

Modelado y Simulado de un Vehículo eléctrico a escala 1:8 (Aguara'i)

Ingeniería Electromecánica con Orientación Electrónica

Ariel David Bogado Arce - 45.302 y Juan José Gini Becker - 42.963

Resumen— Este artículo fue realizado con el fin de formar las bases de conocimiento respecto a la propulsión de los vehículos eléctricos, para ello, se estudió el movimiento de un vehículo eléctrico a escala y se quitó un modelo matemático capaz de representar su funcionamiento. La investigación comprende estudios sobre motores eléctricos, específicamente motores BLDC, conceptos, características constructivas, el principio de funcionamiento y control de estos. También trata de técnicas de modelado e identificación de sistemas. Además, contiene el análisis del funcionamiento del modelo en la plataforma MATLAB y un diseño de control simulado en la plataforma Simulink, así como la implementación de este en el vehículo eléctrico a escala utilizando a un sistema embebido seleccionado, myRIO de National Instruments. Para el cumplimiento de los objetivos planteados se procedió a la identificación de sistemas utilizando herramientas incorporadas de la plataforma MATLAB con datos previamente obtenidos, para luego ser simulados en Simulink para el posterior diseño de control.

Palabras clave— Identificación de sistemas, modelo matemático, vehículo eléctrico.

I. NOMENCLATURA

Aguara'i: Nombre del vehículo eléctrico a escala 1:8

A2G: Nombre del equipo conformado por estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica y un profesor tutor para la competencia RoboCar Race 2018

BLDC: (Brushless DC Motor) Motor CC sin escobillas.

ESC: (Electronic Speed Controller) Controlador electrónico de velocidad.

FET: (Field Effect Transistor) Transistor de efecto campo.

PWM: (Pulse Width Modulation) Modulación por ancho de pulso.

RC: (Remote Controlled) a control remoto.

II. INTRODUCCIÓN

LOS vehículos eléctricos se están convirtiendo en alternativas prometedoras para remediar la contaminación del aire urbano, ya que utilizan la electricidad generada centralmente como fuente de energía. Hoy en día, la industria y la academia se esfuerzan por superar las barreras desafiantes que bloquean el uso generalizado de vehículos eléctricos. El modelado y la optimización de otros componentes de los vehículos eléctricos son muy importantes, ya que tienen fuertes impactos en la eficiencia, la capacidad de conducción y la seguridad de los vehículos. En este sentido, existe una creciente demanda de conocimiento para modelar y optimizar los vehículos eléctricos. [1] Considerando la importancia que

tienen en la actualidad los vehículos eléctricos, en este proyecto se ha abordado el estudio del modelo de un vehículo eléctrico a escala 1:8, de manera a ser utilizado en el diseño de un control de velocidad. Se tuvo como objetivo el modelado, diseño del sistema de control, la simulación y la implementación del control en el vehículo seleccionado. En este trabajo se simuló el vehículo eléctrico a escala denominado Aguara'i, esta simulación fue realizada usando las herramientas MATLAB y Simulink como plataforma para facilitar el diseño del control y configuración de hardware. Para la implementación y la validación del resultado, fue implementado al vehículo con la ayuda del software LabVIEW.

III. MOTOR BLDC

Un motor BLDC es un motor síncrono de imán permanente que utiliza la detección de posición del rotor y un inversor para controlar las corrientes de armadura. El motor trifásico BLDC se opera en modo de dos fases, es decir, las dos fases que producen el par más alto se activan mientras la tercera fase está apagada. [2]

Cada secuencia de conmutación del motor presenta una bobina energizada con tensión positiva, otra bobina con tensión negativa y otra en estado abierto. El torque del motor se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y el de los imanes permanentes que forman el rotor. [3]

La clave para controlar el funcionamiento de un motor BLDC reside en controlar en todo momento la posición en la que se encuentra el rotor. [3] Es de esto de lo que se encarga el ESC.

El propósito del ESC es variar la velocidad del motor junto con el sentido de giro. Independiente del tipo de motor eléctrico al que esté conectado el variador, el ESC interpreta información de control. El ESC varía la relación de cambio de una red de transistores FET. Este grupo de transistores hace posible un control más suave y preciso de la velocidad de giro de los motores. En el caso de los vehículos RC a escala, los ESC en general son controlados por PWM para controlar los motores eléctricos. El control remoto manda una señal PWM al ESC con variaciones del orden de los milisegundos, y estos a su vez crean una corriente alterna trifásica que es suministrada al motor, a partir de la corriente continua proveniente de la batería. [4]

El vehículo eléctrico utilizado en el proyecto consiste en un buggy a escala 1:8 de la marca HoBao, modelo HyperVSe. La tracción del vehículo está dada por un motor BLDC que impulsa

las 4 ruedas, controlado por un ESC. Se pueden apreciar las especificaciones del motor y el ESC en las tablas I y II.

TABLA I: ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

Especificaciones del Motor	
Potencia Máxima	2800 W
Tensión Máxima	< 21 V
Corriente Máxima	135 A
Corriente de Salida	2,3 A
No. de Polos	4
Resistencia	0,0079 Ω
KV (RPM/Volts)	2.000
RPM Máxima	50.000
Longitud	76 mm
Diámetro	40 mm
Peso	~ 405 g

TABLA II: ESPECIFICACIONES DEL ESC

Especificaciones del ESC	
Cte. Cont./de Ráfaga	100 A/600 A
Resistencia	0,00035 Ω
Dimensiones	41×51×36 mm

IV. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS POR CAJA NEGRA

En muchas ocasiones, es muy útil poseer el modelo de un sistema para su análisis, y en particular, para el control, porque la inmensa mayoría de los métodos de diseño se basan en su conocimiento. A la determinación de dicho modelo, a partir de tener algún conocimiento previo sobre el proceso y de experiencias prácticas, se le conoce como identificación. [5]

Cuando se requiere modelar de manera tradicional un sistema físico es necesario realizar una validación de modelos matemáticos de los diferentes procesos que en el intervienen. Buscar un modelo matemático es encontrar una relación entre la entrada y la salida del sistema. En particular, la dinámica interna se relaciona matemáticamente con la salida y la entrada a través de la función de transferencia. [6]

Con respecto al modelado tradicional, se debe tener en cuenta que normalmente resulta muy complicado considerar todas las leyes físicas que intervienen en un sistema y que, aun suponiendo que esto fuera posible, el modelo resultante pudiera ser muy complejo, y, por consiguiente, difícilmente manejable por las técnicas de diseño de sistemas de control. Por otra parte, en la práctica, las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, etc., hacen que el comportamiento real nunca sea el comportamiento previsto.

Por estas dificultades con el modelado tradicional, se procedió a identificar el sistema a través del método de caja negra, este tipo de identificación solo permite conocer la función de transferencia sin la posibilidad de acceder a sus dinámicas internas de manera directa. Para ello se realiza el proceso de filtrado compuesto por la estimación e identificación, que de manera indirecta describen la dinámica de los estados a través de un estimador usando a la variable instrumental y la señal observable retardada, que afecta a la matriz de transición y así al identificador mediante la señal retardada del sistema de referencia. La descripción del comportamiento de un sistema tipo caja negra se hace fuera de

línea, comúnmente a través de ecuaciones diferenciales; sin que ello permita conocer que ocurre dentro del sistema y menos como se da una determinada evolución. La identificación de la dinámica interna del sistema tipo caja negra se basa en la función de transición, que en su forma más simple corresponde a la primitiva de la ecuación diferencial del modelo de referencia. Pero en ningún caso se conoce la ganancia de coeficientes de la primitiva y en consecuencia la ganancia interna del sistema de referencia. [6]

Para obtener el modelo del Aguara'i, se consideró como "caja negra" el sistema compuesto por el ESC, el motor BLDC y el sistema de transmisión. Como se puede ver en la Fig. 1, a la entrada del sistema se cuenta con el valor del ciclo de trabajo de la señal PWM que controla el ESC. La salida es la velocidad del vehículo en m/s.



Fig. 1: Esquema de la caja negra para una entrada PWM y una salida m/s.

Para realizar la identificación del sistema, primeramente, se procedió a la recolección de datos de entrada y salida, estos datos fueron adquiridos con el myRIO. Se dispuso en la entrada una señal PWM de valor de ciclo de trabajo 0.130769 que corresponde al 40% de la aceleración máxima, para luego tomar los datos del encoder a través del myRIO. El encoder utilizado fue uno óptico, en donde cada interrupción de la luz genera un pulso. Por cuestiones de fijación dentro del vehículo, fue utilizado un disco con 4 dientes, colocados en un eje intermedio entre el motor y las ruedas. Teniendo en cuenta que 4 pulsos equivalen una vuelta del eje, y teniendo la relación de transmisión entre ese eje y las ruedas; y el diámetro de las ruedas, en la Ecuación 1 se encontró la relación matemática para obtener la salida en metros por segundo en función de los pulsos por segundo del encoder. La disposición del encoder se puede observar en la Fig. 2

$$Velocidad \left(\frac{m}{s} \right) = i_{eje/rueda} \cdot \frac{1}{4} \cdot PE \cdot Cia_{Rueda} \quad (1)$$

En donde:

- $i_{eje/rueda}$ es la relación de transmisión entre el eje donde está ubicado el encoder y la rueda.
- PE son los pulsos del encoder en pulsos/segundo.
- Cia_{Rueda} es la circunferencia de la rueda en metros

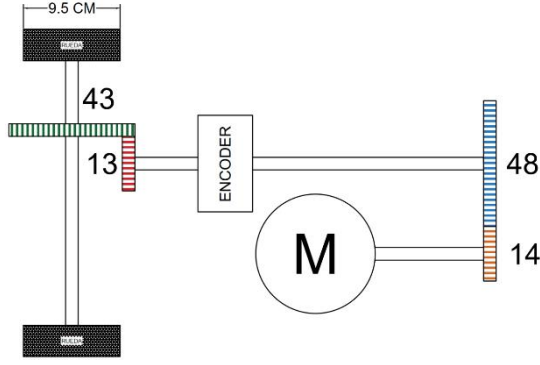


Fig. 2: Relación de transmisión entre el motor y la rueda y posición del encoder.

Reemplazando los valores de relación de transmisión, y la circunferencia de la rueda en la ecuación (1), se tiene:

$$Velocidad \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{13}{43} \cdot \frac{PE}{4} \cdot \pi \cdot 0.095 \quad (2)$$

Una vez obtenido los datos de salida, se observó que la señal contenía mucho ruido que podría afectar en la obtención de la función de transferencia, debido a esto, se le aplicó un filtro pasa bajo de segundo orden. En la Fig. 3 se puede observar la señal obtenida y la filtrada. Estos son ocasionados por la baja resolución del encoder.

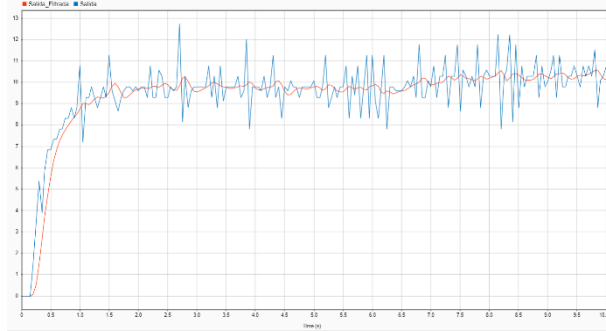


Fig. 3: Señal filtrada sobre la señal original.

Con una señal mas limpia, se utilizó la herramienta *System Identification* de MATLAB para obtener una función de transferencia. Se configuró la herramienta a que aproxime la señal obtenida a una función de transferencia de segundo orden, con dos polos y un cero, como es esperado del comportamiento de un motor eléctrico. También fue añadido un delay que fue percibido en la señal obtenida de la adquisición de datos.

Como se pudo ver en la Fig 4, el modelo obtenido con la identificación alcanzó un acercamiento del 86.22% a la señal comparada, lo que supone una muy buena aproximación, teniendo en cuenta el ruido presente en la señal a causa del sensor utilizado en la adquisición. A pesar del ruido aun existente, al igual que la señal obtenida desde el modelo resultante de la identificación, tiende a estabilizarse a los 10 m/s.

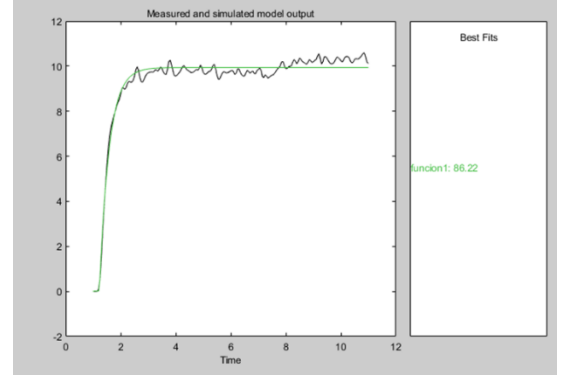


Fig. 4: Porcentaje de aproximación del modelo obtenido

La función de transferencia obtenida obedece la Ecuación (3).

$$G(s) = K_p \cdot \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)} \cdot e^{-T_D s} \quad (3)$$

Donde:

- K_p es la constante proporcional
- T_z es el valor del Cero
- T_{p1} es el valor del polo 1
- T_{p2} es el valor del polo 2
- T_D es el valor del delay

Reemplazando la ecuación (3) con los valores obtenidos en la identificación y pasando a la forma estándar, se tiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-0.5856s + 24.85}{0.002562s^2 + 0.35363s + 1} \cdot e^{-0.2s} \quad (4)$$

V. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL

A partir de la validación de la función de transferencia obtenida con la identificación de sistemas, se procedió a diseñar un control de velocidad apropiado para la tracción del vehículo.

Se optó por el control tradicional PID por la rapidez de implementación, debido a que la señal obtenida del encoder presenta bastante ruido, se optó por descartar la acción derivativa, ya que éste es bastante vulnerable ante la presencia de errores [7]. Para hallar los parámetros de control, K_p y K_i , se utilizó la herramienta de Matlab llamada PID Tuner.

Variando el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio, se buscó tener un tiempo de establecimiento pequeño, de tal manera que el vehículo tenga una respuesta rápida ante cambios de velocidad, el comportamiento obtenido se puede observar en la Fig. 5.

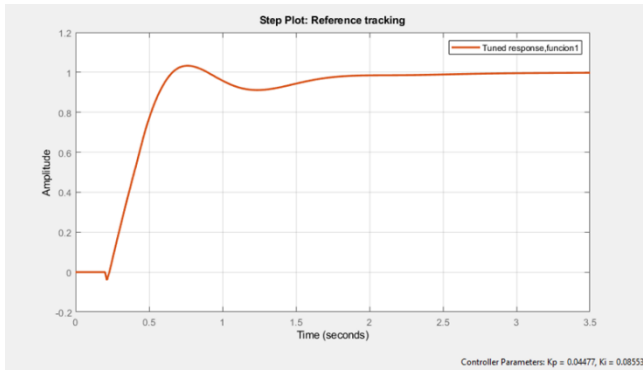


Fig. 5: Sintonización del Control.

Para los valores de $K_p = 0.04477$ y $K_i = 0.08553$ ($T_i = 0.5236$) se obtuvo:

- Tiempo de crecimiento: 0.308 segundos.
- Tiempo de establecimiento: 1.8 segundos.
- Sobreimpulso: 3.3%
- Pico: 1.03

Una vez obtenida la sintonización, se realizó el diseño del control en Simulink, como se muestra en la Fig. 6.

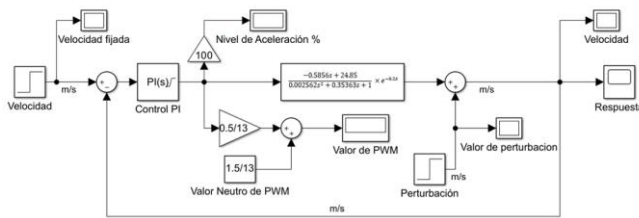


Fig. 6: Diseño de control en Simulink.

El objetivo de este control es poder mantener de forma apropiada al vehículo dentro de un rango de velocidad deseado, este está comprendido entre 1 y 12 m/s. Si bien, el vehículo es capaz de llegar a más velocidad, se dispuso este rango debido a la velocidad de muestreo del controlador y del encoder. Se hicieron pruebas para los valores de 1, 2, 5 y 10 m/s sin la presencia de alguna perturbación externa, el comportamiento obtenido con cada velocidad se puede observar en la Fig. 7 y en la Tabla III.

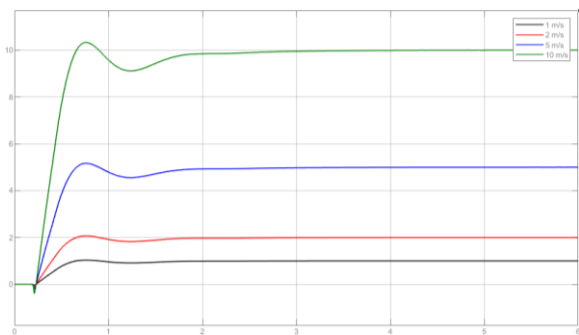


Fig. 7: Respuesta del sistema a 1, 2, 5 y 10 m/s.

TABLA III: VALORES DEL COMPORTAMIENTO DEL CONTROL

Velocidad	1 m/s	2 m/s	5 m/s	10 m/s
Tiempo de crecimiento t_r	0.3168 s	0.3218 s	0.3070 s	0.2878 s
Tiempo de establecimiento t_s	2.0027 s	2.0208 s	2.014 s	2.0327 s
Sobreimpulso P_o	3.3172 %	3.285 %	3.296 %	3.312 %
Pico P	1.0331 m/s	2.0657 m/s	5.1648 m/s	10.3312 m/s

Previendo variaciones de velocidad debido a las condiciones de la pista en donde se desplaza el vehículo, ya sea por una pendiente o una elevación, se simuló condiciones de aceleración y desaceleración no deseadas. Para ello, en la simulación se introdujeron perturbaciones de distintos valores y se analizaron las respuestas.

Tras estos análisis de perturbación de la velocidad, ya sea con una aceleración o desaceleración no deseada, se concluye que el sistema de control es capaz de hacer frente a estas situaciones y mantener la velocidad fijada. En la Tabla IV se pueden observar que el tiempo de reacción del sistema oscila entre 0.456 y 0.653 segundos, considerando el propósito del control, estos valores cumplen con el objetivo.

TABLA IV: TIEMPO DE REACCIÓN DEL SISTEMA ANTE PERTURBACIONES

Valor de la perturbación con relación a la velocidad fijada	Tiempo de Reacción Aceleración	Tiempo de Reacción Desaceleración
30%	0.456 s	0.462 s
50%	0.513 s	0.557 s
80%	0.653 s	0.582 s

VI. IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

Para la implementación del control diseñado, se utilizó como controlador el dispositivo embebido myRIO. El software de control fue diseñado en la plataforma LabVIEW.

La programación está hecha dentro de una estructura de repetición con un periodo de actualización de 50 milisegundos. El dato de entrada es la cantidad de pulsos del encoder.

En el panel frontal, mostrado en la Fig. 8, se dispuso un cuadro con los datos relevantes del vehículo, la cantidad de pulsos del encoder, la velocidad y el valor de la señal PWM y los parámetros de control para un eventual ajuste manual.

Se dispuso de un control del setpoint junto a un gráfico donde se puede ver este setpoint y la velocidad actual del vehículo.

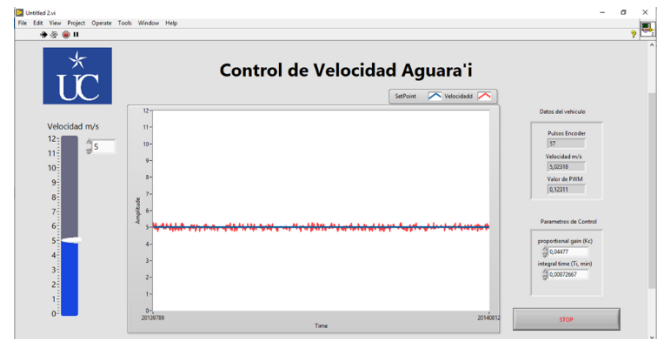


Fig. 8: Panel frontal del software de control

Una vez terminada la programación del software, se realizó una prueba a 5 m/s, y el sistema respondió como se esperaba.

En la Fig. 9 se observan los comportamientos del sistema a 2, 5 y 10 m/s, y en la tabla V se detallan los parámetros del

comportamiento. Como se puede apreciar en la tabla, hay una reacción diferente ante cada velocidad fijada. Esto es debido primeramente al ruido introducido por el encoder, y segundo por la baja resolución de este, teniendo tan solo 4 pulsos por vuelta.

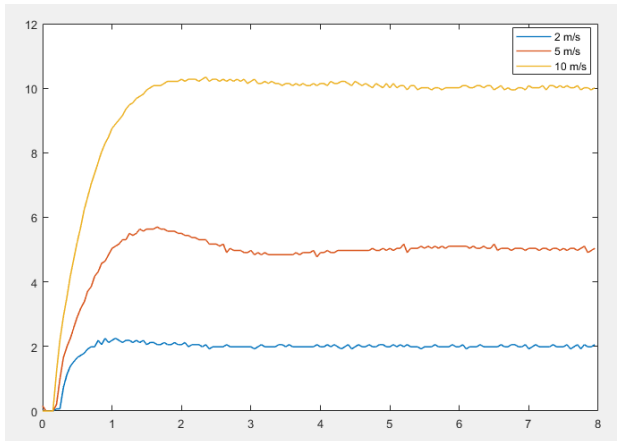


Fig. 9: Comportamiento del vehículo a 2, 5 y 10 m/s.

TABLA V: VALORES DEL COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO

Velocidad	2 m/s	5 m/s	10 m/s
Tiempo de crecimiento t_r	0.3850 s	0.6484 s	0.905 s
Tiempo de establecimiento t_s	2.20172 s	4.050 s	3.12 s
Sobrepulso P_o	3.285 %	3.157 %	3.13 %
Pico P	2.0657 m/s	5.703 m/s	10.34 m/s

VII. COMPARACIÓN CON LAS SIMULACIONES

El comportamiento obtenido en las simulaciones y en la implementación física tienen una cierta diferencia, esto se debe a distintos factores, en primer lugar, el control se diseñó en base a un modelo con un nivel de acercamiento del 86.22% al modelo real, en segundo lugar, el modelo se obtuvo haciendo pruebas sin carga inercial, para obtener el modelo, se hicieron girar las ruedas sin que tengan contacto con alguna superficie, es decir, sin fricción, en el momento de hacer la prueba, ya existía una carga inercial, las ruedas ya estaban apoyadas por una superficie y lograban desplazar el vehículo, y en tercer lugar, el ruido introducido por el encoder es variable para cada velocidad, por lo que representa un dato con errores al sistema de control y esto provoca una constante sobre corrección de la velocidad. A pesar de estas diferencias con la simulación, las pruebas realizadas cumplieron con lo esperado. Se probó el vehículo en distintos tipos de superficie logrando mantener una velocidad constante.

VIII. CONSIDERACIONES FINALES

A. Conclusiones

El presente trabajo consistió en obtener un modelo matemático que represente el funcionamiento de un vehículo eléctrico a escala para luego aplicar ese modelo en el diseño de un control de velocidad.

Debido al tiempo de implementación y dificultad de hallar de forma precisa los parámetros del motor BLDC, se optó por obtener un modelo a través del método de “caja negra”, donde se consideró como parte de una “caja negra” el comportamiento del ESC, el motor BLDC y la transmisión del vehículo.

Siguiendo este método, se excitó la entrada del sistema con una señal PWM conocida y se adquirió la velocidad de las ruedas en metros por segundo a la salida, una vez adquiridos los datos, se utilizó la herramienta *System Identification* de MATLAB para obtener una función de transferencia que se aproxime a la curva obtenida en la adquisición. Como el comportamiento de un motor BLDC corresponde con una ecuación de segundo orden, se configuró la herramienta para que aproxime a una función de transferencia de este tipo.

Por otra parte, se hizo un análisis preliminar del efecto del comportamiento dinámico, en donde se concluyó que, debido al tamaño y masa pequeños del vehículo, el efecto del arrastre aerodinámico y la resistencia de rodadura son despreciables para el diseño del control de velocidad.

Con la función de transferencia obtenida, se diseñó, se sintonizó y se simuló un control PI en la plataforma MATLAB y Simulink, las simulaciones arrojaron resultados esperados, inclusive ante la presencia de perturbaciones externas, como una aceleración o desaceleración no deseada provocada por la inclinación de la superficie en donde se desplaza el vehículo.

Para la implementación del control se utilizó el controlador myRIO, y el software fue diseñado en la plataforma LabVIEW.

Una vez implementado el control, se hicieron comparaciones con las simulaciones, si bien, el comportamiento real difiere un poco del comportamiento obtenido en las simulaciones, el control cumple con la función requerida de desplazar el vehículo a la velocidad solicitada y tiene la rapidez suficiente para mantener o variar la velocidad según la petición del usuario o algún factor externo.

B. Sugerencias para trabajos futuros

- Modelado matemático del vehículo eléctrico a escala Aguara'i con todos los subsistemas (ESC, motor BLDC, batería, transmisión, dirección)
- Diseño de control de predictivo de velocidad y dirección para un vehículo eléctrico a escala 1:8.
- Diseño de un control electrónico de velocidad (ESC) para un motor BLDC

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Soylu, S. (2011). *Electric Vehicles – Modelling and Simulations*.
- [2] Baldursson, S. (2005). *BLDC Motor and Control – A Matlab/Simulink Implementation*.
- [3] Cuervo Fernandez, D., & Herrero de Lucas, L. C. (2016). *Programación de Arduino mediante MATLAB/Simulink. Aplicación de control de velocidad de motores BLDC*.
- [4] FVPMax. (2016) *Variador Electrónico (ESC)*. Obtenido de <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>
- [5] Arafet Padilla, P., Chang Mumañ, F., Torres Alberto, M., & Dominguez Abreu, H. (2008). *Métodos de Identificación Dinámica*.
- [6] Medel Juárez, J. d., Zagaceta Alvarez, M. T., & Palma Orozco, R. (2014). *Identificación con estimación para sistemas tipo caja negra. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 35-46.
- [7] Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*.