

Identificación y Diseño del Controlador para un Sistema de Control de Velocidad Tipo Crucero en un Vehículo

Paulo César Daqui Loureiro⁽¹⁾, Víctor André Sotomayor Paredes⁽²⁾,
Juan Carlos Suarez Luque⁽³⁾, César Martín Moreno, MSc⁽⁴⁾
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)^{(1) 2) (3)(4)}
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)^{(1) 2) (3)(4)}
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

pdaqui@espol.edu.ec⁽¹⁾, vsotomay@espol.edu.ec⁽²⁾, jlsuarez@espol.edu.ec⁽³⁾, cmartin@espol.edu.ec⁽⁴⁾

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo general encontrar el modelo matemático de una bicicleta eléctrica con motor de corriente continua, haciendo uso de la técnica de identificación de sistemas, para luego poder diseñar e implementar un controlador sencillo.

Para el desarrollo del experimento se hizo uso de varias herramientas, tanto teóricas como tecnológicas, se planteó el diseño de la solución bajo ciertas limitantes, y se armó un sistema de captura de datos; en primera instancia se realizó un análisis no paramétrico, con la finalidad de tener la información necesaria para luego diseñar una señal de entrada, con la cual obtener una función de transferencia para dicha planta mediante el uso de modelos paramétricos, donde la entrada del sistema es el voltaje en el acelerador de la bicicleta y la salida la velocidad de desplazamiento de la misma. El proyecto finalizó con el diseño de un controlador para la planta, el mismo que fue sometido a pruebas simuladas y reales.

A partir de los resultados obtenidos durante el experimento, se elaboraron diversas conclusiones, siendo la más importante que se cumplió con el objetivo general del proyecto, además se plantearon diferentes recomendaciones.

Palabras Claves: *Identificación de Sistemas, Señal de Entrada, Señal de Salida, Función de Transferencia.*

Abstract

This work has as overall objective to find the mathematical model of an electric bicycle that works with a DC motor using the system identification technique and then to design and to deploy a simple controller.

For the development of the experiment several tools were used, both theoretical and technological, it was proposed the design of the solution under certain constraints and a data acquisition system was set up; initially a nonparametric analysis was performed, in order to obtain the required information for the design of an input signal which is useful to obtain a transfer function for the plant by means of parametric models, where the system input is the voltage at the bicycle's throttle and the output is the velocity of displacement of the bike. The project ended with the design of a controller for the plant, which was evaluated via simulated and real tests.

From the results obtained during the experiment, we made some conclusions, the most important is that the objective of the project was reached, also various recommendations were made.

Keywords: *Systems Identification, Input Signal, Output Signal, Transfer Function*

1. Introducción

El presente trabajo trata sobre la identificación de un sistema de velocidad tipo crucero para un vehículo, y el posterior diseño de un controlador.

Se escogió una bicicleta eléctrica con motor de corriente continua como la planta en torno a la cual se desarrolló el experimento, se realizó un análisis paramétrico, se diseñó una señal de entrada al sistema y se procedió a la estimación de la función de transferencia de la planta mediante modelación paramétrica.

Una vez obtenida la función de transferencia de la planta, se procedió a diseñar el controlador el cual fue sometido a diferentes pruebas, las que fueron registradas y analizadas.

2. Herramientas tecnológicas y teóricas utilizadas.

Dentro de los principales herramientas tecnológicas utilizadas tenemos:

- El software MATLAB.
- Una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-6009 de National Instruments.
- Un sensor magnético.
- Nueve imanes de 3 x 0.8 cm.

Mientras que dentro de los conceptos teóricos tenemos principalmente:

- La técnica de Identificación de Sistemas.
- Teoría de control.
- Conocimientos sobre uso del software Matlab.

3. Análisis de la planta

Uno de los requerimientos del proyecto era el de trabajar con un vehículo, el cual sería la planta donde se realizaría la identificación, para esto se utilizó una bicicleta eléctrica.

3.1 Elementos físicos de la planta

Se empleó un sensor magnético e imanes que fueron colocados en los radios de la rueda trasera de la bicicleta para capturar pulsos cada vez que un imán pase frente al sensor; además con la finalidad de realizar el experimento sin la necesidad de que el vehículo se desplace, se hizo uso de un banco de pruebas de marca Kinetic, utilizado por ciclistas en sus entrenamientos, como se puede ver en la figura 1.



Figura 1. Vista general de la planta.

3.2 Limitaciones del experimento

Es importante mencionar que debido al uso del banco de prueba, se dejó de lado la influencia de la resistencia del aire ante el movimiento de la bicicleta, así como también las variaciones de la fricción entre las ruedas y el terreno, así como, la contribución del pedaleo, entre los más relevantes.

También se podría ver al rango de operación del motor como una de las limitantes, debido que éste trabaja entre los 0.8 y 4.2 voltios, aunque al ingresar un voltaje mayor a 3.8 voltios recae en zona de saturación.

Para minimizar cualquier variación en el comportamiento de la planta, producto de la descarga de la batería de la bicicleta, ésta se mantuvo conectada al cargador durante todo el experimento, y se le dio el tiempo necesario para recargarse después de cada captura de datos.

3.3 Respuesta al escalón

Se diseñó una señal de tipo escalón con una amplitud de 3.5 voltios, la cual fue aplicada a la planta; sin embargo luego con el transcurso del experimento, específicamente en la etapa del diseño de las posibles señales de entrada, se encontró que si bien se obtenían los datos de la respuesta del sistema ante ésta señal, se encontraron problemas debido a que no se había considerado como se comportaría la salida al momento de dejar de aplicar un voltaje a la entrada.

Cuando se probó señales que dejaban de suministrar voltaje a la planta por un tiempo considerable se observó que la salida demoraba mucho en responder (disminuir la velocidad): dicho

comportamiento se debía a la inercia de la rueda. Para contrarrestar éste fenómeno se aplicó fricción en la llanta, con la finalidad de obtener una salida que responda en un tiempo similar ante un incremento o un decaimiento de voltaje en la entrada del sistema. Es importante mencionar que se mantuvo fricción durante todo el experimento para contrarrestar dicho suceso.

Para observar la respuesta, se diseñó una entrada de tipo escalón con una amplitud de 3.5 voltios y de 25 segundos de duración, con la finalidad de observar la respuesta del sistema ante los cambios repentinos de voltaje, obteniendo lo siguiente en la Figura 2

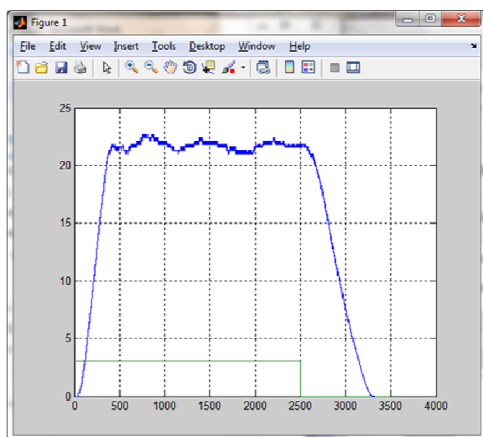


Figura 2. Respuesta al escalón.

Se puede observar que la señal de salida no se estabiliza en un valor constante, sino que varía, esto se debe a diversos factores, tales como el tipo de sensor utilizado y que el trabajo fue realizado sobre una planta real, por lo que se asumió un valor de estabilización de 22 kph, el 63.2% de dicho valor es de 13.904 Kph; por lo tanto tenemos que:

- $\tau_1 = 2.65$ segundos
- $\tau_2 = 3.68$ segundos.

Donde τ_1 y τ_2 se los encontró gráficamente, en el ascenso y en el descenso de la señal de salida, respectivamente.

4. Diseño de la señal de entrada

Se diseñaron posibles señales de entrada tomando en cuenta las consideraciones pertinentes, por lo que se usaron los siguientes tipos de diseño:

- Secuencia Binaria (RBS)
- Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)
- Señal multi-senoidal.

Para generar dichas señales se hizo uso del Input Design GUI, herramienta diseñada en Matlab por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun.

5. Proceso de selección de la señal de entrada

De las señales que se generaron, se escogió para el siguiente análisis las 3 mejores por cada tipo de señal de entrada; a continuación en la Tabla 1 se muestran sus diseños y resultados:

Tabla 1. Diseño de señales de entrada.

Secuencia Binaria Aleatoria (RBS)					
	Duración de la señal	Probabilidad de conmutación	Tiempo de Conmutación		
RBS1	600	0.5	2.5		
RBS2	660	0.5	2.2		
RBS3	592	0.5	1.6		
Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)					
	No. de Ciclos	α	β	T_{dom}^{Lo}	T_{dom}^{Hi}
PRBS1	19	2	3	2.65	3.68
PRBS2	15	2	3	1.5	1.65
PRBS3	29	3	3	2.65	3.68
Señal Multi-sinusoidal					
	No. de Ciclos	α	β	T_{dom}^{Lo}	T_{dom}^{Hi}
MULTSIN1	19	2	3	2.65	3.68
MULTSIN2	38	4	3	2.65	3.68
MULTSIN3	29	3	3	2.65	3.68

5.1. Análisis de las señales de entrada utilizando la herramienta CRA.

Antes de escoger la señal de entrada se analizó el grado de relación entre ésta y la señal de salida, así como el tipo de relación existente entre éstas mismas, para lo cual se utilizó la función CRA del software Matlab.

A continuación se muestra el gráfico obtenido, del análisis, con la señal PRBS3:

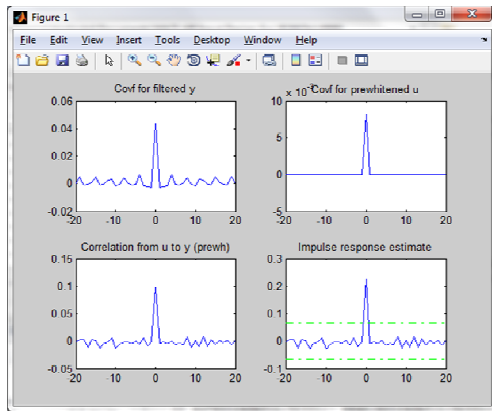


Figura 3. Función cra (prbs3OUT, 20, 10,2).

Con ésta señal de entrada, pese a haber aplicado un pre-blanqueado, hasta un período atrás “k=1” ésta no se asemeja mayormente al ruido blanco, ya que sí posee cierta relación con valores anteriores; siendo diferente para otros periodos donde son independientes sus comportamientos.

Únicamente hay una gran relación si se compara la señal en un tiempo con la misma señal en el mismo tiempo “k=0” (resultado esperado), Las conclusiones para la señal de salida son parecidas a las hechas anteriormente para la señal de entrada, debido a que ésta no posee mucha dependencia con respecto a sus valores anteriores.

En éste gráfico se puede ver la relación que hay entre la salida y la entrada para los diversos períodos, pese a que no hay una gran influencia de los valores anteriores de la entrada con respecto al valor actual de la salida, su valor actual sí lo afecta, por lo que satisfactoriamente se puede concluir que sí hay un relación entre ambas señales, brindando confianza para realizar los análisis posteriores.

5.2. Señales seleccionadas.

Luego de analizar todas las posibles señales de entrada, se llegó a la conclusión de que los grupos de las señales PRBS y multi-sinusoidal, presentaban ligeramente mejores resultados por sobre las RBS, por lo que se descartó a dicho grupo de señales. Sin embargo se debe mencionar que los resultados obtenidos en ésta etapa del experimento, no brindaron la guía esperada, esto debido a que producto de la forma de captura, y procesamiento de la señal de salida, existe un retardo inherente en el sistema, el cual es el causante de que el análisis de correlación y

la respuesta al escalón, realizados en el análisis no paramétrico sean difíciles de interpretar.

Debido a las características de la planta, en la cual no es crítico el hecho de variar abruptamente el voltaje de la señal de entrada, ni se produce un desgaste significativo de los actuadores, se escogió el grupo de las 3 señales PRBS.

6. Estimación de la función de transferencia del sistema mediante análisis paramétrico

Éste análisis es el último paso para la identificación de un sistema; como primera parte del mismo se procedió a obtener diversas estimaciones preliminares, con el propósito de escoger la que mejor se ajuste a los criterios de validación establecidos más adelante, y así obtener la función transferencia del sistema, los métodos paramétricos utilizados fueron los siguientes:

- ARX
- ARMAX
- FIR
- BOX-JENKINS
- ERROR DE SALIDA

6.1. Elección del modelo más conveniente.

ARX: Como se puede observar en la tabla 2, el porcentaje de similitud de las estimaciones realizadas con éste modelo es demasiado bajo como para ser consideradas.

Tabla 2. Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARX).

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de transferencia
ARX 101010	25.38	Auto correlación fuera de intervalos de confianza.	10 polos, 10 ceros, retardo
ARX 10210	23.67		10 polos, 2 ceros, retardo
ARX 5110	19.91		5 polos, 1 cero, retardo
ARX 4110	18.58		4 polos, 1 cero, retardo
ARX 9110	22.91		9 polos, 1 cero, retardo
ARX 8110	20.84		8 polos, 1 cero, retardo
ARX 3110	20.67		3 polos, 1 cero, retardo
ARX 1110	28.58		1 polo, 1 cero, retardo

ARMAX: Como se puede observar en la tabla 3, se tienen estimaciones con un porcentaje de similitud parecido, de éstas destacan: ARMAX:3,2,2,1; ARMAX:3,2,2,3 y ARMAX:3,3,2,2; sin embargo se tomó en cuenta el concepto de parsimonia y se escogió a la ARMAX:2,2,2,2, ver figura 4.

Tabla 3. Análisis de las estructuras generadas (Modelo ARMAX).

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de transferencia
ARMAX 2,2,2,1	65.31	Auto correlación fuera de intervalos de confianza.	2 polos, 2 ceros.
ARMAX 2,2,2,2	65.45		
ARMAX 2,2,3,1	65.33		
ARMAX 2,2,3,2	65.44		
ARMAX 2,3,2,1	65.49		2 polos, 3 ceros.
ARMAX 2,3,3,1	65.48		
ARMAX 2,3,3,2	65.54		
ARMAX 2,3,3,3	65.93		3 polos, 2 ceros.
ARMAX: 3,2,2,1	67.79		
ARMAX: 3,2,3,1	65.27		
ARMAX: 3,2,3,2	65.33		
ARMAX: 3,2,3,3	65.41		3 polos, 3 ceros.
ARMAX: 3,2,2,3	67.88		
ARMAX: 3,3,2,2	67.89		
ARMAX: 3,3,3,1	65.46		
ARMAX: 3,3,3,2	65.46		
ARMAX: 3,3,3,3	65.88		

Como soporte adicional a ésta decisión, se recalca que si bien las tres estructuras mencionadas al principio tienen un mejor porcentaje de similitud, no superan significativamente al de la estructura seleccionada (2.44% en el mayor de los casos).

En la Figura 5, resalta el hecho de que la Auto correlación de los residuos de la salida, se encuentra fuera del intervalo de confianza en varios tramos de la gráfica, esto se debe a las características propias de la planta que al ser real involucra una gran cantidad de

ruido, que también es generado por los sensores utilizados; sin embargo se obtuvo una gráfica que muestra variaciones lo que indica que no hay correlación entre los residuos de la salida, que es lo que se busca.

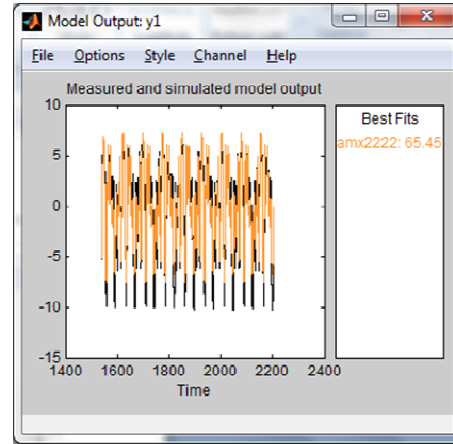


Figura 4. Porcentaje de similitud de la estructura seleccionada..

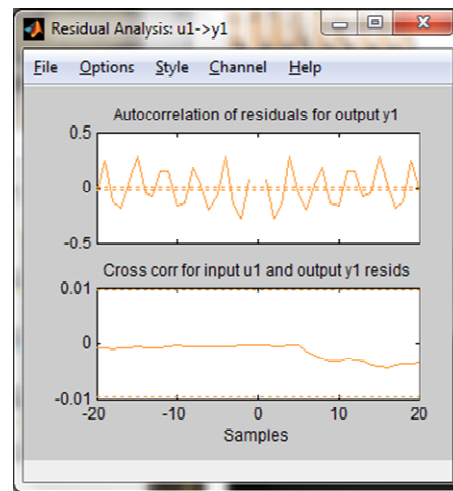


Figura 5. Análisis residual de la señal escogida.

ERROR DE SALIDA: En éste modelo se parametriza por separado la entrada y el ruido, sin asignar coeficientes para el modelo del mismo.

Se obtuvieron estimaciones con un buen porcentaje de similitud, pero con funciones de transferencia con mayor número de polos comparada con la ARMAX 2,2,2,2, siendo OE233 la mejor; debido a que la diferencia en el porcentaje de ajuste entre éstas dos no es significativa (3.84 %), se optó por continuar con la estimación antes escogida.

Tabla 3. Análisis de las estructuras generadas (Modelo Error de Salida).

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de transferencia
OE433	69.42	Auto correlación fuera de intervalos de confianza.	4 polos, 3 ceros
OE432	69.41		
OE343	69.37		
OE244	69.31		4 polos, 4 ceros
OE233	69.29		3 polos, 2 ceros
OE243	69.08		4 polos, 3 ceros
OE442	68.84		
OE424	68.77		
OE421	68.76		
OE422	68.76		
OE323	68.76		
OE321	69.74		

BOX-JENKINS: Se encontraron buenos porcentajes de similitud, sin embargo como se puede observar en la tabla 4, los resultados son parecidos a los conseguidos anteriormente con el modelo Error de salida, con porcentajes de similitud cercanos al 69%, por lo que se aplicó el mismo criterio, es decir el de parsimonia y se mantuvo a la ARMAX 2,2,2,2.

Tabla 4. Análisis de las estructuras generadas (Modelo Box Jenkins).

Señal	% de similitud	Análisis residual	Función de transferencia
BJ 23331	69.42	Auto correlación fuera de intervalos de confianza.	3 polos, 2 ceros
BJ 22331	69.41		
BJ 22332	69.37		
BJ 23232	69.08		
BJ 23233	68.84		
BJ 33332	68.77		
BJ 33232	68.76		
BJ 32332	68.76		
BJ 33331	68.76		
BJ 33333	69.74		

FIR: De éste modelo se obtuvieron los más bajos porcentaje de similitud, por lo que no fueron consideradas ninguna de éstas estimaciones.

6.2. Función de transferencia del Sistema.

Como ya se mencionó anteriormente, la mejor representación de la planta es la ARMAX 2,2,2,2 obtenida a través de MatLab. Como resultado final se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{-0.24478 (s - 5.965)}{(s^2 + 0.4792s + 0.2397)}$$

7. Diseño del controlador

Se procedió al diseño del controlador, haciendo uso de la herramienta Sisotool de Matlab, donde se realizó el análisis de la trayectoria de las raíces, y diversas pruebas hasta encontrar la función de transferencia del compensador. El esquema a utilizar (lazo cerrado), será el siguiente:

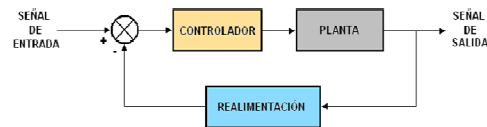


Figura 6. Sistema en lazo cerrado.

Mediante el comando sisotool(G) se obtuvo la siguiente trayectoria de raíces:

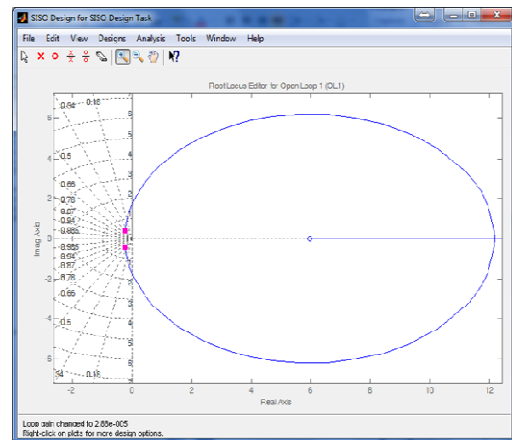


Figura 7. Trayectoria de las raíces..

Se observa los 2 polos (imaginarios con parte real negativa) de la función de transferencia, los cuales se encuentran muy cerca al origen, esto sumado al hecho de que se tiene también un cero a la derecha, son indicadores de que el sistema es de alto riesgo.

7.1. Metas de control.

La incorporación del controlador, tiene como objetivo minimizar el tiempo de estabilización, definir un nivel sobre nivel porcentual bajo, y tener un porcentaje de error estacionario cercano a cero, a continuación se presentan las metas de control propuestas:

- Mejorar el sobrenivel porcentual de 17.2% a 5%.
- Mejorar el tiempo de estabilización (menor a 20 %).
- Eliminar el error de estado estable.(menor a 0.01).

Las metas de control fueron escogidas bajo las limitantes del sistema, como se puede observar más adelante, el sistema rápidamente se vuelve inestable.

No se hace mejoras en el tiempo de levantamiento debido que es un buen tiempo para el sistema bajo estudio, el cual es un sistema electro-mecánico.

7.2. Obtención del controlador.

Los pasos para el diseño del controlador fueron los siguientes:

1. Se escoge el modelo de la estructura de lazo cerrado, en el diagrama de bloque de Sisotool de lazo cerrado y se verifica que cumpla las condiciones iniciales: $G=Planta$; $H=1$; $C=1$; $F=1$, como se muestra en la Figura 8.

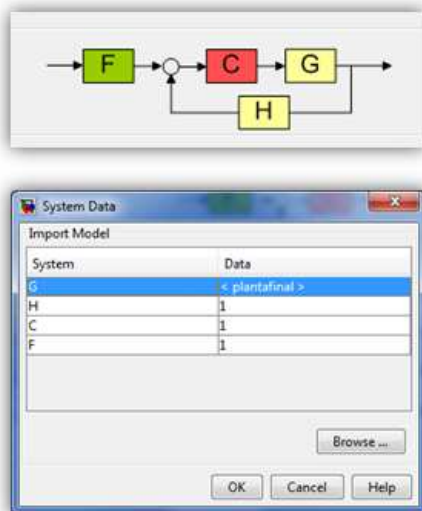


Figura 8. Modelo lazo cerrado y valores.

2. Para que el error de estado estacionario sea cero se agrega un integrador con frecuencia 0.

3. Se ingresan los requerimientos a alcanzar en el lugar geométrico de las raíces, que son el sobre nivel porcentual, (percent overshoot (5)), y el tiempo de estabilización, (setting time (12)), como se muestra en la Figura 9.

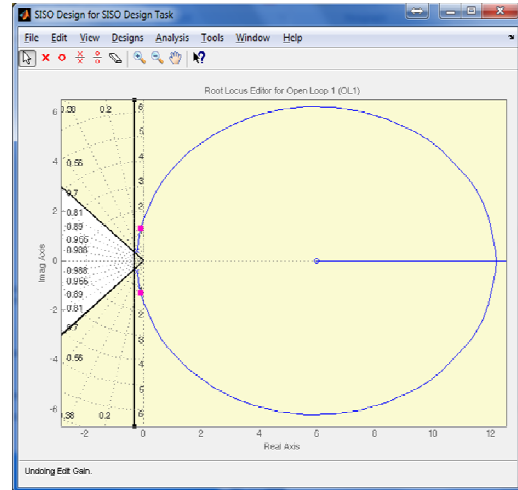


Figura 9. Trayectoria de las raíces con metas de control propuestas

4. Se agregaron 2 ceros reales negativos, debido a que el sistema es inestable, luego con los dos requerimientos se busca coincidir con la trayectoria de raíces y ubicar las raíces complejas en su punto de intersección como se muestra en la Figura 10.

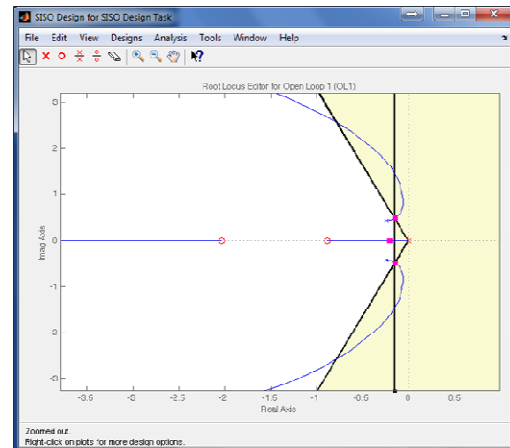


Figura 10. Ventana de diseño de Sisotool.

5. Se generó la respuesta al escalón en lazo cerrado, como se muestra en la Figura 11, y se observó que el tiempo de estabilización no se logró mejorar al valor deseado, sin embargo, el sobre nivel porcentual es casi nulo.

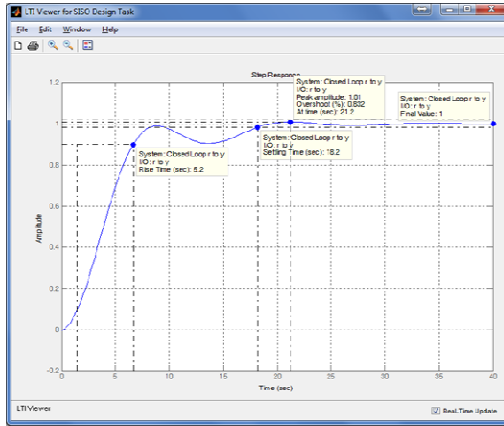


Figura 11. Respuesta al escalón al sistema en lazo cerrado.

- La arquitectura de nuestro compensador queda como se muestra en la Figura 12 como un controlador PID, el cual permite controlar la planta según las metas planteadas. Se tiene la función de forma $k_p + k_i(1/s) + k_d(s)$, por tanto:

$$K_p=0.05797, K_i=0.0356 \text{ y } K_d=0.01988$$

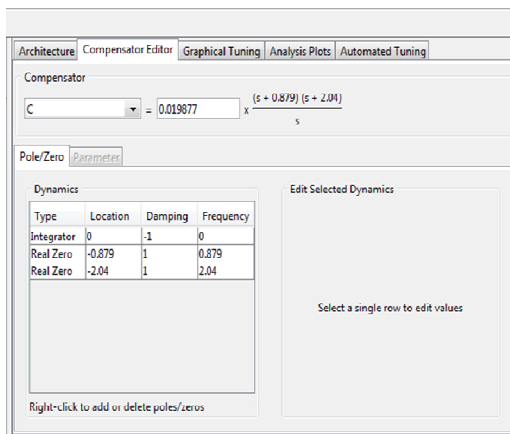


Figura 12. Función del controlador PID en Sisotool.

8. Implementación del controlador

La meta final del proyecto es la implementación del controlador, el cual fue incorporado a la planta para verificar el comportamiento del sistema planta-controlador como tal, y comprobar así el cumplimiento de las metas planteadas. Esta implementación fue realizada mediante simulación en planta virtual así como implementación en la planta real, todo esto realizable con la ayuda de la herramienta Simulink de Matlab.

8.1. Implementación en planta virtual.

A partir del diagrama de bloques indicado arriba, el cual es un esquema de lazo cerrado, se realizará un esquemático como se indica en la Figura 13 el cual está diseñado en Simulink y es el que permitirá realizar las pruebas del sistema.

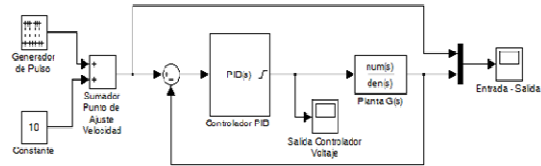


Figura 13. Diagrama esquemático en lazo cerrado para simulación con planta virtual.

El funcionamiento del esquemático de la Figura 13 se indica a continuación: se genera un tren de pulsos de 0 a 10 kph el cual es sumado a un valor constante de 10 kph, haciendo que la velocidad tome los valores de 10 kph o de 20 kph, donde esta velocidad será para las pruebas la velocidad de ajuste (setpoint). Este valor ingresa al controlador PID para entregar una velocidad sostenida, cumpliendo de esta manera un sobre-nivel porcentual y un tiempo de estabilización establecido en las metas propuestas, lo cual se observa en las Figuras 14 y 15, a continuación:

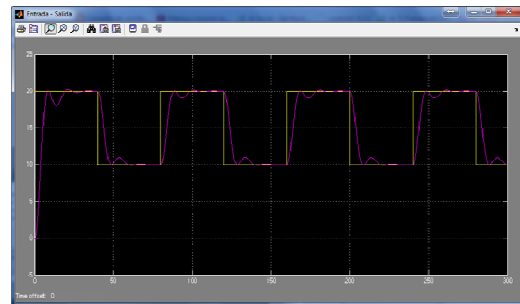


Figura 14. Entrada (amarillo, en Kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema en lazo cerrado simulado.

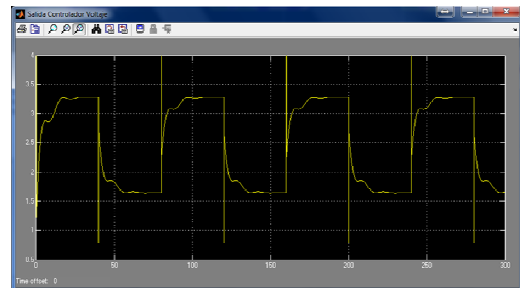


Figura 15. Salida (en voltios) de la señal del controlador PID.

A partir del esquema de la Figura 13, se realizó un nuevo esquemático como se indica en la Figura 16 el cual está diseñado en Simulink y fue el que permitió realizar las pruebas del sistema en base a un tren de pulsos que simule los valores de ajuste de la velocidad. Se cambió la función de transferencia por un bloque de adquisición con la planta real como tal.

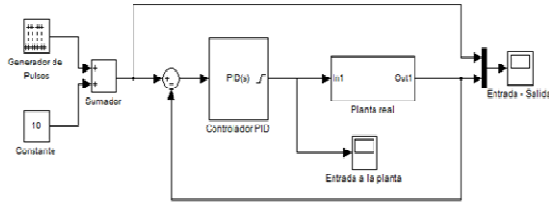


Figura 16. Diagrama esquemático en lazo cerrado con adquisición de datos en tiempo real.

Se genera un tren de pulsos de 0 a 10 kph más un valor mínimo de 10 kph, permitiendo oscilar la velocidad de ajuste o en 10 kph o en 20 kph. Este valor ingresa al controlador PID, y se limita los márgenes de saturación de la salida del controlador PID entre 1.0 V y 3.8 V, que son los rangos aceptables de entrada de nuestra planta real.

En la Figura 17 se observa la salida del controlador PID que alimenta a la planta real el cual se mantiene dentro de los márgenes antes mencionados. La salida del sistema debiera tener un sobre-nivel porcentual muy bajo, menor del 1%, pero lo que observamos en la Figura 18, la cual representa la entrada/salida del sistema con planta real, es la gráfica producto de las características del tipo de sensor empleado, del retardo ocasionado por el procesamiento de los datos capturados, del ruido de la tarjeta electrónica, y de las perturbaciones inherentes en un sistema real, tales como fricción, rodamientos y desbalance del neumático. Sin embargo, se puede apreciar que la estructura de la salida del sistema real se comporta de manera muy similar al del sistema simulado, logrando así cumplir un bajo sobre-nivel porcentual y un tiempo de estabilización dentro de los parámetros de las metas planteadas, logrando de esta manera mantener una velocidad sostenida durante un período de tiempo.

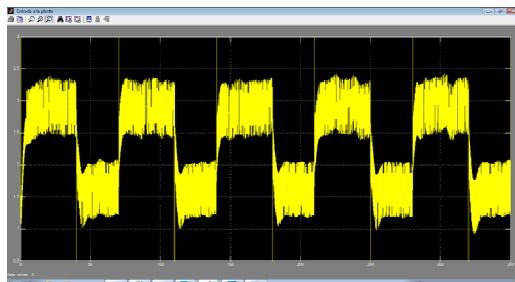


Figura 17. Salida (en voltios) de la señal del controlador PID

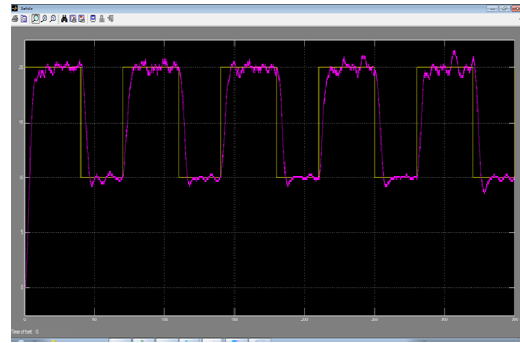


Figura 18. Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) del sistema con planta real.

A continuación, se realizó un nuevo esquemático como se indica en la Figura 19 el cual funciona con un valor de ajuste fijo a la entrada, simulando la operación real de un sistema de control de velocidad crucero, con el uso del subsistema Planta real. Se observa en la Figura 20 la entrada/salida del sistema con planta real con una perturbación aplicada a la salida de la planta, en este caso, mayor presión con el rodillo de entrenamiento sobre el neumático, lo que simula un cambio en la pendiente del terreno, y se verifica de esta manera la operatividad del controlador. Se observa que el controlador actúa sobre la planta y mantiene la velocidad constante.

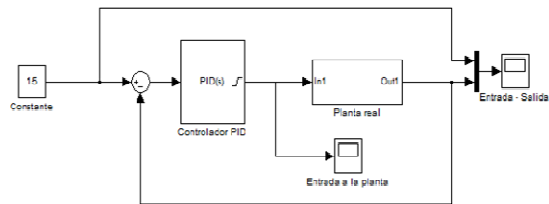


Figura 19. Esquemático en lazo cerrado adquisición de datos en tiempo real con punto de ajuste fijo.

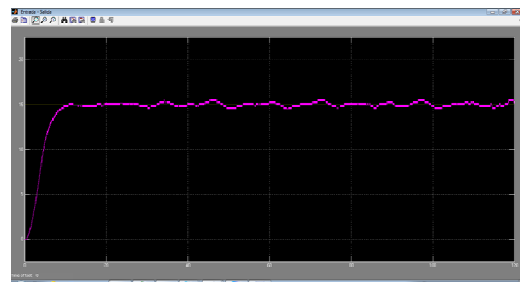


Figura 20. Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, aplicando presión estable con el rodillo.

Se prueba finalmente la condición del controlador de mantener la velocidad estable a pesar de la aplicación variable de la presión sobre el neumático, con el rodillo de entrenamiento, se observa en la Figura 21, la eficaz operatividad del controlador, en donde se simula cambios en la pendiente del terreno mediante la aplicación de variaciones de presión al neumático con el rodillo (mayor presión pendiente creciente y menor presión pendiente decreciente, línea verde) la velocidad (línea magenta) tiende siempre a estabilizarse. Cabe recalcar que en esta prueba fue realizada sin saturar al sistema, como es el caso de una velocidad de 15 kph.

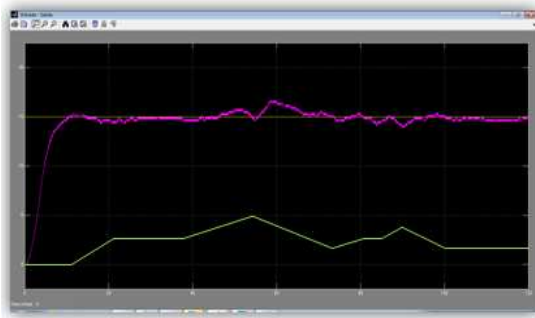


Figura 21. Entrada (amarillo, en kph) / Salida (magenta, en kph) de la planta real, variando la presión del rodillo (verde,#de vueltas).

9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos durante el experimento, se concluye que se cumplió con el objetivo general del proyecto, debido a que se encontró un modelo matemático de una bicicleta eléctrica, haciendo uso de la técnica de identificación de sistemas; además de esto se logró diseñar e implementar con éxito un controlador para la planta .

Después de los diferentes análisis realizados, se logró encontrar varias estimaciones de la función de transferencia de la planta con porcentajes de similitud mayores al 60%, luego de realizar el análisis residual y observar la respuesta al escalón para cada una de las estimaciones y aplicando el criterio de parsimonia, se escogió a la ARMAX 2,2,2,2; q posee un 65,54 % de similitud, comprobando así la validez de la técnica de identificación de sistemas sobre un proceso real.

Como parte de la interfaz física entre la planta y la computadora portátil, se utilizó con éxito la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-600, implementándose así un sistema de adquisición que demostró ser eficiente durante todo el experimento, brindando la capacidad de capturar la señal proveniente del sensor magnético, ubicado en la rueda trasera de la bicicleta, y a su vez ingresar la señal de entrada a la planta, todo esto con una excelente

resolución, sin ninguna contribución de ruido significativa, y permitiendo trabajar en tiempo real.

Se logró diseñar en simulink un bloque esquemático que permitió procesar con éxito la señal proveniente del sensor magnético, convirtiéndola en otra señal que refleja el comportamiento de la velocidad de la bicicleta, obteniendo así la señal de salida del sistema; dicho esquemático fue utilizado durante todo el experimento. Es importante mencionar que si bien los valores de la señal de salida del sistema si reflejan el comportamiento de la velocidad, producto del procesamiento de la señal del sensor, se agregó retardo al sistema, y se obtuvo señales de salida con mediana resolución en algunos casos. Por lo que se concluye que tanto el uso del sensor magnético, y el procesamiento de la señal generada por el mismo, es viable solo para fines académicos.

13. Agradecimiento

A nuestro director, el MSc. César Martin Moreno, por su guía y orientación en éste proyecto, así como también a todos quienes ayudaron de alguna u otra forma a cumplir con esta meta.

14. Referencias

- [1] Ljung, Lennart, "System Identification: Theory for the User", Prentice Hall Second Edition, 1999.
- [2] Shahian, B., Hassul, M., "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall, 1993.
- [3] Kuo, Benjamin, "Sistemas de control automático", Prentice-Hall Hispanoamericana Séptima Edición, 1996.
- [4] Ogata, Katsuhiko, "Ingeniería de Control Moderna", Pearson Educación Tercera Edición, 1998.
- [5] Ogata, Katsuhiko, "Sistemas de control en tiempo discreto", Pearson Educación Segunda Edición, 1996.
- [6] Ljung, Lennart, "System Identification Toolbox™ User's Guide", MathWorks Inc R2012a, 2012.
- [7] Ljung, Lennart, Glad, Torkled "Modeling of Dynamic System", Prentice-Hall, 1994.
- [8] Michel Gevers, "A PERSONAL VIEW ON THE DEVELOPMENT OF SYSTEM IDENTIFICATION, Center for Systems Engineering and Applied Mechanics (CESAME). Université Catholique de Louvain.