

© 2016 IEEE. Personal use of this material is permitted. Permission from IEEE must be obtained for all other uses, in any current or future media, including reprinting/republishing this material for advertising or promotional purposes, creating new collective works, for resale or redistribution to servers or lists, or reuse of any copyrighted component of this work in other works.

This is an Accepted Manuscript of the following article: *J. A. Brizuela, C. M. Astorga, A. Zavala and F. Canales, "Instrumentation of a Bicycle Without Driver for Experimental Testing of Automatic Control," in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 8, pp. 3540-3546, Aug. 2016.* To access the final edited and published work is available online at: <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7786332>

Instrumentation of a Bicycle Without Driver for Experimental Testing of Automatic Control

J. A. Brizuela, C. M. Astorga, A. Zavala and F. Canales

Abstract— In this paper, the instrumentation of a riderless bicycle prototype for control purposes is addressed. The proposed instrumentation is based on the mathematical model of a bicycle, in which the dynamical variables correspond to the translational velocity, the angular position of the handlebar and the velocity of the roll angle of its general framework. Throughout the paper, a convenient and simple way to measure these variables is detailed explained, in order to provide an instrumented prototype ready to be used for testing automatic control laws. This corresponds to the main contribution of the present paper. The dynamical model, from which the proposed instrumentation has been designed, corresponds to a Linear Parameter Varying system, considering the translational velocity as time-varying parameter. The results of the instrumentation and its effectiveness are shown from experimental tests.

Keywords— Translational velocity, velocity of the roll angle, handlebar position, riderless bicycle.

I. INTRODUCCION

LA BICICLETA es un medio para el ocio, recreación y deporte. Representa un medio de transporte eficiente y limpio, debido a la característica de no poseer motores o elementos mecánicos que contribuyen al efecto invernadero del planeta. El vehículo ha sido utilizado durante casi dos siglos, sin embargo, los fenómenos físicos involucrados en la dinámica de la bicicleta son aún difíciles y complejos de analizar. Como resultado, es en tiempos actuales con el auge de programas especializados en la solución numérica de sistemas dinámicos, que dichos fenómenos dentro de los modelos matemáticos en cuestión son posibles de analizar. Los estudios referidos a la estabilidad del vehículo en su postura vertical o el seguimiento de trayectorias definidas considerando una velocidad de traslación constante o variable, representan un problema atractivo que ha cobrado interés. En efecto, la estabilidad del vehículo ha captado la atención de investigadores, especialmente en el área de control automático. Lo anterior se debe, principalmente, a las características dinámicas involucradas en el movimiento del vehículo [2]. El primer análisis de la bicicleta fue presentado en el año de 1869 mostrando que bajo ciertas condiciones, su dinámica puede ser aproximada al modelo matemático del

bien conocido péndulo invertido [1]. En términos generales, los modelos matemáticos que aproximan el comportamiento real del sistema incorporan la velocidad traslacional del vehículo en sus ecuaciones dinámicas, además de que presentan la característica de la ubicación de sus polos y ceros en el semiplano derecho del plano complejo. Como resultado, se presentan retos considerables relacionados con la estabilización del vehículo en la postura vertical y/o el control de la velocidad de traslación, sin considerar un conductor [3]. En otro sentido, previo diseño de un algoritmo de control es necesario contar con una aproximación acertada de la dinámica del cualquier sistema, para efectos de realizar simulaciones que permitan validar y analizar las metodologías diseñadas en el ámbito del control automático. Sin embargo, nada más convincente y determinante que obtener resultados a partir de experimentos realizados en un prototipo instrumentado. Lo anterior corresponde la mayor motivación del presente artículo. En esta dirección, existe vasta literatura que presenta la solución a problemas relativos al seguimiento de trayectorias manteniendo el vehículo en su posición vertical [4] y, considerando elementos adicionales como balancines, propuestas para abordar el problema de control se diseñan y presentan en términos de controladores retroalimentados [5]. Adicionalmente, resultados en simulación de la aplicación de controladores basados en lógica difusa se presentan en [6] y, considerando metodologías de diseño fundamentadas en modos deslizantes, el problema de la estabilización de la bicicleta se resuelve en [7]. En [8], se aborda el algoritmo de un control no-lineal diseñado a partir del modelo simplificado de una bicicleta sin conductor, con el objetivo de mantener su postura vertical. Utiliza como variables de estabilización un par aplicado al manubrio y fuerzas cuyo efecto infieren en el balanceo del vehículo. El problema del modelado de la bicicleta sin conductor, además de la solución que garantiza su estabilidad, se presenta en [9][10]. Una visión general de dicho vehículo considerando una serie de pruebas de esfuerzo ha sido reportada utilizando un sistema de captura de datos activo del movimiento del mismo [11] y, finalmente, la bicicleta sin conductor se estabiliza mediante controladores retroalimentados considerando un modelo Lineal de Parámetros Variables en el Tiempo (LPV del inglés) [13][14]. Dicho modelo LPV adopta, como parámetro variable, la velocidad traslacional del vehículo. En efecto, existe vasta literatura y trabajos reportados al respecto del modelo dinámico de la bicicleta sin conductor y su correspondiente sistema de control [15][16][17]. Sin embargo, resulta necesario e imprescindible contar con un prototipo instrumentado [17], con el objetivo de la implementación de los algoritmos de control diseñados y analizados previamente en simulación; a fin de validar su comportamiento. Es en este

J. A. Brizuela, Centro Universitario de los Valles, Universidad de Guadalajara, Ameca, Jalisco, México, jabriz.cenidet@gmail.com, jorge.brizuela@valles.udg.mx

C. M. Astorga, Tecnológico Nacional de México Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, astorga@cenidet.edu.mx

A. Zavala, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, SLP, México, azavala@ipicyt.edu.mx

F. Canales, ABB Corporate Research, Baden, Suiza, francisco.canales@ch.abb.com

aspecto en donde radica la principal aportación del presente artículo: la instrumentación de una bicicleta sin conductor para pruebas experimentales de control automático. Consecuentemente, los resultados presentados muestran, a detalle, una forma simple y eficiente del uso de sensores y actuadores a fin de medir y manipular las variables dinámicas involucradas en el modelo matemático del vehículo. Lo anterior, con el objetivo de proveer al diseñador de una plataforma para implementar, analizar y verificar los diseños de los algoritmos de control automático. El artículo tiene la siguiente distribución: la Sección II presenta una introducción general a la instrumentación del prototipo, incluyendo el modelo matemático considerado. La Sección III aborda la explicación detallada de la instrumentación del sistema. La Sección IV muestra la integración de lo presentado en la Sección III y, finalmente, la Sección V contiene los resultados experimentales de la instrumentación del prototipo. Se incluyen conclusiones en la Sección VI.

II. MODELO MATEMATICO E INTRODUCCION A LA INSTRUMENTACION DEL PROTOTIPO

Note que el generar un prototipo instrumentado permite realizar pruebas experimentales. Como resultado, el diseñador se encuentra listo para aplicar y evaluar los resultados de su diseño, relativos a una específica área de la ingeniería. Lo anterior constituye la principal aportación del presente artículo, el cual tiene el propósito de instrumentar un vehículo de dos ruedas con el objetivo de desarrollar pruebas experimentales de algoritmos de control automático. A fin de instrumentar un prototipo, es importante conocer y analizar el modelo matemático del sistema. A partir de dicha representación, las variables a cargo de la aproximación del comportamiento real del sistema pueden ser identificadas y, en consecuencia, pueden ser tomadas decisiones al respecto de la mejor manera de medirlas y/o manipularlas. Una vez que el diseñador conoce las variables provenientes de la instrumentación, entonces es posible comenzar el diseño de los algoritmos de control. En este sentido, la dinámica de la bicicleta puede ser formulada en términos de un marco general que considera un cuerpo rígido (conductor), un marco frontal compuesto por el manubrio y la correspondiente rueda delantera, y cada una de las ruedas. La representación general de la bicicleta sin conductor es [15][16]:

$$Q\ddot{q} + vW\dot{q} + (gE_0 + v^2E_1)q = f \quad (1)$$

donde Q y W corresponden matrices de masas y amortiguamientos, respectivamente; E_0 y E_1 representan matrices de rigidez y g es la aceleración de la gravedad. Las matrices mencionadas dependen de la geometría del prototipo instrumentado en términos de la velocidad traslacional del vehículo v , involucrada en segundo grado en el modelo matemático generalizado. En (1) y, de acuerdo con lo presentado en la Fig. 1, $q \in \mathbb{R}^2$ corresponde al vector de

posiciones angulares que contiene el ángulo de balanceo ϕ (ángulo comprendido entre el marco de la bicicleta y la vertical) y el ángulo del manubrio δ (ángulo entre el manubrio y la perpendicular, con respecto al marco general), es decir $q = [\phi \ \delta]^T$. $f \in \mathbb{R}^2$ es el vector de entradas generalizadas, compuesto por un par aplicado al manubrio T_δ y un par aplicado al marco general T_ϕ , i.e., $q = [T_\delta \ T_\phi]^T$.

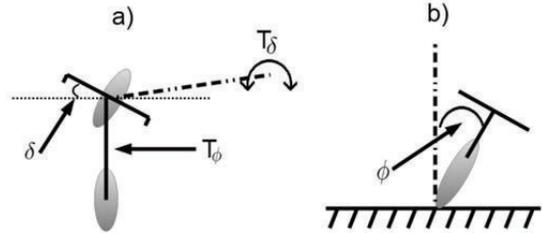


Figura 1. Diagrama de bicicleta sin conductor: a) vista superior de vehículo, b) vista frontal de vehículo.

Definiendo el vector de estados como $x = [\phi \ \delta \ \dot{\phi} \ \dot{\delta}]^T$ y adoptando como única fuerza de entrada el par aplicado al manubrio T_δ , la representación en variables de estado para el sistema dinámico en cuestión es:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(v)x + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2)$$

considerando y como la salida del sistema (variables medidas) y $u = T_\delta$. A partir de (2), se manifiesta la dependencia del sistema en la velocidad traslacional v , involucrada polinomialmente. Como resultado, la representación del sistema (2) se considera dentro de una subclase de los sistemas Lineales Variantes en el Tiempo (LTV, del inglés): los sistemas Lineales de Parámetros Variables en el Tiempo (LPV) [12][13]. En el contexto real, lo anterior involucra el hecho de que la velocidad traslacional del vehículo puede variar dependiendo de las condiciones del suelo en el que éste se encuentre desplazándose. Una vez que el modelo matemático del sistema es conocido, entonces es posible comenzar con la instrumentación del prototipo. Para conseguir esto, se adoptan como salidas del sistema: i) la posición angular del manubrio δ y ii) la velocidad del ángulo de balanceo $\dot{\phi}$. Consecuentemente, el modelo LPV de la bicicleta sin conductor requiere las mediciones de dichas salidas además de la velocidad traslacional, en conjunto con un dispositivo capaz de aplicar el par al manubrio (entrada al sistema (2)). Lo anterior manifiesta la necesidad de tres sensores y un actuador. Adicionalmente, las variables medidas deben ser introducidas en una unidad de adquisición y procesamiento de datos con el fin de su almacenamiento, presentación gráfica y análisis. Lo anterior se consigue a través de una interfase electrónica encargada del acoplamiento de los correspondientes niveles eléctricos proporcionados por

los sensores. En términos generales, la Fig. 2 presenta los elementos involucrados en la instrumentación del prototipo, además de la interconexión entre ellos.

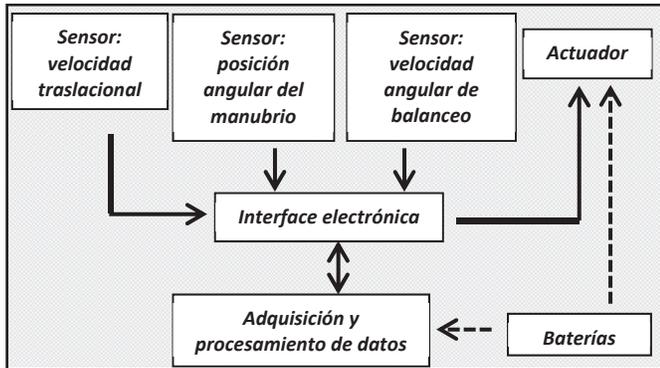


Figura 2. Esquema general de la instrumentación del prototipo de una bicicleta sin conductor.

A partir de la Fig. 2, la unidad de adquisición y procesamiento de datos se encarga de la captura de la información proporcionada por los sensores, además de la generación de la señal de entrada aplicada al sistema a través del actuador. La interfaz electrónica, por su parte, es responsable del acoplamiento de las señales eléctricas provenientes de los sensores, de forma tal que la interacción entre el sistema de adquisición y procesamiento de datos y el resto de la instrumentación pueda ser realizada de manera correcta. A continuación se presentan, a detalle, los componentes involucrados en la instrumentación de la bicicleta sin conductor.

III. INSTRUMENTACION DEL PROTOTIPO DE UNA BICICLETA SIN CONDUCTOR

El prototipo requiere un dispositivo capaz de adquirir, procesar y almacenar los datos provenientes de los sensores, además de generar el par aplicado al manubrio del vehículo. A fin de conseguir dichos objetivos, el sistema de adquisición de datos, denominado PEC800 de ABB, fue utilizado (Fig. 3). El PEC800 es un sistema embebido diseñado especialmente para aplicaciones con la necesidad de tareas de control a altas velocidades, principalmente en el área de electrónica de potencia. Se compone de los siguientes elementos:

- (i) Módulo de procesamiento: es considerado la componente principal del sistema de adquisición de datos. Se basa en un FPGA con una velocidad de procesamiento de 400 Mhz, contiene memorias de tipo flash y RAM de 32 MB y 16 MB, respectivamente.
- (ii) Unidad de comunicación: permite la interacción entre el módulo de procesamiento y los sensores del sistema. Adicionalmente, provee el medio necesario para la programación del sistema vía TCP/IP.
- (iii) Módulo de entradas y salidas: contiene interfaces analógicas y digitales requeridas en el ámbito del

desarrollo de sistemas de control. Se compone de tres entradas analógicas con una resolución de 12 bits y tres salidas analógicas. Adicionalmente, contiene 16 entradas y/o salidas digitales configurables.

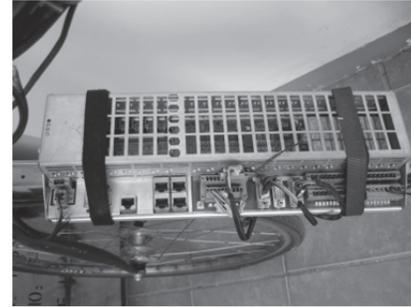


Figura 3. Sistema de adquisición y procesamiento de datos PEC800.

El uso de PEC800 se basa en la idea de simplificar las labores de programación del dispositivo, debido a que ésta se consigue mediante un protocolo de comunicación (Toolbox ABB AC 80PEC) compatible con MATLAB Simulink. Como resultado, la unidad de procesamiento y adquisición de datos PEC800 permite la programación de los algoritmos de control diseñados de forma más simple, debido a que MATLAB Simulink es considerado como una herramienta conocida para la simulación y el análisis de resultados de diseños dentro del área de control automático. La interfaz electrónica, por su parte, se encarga del acondicionamiento de las señales eléctricas provenientes de los sensores del sistema, a fin de asegurar la comunicación entre el sistema de adquisición y procesamiento de datos y los sensores. Adicionalmente, acondiciona la señal proveniente del sistema de adquisición y procesamiento de datos hacia el actuador del sistema. En términos generales, se compone amplificadores operacionales, un microcontrolador y un optoacoplador. La Fig. 4 muestra el esquema generalizado de dicha interfaz electrónica.

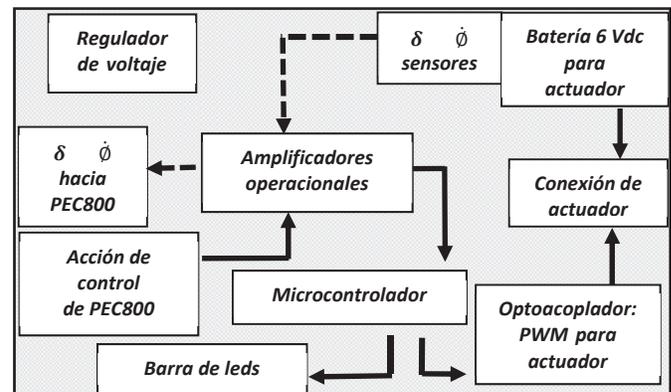


Figura 4. Diagrama a bloques de interfaz electrónica.

Para su explicación, la interfaz electrónica se divide en dos secciones (referir Fig. 4 y Fig. 5):

- (i) Sección de acondicionamiento de señales de sensores (líneas punteadas): esta sección provee, a su salida, las señales eléctricas proporcionadas por los sensores listas para ser adquiridas por el PEC800 (entradas analógicas). Las salidas de los sensores encargados de las mediciones de la velocidad del ángulo de balanceo y el ángulo del manubrio, son recibidas por un conjunto de amplificadores operacionales configurados como seguidores de voltaje, con el objetivo de hacer frente a posibles problemas de impedancias. Finalmente, sus salidas se enlazan directamente con la unidad de adquisición y procesamiento de datos. Dicho conjunto se energiza de un regulador de voltaje (5 Vdc) con el fin de garantizar su funcionalidad, a partir de un voltaje de corriente directa de 24 Vdc proveniente del sistema de adquisición y procesamiento de datos.
- (ii) Sección de acondicionamiento de la señal para el actuador del sistema (líneas continuas): involucra la acción del microcontrolador. Dicho componente, cuya energía proviene del regulador de voltaje, es utilizado para acondicionar la señal hacia el actuador. El PEC800 genera la acción de entrada al sistema (2) a través del actuador en una señal eléctrica de corriente directa, mientras que el actuador del sistema opera en base a una señal de tipo modulador de ancho de pulso (PWM, del inglés). Así, el microcontrolador recibe un voltaje de corriente directa y lo transforma proporcionalmente a un ancho de pulso, de forma tal que el actuador varíe su par y posición. Como resultado, la señal PWM es aplicada directamente al actuador, a través de un optoacoplador a cargo del aislamiento del voltaje de alimentación para dicho componente (batería de 6 Vdc) y el voltaje de alimentación general proveniente del PEC800. La barra de leds, finalmente, permite visualizar los cambios en la señal aplicada al actuador.

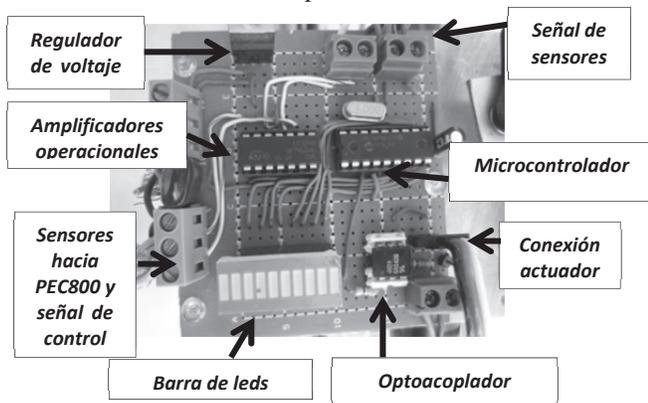


Figura 5. Interfaz electrónica.

La instrumentación requiere de un dispositivo capaz de generar y aplicar la energía de entrada al sistema. Para efectos

de asegurar dicha aplicación, un servomotor fue incluido como parte del prototipo. Este componente permite el cambio de la posición angular del manubrio y la modificación del par aplicado. Note que la posición angular del manubrio es, a su vez, una variable medible del sistema (abordada posteriormente). Dicho servomotor es colocado cerca de la interface electrónica, en conjunto con una pieza de metal acoplada al rotor del mismo (ver Fig. 6). La pieza de metal, a su vez, se enlaza al eje del manubrio. Como resultado, en el momento de la variación de la señal de entrada requerida para el sistema proveniente del PEC800, convertida al correspondiente ancho de pulso por el microcontrolador, será generado el cambio de la posición del rotor del servomotor y, consecuentemente, la aplicación del par al manubrio de la bicicleta.

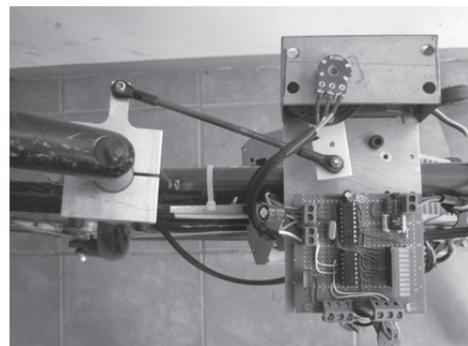


Figura 6. Actuador de sistema y su correspondiente acoplamiento mecánico: servomotor.

Finalmente, se presenta la explicación de los sensores utilizados para la medición de las variables dinámicas involucradas en el sistema de la bicicleta sin conductor. Note que las variables de salida medibles corresponden a la posición angular del manubrio δ y la velocidad angular del balanceo $\dot{\phi}$, además de la velocidad traslacional del vehículo v . Con el objetivo de la medición de la velocidad del ángulo de balanceo, el dispositivo seleccionado es un giroscopio (Fig. 7).

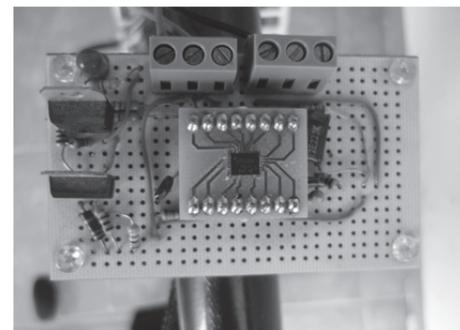


Figura 7. Giroscopio: sensor de la velocidad de ángulo de balanceo $\dot{\phi}$.

Dicho componente genera una señal eléctrica proporcional a la velocidad del cambio en la posición angular del balanceo de la

bicicleta con respecto a la vertical. En otras palabras, considerando dicho giroscopio, se consigue la medición de la variable $\dot{\theta}$ directamente en $\frac{\circ}{s}$, lista para ser enlazada con la unidad de adquisición y procesamiento de datos. Lo anterior se consigue una vez que el correspondiente acondicionamiento de señal ha sido realizado por los amplificadores operacionales incluidos en la interface electrónica. La medición de la posición angular del manubrio, por su parte, se realiza a través de un potenciómetro acoplado mecánicamente al rotor de servomotor. Note que la posición del rotor del actuador del sistema permite la manipulación de la posición del manubrio a través del acoplamiento mecánico presentado en la Fig. 5, de forma tal que dicha posición es proporcional a la posición angular del manubrio.

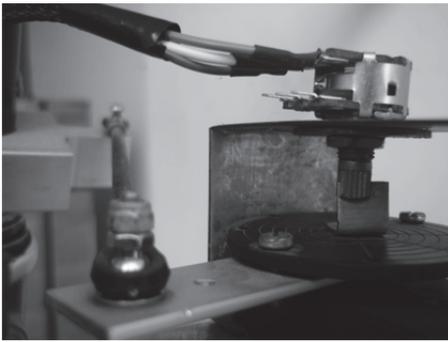


Figura 8. Potenciómetro: sensor de la posición angular del manubrio δ .

A partir de la Fig. 8, es posible visualizar el sensor encargado de la medición del ángulo del manubrio. Note el potenciómetro acoplado a la flecha del rotor cuya resistencia varía en función de la posición del mismo. Así, un arreglo resistivo compuesto por un resistor fijo y el generado por el movimiento del servomotor, reflejado en la posición angular del manubrio a través de la pieza mecánica mostrada, permite la construcción de un divisor de voltaje proporcional al ángulo del manubrio δ . En otras palabras, una vez que el movimiento del manubrio ha sido realizado a consecuencia de la aplicación de la señal de control proveniente del sistema de adquisición y procesamiento de datos, el potenciómetro cambiará su posición y, consecuentemente, su resistencia. A partir del divisor de voltaje, la diferencia de potencial resultante, medida en el nodo interno del arreglo, es proporcional al ángulo del manubrio. A fin de determinar la velocidad traslacional v , finalmente, se utiliza un encoder de efecto Hall acoplado a la rueda trasera del vehículo. Dicho sensor genera una frecuencia proporcional a la velocidad de traslación a partir del paso de un conjunto de piezas de material ferroso por el mismo, posicionadas en la cara interna de la rueda trasera (ver Fig. 9). Así, conocido el número de piezas metálicas acopladas a la rueda trasera (36), el diámetro interno (Rw) de la misma y la señal proveniente del sensor de efecto hall F , una subrutina programada dentro de la unidad de adquisición y

procesamiento de datos permite conocer la velocidad traslacional del vehículo.



Figura 9. Encoder: sensor de la velocidad traslacional v del vehículo.

La velocidad traslacional del vehículo se determina:

$$v = F \frac{2\pi Rw}{36} \quad (3)$$

La frecuencia generada por dicho sensor se enlaza directamente con las entradas digitales del módulo de entradas y salidas del sistema de adquisición y procesamiento de datos. Lo anterior permite, considerando una subrutina programada en dicha unidad con base de tiempo fija, determinar la frecuencia de la señal y la velocidad traslacional del vehículo a partir de (3).

IV. INTEGRACION DE LOS COMPONENTES DE LA INSTRUMENTACION DEL PROTOTIPO

La presente sección aborda la integración de los componentes de la instrumentación detallados en la sección anterior, con el objetivo de la explicación relativa a la colocación, en el prototipo, de cada uno de ellos. El sensor encargado de la medición de la velocidad traslacional del vehículo se aprecia en la Fig. 10E, en contacto con la rueda trasera que contiene el conjunto de piezas metálicas. La unidad de adquisición y procesamiento de datos, por su parte, se coloca en la sección inferior del marco general de la bicicleta (referir A), a la cual convergen todas las señales de la instrumentación del prototipo. El giroscopio, encargado de la medición de la velocidad del ángulo de balanceo presentado en la Fig. 10D, se coloca en el marco general de la bicicleta, de forma tal que el balanceo del sistema generará el cambio en la señal eléctrica de su salida. Las secciones B-C en la imagen referida, identifican las posiciones de la interface electrónica y el servomotor considerado y, finalmente, un conjunto de baterías recargables de 24 Vdc y 6 Vdc se colocan en la sección trasera (F). Dichas baterías entregan la energía eléctrica requerida para el funcionamiento de la unidad de adquisición y procesamiento de datos (24 Vdc) y el servomotor o actuador del sistema (6 Vdc). En conjunto, los elementos mencionados permiten pruebas experimentales considerando, al prototipo, como un prototipo autónomo.

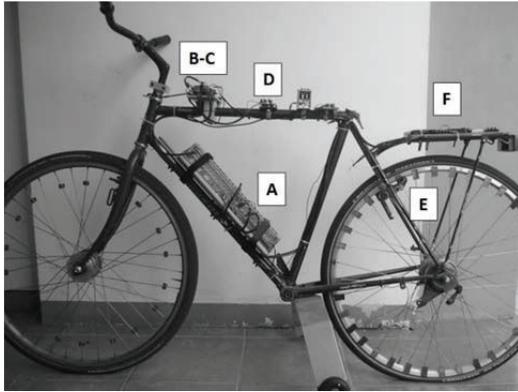


Figura 10. Integración de la instrumentación del prototipo de una bicicleta sin conductor.

V. VALIDACION DE LA INSTRUMENTACION DEL PROTOTIPO

La presente sección muestra los resultados experimentales relativos a la instrumentación del prototipo, utilizando la memoria de la unidad de adquisición y procesamiento de datos para el almacenamiento de las señales provenientes de dicha instrumentación. Una vez finalizada la prueba, los datos almacenados son recuperados y graficados para su validación y análisis. La Fig. 11 presenta la velocidad traslacional adquirida, la señal de control (entrada al sistema (2)) generada por el PEC800 para el actuador del sistema (servomotor) y la posición angular del manubrio.

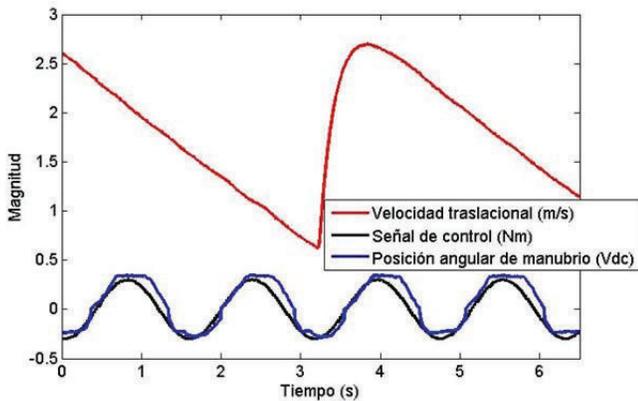


Figura 11. Resultados experimentales de la instrumentación del prototipo: velocidad traslacional, señal de control y posición angular de manubrio.

A partir de la Fig. 11, es posible visualizar los resultados experimentales de los sensores encargados de la medición de la velocidad traslacional del vehículo y la posición angular del manubrio. Para la presente prueba, impulsos aplicados manualmente en la rueda trasera permiten simular el movimiento traslacional de la bicicleta, aplicados al inicio de la prueba y en $t=3.2$ s. Adicionalmente, se presenta la variación de la posición angular del manubrio directamente en términos de la señal eléctrica proveniente del sensor (potenciometro acoplado a la flecha del rotor de servomotor),

como consecuencia de la aplicación de la señal de control generada en el PEC800. Dentro de la unidad de adquisición y procesamiento de señales, se genera una señal de tipo senoidal, manifestada en la salida analógica de dicha unidad. La señal de control es traducida en una señal de tipo modulador de ancho de pulso y aplicada, a través del optoacoplador, al servomotor del sistema. Dicha señal de control se incluye en la Fig. 11. La Fig. 12, por su parte, muestra la posición angular del manubrio y la velocidad del ángulo de balanceo proveniente del giroscopio utilizado. Note que la posición angular del manubrio, a diferencia del presentado en la Fig. 11, se grafica en radianes (rad).

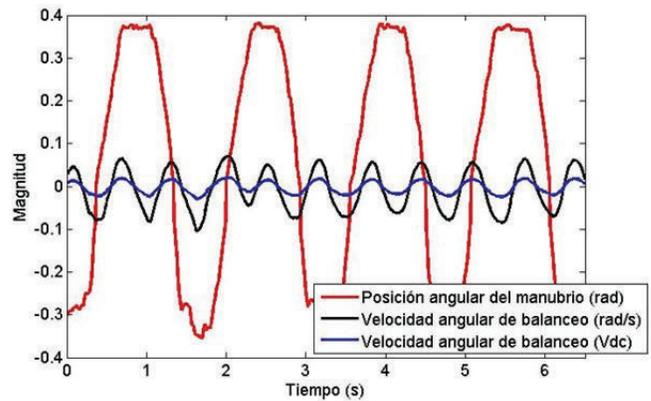


Figura 12. Resultados experimentales de la instrumentación del prototipo: posición angular del manubrio y velocidad angular de balanceo.

Para efectos de validar la correcta operación del giroscopio a cargo de la medición de la velocidad del ángulo de balanceo, se aplica un movimiento manual en el marco general del vehículo, tomando como condición inicial su postura vertical. Note que, en efecto, dicho movimiento manual (par aplicado) se considera como parte de la representación generalizada del modelo matemático de la bicicleta, presentado en la ecuación (1). En la Fig. 12, las gráficas relativas a la velocidad del ángulo de balanceo se muestran considerando la señal eléctrica directamente generada en el sensor en corriente directa, misma que, dentro de la unidad de adquisición y procesamiento de datos es transformada a radianes por segundo (rad/s). Lo anterior se basa en las condiciones operativas del sensor, debido a que provee, a su salida, una variación en la velocidad de 10 mV por grado por segundo. Consecuentemente, a partir de dicho dato, es posible manipular de forma simple la señal con unidades de grados por segundo a radianes por segundo. Finalmente, la Fig. 13 presenta el software utilizado en Matlab Simulink para las pruebas experimentales, a manera de referencia para la comprensión de la obtención de los resultados presentados con anterioridad. Los recuadros en color blanco implican configuraciones internas requeridas para la operación del FPGA relativas, principalmente, a registros de entradas y salidas. En la imagen referida, el recuadro en la sección

central izquierda en color naranja, contiene la subrutina encargada de la determinación de la velocidad traslacional de vehículo, mientras que los recuadros en color azul presentan lo involucrado en la señal de entrada al sistema y su aplicación en el convertidor digital-analógico. Note que las líneas de conexión de dicho elemento comienzan con la señal senoidal aplicada. El recuadro en color magenta ubicado en la parte central derecha de la Fig.13, por su parte, presenta el elemento encargado del almacenamiento de los datos presentados en la Fig. 11 y Fig. 12.

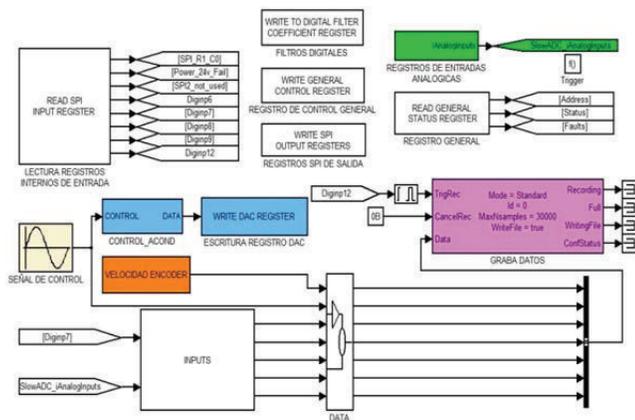


Figura 13. Programa en Simulink utilizado en pruebas experimentales.

Como resultado, la instrumentación del prototipo se considera funcional y práctica para la implementación de algoritmos de control automático.

VI. CONCLUSIONES

El presente artículo aborda una solución simple pero efectiva para la medición de las variables dinámicas involucradas en el modelo matemático de una bicicleta sin conductor. Como resultado, el prototipo instrumentado permite la validación experimental de algoritmos de control diseñados dentro del contexto del control automático; considerando su implementación y análisis. La efectividad del presente se concluye a partir de resultados experimentales.

REFERENCIAS

[1] W. Rankine, On the dynamical principles of the motion of velocipedes, *Enginner-London* 28 (1869) 79, 129, 153, 175.
 [2] D. Andreo, M. Larsson, V. Cerone, D. Legruto, Stabilization of a riderless bicycle: A Linear Parameter Varying Approach, *IEEE Control Systems Magazine* 30 (2010) 23-32.
 [3] K. Astrom, R. Klein, A. Lennartsson, Bicycle dynamics and control, *IEEE Control System Magazine*, 25-4 (2005) 26-47.
 [4] N. Getz, J. Marsden, Control for an autonomous bicycle, in *Proc. IEEE International Conference Robot* (1995) 1397-1402.
 [5] M. Yamakita, A. Utano, Automatic control of bicycles with a balancer, in *Proceedings on IEEE/ASME Conf. Advanced intelligent Mechatronics* (2005) 1245-1250.
 [6] N. Umashankar, H. Sharma, Adaptive neuro-fuzzy controller for stabilizing autonomous bicycles, in *Proc. IEEE Conference on Robotics and Biomimetics* (2006) 1652-1657.
 [7] L. Guo, Q. Liao, S. Wei, Design of fuzzy sliding mode controller for bicycle robot nonlinear system, in *Proc. IEEE Conf. Robotics and Biomimetics* (2006) 176-180.

[8] L. Keo, M. Yamakita, Controlling balancer and steering for bicycle stabilization, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2009) 4541-4546.
 [9] Y. Yavin, The derivation of a kinematic model from the dynamic model of the motion of a riderless bicycle, *Comput Math Appl* 51-6-7 (2006) 865-878.
 [10] Y. Yavin, Modelling and control of the motion of a riderless bicycle rolling on a moving plane (2007), *Computed athematical Applications* 54-11-12 (2007) 1319-1328.
 [11] J. K. Moore, M. Hubbard, A. L. Schwab, J. D. G. Kooijman, D. L. Peterson, *Statistics of Bicycle Rider Motion* (2010), *Procedia Eng* (2010) 2937-2942.
 [12] F. Amato, *Robust Control of Linear Systems Subject to Uncertain Time-Varying Parameters*, *Lect Notes Contr Inf*, SPRINGER.
 [13] R. Tóth, *Modeling and Identification of Linear Parameter-Varying Systems*, *Lect. Notes Contr Inf*, SPRINGER.
 [14] J. Mohammadpour, C. W. Scherer, *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*, Springer.
 [15] A.L. Schwab, J.P. Meijaard, J. M. Papadopoulos. Benchmark results on the linearized equations of motion of an uncontrolled bicycle, *J Mech Sci Technol* 19-1 (2005) 292-304.
 [16] J. Kooijman, A. Schwab, J. Meijaard, Experimental validation of a model of an uncontrolled bicycle, *Multibody Systems Dynamics*, 19-1 (2008) 115-132.
 [17] D. L. Peterson, J. K. Moore, D. Fintelmana, M. Hubbard, Low-power, modular, wireless dynamic measurement of bicycle, *Procedia Engineering*, 2-1 (2010) 2949-2954.



Dr. Jorge Aurelio Brizuela-Mendoza was born in Guadalajara, Jalisco, Mexico, October 1984. He received the B.S. degree in Electronic from Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán, Cd. Guzmán, Jalisco, Mexico. In 2003, the M.Sc. in Mechatronics degree from Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Mexico. In 2015, he received the Ph. D. in Eletronic from the previos mentioned institution. He works has a full-time professor in Centro Universitario de los Valles (CUvalles), Universidad de Guadalajara, Ameca, Jalisco, Mexico.



Dr. Carlos Manuel Astorga-Zaragoza was born in Cd. Minatitlán, Veracruz, Mexico, in 1967. He is an Electronic Engineer graduated in 1990 from the Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz, Mexico. He received the degree of Master of Science in Electronic Engineering at the National Center for Research and Technological Development (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, Mexico, in 1993, and the degree of Doctor of Process Engineering at the University of Lyon 1 in France October 2001. In 2009, held a postdoc in Automatic Control at the University of Nancy 1 in France.



Dr. Arturo Zavala-Rio received his B.S. degree in Electronic Systems Engineering and M.S. degree in Control Engineering from the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Mexico, in 1989 and 1992 respectively, and his D.E.A. and Ph.D. degrees in Automatic Control from the Institut National Polytechnique de Grenoble, France, in 1994 and 1997, respectively. He held professor-researcher positions at Universidad Autonoma de Queretaro (1999-2000), Mexico, and Universidad Autonoma de San Luis Potosi (2001), Mexico. He has been visiting researcher at Mechanical Engineering Laboratory (1998), Japan, and Universite de Technologie de Compiègne (2001-2002), France. Since 2002, he is a full-time researcher at the Instituto Potosino de Investigacion Cientifica y Tecnologica, Mexico. His research topics focus on the modelling, analysis, and control of nonlinear systems.



Dr. Francisco Canales-Abarca received the degree of mechanical-electrician engineer from Universidad Veracruzana in the year 1992 and Master of Science degree in Electronic Engineering by the National Center for Research and Technological Development in 1996. He has a doctorate degree in philosophy from the Virginia Polytechnic Institute and State University (2003). Currently, he works as a Research Fellow at ABB Corporate Research, located in Baden, Switzerland.