

Development of an electric bicycle experimental platform

Mariano Sánchez-Morales* Alejandra de la Guerra*

* Facultad de Ingeniería, Campus CU, UNAM, CDMX, Mexico
(e-mail: ale_delaguerra@comunidad.unam.mx)

Resumen This article presents the design, construction and start-up of an experimental platform for the evaluation of schemes for pedaling assistance of electric bicycles. The experimental platform represents a front-wheel drive bicycle. The motor used is a direct current motor (DC motor). The acquisition of the measured signals (angular position and current of the DC motor) and the generation of the PWM signals is carried out in the ARDUINO MEGA 2560. The signals monitoring and control programming was done in MATLAB/Simulink. At this stage, a PI controller is used to regulate the DC motor speed to verify the correct platform operation.

Keywords: DC motor, experimental platform design, SIMULINK, ARDUINO.

1. INTRODUCCIÓN

La motivación general de este trabajo es el diseño de bicicletas eléctricas como una alternativa, ecológica y accesible, a la movilidad en vehículos particulares en las ciudades. En la literatura de bicicletas eléctricas con asistencia al pedaleo se han presentado dos estrategias: i) asistencia de potencia constante (CAP por sus siglas en inglés) y ii) asistencia de potencia proporcional (PAP). La estrategia CAP suele proporcionar una experiencia poco natural para el usuario (Hung and Lim, 2020), lo que ha impulsado la investigación en las soluciones PAP. Sin embargo, para implementar el esquema PAP es necesario conocer el par en los pedales generado por el conductor. En este caso, se tienen dos alternativas: i) usar un sensor de par, como en Cardone et al. (2016), ii) estimar el par usando un observador, como en González et al. (2020). La ventaja de diseñar un estimador para el par generado por el conductor es sobretodo de carácter económico, pero una buena estimación de las perturbaciones puede mejorar la experiencia del usuario.

Para evaluar estos esquemas es necesario hacer varias pruebas con parámetros distintos: peso del conductor, inclinación del suelo, rugosidad del terreno, presión del aire en la llanta, etc. Con el fin de hacer estas pruebas y poder comparar métodos de una forma rápida y estandarizada en este artículo se propone el diseño de una plataforma experimental que representa la tracción delantera de una bicicleta eléctrica con motor de corriente directa.

Coherente a la propuesta de Saleem et al. (2011) el diseño de la plataforma experimental se dividió en tres etapas: diseño mecánico, diseño eléctrico y programación del controlador.

Por lo tanto, el artículo se divide en una Sección 2, donde se detalla el diseño mecánico, otra Sección 3 para la presentación del diseño electrónico, una Sección 4 para mostrar el control del motor de CD y finalmente las conclusiones en la Sección 5.

2. DISEÑO MECÁNICO

Los fundamentos para la metodología del diseño se tomaron de Isermann (2007), en la primera etapa se delimitaron los fenómenos a estudiar con la plataforma y las necesidades físicas a cubrir. Para el sistema mecánico se puntualizaron las siguientes necesidades: i) estructura y soporte para todos los elementos de la plataforma ii) giro de la llanta en contacto con una superficie iii) presencia de fricción estática y dinámica entre la llanta y la superficie iv) capacidad de variación en la pendiente del sistema y v) acción de un par de carga opuesto al movimiento de la llanta.

La mayoría de las unidades se reportan en el sistema internacional, sin embargo algunas métricas se establecen en el sistema inglés debido a su referencia al mercado. Las especificaciones para la necesidad i) se determinaron mediante dos directrices, el tamaño posible donde la plataforma ejecutaría las pruebas, el espacio máximo factible tiene las cotas de: 80 [cm] de ancho, 120 [cm] de largo y 100 [cm] de altura, asimismo se consideraron los tamaños de las llantas para las diferentes bicicletas de uso común, las cuales tienen diámetros comerciales de 12 a 26 [in] (unidades en las cuales se expresa la rodada). También la plataforma no podrá exceder los 40 [kg].

Para ii) se analizaron los distintos tipos de motores eléctricos para bicicletas, tal como se menciona en Morchin and Oman (2006) existen precedentes del uso de motores de

inducción y síncronos, entre otros; sin embargo Dimitrov (2018) indica que debido al desarrollo de potencia, menor tamaño y precios los motores con mayor aplicación y presencia actualmente son los motores de corriente directa (motor de CD) o los motores de corriente directa sin escobillas (BLDC por sus siglas en inglés).

En la mayoría de los motores de CD para bicicletas la diferencia de potencial fluctúa entre los 12 a 36 [V]. En potencia existe mucha variedad, tales como motores por arriba de los 2000 [W], pero por cuestiones reglamentarias de algunos países gran parte del mercado se encuentra por debajo de los 250 [W]; la velocidad lineal promedio es 5 [m/s] y con intensidades de corriente eléctrica nominal a 6 [A] (Muetze and Tan, 2007; Hung and Lim, 2020).

Se analizaron las posibles configuraciones de la plataforma para la solución de iii) y existieron dos enfoques. Utilizar una bicicleta completa y adaptar todo el sistema sobre la misma o trabajar únicamente con las parte de interés. Debido a los alcances del trabajo se optó por el segundo enfoque; se fijó como especificación que la plataforma fuera estática y existiera únicamente un movimiento angular por parte de la llanta, fue totalmente necesario el contacto con una superficie para que existiera el fenómeno de fricción estática y dinámica. No se determinaron valores ideales para la fuerza de fricción ya que uno de los objetivos a estudiar con la plataforma es la estimación de los coeficientes de la misma.

Como se menciona en la introducción, una de las aplicaciones más comunes de los motores eléctricos en bicicletas es ante una calle con una pendiente pronunciada, por ello, los ángulos de variación de iv) se fijaron a partir de una vecindad a un ángulo del 6%; debido a que es el valor recomendable para incentivar el uso de bicicletas en ciudades (Lastra et al., 2016). El cálculo de la pendiente en porcentaje es un método utilizado particularmente en topografía. Consiste en trazar un triángulo rectángulo donde la hipotenusa es la calle a estudiar, se miden las distancias horizontales (cateto adyacente) y verticales (cateto opuesto), el resultado del cociente entre las distancias se multiplica por 100.

Por otra parte, v) requería un par opuesto al generado por el motor para dos propósitos; considerarse una perturbación para probar la robustez de los controladores de velocidad y a su vez tener la funcionalidad de freno de emergencia, por consiguiente los requisitos se establecieron en función de frenos comerciales. Las especificaciones y métricas finales se presentan en la Tabla 1.

Una vez establecidas las métricas de las especificaciones se continuó con la siguiente etapa de la metodología, el diseño de componentes. La evaluación de las soluciones a la necesidad i) partió del análisis a las medidas comerciales de llantas y el trazado con los valores ideales de la métrica i), por consiguiente se determinaron las dimensiones comerciales de 16 [in] y 1 [in] para las métricas iii) y iv), respectivamente. Las trazas para la métrica i) resultaron de 70 x 80 x 60 [cm].

Con las dimensiones proyectadas se exploraron las distintas soluciones en materiales y configuración de los elementos para construir la estructura de la plataforma. Con respecto al soporte se eligieron perfiles tubulares rectangulares (PTR) de 1 1/2 [in] x 1 1/2 [in], a calibre 14 y 16; con un espesor de 0.075 [in] y 0.060 [in], respectivamente; y una masa promedio de 1.9 [kg] por metro de PTR.

Se evitó realizar uniones y procesos por soldadura para facilitar la flexibilidad en dimensiones y posibles cambios posteriores, por consiguiente se prefirieron uniones atornilladas a 90 grados para los PTR. Los cálculos para elegir los tornillos para las uniones, los cuales estarán sometidos ante esfuerzos cortantes simples, se llevaron a cabo mediante los procedimientos explicados en Guardiola Vállora (2012) y Shigley et al. (1990). Se escogieron los tornillos marca Protor hexagonal cuerda (STD), ASTM a 307 grado A, diámetro nominal de 7/16 [in] o 11.1 [mm] a cuerda parcial, una resistencia mínima a prueba de 33 [kpsi] y con un esfuerzo a corte de 7460 [kpsi] Sommer (2018). Véase la Figura 1 a) para el resultado de esta etapa. Uno de los principales objetivos del trabajo es la

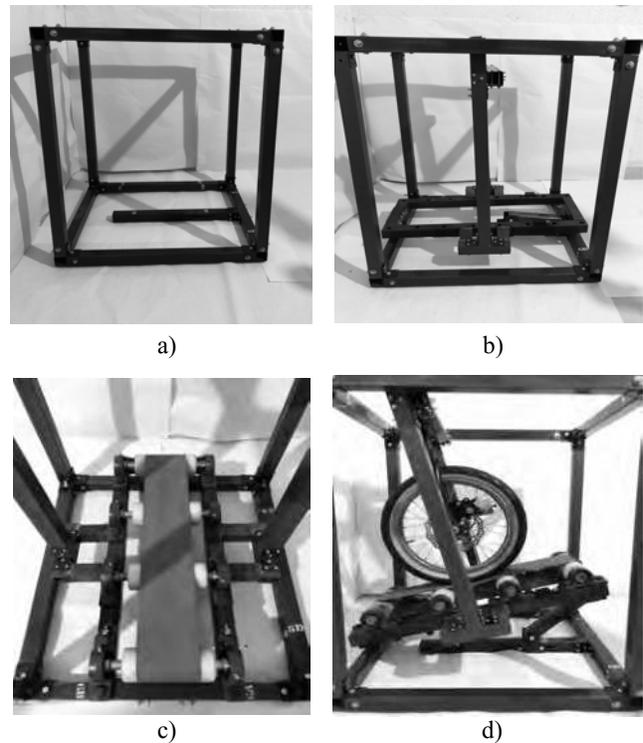


Figura 1. Etapas del sistema mecánico: a) únicamente estructura de la plataforma. b) se añade la base de la banda c) se instalan los rodillos, ejes y la banda. d) presentación final del sistema mecánico con llanta, motor y freno.

implementación de observadores de par y controladores de velocidad, por ello, esas características se priorizaron para la elección del motor de CD; asimismo el aspecto económico de las opciones. Los datos técnicos del motor KSV 4030/252 seleccionado se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Especificaciones y métricas finales

# Métrica	# Necesidad	Métrica	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1	Medidas de la plataforma	cm	50x120x100	80x110x80
2	1	Peso de la plataforma	N	400	200
3	1	Diámetro de la llanta	in	12	20
4	1	Espesor de la llanta	in	0.75	1.75
5	2	Velocidad lineal promedio	m/s	2	5
6	2	Velocidad lineal máxima	m/s	6	8.9
7	2	Potencia	W	100	250
8	2	Intensidad de corriente eléctrica	A	2	7
9	4	Variación de ángulo	%	0 % a 6 %	0 a 18 %
10	5	Par en contra	Nm	10	25

Para reproducir el fenómeno de fricción sin desplazamiento lineal por parte de la llanta y la plataforma, además de la posibilidad de cambiar los coeficientes de fricción, se plantearon las siguientes soluciones: la superficie en contacto con la llanta sería una banda que simularía el camino a recorrer por la bicicleta y el cambio de banda representaría una superficie diferente y por ende un coeficiente de fricción distinto.

El ancho y largo de la banda se diseñaron con un margen superior de las dimensiones óptimas para mantener flexible los diámetros y anchos de la llanta en iteraciones posteriores. El diámetro externo e interno de los rodillos se definieron a partir de valores comerciales y de amplio uso industrial para su factible adquisición. Los rodillos elegidos tienen las siguientes características comerciales: un diámetro interno de 3/4 [in], diámetro externo de 1 1/2 [in] y un largo de 6 [in].

Tabla 2. Datos técnicos del motor de CD

Magnitud	Unidades	valor
Voltaje nominal	V	24
Par máximo	Nm	8
Velocidad nominal	rad/s	22
Potencia nominal	W	104
Corriente nominal	A	4
Corriente de arranque	A	42
Constante de la FEM	Vs/rad	1.0886
Constante del par	Nm/A	0.9
Resistencia de armadura	ohms	0.35
Inductancia	mH	0.45
Inercia del rotor	μkgm^2	0.42
Peso	N	11.7

La distancia entre centros de los rodillos se eligió a partir del valor ideal para el diámetro de la rueda (métrica iii), se estableció en 60 [cm]. Establecidas las dimensiones se diseñó la base para la banda, en uno de sus extremos se colocó una junta con 1 grado de libertad en rotación, marca Jako® de alta resistencia de 4.5 x 4.5 [in], con rodamientos en el eje axial de acero inoxidable. En el otro extremo se dispuso de un sistema biela - manivela. La base de la banda ejecutará la función de la manivela con el propósito de lograr un desplazamiento angular que representará diferentes pendientes en el camino de la bicicleta. En la Figura 1 b) se aprecia la base de la banda ya montada en la estructura de la plataforma.

Para determinar la longitud de la banda se planteó una analogía con el cálculo para bandas planas de transmisión de potencia, pero con las consideraciones siguientes: diámetros iguales para ambas poleas (rodillos) lo que provocaría un ángulo cero de apertura entre ellas. Después de las consideraciones mencionadas se planteó la ecuación (1), fundamentada en Shigley et al. (1990),

$$L = 2C + \pi D, \quad (1)$$

donde C es la distancia entre centros de los rodillos, D es su diámetro externo y la longitud de banda cuyo valor resultó de $L = 50.7$ [in].

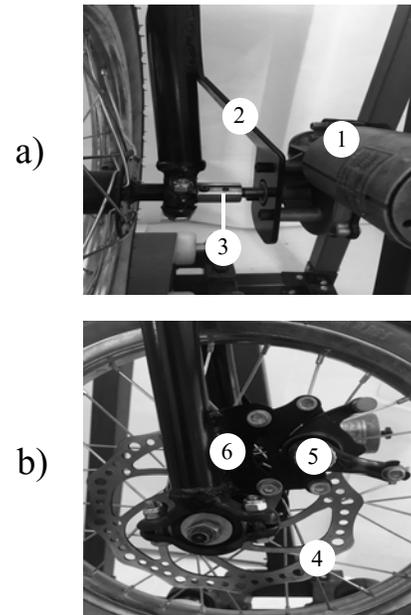


Figura 2. De a): 1 Motor DC, 2 soporte desde la horquilla para el motor DC y 3 acoplamiento entre la maza y el eje del motor. De b): 4 disco (rotor) para el freno, 5 cáliper de montaje lateral y 6 ancaje para el cáliper

Para la necesidad iii) se optó por una banda plana marca Chiorino®: 2M8 U0-U-G10 FH, coeficiente de fricción cinética μ_k ante acero de 0.2 y un espesor total de 2.3 [mm]. Con la determinación de la banda se continuó con la elección de los rodamientos y sus ejes, donde el diámetro interior de los rodillos acotó las soluciones. Para el material de los ejes se decidió por una barra redonda

de acero Cold Rolled de 1.905 [cm] de diámetro y largo de 25 [cm] cada uno. Los rodamientos se escogieron de piso UPC 204-12 con diámetro de 1.905 [cm]. En la Figura 1 c) se puede visualizar el montaje de los rodillos, rodamiento, ejes y banda.

Después se diseñaron los componentes de soporte, freno y unión de llanta con la plataforma. Como apoyo principal se escogió una horquilla (tijera) para monociclo rin 16 [in] con tubo de dirección (corona) a 12 [in]. A la maza se le acondicionaron directamente un cople (bujé) y soporte para el motor del lado derecho, véase Figura 2 a). Se modificó la maza del lado izquierdo para montar el disco de frenado marca Tough® de 160 [mm] mediante 6 tornillos de 5.4 [mm]. A la tijera se le colocó un anclaje para caliper marca Shunfeng® de montaje lateral, véase Figura 2 b). Por último, para evitar vibraciones y rotaciones en el tubo de dirección se adaptó una cuña de 100 x 7 x 5 [mm] de largo, ancho y altura respectivamente. El montaje final del sistema mecánico se puede ver en la Figura 1 d).

3. DISEÑO ELECTRÓNICO

Las directrices para el diseño del sistema eléctrico se determinaron con base en los requisitos técnicos del control, medición (corriente y velocidad angular) y protección del motor de CD. Se establecieron las siguientes necesidades: i) proporcionar alimentación al motor CD, ii) variar la velocidad del motor, iii) leer la velocidad angular de la llanta y iv) medir la corriente suministrada.

Desde una perspectiva de caja negra, la única entrada al sistema eléctrico es una señal de 127 [V] CA y una señal de salida a 24 [V] CD. Consistente a la propuesta de Saleem et al. (2011) el motor de CD se considera un elemento del sistema mecánico, sin embargo, se estudia y considera una función pasiva del sistema eléctrico. Con las necesidades establecidas y especificaciones del motor de CD se realizó el diagrama funcional, ver Figura 3, donde se identificaron 5 funciones a diseñar y 6 interacciones entre ellas.

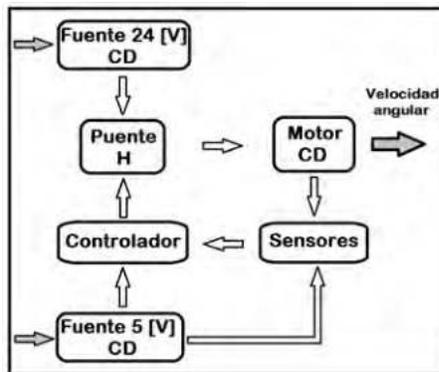


Figura 3. Diagrama funcional del sistema eléctrico

Para la elección de la fuente de 24 [V] se consideraron las exigencias en corriente nominal y arranque del motor CD

(véase Tabla 2), se optó por una fuente conmutada de 200 [W], 24 [V] y 8.33 [A] que alimentaría directamente al puente H. Previendo una caída de voltaje en circuitos de protección y fluctuaciones en la potencia requerida por la plataforma se adquirió una fuente conmutada de 44 [W], 24 [V] y 1.8 [A] que complementaría el circuito de protección. En la Figura 4, los elementos 2 y 3 son las fuentes de potencia a 24 [V]. Para la interacción entre la fuente y el puente H se diseñó un limitador de corriente y un regulador de voltaje (7 en la Figura 4), con base en Floyd (2008) y Boylestad and Nashelsky (2003). Estos elementos definen un voltaje de 24 [V] a la salida y una corriente máxima sostenida de 7 [A], permitiendo picos al arranque del motor.

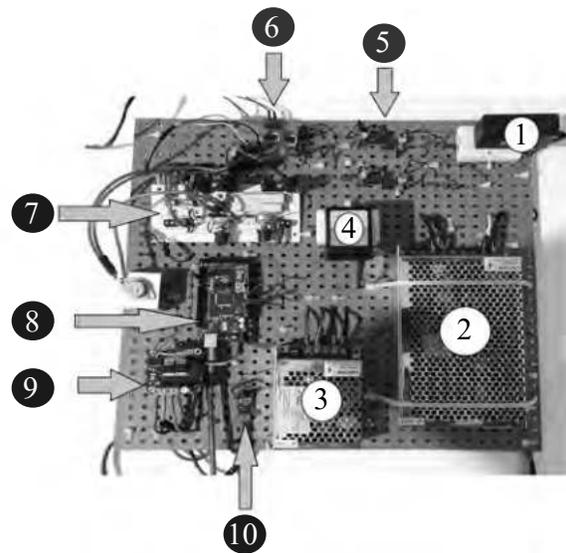


Figura 4. 1: Transformador CA a CD 7.2 [V], 2: Fuente de voltaje 24 [V], 3: fuente de voltaje 24 [V], 4 transformador CA a CD 7.2 [V], 5: regulador de voltaje, 6: circuito seguidor de voltaje y optoacopladores, 7: limitador de corriente, 8: microcontrolador ARDUINO MEGA 2560, 9: puente H, 10: sensor de corriente

La siguiente función a diseñar fue el controlador, se eligió un microprocesador ARDUINO®MEGA 2560 por las capacidades de entradas y salidas, 16 entradas analógicas de 10 bits, 54 salidas digitales, 15 salidas habilitadas para modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) y 6 temporizadores programables; otra razón para su elección fue su compatibilidad con diversos módulos y sensores. Su funcionamiento puede llevarse a cabo al conectarse a una computadora por conexión USB o por entrada externa.

Las especificaciones más significativas para la elección del puente H fue la corriente de operación nominal y su compatibilidad con la tarjeta del microprocesador. Se eligió el módulo IBT-2, que está conformado por el medio puente H BTS 7960B para la parte de potencia y el microchip 74AHC244 para la lógica. El módulo permite controlar ambas direcciones de giro, positiva (horaria) y

negativa (antihoraria). La corriente máxima a la cual se puede someter el módulo es de 43 [A], valor adecuado para la corriente nominal y pico del motor CD. La parte lógica del módulo tiene ocho terminales numeradas: 1 y 2 para el PWM, 3 y 4 habilitadores de la dirección de giro, 5 y 6 alarmas ante picos de corriente, 7 y 8 son la alimentación digital del circuito lógico.

Para la conexión de tierra en común y los habilitadores de dirección de giro se utilizaron optoacopladores PC 817, con el propósito de desacoplar los diferentes circuitos de baja y alta potencia evitando corrientes de rebote al apagar el motor.

El diseño de componentes para suministrar una señal de 5[V] se dividió en dos: la primera etapa consistió en transformar de CA a CD y regular el voltaje de salida a 7 [V]. La segunda etapa fue diseñar un seguidor de voltaje digital mediante amplificadores operacionales, con el propósito de asegurar una señal de salida del circuito a 5[V], independientemente de la carga conectada, todo elemento que trabaje de manera digital se alimentaría de esta señal. Otro beneficio del circuito de protección es que la corriente entregada fluye a partir de los amplificadores operacionales, lo cual limita estrictamente la corriente entregada a la etapa digital, por cuestiones de protección ante corto circuito, evitando daños a sensores y otros elementos.

La última función en definirse fue la etapa de los sensores. Para la corriente suministrada al motor de CD, con base en las corrientes nominal y pico, se eligió el módulo ACS712 con un sensor de corriente de efecto Hall, que percibe la intensidad del campo magnético producido por inducción electromagnética. La señal de salida se comporta de manera lineal, entregando un voltaje directamente proporcional a la corriente que fluya. Para el acondicionamiento de la señal se midió el voltaje entregado por el sensor sin carga, que representaría la ordenada al origen, por datos del fabricante este valor debe fluctuar en los 2.5 [V]. El voltaje reportado fue de 2.52 [V]. Para la constante de proporción (pendiente) se hicieron diferentes pruebas a valores preestablecidos, se obtuvo una constante de proporción de 0.0658 [V/A]; el cual representa la sensibilidad del sensor. La medición de corriente para el sensor en específico estaría modelada por la ecuación lineal,

$$I = \frac{V - 2.52}{0.0658}, \quad (2)$$

donde I es la medición de la intensidad de corriente eléctrica en [A] y V es el voltaje entregado por el sensor en [V]. El sensor tiene tres terminales: tierra, salida analógica y voltaje de alimentación, su conexión se hizo al circuito de 5 [V] digital, y la salida del sensor se conecta a la placa del microcontrolador.

Para medir la velocidad angular se eligió un Encoder rotativo incremental marca Autonics ®E50s8-2000-3-T-S de tres canales, que cuenta con 2000 pulsos por revolución y se alimenta a 5 [V], el cual se conectó al circuito

seguidor de voltaje. Con forma cilíndrica de 50 [mm] de diámetro, 58.3 [mm] de largo y un eje de 8 [mm] que se conectó al eje de la llanta. Los canales A y B registran los pulsos y un canal Z cuenta las vueltas. Al leer y procesar los 2000 pulsos por revolución se obtiene una resolución de $\pi \times 10^{-3}$ radianes, a su vez, si se leen los flancos y transiciones se logra 8000 estados por revolución, lo cual resultaría una resolución aproximada de 7.85×10^{-4} radianes. Para obtener un bosquejo de la frecuencia y periodo de la señal compuesta por los canales A y B se consideró la velocidad nominal del motor CD. En 1 [s] se completan aproximadamente 3.5 vueltas, es decir, la señal considerando ambos canales del encoder tendría una frecuencia de 28000 [Hz]. El montaje y ensamble de las soluciones finales de cada etapa se muestra en la Figura 4.

4. PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR

4.1 Adquisición y procesamiento de las señales medidas

La corriente del motor de CD se adquirió usando un puerto analógico, como se muestra en la Figura 5, para después procesarla usando un filtro de primer orden incluido en la función de MATLAB *Sistema*. En cuanto a la posición del rotor, se usaron dos puertos digitales para obtener las señales de los canales A y B del encoder, para a continuación obtener la posición usando la S-function encoderRead de Campa (2015). Posteriormente, la velocidad medida se obtiene aplicando una derivada *sucia* a la posición medida que también se incluye en la función de MATLAB *Sistema*.

4.2 Programación del controlador y observador

El controlador PI de velocidad se programó en la función *Sistema* con un periodo de muestreo de $T_s = 0.5$ [ms]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt, \quad (3)$$

donde $e = \omega_d - \omega$ con ω_d la velocidad de referencia y ω la velocidad medida, $K_p = 16$ es la ganancia proporcional y $K_i = 13$ es la ganancia integral. La función de MATLAB *Sistema* tiene dos salidas de control, la amplitud de la señal de control y su signo, por lo cual se utilizan dos pines de PWM para controlar el puente H.

Para el diseño del observador, el primer paso fue hacer la identificación del modelo del motor de CD KSV 4030/252 conectado a la llanta usando la respuesta escalón. El modelo de primer orden que se obtuvo es:

$$G(s) = \frac{\omega_s/V}{\tau s + 1}, \quad (4)$$

donde ω_s es la velocidad alcanzada, V es la magnitud de la entrada escalón y τ es la constante de tiempo. A continuación, se obtuvo la representación en espacio de estados correspondiente al modelo en función de transferencia (4):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (5)$$

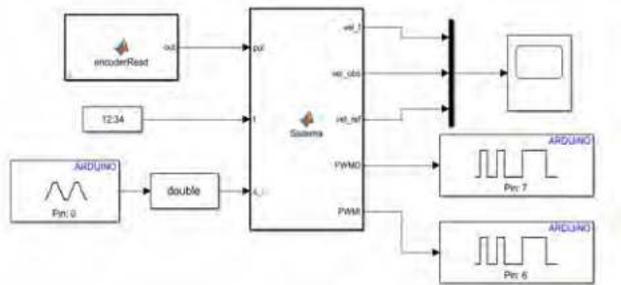


Figura 5. Modelo en Simulink: bloques de entrada y salida para la comunicación con el ARDUINO MEGA 2560

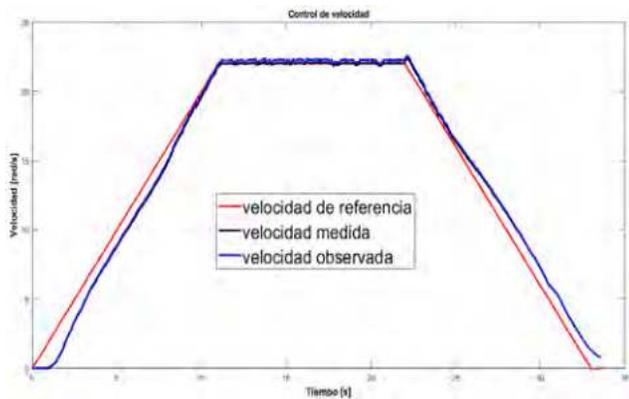


Figura 6. Control de velocidad: motor de CD conectado a la llanta

con $A = -1/\tau = -0.4386$, $B = \omega_s/V = 1.4570$ y $C = 1$. Con base en el modelo (5) se diseñó un observador Luenberger de estado reducido para estimar la velocidad de eje del motor como:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(Cx - C\hat{x}), \quad (6)$$

donde $L = 1150$. Este observador se programó en la función *Sistema*

Los resultados de la regulación de velocidad se observan en la Figura 6, donde la velocidad medida alcanza el valor de la referencia en velocidad constante, con la media del error igual a $\bar{e} = 0.047$. La velocidad estimada también tiende al valor de la velocidad medida aunque en este caso el valor medio del error de estimación es $\bar{e}_o = -0.1492$ con $e_o = \omega - \hat{\omega}$ donde $\hat{\omega}$ es la velocidad estimada.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se verificó el funcionamiento correcto de la plataforma experimental propuesta. Esta verificación se logró al programar y probar un controlador PI y un observador Luenberger en la tarjeta ARDUINO MEGA 2560. Asimismo, la adquisición, el procesamiento, almacenamiento y despliegue de las señales en Matlab/Simulink se realizó con éxito.

6. AGRADECIMIENTO

Parte de este trabajo se realizó en un laboratorio del edificio 18 del Instituto de Ingeniería C. U. UNAM a cargo del Dr. Luis Álvarez-Icaza, los autores agradecen el apoyo recibido durante esa temporada.

REFERENCIAS

- Boylestad, R.L. and Nashelsky, L. (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON educación.
- Campa, G. (2015). *Writing a Simulink Device Driver block: a step by step guide*. The MathWorks, Inc.
- Cardone, M., Strano, S., and Terzo, M. (2016). Optimal power-assistance system for a new pedelec model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(17), 3012–3025.
- Dimitrov, V. (2018). Overview of the ways to design an electric bicycle. In *2018 IX National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 1–4. IEEE.
- Floyd, T.L. (2008). *Dispositivos electrónicos*. Pearson Educación.
- González, G., Aligia, D., Pezzani, C., and De Angelo, C. (2020). Observador del par ejercido por el ciclista en bicicletas eléctricas con asistencia al pedaleo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(4), 380–389.
- Guardiola Vllora, A.P. (2012). *Diseño y cálculo de uniones con tornillos no pretensados*. Universitat Politècnica de València.
- Hung, N.B. and Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy*, 260, 114323.
- Isermann, R. (2007). *Mechatronic systems: fundamentals*. Springer Science & Business Media.
- Lastra, M.S., Pérez, C.G., and Murata, M. (2016). *Bicicletas para la ciudad: una propuesta metodológica para el diagnóstico y la planeación de infraestructura ciclista*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morchin, W.C. and Oman, H. (2006). *Electric bicycles: a guide to design and use*, volume 8. Electric Bicycle Manual.
- Muetze, A. and Tan, Y.C. (2007). Electric bicycles-a performance evaluation. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4), 12–21.
- Saleem, A., Tutunji, T., and Al-Sharif, L. (2011). Mechatronic system design course for undergraduate programmes. *European Journal of Engineering Education*, 36(4), 341–356.
- Shigley, J.E., Mischke, C.R., Bocanegra, F.P., and Correa, C.O. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica*. McGraw-Hill México.
- Sommer (2018). *Catálogo tornillos*. Casa Sommer.