno: potentiometro. Resistencia nominal: 10 k Ω , precisión: 0.034%.

2.4 Sistema de Control

El vehículo dispone de un sistema de control embebido que puede proporcionar un par diferente para cada uno de los cuatro motores, actuando sobre el convertidor DC/DC, tal como se muestra en la Figura 5. La Unidad de Control (ECU) calcula en tiempo real los valores de los pares obtenidos por el algoritmo de control. La ECU también monitoriza la batería y todas las señales de los sensores descritos anteriormente. También dispone de un sistema de monitorización accesible por el conductor.

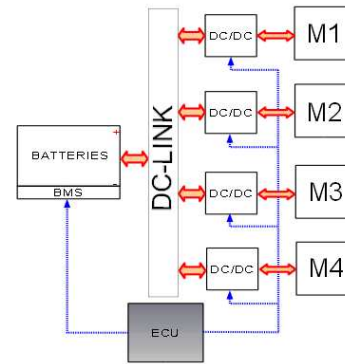


Figura 5: Fox power management system.



Figura 6: Modelo CAD.

3 MODELO DINÁMICO Y VALIDACIÓN

Se ha creado un modelo CAD del vehículo (Figura 6). El propósito de este modelo es doble: por una parte, los dispositivos se pueden colocar virtualmente en el modelo antes de su integración final en el vehículo real, comprobando de manera sencilla no solo cómo encajarlos, sino también cómo afecta su posición a los parámetros del sistema completo (centro de masas, inercia...). Esto es especialmente importante en este caso, dado que al vehículo se le añadirán nuevos componentes en el futuro (supercondensadores y pila de combustible). Por otra parte, el modelo se portará a dos herramientas *software* numéricas (ADAMS y Matlab-Simmechanics) para simular la dinámica del vehículo y probar nuevos controladores para está dinámica.

El modelo completo del vehículo no se describe aquí, debido a la falta de espacio. Sin embargo, se muestra por competo en [5]. Un diagrama de bloques de su implementación en Simmechanics se muestra en la Figura 7.

Los resultados de dos simulaciones se comparan con los datos obtenidos de dos pruebas reales. Estas pruebas se realizaron en una superficie de cemento horizontal y seca.

Las entradas del modelo son las referencias de par y el ángulo del volante. Las referencias de par

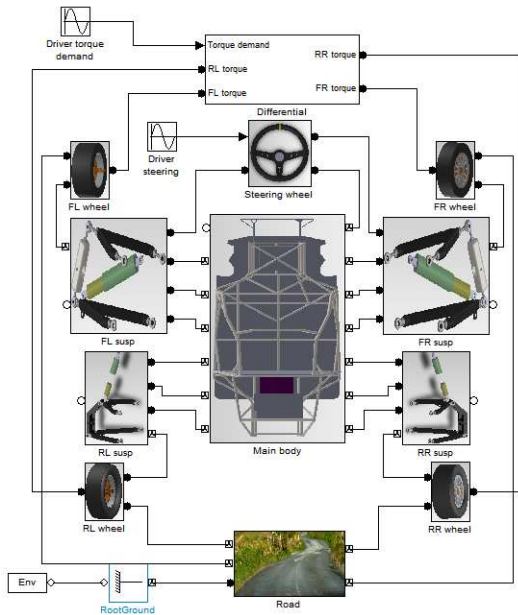


Figura 7: Diagrama de bloques en Simmechanics

vienen dadas por un controlador PI que sigue la velocidad del vehículo. El valor de la velocidad dado por el GPS es corregido con los cálculos realizados con la herramienta online contrastada GPSvisualizer [3], basados en los datos de posición aportados por el propio GPS.

3.1 Prueba a propulsión

Condiciones de la prueba a propulsión

Para la primera prueba solo estaban activos los motores traseros, y en ambos se aplicó el mismo par. Las ruedas delanteras rodaban libremente. Esta configuración es similar a la de un vehículo con motor de combustión interna a propulsión, donde un diferencial mecánico distribuye el par equitativamente entre las dos ruedas traseras.

Las figuras 8 y 9 muestran la posición del volante y la referencia y el seguimiento de la velocidad.

Resultados de la prueba a propulsión

La Figura 10 muestra los *slips* longitudinales, laterales y resultantes en las cuatro ruedas. La diferencia principal entre las ruedas delanteras y traseras está en el *slip* longitudinal. Mientras en las ruedas traseras este toma valores similares a los del *slip* lateral, en las ruedas delanteras ambos parámetros difieren en varios órdenes de magnitud. Dado que los motores delanteros no crean ningún par, la única resistencia al movimiento es la inercia de la rueda. Por contra, el par aplicado por los motores traseros hace que el *slip* longitudinal aumente, y en consecuencia la fuerza longitu-

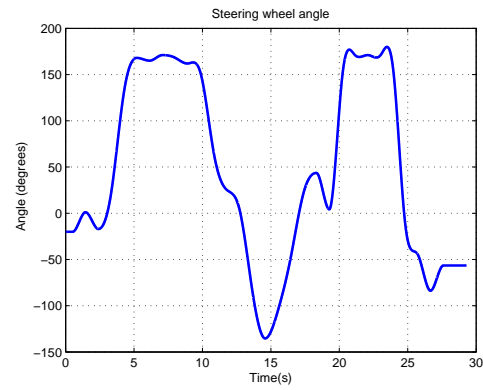


Figura 8: Ángulo del volante.

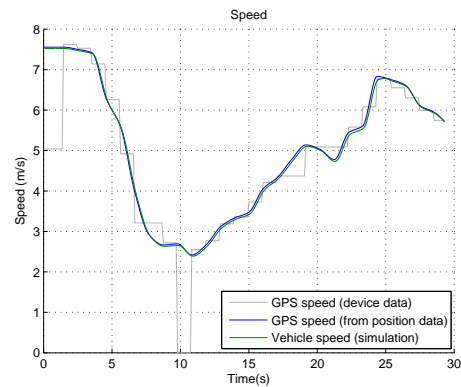


Figura 9: Velocidad.

dinal, como se muestra en la Figura 11, donde se representan las fuerzas longitudinales y laterales en las ruedas.

El *slip* lateral toma su valor más alto cuando el vehículo está girando, debido a las fuerzas de inercia. Esto es fácil de comprobar comparando la Figura 10 con el ángulo del volante (Figura 8). El *slip angle* se representa en la Figura 12. Como se esperaba, el valor de este ángulo aumenta con la curvatura de la trayectoria y la velocidad del coche.

Por última, las trayectorias de la prueba real y la simulación se comparan en las Figuras 13 (a) y (b).

3.2 Prueba a tracción total

Condiciones de la prueba a tracción total

Una segunda prueba se realizó, donde se aplicaba el mismo par a las cuatro ruedas. La velocidad y el ángulo del volante se muestran en las Figuras 14 y 15.

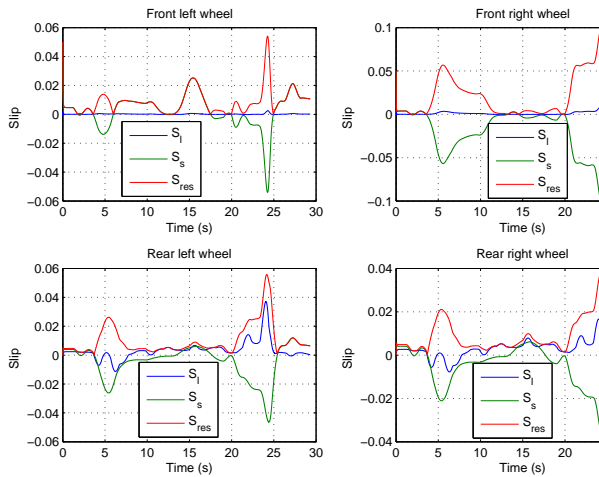


Figura 10: *Slips* en cada rueda.

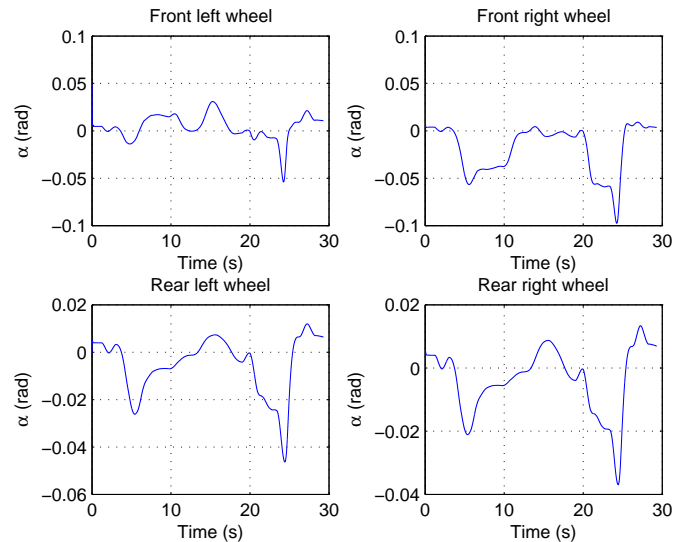


Figura 12: *Slip angle* en cada rueda.

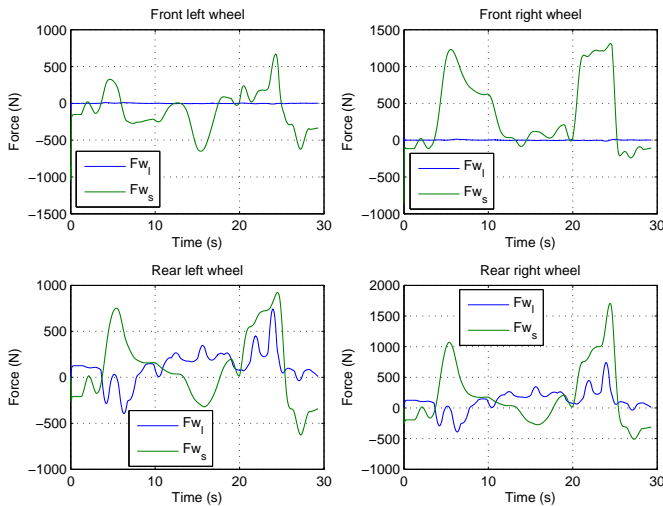


Figura 11: Fuerzas en cada rueda.

A una mayor velocidad el *slip* sería más significativo.

Sin embargo, la forma de las trayectorias (Figuras 13 y 17) demuestra que en ambos casos (Real y simulado) el vehículo tiene un comportamiento muy similar tanto a propulsión como a tracción total. Por lo tanto, queda probado que el modelo consigue una trayectoria realista, por lo que es válido para probar cualquier controlador de tracción antes de su implementación en el vehículo, lo cual es el objetivo principal del modelo.

Resultados de la prueba a tracción total

Los *slips* se muestran en la Figura 16. En este caso todos los *slips* son del mismo orden, y la tracción se reparte entre las cuatro ruedas.

Las trayectorias de la prueba real y la simulada se muestran en las Figuras 17 (a) y (b).

3.3 Discusión

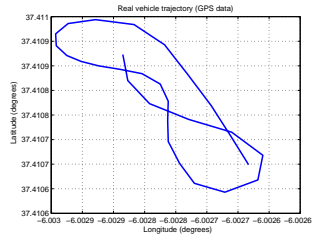
La bondad del modelo no se puede cuantificar, debido a la escasa precisión del dispositivo GPS, que afecta no solo al gráfico de la trayectoria, sino también a la medida de la velocidad. La conversión de coordenadas geográficas a UTM supondría a su vez una segunda fuente de error.

Las pruebas se hicieron a baja velocidad debido a las reducidas dimensiones de la pista de pruebas.

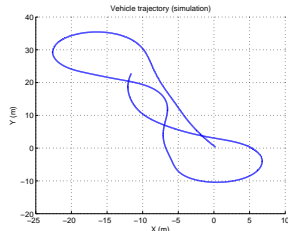
4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Esta sección muestra los resultados de experimentos reales que permiten analizar el comportamiento de cada uno de los cuatro motores y el control de par. En el primer experimento, el vehículo se mantiene girando a izquierdas con un radio de giro constante de 3.52m, mientras que la señal del acelerador comienza a incrementarse. El vehículo para al final del experimento. La tracción durante esta prueba es trasera. La velocidad, corriente y par de cada uno de los motores así como la corriente y voltaje de baterías han sido registradas durante el experimento con un período de muestreo de 150ms para su posterior análisis.

En la Figura 18 se observan la corriente y voltaje del pack de baterías. Como es de esperar, el voltaje permanece casi constante mientras que la corriente se incrementa hasta llegar, en esta prueba, a un máximo de 30A, lo que equivale a una potencia máxima entregada por las baterías



(a) Trayectoria del vehículo (GPS).



(b) Trayectoria del vehículo (simulación)

Figura 13: Trayectoria del vehículo .

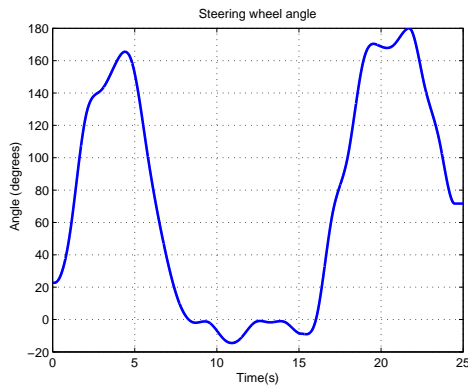


Figura 14: Ángulo del volante.

de 2.4kW.

En la Figura 19 se puede observar la velocidad de cada motor (rpm). Destacar que el par es controlado en cada rueda y el vehículo describe una trayectoria de giro constante a izquierdas, en consecuencia las velocidades de las cuatro ruedas son diferentes. Ordenadas de más lenta a mas rápida tenemos: Rueda trasera izquierda (RL), delantera izquierda (FL), trasera derecha (RR) y delantera derecha (FR). Considerando un radio aproximado de cada rueda de 0.26m esta diferencia de velocidad entre ruedas llega a tener valores importantes, en esta prueba varía desde los 13.7km/h (RL) a los 23.5km/h (FR).

La corriente demandada por cada motor se muestra en la Figura 20. Destacar que las unidades de corriente, ofrecidas por el fabricante, están en porcentaje. Estos valores son proporcionales a la

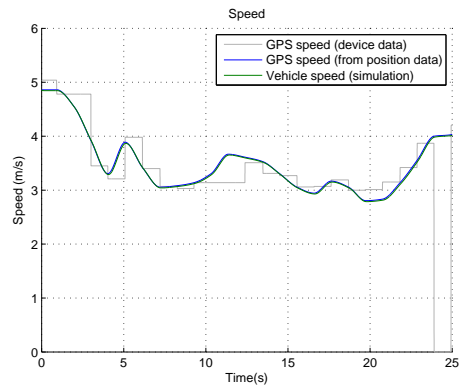


Figura 15: Velocidad.

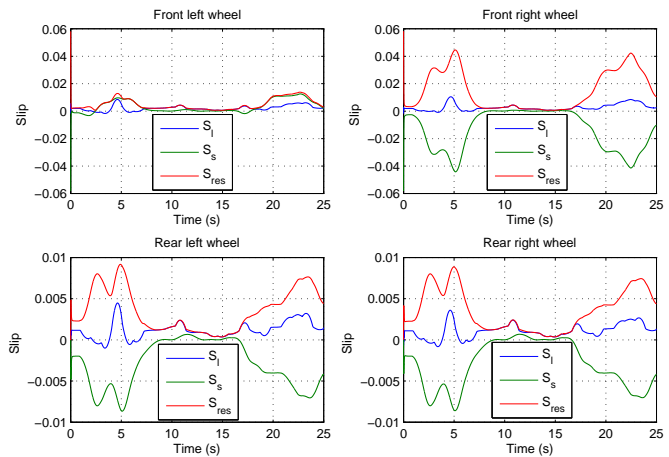
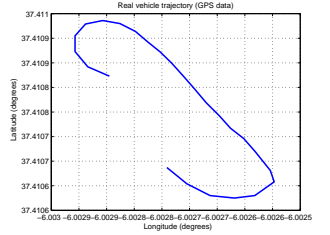


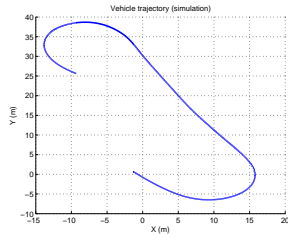
Figura 16: Slips en cada rueda.

corriente nominal (400A) de los convertidores que adaptan la potencia entre batería y cada motor y un offset (por ejemplo, 5% corresponde a 0A). La ECU registra la señal del pedal del acelerador y computa el par que debe aplicar a cada motor. En este experimento, la referencia de par enviada a los controladores de los motores de cada rueda motriz es la misma. Considerando, pues, el mismo par deseado y aplicado éste en cada uno de los cuatro motores, la corriente demandada por cada rueda motriz debería del mismo modo ser igual. Teniendo en cuenta que en este experimento el vehículo funciona con tracción trasera las ruedas delanteras no son motrices, en esta prueba, y tienen un consumo de corriente de 0A (5% en la figura). El comportamiento del vehículo es similar al de un vehículo convencional con tracción trasera y diferencial mecánico.

En un segundo experimento el vehículo alterna una secuencia de trayectorias rectas y curvas. En la parte superior de la Figura 21 se muestra el ángulo del volante (medida obtenida a partir del voltaje de un potenciometro). Un voltaje de



(a) Trayectoria del vehículo (GPS).



(b) Trayectoria del vehículo (simulación)

Figura 17: Trayectoria del vehículo.

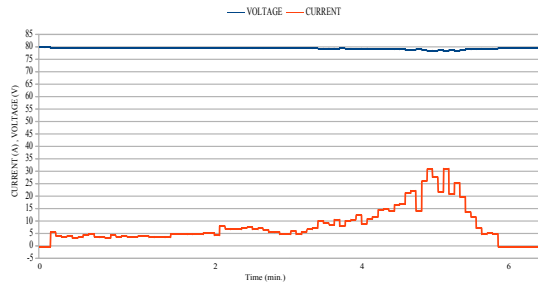


Figura 18: Corriente y voltaje de las baterías.

4.155 V (línea gris en la figura) corresponde a una trayectoria en línea recta (ángulo de giro de 0°), valores de tensión por encima corresponden a giros del volante hacia la izquierda y valores por debajo de ese umbral corresponden a giros hacia la derecha. En esta prueba se elige una tracción total del vehículo, es decir, las cuatro ruedas serán motrices. De nuevo, se controla el par aplicado por cada motor. La duración del experimento es de aproximadamente 1 minuto y el tiempo de muestreo es de 200 ms.

La velocidad de cada una de las cuatro ruedas puede verse en la Figura 21. Destacar que la velocidad de cada una de las ruedas es muy similar durante la trayectoria en línea recta, pero comienzan a hacerse diferentes a medida que se incrementa el ángulo de giro, como puede observarse en los períodos de giro a la izquierda. Como sucedía en el experimento previo, durante estos períodos, la velocidad de cada rueda se incrementa de una a otra en el siguiente orden: RL, FL, RR and FR. Finalmente la Figura 22 muestra el compor-



Figura 19: Velocidad de los cuatro motores (rpm), Rueda trasera izquierda (RL), Delantera izquierda (FL), Trasera derecha (RR) y Delantera derecha (FR).

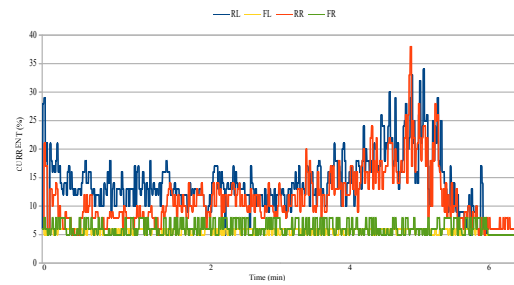


Figura 20: Corriente de los cuatro motores (Rueda trasera izquierda (RL), Delantera izquierda (FL), Trasera derecha (RR) y Delantera derecha (FR)).

tamiento de la corriente demandada por cada motor en el mismo experimento. Como era de esperar, con el control de par aplicando la misma referencia a cada uno de los cuatro motores, la corriente consumida en todos los motores es aproximadamente igual.

5 CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta un vehículo eléctrico con cuatro motores en rueda (diseñado y probado para propósitos de investigación. Un modelo dinámico basado en la conexión de los diferentes dispositivos mecánicos en el vehículo ha sido implementado en

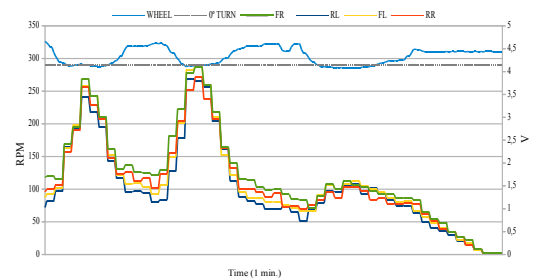


Figura 21: Ángulo de giro del volante (V) y velocidad de cada rueda (rpm).

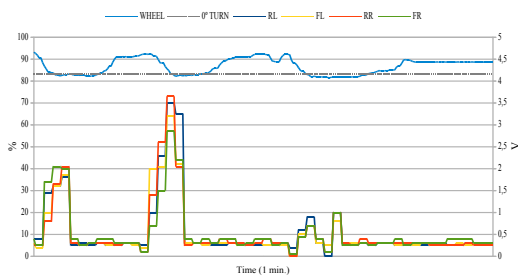


Figura 22: Ángulo de giro del volante y corriente de los motores

Simmechanics. Aunque el modelo no se detalle en el presente documento si se presentan varios experimentos que demuestran su capacidad para representar las dinámicas del vehículo. Este modelo será más adelante usado para probar nuevos controladores de par antes de su implementación en el vehículo real.

El documento también muestra varios experimentos reales de control de distribución de par, usando dos y cuatro ruedas motrices. Los experimentos demuestran como el par demandado por el conductor es aproximadamente igual en las ruedas motrices, permitiendo así diferentes velocidades de cada una de las cuatro ruedas cuando el vehículo describe una trayectoria curva. Por lo tanto el controlador implementado en la ECU del vehículo permite al vehículo realizar el equivalente a un diferencial mecánico. Finalmente el trabajo realizado demuestra que este vehículo es una excelente bancada de ensayo para probar avanzados controladores de distribución de par.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero ofrecido por el Ministerio de Economía y Competitividad para financiar este trabajo bajo la concesión DPI2013-46912-C2-1. Los autores también quieren recordar el excelente trabajo de Juan Cabrera Garcá al que dan las gracias por su dedicación.

Referencias

[1] Bordons C., Ridao M.A., Pérez Espinosa A., Arce A. and Marcos D. Model Predictive Control for Power Management in Hybrid Fuel Cell Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference 2010 (VPPC 10), Lille, France, 2010

[2] Edrén J., Exploring force allocation control of over actuated vehicles. Licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden), 2011.

[3] http://www.gpsvisualizer.com/convert_input (Last visit: January 2014).

[4] Gutiérrez J., Romo J., González M.I., Cañibano E., Merino J.C., Control Algorithm Development for Independent Wheel Torque Distribution with 4 In-wheel Electric Motors. Computer Modeling and Simulation (EMS), 2011 Fifth UKSim European Symposium on , vol., no., pp.257,262, 16-18 Nov. 2011

[5] Marcos, D. Contributions to Power Management and Dynamics Control in Hybrid Vehicles. Ph. D. thesis, University of Seville, 2014.

[6] Marcos D., Bordons C., Ridao M.A., A Comparative Study of Energy Storage Systems in a Fuel Cell Hybrid Vehicle. Jornadas de Automática XXXI. Jaén, 2010.

[7] Qian H., Xu G., Yan J., Lam T.L., Xu Y., Xu K., Energy management for four-wheel Independent Driving Vehicle, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.5532,5537, 18-22 Oct. 2010

[8] Wang J. and Longoria R. G., "Coordinated Vehicle Dynamics Control with Control Distribution," Proceedings of the 2006 American Control Conference, pp. 5348 -5353, 2006.