

SIMULACIÓN DINÁMICA DEL FRENADO REGENERATIVO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO URBANO

Dynamic Simulation of Regenerative Braking in an Urban Electric Vehicle

Doctorando:

Juan Ulises DUSAU

<https://orcid.org/0009-0008-9127-4184>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional General Pacheco, General Pacheco, Tigre, Buenos Aires, Argentina
jdusau@docentes.frgp.utn.edu.ar

Director:

Juan VOROBIOFF

Codirector:

Gustavo José CAZZOLA

Resumen

Se integra la estimación indirecta de la curva par-velocidad generada durante el frenado regenerativo, obtenida a partir de ensayos de desaceleración, con la simulación dinámica de un vehículo eléctrico urbano L6(b) en Matlab/Simulink. Los registros GPS de alta resolución y los parámetros físicos relevados permitieron inferir la curva $T_e(n)$, incorporada como tabla de búsqueda en un modelo basado en la segunda ley de Newton. Sobre la misma trayectoria empleada para construir $T_e(n)$, una calibración del momento de inercia equivalente de 2,56 % produjo una correlación de 0,999756 y un MAPE de 2,050297 %. Debido a que la construcción y el ajuste utilizan el mismo registro, estas métricas constituyen una calibración y verificación interna, no una validación independiente. El modelo proporciona una base para futuras pruebas con trayectorias no utilizadas en su ajuste.

Palabras clave: frenado regenerativo; vehículo eléctrico urbano; categoría L6(b); simulación dinámica; estimación indirecta de par; calibración de modelos.

Abstract

This study integrates an indirect estimate of the regenerative torque-speed curve, obtained from deceleration tests, with the dynamic simulation of an L6(b) urban electric vehicle in Matlab/Simulink. High-resolution GPS records and measured vehicle parameters were used to infer the $T_e(n)$ curve, which was implemented as a lookup table in a Newton-based model. On the same trajectory used to construct $T_e(n)$, calibration of the equivalent moment of inertia by 2.56 % yielded a correlation coefficient of 0.999756 and a MAPE of 2.050297 %. Because curve construction and model fitting use the same record, these metrics represent calibration and internal verification rather than independent validation. The model provides a basis for future testing with trajectories not used during fitting.

Keywords: regenerative braking; urban electric vehicle; L6(b) category; dynamic simulation; indirect torque estimation; model calibration.

Introducción

Los vehículos eléctricos urbanos L6(b) ofrecen baja masa y costo operativo para la movilidad de corta distancia. En Argentina, fueron incorporados mediante el Decreto Reglamentario 32/2018 de la Ley de Tránsito N.º 24.449 (Presidencia de la Nación Argentina, 2018). La recuperación energética depende del ciclo de conducción y del control, y su evidencia

específica en L6(b) es escasa (Szumska & Jurecki, 2022; Wu et al., 2020). Este trabajo se limita a estimar el par regenerativo y reproducir la desaceleración; no calcula energía recuperada ni compara estrategias de control.

Este trabajo extiende el modelo previamente aplicado a la aceleración del prototipo Sero Electric (Cazzola et al., 2023a) hacia el frenado regenerativo por liberación del acelerador (*coasting-regen*), sin accionamiento del freno hidráulico. El objetivo es estimar indirectamente la curva $T_e(n)$, implementarla en un modelo longitudinal de Matlab/Simulink y contrastar la velocidad simulada con el registro GPS representativo. El alcance se limita a la calibración y verificación interna sobre la trayectoria utilizada para inferir $T_e(n)$; la validación independiente con otras trayectorias queda planteada como trabajo posterior.

Desarrollo

Método experimental. Se ensayó un Sero Electric L6(b) equipado con motor de inducción trifásico DAFA de 5 kW y controlador vectorial Curtis 1234E (Curtis Instruments, 2021). Con una masa total con ocupantes de 665 kg, radio efectivo de rueda de 0,255 m y relación total de transmisión de 12,3, el vehículo se aceleró hasta su velocidad máxima y luego se liberó el acelerador sin accionar el freno hidráulico. Un Racelogic GPS Data Logger Performance Box registró latitud, longitud y velocidad cada 100 ms. La detención final se realizó por fricción; el análisis se restringió a los 5,8 s en los que la regeneración resultó dominante.

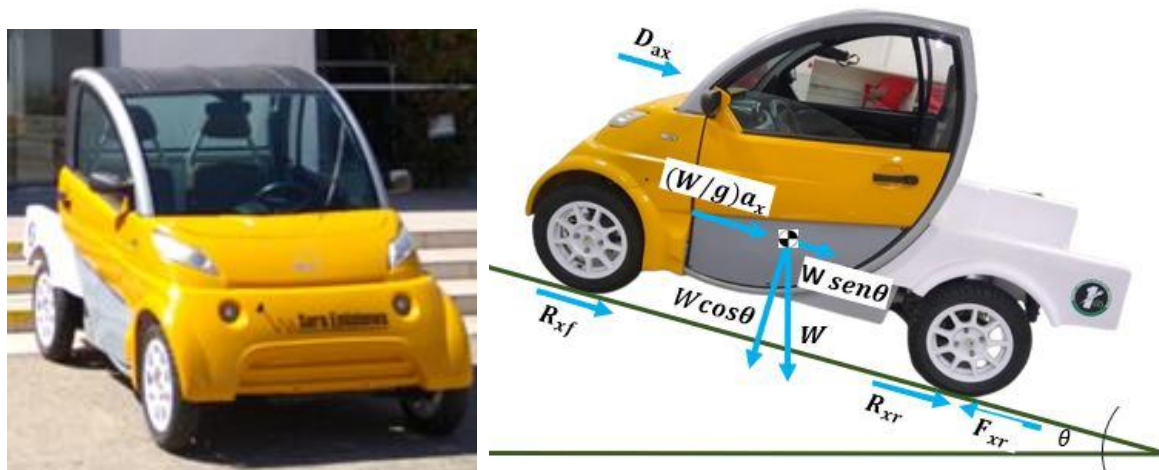


Figura 1: Vehículo bajo ensayo y diagrama de cuerpo libre para la dinámica longitudinal.

Estimación indirecta de la curva $T_e(n)$. De ocho trayectorias de desaceleración se seleccionó la Curva 4 mediante un criterio de centralidad robusto. El registro se discretizó en siete intervalos, con desplazamiento inicial de 0,73 s; para cada segmento se calcularon ΔV , Δt , el módulo de la desaceleración media $|a_x|$ y la velocidad media V . Al particularizar el balance de fuerzas del vehículo y las inercias del tren de transmisión (Gillespie, 1992; Cazzola et al., 2023a), el par regenerativo se estimó con:

$$T_e = 15,085 |a_x| - 1,41 (1 + V/44,7) - (1/116) V^2 \quad (1)$$

donde T_e se expresa en $N \cdot m$, $|a_x|$ en m/s^2 y V en m/s . La velocidad de giro del motor se calculó mediante la relación rueda-reductor:

$$n \approx 460,613 V \quad (2)$$

Los siete pares promedio (n, T_e) cubren aproximadamente 396-4712 r.p.m. y 13,10-29,85 $N \cdot m$. La curva resultante se empleó sin extrapolación; por debajo del mínimo ensayado se impuso $T_e = 0$ para representar la atenuación del frenado a muy bajas revoluciones.

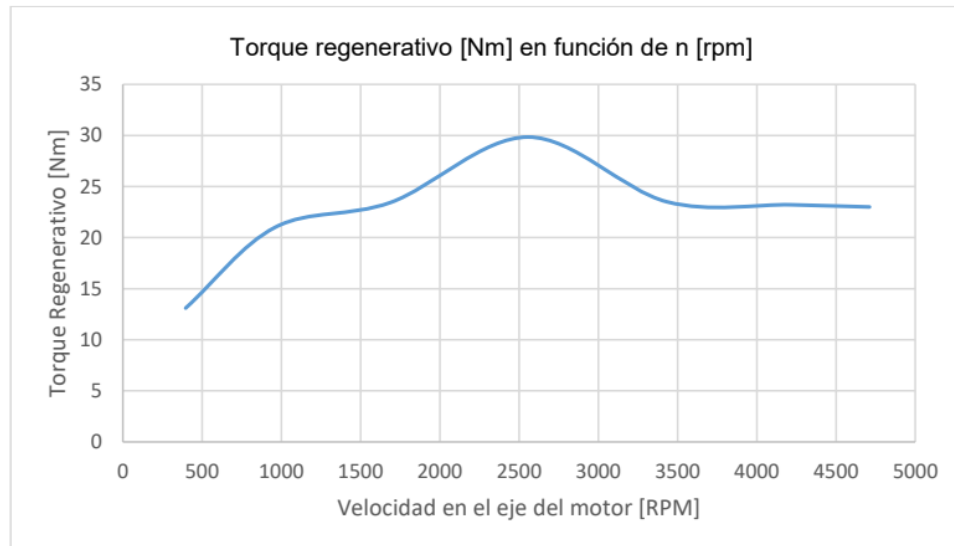


Figura 2: Par regenerativo estimado T_e en función de la velocidad de giro n .

Modelo de simulación. La curva $T_e(n)$ estimada a partir del ensayo y las cargas pasivas del vehículo se implementaron como tablas de búsqueda unidimensionales en un modelo de dinámica rotacional. El esquema integra el par regenerativo, las resistencias aerodinámica y de rodadura y la inercia equivalente para obtener velocidad y distancia. Se utilizó un paso fijo de 0,1 s, solucionador ODE3 (Bogacki-Shampine) y condición inicial $V_0 = 10,458$ m/s (37,650 km/h), manteniendo coherencia con la frecuencia del GPS y con el modelo previo (Cazzola et al., 2023b).

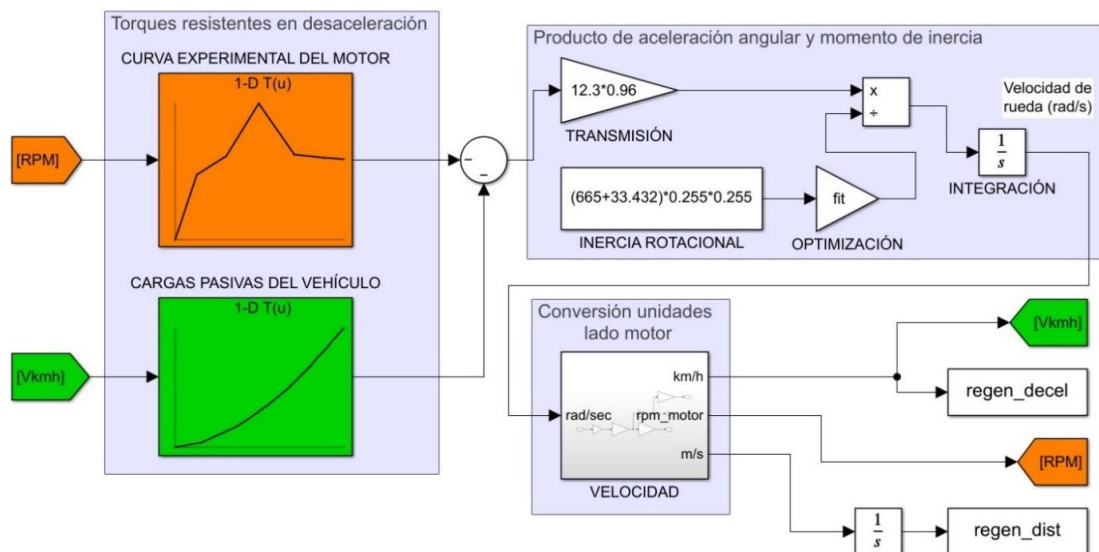


Figura 3: Modelo de dinámica rotacional implementado en Matlab/Simulink.

Resultados

La Curva 4 empleada para inferir $T_e(n)$ se utilizó también como referencia para calibrar el modelo. La velocidad simulada se ubicó inicialmente por debajo de la velocidad GPS, indicando una desaceleración excesiva. Se efectuó un barrido de 40 simulaciones en $1,00 \leq \text{fit} \leq 1,05$ y se seleccionó el valor que minimizó el MAPE. El óptimo fue $\text{fit} = 1,0256$, equivalente a incrementar en 2,56 % el momento de inercia equivalente. El ajuste conserva la estructura de fuerzas y $T_e(n)$, pero constituye una calibración sobre el mismo caso y una verificación de consistencia interna, no una validación predictiva independiente.

Métrica	Sin ajuste	Con ajuste	Variación [%]
Correlación	0,999683	0,999756	0,0073
MAE	0,621125	0,309998	50,08
MSE	0,459859	0,156192	66,03
MAPE	4,119001	2,050297	50,22
MSPCE	0,241714	0,106984	55,74

Tabla 1: Métricas de calibración de la velocidad antes y después del ajuste.

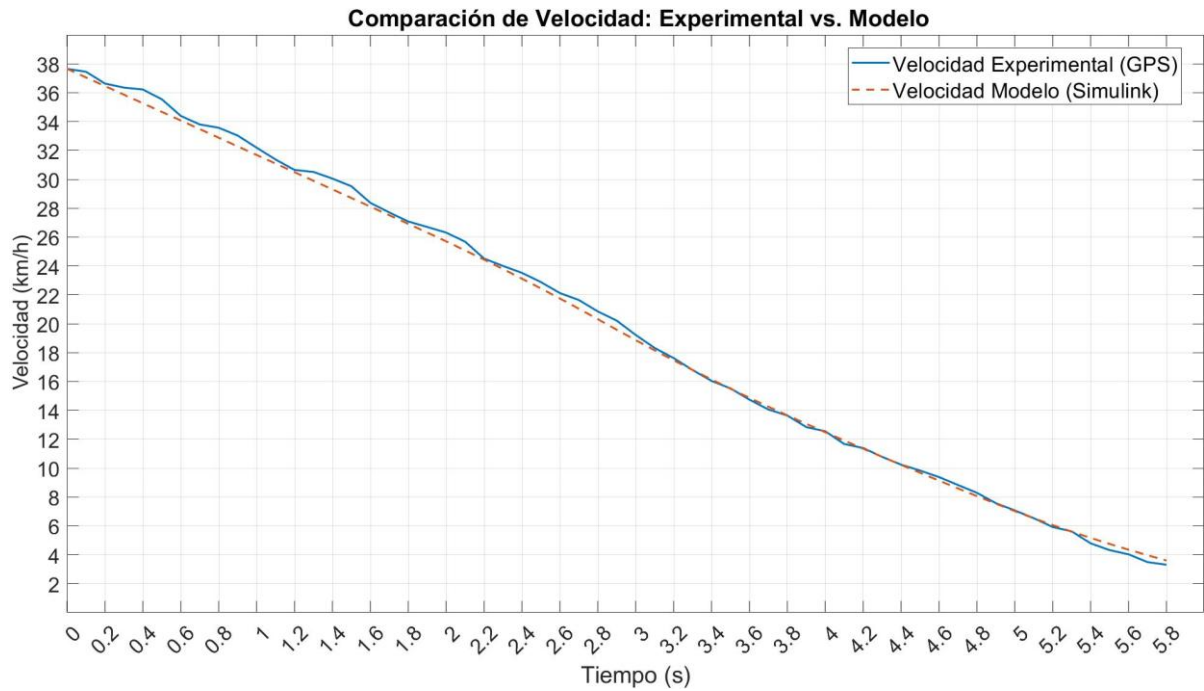


Figura 4: Comparación de velocidad experimental y simulada con el modelo ajustado.

La correlación de velocidad aumentó de 0,999683 a 0,999756 y el MAPE disminuyó de 4,119001 % a 2,050297 %, mientras que MAE, MSE y MSPCE se redujeron 50,08 %, 66,03 % y 55,74 %, respectivamente. La comparación en distancia mostró el mismo comportamiento: la correlación pasó de 0,999973 a 0,999995 y el MAPE de 2,202367 % a 1,309270 %. Estas métricas describen la capacidad del modelo calibrado para reconstruir la trayectoria de referencia; no demuestran su generalización a trayectorias no utilizadas en la construcción de $T_e(n)$ ni en el ajuste.

Conclusiones

La estimación indirecta del par regenerativo se integró en un modelo de dinámica longitudinal capaz de reconstruir la desaceleración de la Curva 4. La calibración acotada del momento de inercia corrigió la sobre-desaceleración sin alterar $T_e(n)$ ni la estructura física del modelo, y permitió alcanzar $R = 0,999756$ y $MAPE = 2,050297 \%$ en velocidad. Como la misma trayectoria se empleó para inferir $T_e(n)$ y ajustar el modelo, los resultados constituyen una calibración y verificación interna, no una validación independiente. El alcance se limita a coasting-regen, al rango ensayado y a velocidades en las que la regeneración domina. Como continuación se propone separar datos de calibración y validación mediante otras trayectorias experimentales y, posteriormente, integrar tracción, regeneración y freno de fricción en un esquema one-pedal para su evaluación con ciclos urbanos.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Se utilizó OpenAI Codex exclusivamente como asistencia editorial para condensar el manuscrito y adecuarlo al formato de las Jornadas. No se generaron ni modificaron resultados, cifras, ecuaciones o conclusiones científicas. El contenido final fue revisado, contrastado con el manuscrito fuente y queda bajo responsabilidad de los autores.

Referencias

- Cazzola, G., Mirassou, H., Dusau, J., & Santelli, J. (2023a). Estudio teórico y experimental de la dinámica longitudinal de un vehículo eléctrico de categoría L6(b). En *Actas del VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica / III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria* (pp. 1978-1989).
- Cazzola, G. J., Mirassou, H. M., Dusau, J. U., Santelli, J. A., & Buchhammer Papasian, B. (2023b). Simulación de la dinámica longitudinal de un vehículo eléctrico de categoría L6(b) en Matlab/Simulink. En *Actas del VIII Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica / III Congreso Argentino de Ingeniería Ferroviaria* (pp. 1415-1426).
- Curtis Instruments, Inc. (2021). *1234E/1236E AC motor controller - operating manual (Rev. B)*.
<https://www.curtisinstruments.com>
- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International.
- Presidencia de la Nación Argentina. (2018). *Decreto Reglamentario 32/2018: Modificación de la Ley de Tránsito N.º 24.449*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/decreto_32_2018.pdf
- Szumaska, E. M., & Jurecki, R. (2022). The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies*, 15(24), 9369. <https://doi.org/10.3390/en15249369>
- Wu, S., Zhang, C., Cao, B., Pan, W., Liu, F., & Yuan, W. (2020). Review of regenerative braking systems for electric vehicles. *Applied Sciences*, 10(12), 4085. <https://doi.org/10.3390/app10124085>