

Simulación de un Sistema de Propulsión Eléctrico para EV

Gabriel Eirea, Fernando Chiaramello, Francisco Souza, Sergio Santana Negrín

Abstract—En este artículo se presenta un modelo de un sistema de propulsión de vehículos eléctricos (EVs) para la simulación en MATLAB/Simulink. Se utilizaron topologías y dimensiones representativas del estado del arte en cuanto a EVs disponibles en el mercado. La simulación de este modelo permite evaluar el rendimiento energético del sistema bajo distintos ciclos de conducción. En particular, es posible evaluar el desempeño de distintas estrategias de frenado regenerativo. Se presentan resultados de simulación para un ciclo de conducción estándar.

Index Terms—Vehículo Eléctrico, EV, Ciclo de Conducción, Convertidores DC-DC, Freno Regenerativo, Freno Híbrido.

I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad, la tendencia del mercado automotriz es disminuir o eliminar la dependencia del petróleo y consecuentemente la emisión de gases de efecto invernadero, mediante la utilización de sistemas de propulsión eléctricos en los vehículos. Como resultado el mercado actual ofrece una variada gama de vehículos eléctricos (EVs).

El presente estudio se propone evaluar el desempeño, desde un punto de vista energético, de un sistema de propulsión eléctrico de similares características a los que se encuentran en los EVs comerciales. Estos están fundamentalmente conformados por: banco de baterías, convertidores electrónicos de potencia, controladores y motor de tracción eléctrico[7].

Para ello, se creó un modelo MATLAB/Simulink del sistema de propulsión de un EV, con su control asociado. Este modelo se puede alimentar con distintos ciclos de conducción y permite evaluar el desempeño del sistema con diferentes estrategias de control, en particular el rendimiento energético de distintas estrategias de frenado regenerativo.

II. EL MODELO DE EV

Se realizó un relevamiento del estado del arte de las tecnologías de los diferentes componentes [2][1][3]. Se estudiaron algunas topologías de convertidores electrónicos de potencia DC-DC y DC-AC de aplicación automotriz, así como los motores eléctricos de tracción más utilizados y sus principios de funcionamiento. Se complementó este estudio del estado del arte con la investigación de los principios de funcionamiento del Freno Regenerativo (recuperación y almacenamiento de energía durante el frenado del vehículo). Como resultado de este relevamiento se definieron las características de los distintos bloques de un EV de manera que

fuera representativo de las tecnologías más utilizadas en la actualidad.

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques del modelo en MATLAB/Simulink. Este diagrama se explica a continuación.

A partir de una fuente de tensión continua ('BAT'), que representa la batería, el convertidor DC-DC ('DC-DC'), regula la tensión según consigna impuesta por el controlador ('CTRL-DCDC'), suministrando a la salida un bus de tensión continua con el valor deseado. Esta tensión regulada, alimenta al convertidor DC-AC ('INV') que proporciona a la salida un sistema trifásico de tensiones alternas que alimentan al motor de tracción ('MOT'). El inversor, se controla mediante la estrategia de Control Vectorial de Corriente ('CTRL-INV'), que sensa la velocidad y las corrientes de alimentación del motor y, considerando el par impuesto por el conductor, controla la dinámica de los componentes del inversor.

La entrada del sistema es el ciclo de conducción ('CICLO'), que define la velocidad deseada en función del tiempo. El conductor ('CONDUCTOR') compara esta velocidad de referencia con la velocidad real del vehículo para determinar el par mecánico a aplicar.

La relación entre la velocidad del vehículo y el par ejercido sobre la máquina está dada por la dinámica del automóvil ('AUTO'). En el caso del frenado (par negativo), el par total sobre las ruedas del vehículo es la suma del par ejercido por el freno mecánico y el par ejercido por la máquina actuando en régimen generador. La distribución del par deseado entre el freno mecánico y el generador eléctrico se realiza mediante una estrategia de frenado regenerativo que está definida en el bloque 'FRENO HIBRIDO'.

III. FUNCIONAMIENTO DE LA SIMULACIÓN

Cada uno de los bloques del modelo fue definido en base a topologías representativas del estado del arte y dimensionado de acuerdo a valores típicos encontrados en el mercado de EVs. A continuación se describen los bloques más importantes.

A. Convertidor DC-DC

Luego de investigar el estado del arte respecto a las tecnologías de Convertidores DC-DC bidireccionales[4][5][6][9] que regulan la tensión de la batería para adaptarla a un bus DC de alta tensión, permitiendo además la recuperación de energía hacia la batería al utilizar el Freno Regenerativo, se diseñó un Convertidor DC-DC específico (ver Fig. 2) para esta

Los autores están con el Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Contacto: [geirea, fchiara, fjsouza, ssantana]@fing.edu.uy.

Este trabajo fue financiado por el proyecto ANII FSE_2010_11.

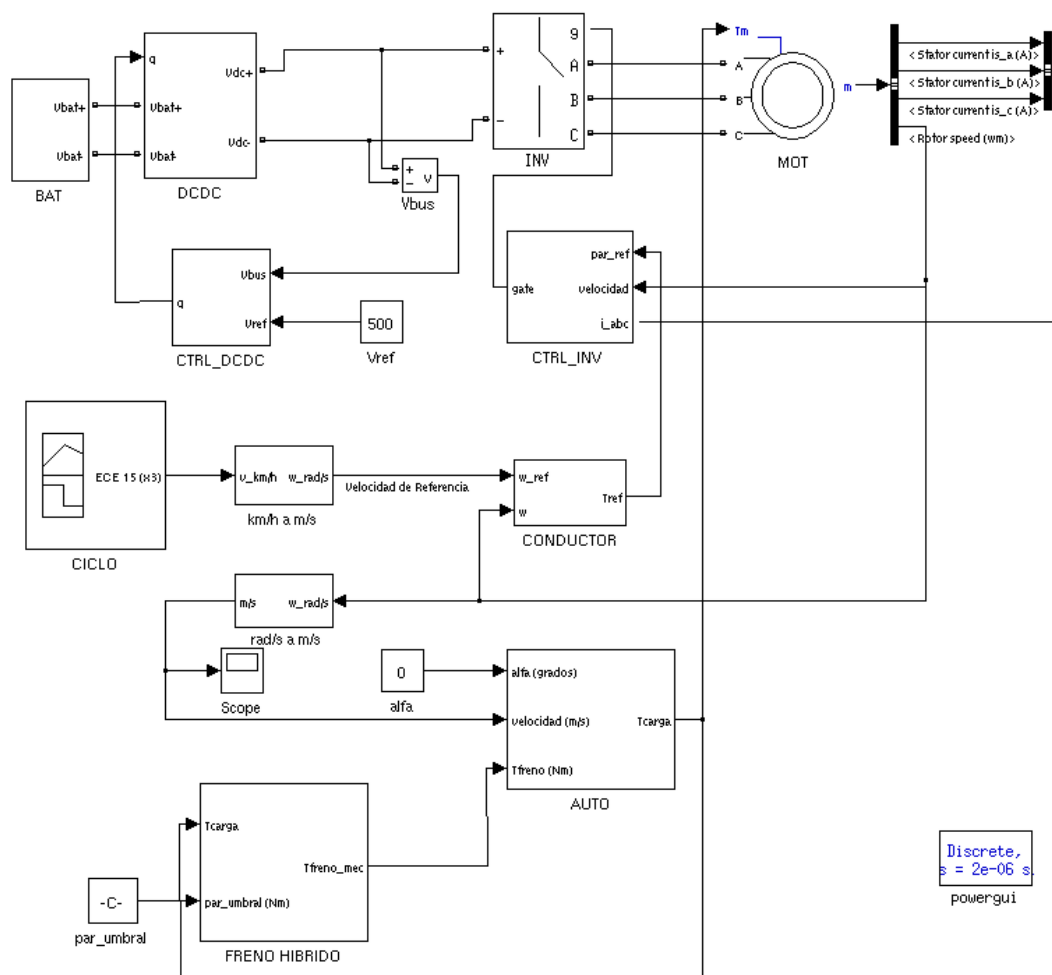


Fig. 1. Diagrama de bloques Simulink del sistema simulado

aplicación. Se utilizó un voltaje de batería de 100V. El control de realimentación regula la tensión del bus DC en 500V.

En la Fig. 3 se muestran los resultados de una simulación del convertidor operando en lazo cerrado, frente a cambios en la corriente de carga. En particular, se verifica que la tensión de bus DC se mantiene regulada durante los transitorios y ante la presencia de corrientes negativas (durante el frenado regenerativo).

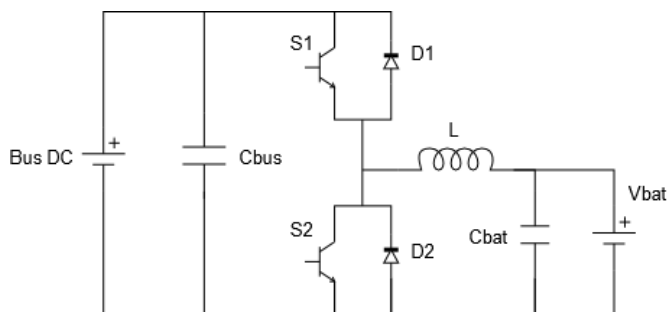


Fig. 2. Convertidor DC-DC bidireccional

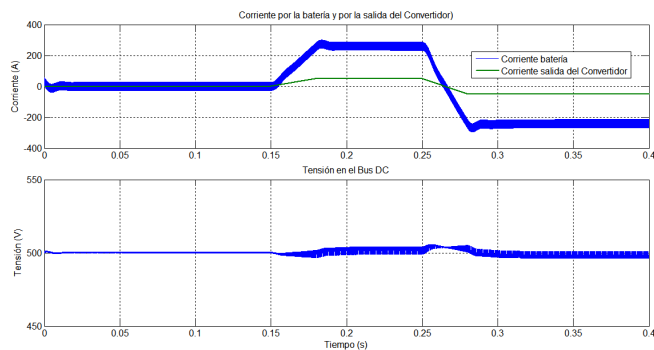


Fig. 3. Ensayo del Convertidor DC-DC bidireccional

B. Inversor

Se utiliza un modelo de inversor ideal provisto por Simulink. El control del mismo se basa íntegramente en el control vectorial descrito en [1]. La única diferencia con respecto a dicho control es que en lugar de un control de velocidad, se realiza un control de par, ya que en este modelo la velocidad se controla con un lazo externo que simula la acción del conductor del vehículo, como se describe a continuación.

C. Interacción entre el conductor y el sistema de propulsión

Se asume que el conductor del vehículo desea trasladarse siguiendo un Ciclo de Conducción predefinido. Para esto, en cada instante el conductor solicita al sistema el par mecánico necesario para alcanzar la velocidad deseada, que es lo que en definitiva ocurre cuando un conductor opera sobre el pedal de aceleración. De esta manera, el conductor del vehículo se integra al lazo de control del motor de tracción. Esta acción se modeló con un controlador PI que opera sobre la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real, para generar una señal de par mecánico deseado.

D. Motor

Se utiliza un modelo de máquina eléctrica provisto por Simulink. El modelo elegido es una máquina de inducción de jaula de ardilla, con una potencia nominal de $37kW$.

E. Freno Regenerativo

El modelo de control de frenado regenerativo puede ser adaptado a distintas estrategias. La estrategia utilizada en esta simulación tiene un par de umbral, por debajo del cual la totalidad del par requerido es provisto por la máquina actuando en régimen generador. Por encima de este umbral, la máquina provee el valor de umbral y el resto es proporcionado por el freno mecánico. El valor de este umbral está definido en función de la potencia máxima que puede manejar la máquina, los convertidores y la batería.

En la Fig. 4 se muestran los resultados de la simulación de esta estrategia. Se observa que la máquina provee el par total (positivo y negativo) en casi todo el período, excepto en $t = 23s$ cuando ocurre una frenada brusca, que requiere un par total mayor (en términos absolutos) que el umbral. En ese momento actúa el par mecánico (línea punteada) y se recorta el par solicitado a la máquina.

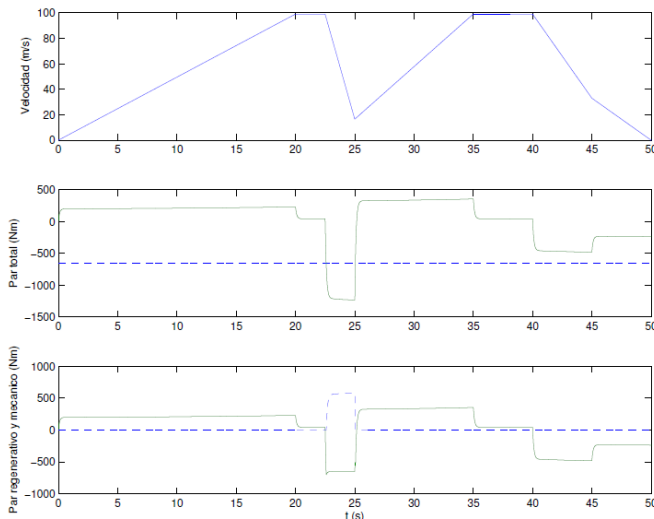


Fig. 4. Simulación del mecanismo de Freno Regenerativo

IV. RESULTADOS

El modelo presentado en la sección anterior fue simulado utilizando el Ciclo de Conducción europeo NEDC. Se comprobó que el vehículo seguía efectivamente la velocidad indicada y que el freno regenerativo actuaba de manera adecuada, entregando energía a la batería durante los intervalos de desaceleración moderada.

Para simular la acción del freno regenerativo, se modificó el comienzo del ciclo NEDC para incluir una frenada brusca.

En la Fig. 5 se muestra una parte del Ciclo de Conducción ensayado con el resultado obtenido. Se observa sobre el comienzo del ciclo la frenada brusca que genera un pico de corriente ingresando en la batería.

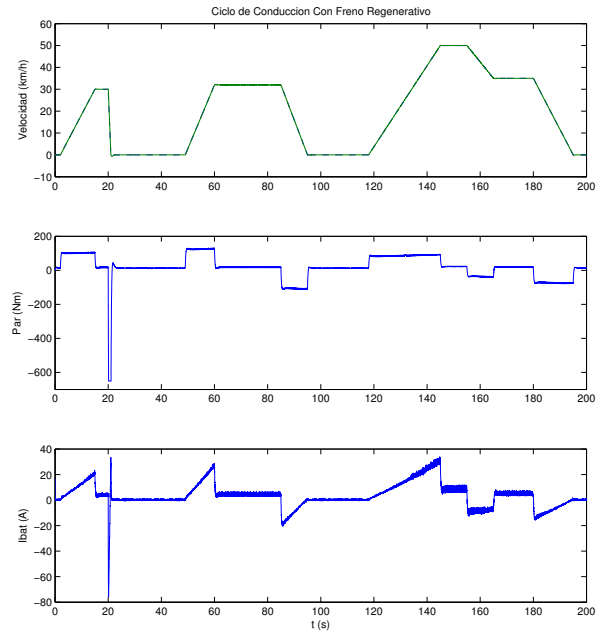


Fig. 5. Resultados de simulación con freno regenerativo.

Para comparar los resultados, se muestra en la Fig. 6 la misma simulación pero sin incluir el mecanismo de freno regenerativo. Se observa que la corriente por la batería es siempre positiva.

En la Fig. 7 se muestra la potencia entregada por la batería con y sin frenado regenerativo. El área de diferencia entre las dos curvas representa la energía recuperada gracias a esta técnica. En la Tabla I se compara la energía total consumida en la batería para ambos casos. La diferencia representa una reducción del consumo de 32% gracias al uso del frenado regenerativo.

TABLE I
COMPARACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA

Caso	Energía consumida (kJ)
sin freno regenerativo	521
con freno regenerativo	355

Además del ahorro de energía, el frenado regenerativo permite un ahorro en el desgaste del freno mecánico, aumentando

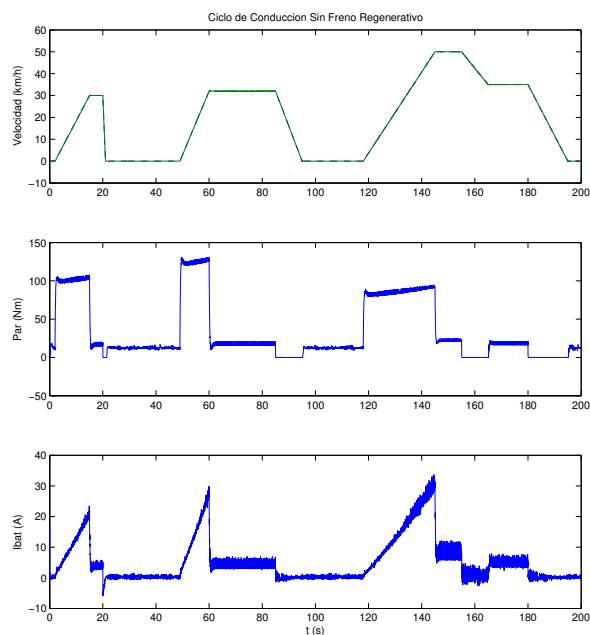


Fig. 6. Resultados de simulación sin freno regenerativo.

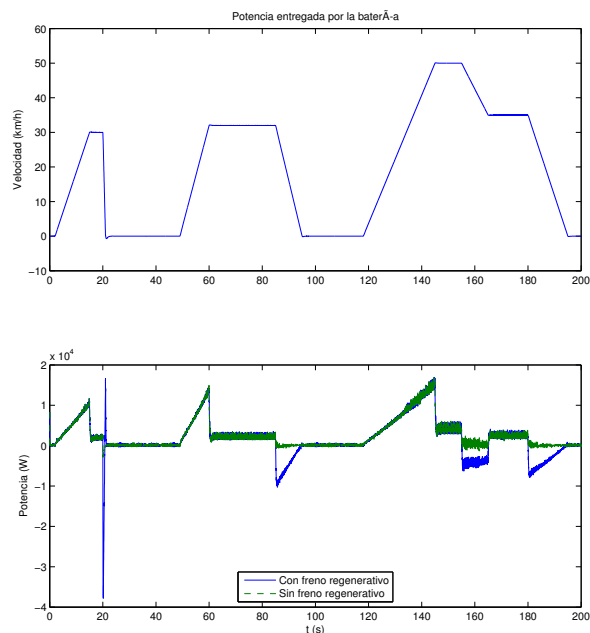


Fig. 7. Resultados de simulación: potencia entregada por la batería con y sin frenado regenerativo.

su vida útil. Este fenómeno puede ser estudiado y cuantificado si se incorpora a la simulación presentada un modelo de dicho desgaste en función de las condiciones de operación, lo cual excede el alcance del presente trabajo.

V. CONCLUSIONES

Se presentó un modelo MATLAB/Simulink para la simulación del sistema de propulsión de EVs. El modelo permite incorporar distintas estrategias de control, de freno regenerativo y ciclos de conducción. Además de verificar el correcto funcionamiento del sistema implementado, la simulación permite estudiar la eficiencia energética en términos de la energía intercambiada entre las baterías y el motor de tracción bajo diferentes regímenes de conducción.

Se presentaron resultados de simulación que muestran el impacto del freno regenerativo en el consumo de energía para un ciclo de conducción determinado. Estos resultados sientan las bases para una exploración más exhaustiva de distintas estrategias de control con la finalidad de optimizar la eficiencia energética del EV.

REFERENCES

- [1] *Autos Híbridos y Eléctricos*, Sergio Santana, Martín Mora, Gastón Hernández, Gonzalo Casaravilla, Fernando Berrutti. Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica, 2010, Montevideo, Uruguay.
- [2] *Modern Electric, hybrid electric and fuel cell vehicles-fundamentals theory and design* Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi, 2nd ed., CRC Press LLC, New York, 2009. ISBN: 0849331544.
- [3] <http://es.wikipedia.org/wiki/VehiculoElectrico>
- [4] *Role of High Power Semiconductor Devices in Hybrid Electric Vehicles*, Madhwi Kumari, P.R. Thakura and D.N. Badodkar. IEEE 978-1-4244-7882-8/11, 2011.
- [5] *A Bidirectional Power Converter for Battery of Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, Zheng Chen, Ziling Nie, Yuhong Fu, and Chris Chunting Mi, Department of Electric and Computer Engineering, University of Michigan-Dearborn, IEEE 978-1-4244-5226-2/10
- [6] *Design of a Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter for a Series Hybrid Electric Vehicle Using PSCAD/EMTDC* D.R Northcott, S. Filizandeh, A.R. Chevretils, IEEE 978-1-4244-2601-0/09
- [7] *Dynamic Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrain Systems*, B.K. Powel, K.E. Bailey, S.R. Cikanek, October 1998.
- [8] *Design and construction of a bidirectional DCDC converter for an EV application*, Magnus Hedlund, Uppsala Universitet, Febrero 2010
- [9] *Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system*, Premananda Pany, R.K. Singh, R.K. Tripathi, International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 3. No. 3, 2011, pp. 101-110.