

Modelado, control y simulación de un vehículo eléctrico

P. Amaya-Trinidad¹, J.F. Guerrero-Castellanos², G.A. Muñoz-Hernández², G. Mino-Aguilar², J. Saynes-Torres²

¹ Universidad de Cádiz, Escuela Politécnica Superior de Algeciras
Avenida de Ramón Puyol, Algeciras, España C.P. 11202

² Facultad de Ciencias de la Electrónica-BUAP. Av. San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel,
Puebla, Pue. México. C.P. 72570.
fguerrero@ece.buap.mx
Teléfono: (52)-22-23559339

Resumen—Este trabajo discute el proceso de modelado, diseño de control y simulación del sistema de tracción de un vehículo eléctrico (VE). El resultado obtenido es un simulador numérico compuesto de los modelos detallados de los principales componentes: sistema de transmisión, motor de inducción, electrónica de potencia, batería, sistema de control y dinámica del vehículo. El simulador fue realizado en MATLAB[®]/Simulink[®] y permitirá estimar el consumo de energía de un VE bajo configuraciones determinadas. El trabajo también discute la implementación de un control crucero basado en eventos (control asíncrono). Resultados de simulación muestran la efectividad del modelo y el control. Estas simulaciones se llevaron a cabo, usando los perfiles de velocidad dados por el ciclo de manejo Europa (NEDC). El simulador es actualmente usado en los cursos de sistemas dinámicos y control de la FCE-BUAP permitiendo fomentar en los estudiantes el uso de las herramientas matemáticas y computacionales y encaminarlos al área de control y diseño de sistemas mecatrónicos “verdes”.

Palabras clave: Vehículo Eléctrico (VE), Sistema de Tracción, DTC, Control basado en eventos.

I. INTRODUCCIÓN

De los vehículos que hoy en día circulan por todo el mundo, la mayoría consumen combustibles fósiles. Estos utilizan motores de combustión interna (ICE), con un rendimiento de la transformación de la energía del depósito de combustible en la energía mecánica menor del 30 %, lo que supone una gran pérdida. Además producen emisiones de CO₂ y NO_x a la atmósfera, lo que conlleva una gran contaminación localizada en las grandes urbes. En años recientes, los vehículos eléctricos (VE) y los vehículos eléctricos híbridos (VEH) han mostrado ser una alternativa como sistema de transporte limpio, eficiente y amigable con el medio ambiente (Emadi, 2005). En un vehículo eléctrico su movimiento es proporcionado por un motor eléctrico que tiene como fuente primaria de energía, baterías. Excluyendo la generación de electricidad, los VE no generan emisiones de CO₂ y NO_x permitiendo amortiguar y formar parte de la solución al problema del calentamiento global. Además,

destacan por su alto rendimiento en la transformación de la energía eléctrica de la batería en la energía mecánica con la que se moverá el vehículo (60-85 %) (Chan *et al.*, 2010).

Sin embargo, los VE presentan dos principales problemas que deben ser abordados y resueltos, estos son, escasa autonomía y largos tiempo de recarga. Estos problemas están íntimamente relacionados con el banco de baterías del vehículo. Las baterías deben disponer de suficiente energía para que el vehículo realice un cierto trayecto y pueda acelerar y desacelerar en caso de que sea necesario (Lukic y Emadi, 2002). Con el fin de estimar el consumo de energía de un vehículo eléctrico es muy importante disponer de un modelo matemático adecuado (Gao *et al.*, n.d.; Mapelli *et al.*, 2010; Durán *et al.*, 2010), que permita simular numéricamente el comportamiento bajo diferentes condiciones y escenarios. El diseño o implementación de cada componente, *e.g.* sistema de transmisión, motor eléctrico, electrónica de potencia y la batería, es una tarea delicada ya que los parámetros de un componente pueden afectar el nivel de potencia de otro, haciendo que el vehículo sea innecesariamente caro o ineficiente.

El presente trabajo recorre el proceso de modelado, control y simulación de un VE. El motor utilizado para el sistema de tracción es un motor eléctrico de inducción (MI) de 1.1 kW. Entonces, las dimensiones y características de cada elemento del VE (baterías, convertidores de voltaje, sistema de tracción y control) se selecciono en función de las características del MI conjuntamente con las siguientes especificaciones mínimas: velocidad máxima sin pendiente de 30 Km/h (velocidad máxima permitida dentro del area de CU-BUAP) y con una masa total (incluyendo al conductor) de 200 Kg. Una atención especial fue puesta en el desarrollo del control de velocidad del MI, que a su vez permite implementar un control de velocidad crucero para el VE. Este control se realiza mediante el bien conocido Control directo de Torque (DTC) y un control PI basado en eventos (Durand *et al.*, 2011; Marchand *et al.*, 2011). La ventaja principal del PI basado en eventos, con respecto a su par

basado en tiempo, radica en que solo cuando es necesario (el error sobrepasa un cierto umbral), la señal de control es calculada y actualizada, evitando cálculos y actualizaciones innecesarias de la señal de control y contribuyendo al ahorro de energía dentro del VE. Finalmente y con el fin de analizar el consumo de energía, se realizaron simulaciones numéricas del sistema completo, usando los perfiles de velocidad dados por el ciclo de manejo Europa (New European Driving Cycle (NEDC)) pero escalados a una velocidad máxima de 30 Km/h (Tzirakis *et al.*, 2006). Si bien el presente trabajo no representa una fuerte aportación al estado de la técnica de los vehículos eléctricos, el simulador resultante es actualmente usado en los cursos de sistemas dinámicos y control de la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE-BUAP), con el objetivo de fomentar en los estudiantes el uso de las herramientas matemáticas y computacionales y despertar el interés por el área de control automático y diseño de sistemas mecatrónicos “verdes”. Además, el proceso descrito en este trabajo, está siendo usado en el diseño de un VE en dicha facultad.

El contenido del trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección II una breve descripción de la dinámica del vehículo, visto como cuerpo rígido, es presentada. La sección III es dedicada al sistema de tracción donde se explica de manera somera cada uno de sus componentes; Baterías, convertidores DC-DC y DC-AC, motor de inducción y transmisión. Se añade en la sección IV el diseño de un control de cruce. En la sección V se analiza el comportamiento dinámico y el consumo de energía mediante la simulación de un ciclo de manejo. Finalmente algunas conclusiones y perspectivas son presentadas en la sección VI.

II. MODELO DINÁMICO DEL VEHÍCULO

Con el fin de desarrollar el modelo matemático que represente la dinámica del vehículo, se realiza un balance de fuerzas. Sea $v_v(t)$ la velocidad del VE, m_v su masa total, $F_t(t)$ la fuerza de tracción generada por el contacto de las llantas con el camino y $F_p(t)$ la fuerza de perturbación debida al arrastre aerodinámico, la fricción de rodamiento y a la gravedad. Estas fuerzas se muestran en la figura 1.

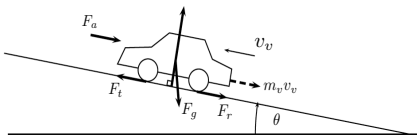


Figura 1. Diagrama de fuerzas actuando sobre el vehículo

Aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene la ecuación diferencial que relaciona la fuerza de tracción $F_t(t)$ con la velocidad v_v del vehículo:

$$m_v \dot{v}_v(t) = F_t(t) - F_p(t) \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} F_p(t) &= F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \\ F_a(t) &= \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d (v_v(t) + v_{viento}(t))^2 \\ F_r(t) &= \text{sgn}(v_v(t)) m_v g \cos(\theta(t)) C_r \\ F_g(t) &= m_v g \sin(\theta(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

C_d es el coeficiente aerodinámico de arrastre, C_r es el coeficiente de fricción de rodamiento, A_f representa el área frontal del vehículo, ρ_a la densidad del aire a $20^\circ C$ y θ el ángulo de la pendiente.

La fuerza F_t es generada por el motor eléctrico, cuyo par generado esta en función de la corriente que fluye a través de sus devanados y su velocidad de rotación. De (1), es claro que el motor eléctrico del vehículo, conjuntamente con el sistema de transmisión debe ser capaz de vencer las fuerzas debidas a la gravedad, el viento, la fricción y los efectos inerciales.

III. SISTEMA DE TRACCIÓN

La figura 2 muestra cada uno de los componentes y subsistemas que conforman el VE y de los cuales el modelo matemático fue obtenido con el objetivo de implementar el simulador computacional. En los siguientes apartados se da una descripción de los elementos y se presenta el modelo matemático de cada uno de ellos.

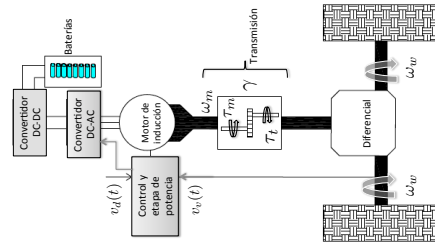


Figura 2. Subsistemas que componen el vehículo eléctrico

III-A. Baterías

En (Amarilla Álvarez, 2011) se realiza un estudio de las diferentes baterías utilizadas en vehículos eléctricos, siendo las de ión-Li las de mejores características, al tener menor tamaño y peso en comparación con las de Pb ácido o Ni-MH. Además no tienen efecto memoria, poseen amplia ciclabilidad y contaminan menos.

En el presente trabajo, el banco de baterías se compone de 4 baterías ión-Li de 3.2 voltios, en serie, lo que hace un total de 12.8 voltios, con una capacidad de 60 Ah. El conjunto seleccionado tiene unas dimensiones de 114x244x203 (mm) y pesa 8.16 kg. Ambos factores son de suma importancia debido a que la masa del vehículo no debe exceder los 200kg, incluido el conductor. En (<http://www.hipowergroup.com/products/LiFePO4>, n.d.) se pueden consultar con detalle las características de las baterías escogidas.

El modelo matemático que caracteriza la curva de descarga es dado por (Lukic *et al.*, 2008), siendo E el potencial total, V la tensión de la batería, ambos en función de la corriente, temperatura y tiempo, SOD el estado de descarga de la batería y SOC estado de carga de la batería.

$$E[i(t), T(t), t] = V[i(t), T(t), t] - R_{int}i(t)$$

$$V[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k \cdot SOD^k[i(t), T(t), t] + \Delta E(T)$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha[i(t)] \cdot \beta[T(t)] \cdot i(t) dt$$

$$100\% = SOD[i(t), T(t), t] + SOC[i(t), T(t), t]$$

La tensión V de la batería depende del nivel de descarga y del potencial existente. A su vez depende del coeficiente c_k , el coeficiente del término k , orden de la representación polinómica de la curva de referencia. La descarga de la batería SOD se realiza dependiendo de Q_r , la capacidad de la batería, la corriente que circula por ella y una serie de factores, $\alpha(i)$, factor que nos muestra la dependencia de la curva con respecto a la corriente y $\beta(T)$, factor de temperatura. En la simulación se representa el nivel de carga SOC de la batería en función del tiempo.

III-B. Convertidor DC-DC

En este trabajo se emplea un convertidor Boost con diodo, se consideró un inductor de 100 mH, una frecuencia de conmutación de 1.5 KHz, una capacitancia de 10 μF . Con estos parámetros un voltaje de entrada de 12.8 V (proveniente de las baterías) puede ser elevado para obtener una salida de 500 V, necesarios para el MI.

III-C. Convertidor CD-CA (Inversor)

Puesto que el motor de inducción necesita tres tensiones alternas para su funcionamiento, se dispone de un conversor DC-AC del que se obtienen las tensiones necesarias para la alimentación del motor. El inversor trifásico cuenta con 3 ramas conectadas en paralelo al bus de corriente continua, cada una de las ramas está provista de 2 transistores conectados en serie y el punto medio se considera el nodo de salida para cada una de las fases. Conectado en antiparalelo a los transistores se encuentra un diodo que proporciona una trayectoria para la corriente inversa que va de la carga al bus de CD provisto de una batería y también facilita la continuidad de corriente en una carga inductiva.

III-D. Motor de Inducción

En (Fraile-Mora, 2003) se hace un estudio detallado de este tipo de motores, muy utilizados en el vehículos eléctricos, como el REVA o el TESLA (<http://www.elcocheelectrico.com/>, n.d.), debido a que su construcción es simple y robusta, son más económicos y necesitan poco mantenimiento.

El MI está caracterizado por las siguientes ecuaciones, que definen las tensiones en el estator V_s y en el rotor V_r :

$$V_s = \frac{d\lambda_s}{dt} + R_s C$$

$$V_r = \frac{d\lambda_r}{dt} + R_r i_r - j w_r \lambda_r$$

donde R_s , R_r , i_s y i_r son las resistencias e intensidades del estator y el rotor, w_r la velocidad angular del rotor y λ el enlace de flujo, que viene determinado por:

$$\lambda_s = (L_s + L_m) i_s + L_m i_r$$

$$\lambda_r = (L_r + L_m) i_r + L_m i_s$$

L_s , L_r y L_m son las inductancias del estator, rotor y mutua. El modelo del que se dispone posee las características de la tabla 1. Para controlar con precisión, tanto de la

Parámetros motor	Valor
Velocidad nominal, ω_{rated}	1415 rpm
Coefficiente aerodinámico C_d	0.2
Potencia nominal, P_{rated}	1.1 kW
Par nominal, τ_m	7.4 Nm
Tensión Nominal, V_{rated}	230/400 V
Corriente nominal, I_{rated}	4.43A
Frecuencia nominal, f_{rated}	50 Hz
Factor de potencia, $\cos(\varphi)$	0.81
Corriente en vacío, I_0	2.13A
Momento de Inercia, J_M	0.0024 kg.m ²
Resistencia del devanado del estator, r_s	9.21 Ω
Resistencia del devanado del rotor, r_r	6.644 Ω
Inductancia de pérdidas del estator, l_{ls}	32.07 mH
Inductancia de pérdidas del rotor, l_{lr}	444.15mH
Inductancia magnetizante de las tres fases, l_m	444.15mH
Peso, M	13kg

TABLA I
PARÁMETROS DEL MI

velocidad como el torque del motor, se implemento un "Control Directo de Torque" también conocido como DTC conjuntamente con un PI basado en eventos, esta estrategia sera descrita en la siguiente sección.

El torque del MI viene determinado por:

$$\tau_m = \frac{p_m(t)}{(2n/60\pi)}$$

Siendo p_m la potencia útil del motor y n el número de polos. El comportamiento del MI, cuando pone en movimiento una carga mecánica, depende de la velocidad de rotación del motor w_m , de las inercias referidas al eje del motor J_t y del par resistente ofrecido por la carga τ_r , el cual viene definido según las fuerzas de perturbación, explicado en el apartado de la dinámica del vehículo.

$$\tau_m - \tau_r = J_t \frac{dw_m}{dt}$$

Mientras que $\tau_m < \tau_r$, acelerará hasta igualar los pares. En este estado de equilibrio, el vehículo se encontrará a velocidad de régimen.

III-E. Transmisión

A partir de la figura 2 el torque, la velocidad angular y la potencia del sistema de transmisión está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \tau_t(t) &= F_t(t)r_w, \quad \tau_w(t) = \frac{\tau_t(t)}{2} \\ \omega_w(t) &= \frac{v_v(t)}{r_w}, \quad p_t(t) = F_t(t)v_v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde τ_t y τ_w son el torque total de tracción y el torque en cada rueda, respectivamente, cuyo radio es r_w . ω_w es la velocidad angular y p_t la potencia de tracción. Además, se asume que la eficiencia de transmisión desde el eje del motor eléctrico a las dos ruedas del vehículo está dada por $\eta_{TS} = 0,95$ (Ehsani *et al.*, 2005) siendo γ el factor de reducción de velocidad. Entonces, el torque, la velocidad angular y la potencia del motor eléctrico, están dadas por:

$$\begin{aligned} \tau_m(t) &= \frac{\tau_t}{\eta_{TS}\gamma} \text{ si } p_t \geq 0 \text{ y } \tau_m(t) = \eta_{TS} \frac{\tau_t}{\gamma} \text{ si } p_t < 0 \\ \omega_m &= \gamma\omega_w \\ p_m(t) &= \tau_m\omega_m \end{aligned} \quad (4)$$

Observación 1: Con lo anterior, es claro que el momento de inercia total visto en el marco de referencia del motor está dado por $J_t = J_M + \frac{J_v}{\gamma^2}$, siendo $J_v = Mr_w^2 + J_w$ el momento de inercia del vehículo, con J_w el momento de inercia de las ruedas.

Observación 2: El torque nominal del motor es de 7.4 Nm, el cuál no es suficiente para el arranque del vehículo, por lo que se elige $\gamma = 6$, suficiente para que el VE obtenga una máxima velocidad 30 Km/h en llano y una máxima velocidad de 15 Km/h con 5° de pendiente.

IV. CONTROL DE CRUCERO MEDIANTE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL ASÍNCRONO

El sistema de control crucero es un sistema de retroalimentación encontrado comúnmente en varios de los automóviles que hoy en día circulan nuestras calles. Este sistema de control tiene el objetivo de mantener una velocidad constante deseada, aún en la presencia de perturbaciones, causadas principalmente por cambios en la pendiente del camino.

IV-A. Enunciado del problema

Considere la ecuación que rige la dinámica del VE, dada por (1) conjuntamente con las ecuaciones dadas para el sistema de transmisión (3) y (4). Entonces la dinámica del vehículo viene dada por:

$$m_v \dot{v}_v(t) = \frac{\eta_{TS}\gamma}{r_w} \tau_m(t) - F_p(t) \quad (5)$$

Se identifica que en la ecuación anterior la velocidad del auto v_v es el estado, $\tau_m(t)$ el control y $F_p(t)$ una perturbación. El objetivo consiste en desarrollar una estrategia de control que permita mantener la velocidad del VE a una velocidad constante deseada, aún en presencia de perturbaciones., *i.e.*

encontrar un control $\tau_m(t)$ tal que $v_v(t) \rightarrow v_d(t)$ cuando $t \rightarrow \infty$. Además, el cálculo de la señal de control solo debe llevarse a cabo cuando cuando la señal de error sobrepase un umbral q_{nom} .

IV-B. Diseño del control

Puesto que el torque del motor $\tau_m(t)$, está en función de las corrientes que circulan a través del devanado, el lazo de control no solo se cerrará mediante la medida de la velocidad del vehículo (o del motor) sino que también dependerá de un lazo de corriente. De está forma el algoritmo de control se implementará bajo una configuración “lazo interno-lazo externo” (inner-outer loop), tal como se muestra en la figura 3.

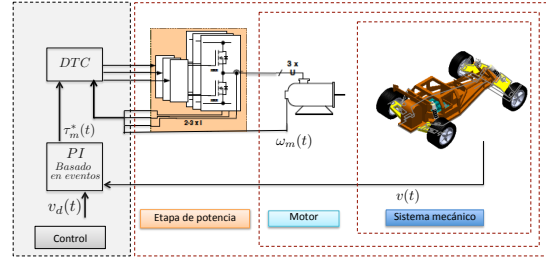


Figura 3. Diagrama a bloque del sistema de control

El lazo de control interno se lleva a cabo mediante el bien conocido “Control directo de torque”, también llamado DTC. El lector puede referirse a (Ponce y Sampé, 2008; Saynes-Torres, 2011) para una explicación detallada del funcionamiento del DTC. Note que el DTC tiene el objetivo de asegurar que el MI entregue un torque $\tau_m(t)$ adecuado, de tal forma que conjuntamente con el tren de transmisión, genere la fuerza de tracción $F_t(t)$ que venza las fuerzas debidas a la gravedad, el viento, la fricción de rodamiento y los efectos inerciales y entonces mantener la velocidad deseada v_d .

El lazo de control externo es el encargado de determinar el perfil del torque deseado $\tau_m^*(t)$ que es usado como consigna dentro del DTC, y que a su vez permitirá mantener una velocidad deseada constante v_d . Este controlador está basado en un estructura PI, pero a diferencia del PI clásico, basado en el tiempo de muestreo, el PI propuesto estará basado en eventos (Durand *et al.*, 2011). El evento tendrá lugar solo cuando el valor absoluto del error sobrepase un umbral determinado a priori *i.e.* $|e(t_a)| > q_{nom}$.

En el contexto de control basado en eventos, se definen las siguientes funciones:

- una *función de evento* $\xi : \chi \rightarrow \mathbb{R}$ que indica si se necesita (cuando $\xi \leq 0$) o no (cuando $\xi > 0$) recalcular y actualizar la señal de control.
- una *función de control* u . Se dice un control *estático* basado en eventos cuando $u : \chi \rightarrow \mathcal{U}$. El tiempo ($u : \chi \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathcal{U}$) o el índice de muestreo ($u : \chi \times \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{U}$) se puede adicionar para construir un control *dinámico* basado en eventos

Para el problema tratado en el presente trabajo la función de control es el bien conocido control PI:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p e(t) + K_i z(t) \\ \dot{z}(t) &= e(t) \end{aligned} \quad (6)$$

donde $e(t)$ es el error existente entre la señal de referencia y la salida de la planta y $K_p, K_i > 0$ son parámetros de sintonización. Note que el control PI es un control dinámico. La función de evento es definida como

$$\xi := q_{nom} - |e(t)| \quad (7)$$

Observación 3: La salida del control será el perfil de torque deseado que es usado como consigna dentro del DTC, i.e $\tau_m^*(t) = u(t)$. Además $e(t) = v_d(t) - v(t)$.

Dado el control (6) y la función de evento (7) y una condición inicial del sistema en lazo cerrado $v(t=0) = v_0$ es posible definir el conjunto de muestreo $T_{\xi, u, v_0} := \{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ como el conjunto de instantes de tiempo $t_0 = 0, t_1, \dots$ (llamado en nuestro contexto, *instantes de muestreo*) para los cuales ξ es negativa. La duración entre dos sucesivos instantes de muestro es llamado *duración entre muestras* y a diferencia del control basado en tiempo, donde la duración entre muestras es constante, en el control basado en eventos la duración puede ser variable.

La discretización del controlador (6)-(7), utilizando una aproximación en diferencias hacia atrás es:

$$u(t_k) = u_p(t_k) + u_i(t_k) \quad (8)$$

con

$$\begin{aligned} u_p(t_k) &= K_p e(t_k) \\ u_i(t_k) &= u_i(t_{k-1}) + K_i T_{e_k} e(t_k) \end{aligned} \quad (9)$$

siendo $T_{e_k} = t_k - t_{k-1}$ el intervalo de tiempo en el que dos acciones de control son ejecutadas (intervalo de tiempo entre dos eventos), el cual es variable. En consecuencia, cada vez que la acción de control es requerida, el actual T_{e_k} es determinado y usado. No obstante, es necesario ser cuidadosos con el producto $T_{e_k} e(t_k)$ presente en el control (9). Este producto puede tomar valores muy grandes en la ausencia de evento o cuando la señal de referencia varía de forma abrupta (e.g una señal escalón), lo que causará importantes sobrepasos. Para compensar esto, el siguiente criterio heurístico es tomado en la actualización de T_{e_k} :

$$T_{e_k} = (T_{e_k} - T_s) e^{-\alpha |e(t_k)|} + T_s \quad (10)$$

Donde T_s es el periodo en el cual son adquiridas las medidas de los sensores y evaluada la función evento (7) y el cual es constante. De esta manera, si el error decrementa, el tiempo entre dos actualizaciones de control incrementa y viceversa, manteniendo el producto $T_{e_k} e(t_k)$ acotado por arriba y por abajo, i.e $T_s e(t_k) \leq T_{e_k} e(t_k) \leq T_{e_k} q_{nom}$.

Observación 4: Puesto que el periodo mínimo de muestreo está dado por T_s la ecuación dada en (10) nunca será negativa.

Observación 5: En el caso de $e^{-\alpha |e(t_k)|} \simeq 0$ (la magnitud del error es grande) $T_{e_k} = T_s$ y nos vemos en el caso clásico de control basado en tiempo.

V. SIMULACIÓN DE UN CICLO DE MANEJO

Un ciclo de manejo es un perfil de velocidades trazado en un plano velocidad-tiempo, que representa una forma típica de conducir en una ciudad o autopista, tomando en cuenta la tecnología del vehículo, las características del tráfico, de las carreteras, características climáticas y geográficas y también características de los mismo conductores. Estos ciclos de manejo tienen una gran importancia, entre otros fines, en el desarrollo de tecnología para nuevos automóviles y en el caso de los vehículos eléctricos en la validación de los modelos que predicen el comportamiento de los VE y su consumo de energía en la vía pública.

Con el fin de verificar el funcionamiento correcto del simulador desarrollado en este trabajo, el cual fue realizado en MATLAB[®]/Simulink[®], se presenta a continuación una simulación. Los parámetros utilizados en la simulación se muestran en las Tablas I y II.

Parámetro	Valor
Masa de vehículo, m_v	200 Kg
Coefficiente aerodinámico C_d	0.2
Área Frontal, A_f	1.5 m ²
Coefficiente de fricción, C_r	0.015
Eficiencia de transmisión, η_{TS}	0.97
Radio de neumáticos, r_w	0.2 m
Cociente de la transmisión, γ	6

TABLA II

PARÁMETROS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y SISTEMA DE TRACCIÓN

El perfil de velocidad deseada se obtuvo a partir del ciclo de manejo Europa pero escalado a una velocidad máxima de 30 Km/h (Tzirakis *et al.*, 2006). La gráfica superior de la figura 4 muestra el perfil de velocidad deseada (ciclo Europa) y la velocidad obtenida por el vehículo, la cual sigue de manera fiel a la referencia. El ciclo cuenta con 4 repeticiones y cada una de las cuales posee 4 paradas, 3 aceleraciones, 4 periodos de velocidad constante y 4 desaceleraciones. Para finalizar posee una prueba de circulación a una velocidad de referencia de 15 km/h con una pendiente de 5 grados. La gráfica inferior de la figura 4 muestra la función de evento, que indica si se recalculó y actualizó la señal de control (cuando $\xi = 0$) o no (cuando $\xi > 0$).

De esta manera, el sistema de tracción, conjuntamente con los algoritmos de control han sido probados. Los valores más representativos del ciclo son:

- Velocidad media = 10 km/h
- Tiempo total = 14 minutos
- Distancia recorrida = 2 km 700 metros
- Velocidad máxima alcanzada = 30 km/h

La simulación arroja resultados sobre la descarga de la batería. Durante los 1000 segundos que dura la simulación, esto es, 16 minutos y 40 segundos, la batería se descargó un 45 por ciento, habiendo recorrido 2 km 706 metros. Cabe mencionar, que si la velocidad del VE es constante (el VE no es sometido a aceleraciones y desaceleraciones), la descarga de la batería sería menor teniendo de esta forma una mayor autonomía.

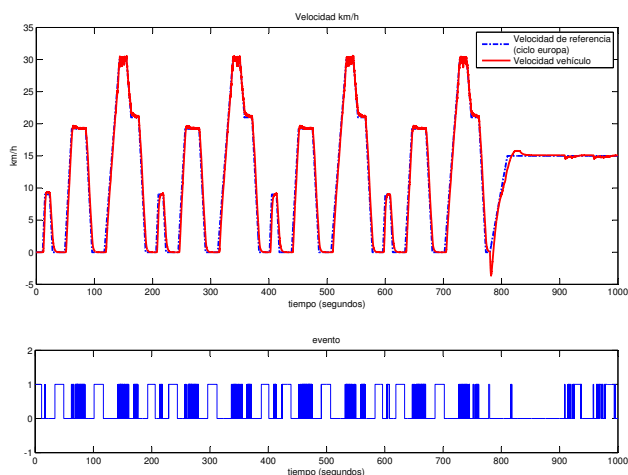


Figura 4. a) Velocidad deseada Vs Velocidad del vehículo (km/h), b) función de evento

Finalmente, la figura 5 muestra el par o torque desarrollado por el MI conjuntamente con el sistema de transmisión, *i.e.* $\tau_t(t)$, dado en Nm. Se puede observar como el par es máximo en los momentos de aceleración. Además, el par es negativo en las fases de desaceleración, indicando que la máquina eléctrica recibe potencia y puede funcionar como generador.

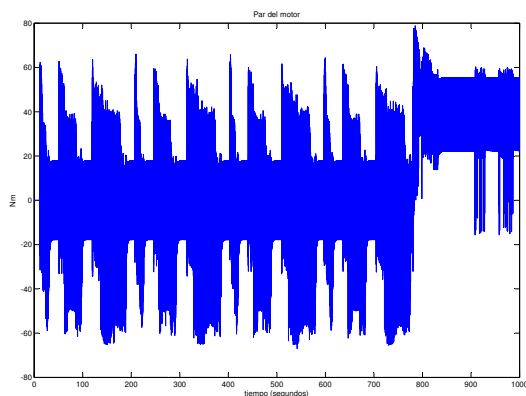


Figura 5. Par desarrollado por el MI conjuntamente con el sistema de transmisión

VI. CONCLUSIONES

Se discutió el proceso de modelado, diseño de control y simulación del sistema de tracción de un vehículo eléctrico (VE). El resultado obtenido es un simulador numérico

compuesto de los modelos detallados de los principales componentes, el cual fue realizado en Matlab/simulink. Se hizo énfasis en el diseño e implementación de un control crucero basado por eventos (control asíncrono). Finalmente, se mostraron resultados de simulación que dan cuenta del proceso de modelado y control. Para la simulación se utilizaron perfiles de velocidades deseadas dadas por el ciclo de manejo Europa (NEDC). En un futuro se verificará de manera experimental, lo presentado, utilizando el prototipo que actualmente se está desarrollando en la Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP).

VII. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al gobierno español y a la vicerrectoría de relaciones internacionales de la BUAP por permitir la estancia en la Facultad de Ciencias de la Electrónica FCE-BUAP y realizar el proyecto de fin de estudios. También se agradece al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el financiamiento del proyecto “Diseño y construcción de un Auto Eléctrico”.

REFERENCIAS

- Amarilla Álvarez, J.M (2011). Baterías recargables de litio para vehículos eléctricos. En: *Ciclo de conferencias del Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM)*.
- Chan, C. C., A. Bouscayrol y K. Chen (2010). Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* pp. 589–598.
- Durand, S., J. Minet, J.F. Guerrero-Castellanos y N. Marchand (2011). Asyncar, a radio-controlled vehicle for asynchronous experiments implementation of an event-based cruise control. En: *7th IEEE Int. Conf. on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*.
- Durán, M., J. Aguilera, G. Guerrero-Ramírez, A. Claudio, L.G. Vela y J Gudiño-Lau (2010). Modelado del sistema de tracción para un vehículo eléctrico. En: *Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático*.
- Ehsani, M., Y. Gao, S.E. Gay y A. Emadi (2005). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles-Fundamentals, Theory, and Design*. first ed. CRS Press LLC.
- Emadi, A. (2005). *Handbook of Automotive Power and Electronics and Motor Drives*. first ed. Taylor and Francis.
- Fraile-Mora, J. (2003). *Máquinas Eléctricas*. quinta ed. Graw Hill.
- Gao, D. W., C. Mi y A. Emadi (n.d.). Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. <http://www.elcohecoelectrico.com/> (n.d.). Consultado el 10 de Abril 2012.
- <http://www.hipowergroup.com/products/LiFePO4> (n.d.). Consultado el 10 de Abril 2012.
- Lukic, S. y A. Emadi (2002). Performance analysis of automotive power systems: effects of power electronic intensive loads and electrically-assisted propulsion systems. En: *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*. pp. 1835–1839.
- Lukic, S.M., Jian Cao, R.C. Bansal, F. Rodriguez y A. Emadi (2008). Energy storage systems for automotive applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **55**(6), 2258–2267.
- Mapelli, F. L., D. Tarsitano y M. Mauri (2010). Plug-in hybrid electric vehicle: Modeling, prototype realization, and inverter losses reduction analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **57**(2), 598–607.
- Marchand, N., S. Durand y J.F. Guerrero-Castellanos (2011). A general formula for the stabilization of event-based controlled systems. En: *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*.
- Ponce, P. y J. Sampé (2008). *Máquinas eléctricas y técnicas modernas de control*. primera ed. Alfaomega.
- Saynes-Torres, Jair (2011). Técnicas de diseño de observadores de velocidad para el control de un motor de inducción. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP.