

# Identificación y diseño del controlador para un sistema de control de posición vehicular usando GPS

Samanta Katherine Patiño Apolo

Henry Nelson Sares Quiroz

MSc. César Antonio Martín Moreno

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

[spatino@fiec.espol.edu.ec](mailto:spatino@fiec.espol.edu.ec), [hsares@fiec.espol.edu.ec](mailto:hsares@fiec.espol.edu.ec), [camartin@fiec.espol.edu.ec](mailto:camartin@fiec.espol.edu.ec)

## Resumen

*En el presente trabajo se realiza la identificación Paramétrica y No Paramétrica para un sistema de control de posición vehicular usando GPS, con fines académicos usando las herramientas de MatLab, para lo cual se utilizará un modelo virtual que cumpla con los requerimientos principales del sistema real. Los objetivos principales del proyecto son: demostrar que la identificación del sistema usando los métodos aprendidos es válida y de gran utilidad aplicado a un proceso real, además diseñar un controlador, que sea capaz de responder a cambios de diferentes parámetros de la planta y a las diversas perturbaciones que esta puede experimentar. Para poder realizar el estudio del proceso de identificación y diseño del controlador se usan alternativas que complementan el uso del GPS para así adaptar el sistema y convertirlo en un sistema dinámico.*

**Palabras Claves:** GPS, IMU, identificación, Sistema, Controlador

## Abstract

*The present paper is developed to identify a parametric and nonparametric control system for vehicle position using GPS, for academic purposes using MatLab tools. A virtual model that meets the main requirements of the real system will be used. The main objectives of the project are: to demonstrate that system identification using the methods learned is valid and useful to be applied to a real process, besides designing a controller capable of responding to changes in various parameters of the plant and the various disturbances that it may be experiencing. In order to perform the study of the identification process and controller design alternatives are used to complement the use of GPS in order to adapt the system and turn it into a dynamic system*

**Keywords:** GPS, IMU, identification, System, Controller

## 1. Introducción

Con el presente trabajo se realizará el estudio de un sistema de posicionamiento vehicular usando GPS, para lo cual se utilizará un modelo virtual que cumpla en gran parte con los requerimientos principales del sistema real.

Se diseñara una entrada para la planta virtual mencionada anteriormente la cual servirá para obtención de datos y procesos de los mismos, la herramienta a utilizar es Matlab.

Luego en el estudio paramétrico se utilizaran las estructuras PEM más conocidas ARX-ARMAX-OE-BJ. Estos métodos dependerán de los coeficientes de cada modelo. Finalmente se elegirá el mejor modelo para poder seguir con la identificación.

Finalmente con la herramienta Sisotool se diseñará un controlador adecuado para después realizar las simulaciones respectivas y demostrar la validez del mismo.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1 Sistema de Posicionamiento Global GPS

El Sistema de Posicionamiento Global GPS es un sistema de localización que utiliza conjuntamente una red de ordenadores y una constelación de 24 satélites que permite conocer con gran exactitud la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto en la superficie terrestre.

### 2.2 Identificación de sistemas

La identificación de sistemas es un método de modelamiento en el que se trata de unir un modelo matemático y una porción de la realidad de modo que se consideren como uno solo. A partir de los datos experimentales de las entradas y salidas del sistema se logra obtener un modelo matemático que sea útil para el estudio del proceso.

#### 2.2.1 Identificación no paramétrica

La identificación no paramétrica obtiene la respuesta al impulso del sistema, cabe indicar que si integramos la primera se puede obtener la respuesta al escalón del mismo.

Debido a la complejidad de lograr conseguir este tipo de señales en la práctica, surge el análisis de correlación como método indirecto para cumplir con dicho objetivo.

##### 2.2.1.1 Análisis de correlación

La identificación no paramétrica vía análisis de correlación es una estimación “libre de estructura” muy útil en la identificación paramétrica, además puede ser usada para confirmar o negar la presencia de una relación de función de transferencia entre variables, finalmente puede predecir también relaciones de realimentación en los datos.

Se puede usar para estimar los coeficientes de respuesta al impulso finito (FIR) entre “ $u$ ”, una entrada candidata, “ $y$ ”, una salida deseada, “ $v$ ” es un término de ruido no medido.

$$y(t) = (b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n})u(t) + v(t)$$

Las principales asunciones detrás del análisis de correlación son:

- ✓ Estacionalidad de las series de tiempo  $U_t$  y  $y_t$  (si la señal es no estacionaria, una solución es usar datos diferenciados).
- ✓ Independencia entre  $u_t$  y el ruido  $v_t$ .

- ✓ Los coeficientes de la respuesta al impulso pasados “ $n$ ” son cero.

Estimación de respuesta de frecuencia vía análisis espectral

Estimación de la función de transferencia empírica (ETFE)

#### 2.2.2 Identificación paramétrica

Este tipo de identificación permite obtener modelos paramétricos, donde es necesario elegir una posible estructura del modelo, un criterio de ajuste de parámetros y finalmente una estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

#### 2.2.3 Estructuras de modelos basados en error de predicción

La estructura de modelos basados en error de predicción usa técnicas de regresión para obtener una estimación del modelo, esta puede ser lineal o no lineal y depende de la estructura del modelo.

Pese a la existencia de 32 formulaciones diferentes, las estructuras PEM más comunes son cinco, a continuación se presenta una tabla con dichos modelos:

Método	$\bar{p}(z)$	$\bar{p}_e(z)$
ARMAX	$\frac{B(z)}{A(z)}z^{-nk}$	$\frac{C(z)}{A(z)}$
FIR	$B(z)z^{-nk}$	1
Box-Jenkins	$\frac{B(z)}{F(z)}z^{-nk}$	$\frac{C(z)}{D(z)}$
Output Error	$\frac{B(z)}{F(z)}z^{-nk}$	1
ARX	$\frac{B(z)}{A(z)}z^{-nk}$	$\frac{1}{A(z)}$

Tabla 1. Estructuras PEM

## 3. Proceso de la solución

Para empezar con el diseño de la solución es importante tomar en cuenta los requerimientos de planta en un sistema real, a continuación nombramos a algunos de ellos:

- ✓ La continuidad de la señal GPS
- ✓ La fricción del pavimento con las llantas
- ✓ La aerodinámica
- ✓ La relación que existe entre el giro del volante y llantas.
- ✓ Las perturbaciones ambientales

El sistema de guiado del vehículo posee sin duda un gran número de variables a estudiar, tornándose en un problema especial de control debido a la complejidad de los modelos matemáticos y a la dificultad que se presenta al linealizar.

Cabe destacar la importancia del uso de la señal GPS y las limitaciones que suelen presentarse conocidas como fuentes de error entre las cuales podemos destacar: perturbación ionosférica, fenómenos meteorológicos, imprecisión de relojes, interferencias eléctricas imprevistas, etc; provocando la pérdida de datos que son de suma importancia para el recorrido de la trayectoria. Esta especial característica provoca el uso de un sistema de Guía, Navegación y Control (GNC).

La parte principal del GNC es el sistema de navegación denominados como Sistema de Navegación Inercial (INS) cuyo objetivo principal es estimar la velocidad, posición y orientación del vehículo. Para poder realizar las estimaciones se utilizan mediciones de aceleración y rapidez de cada eje que son tomadas por una Unidad de Medición Inercial (IMU) conformada por tres acelerómetros y tres giroscopios.

El primer paso que se va a realizar para el proceso de la identificación es el diseño de la planta virtual que será de gran importancia para la obtención del modelo final.

La dinámica del modelo está basada en la IMU (Unidad de Medición Inercial), dicho modelo es de segundo orden y para hacer uso de este modelo se debe ejecutar Simulink y ubicar la librería Aerospace Blockset→GNC→Navigation→ Three Axis→Inertial Measurement Unit.

La función de transferencia tiene 2 parámetros frecuencia natural y factor de amortiguamiento:

- ✓ La frecuencia natural que servirá para determinar la velocidad del vehículo y el consumo de combustible. En este experimento el valor de  $f_n=54$  Hz aproximadamente es una velocidad de 20km/h en primera marcha, con esta frecuencia el ahorro de combustible es mayor y el factor de amortiguamiento  $fa=2.43$

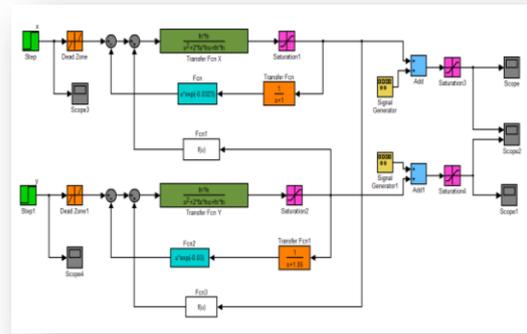


Figura 1. Planta virtual Simulink

Las respuestas para cada una de las señales son:

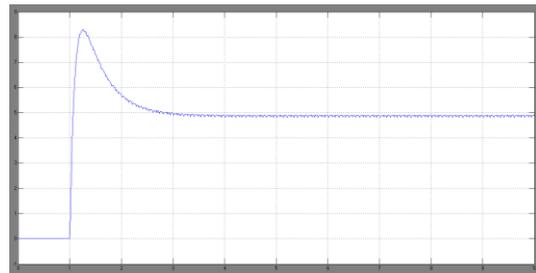


Figura 2. Respuesta al escalón para la señal en X

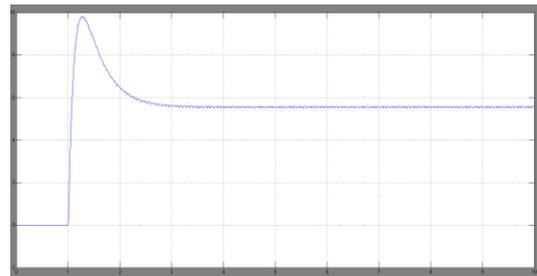


Figura 3. Respuesta al escalón para la señal en Y

Se realizaron algunas pruebas para determinar la señal de entrada y la que mejor se adapta a la forma de respuesta de la planta es la Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS).

La señal PRBS para la coordenada x, está configurada de la siguiente manera:  $\alpha=2$ ,  $\beta=5$ , numero de ciclos=1 y los valores de  $\tau_{lo}=1.25$ ,  $\tau_{hi}=3.63$  fueron tomados utilizando la gráfica de la señal de salida de la planta virtual. Los mismoas valores para la señal de la coordenada Y, a excepción de los valores de la constante de tiempo  $\tau_{lo}=1.24$ ,  $\tau_{hi}=3.5$

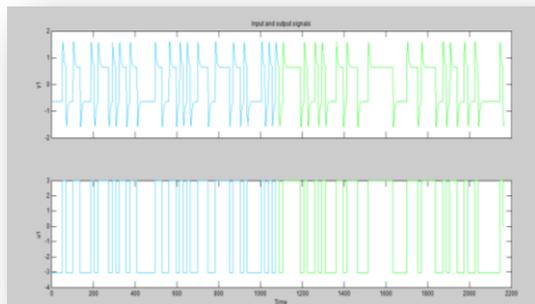


Figura 4. Señales de entrada y salida señal X

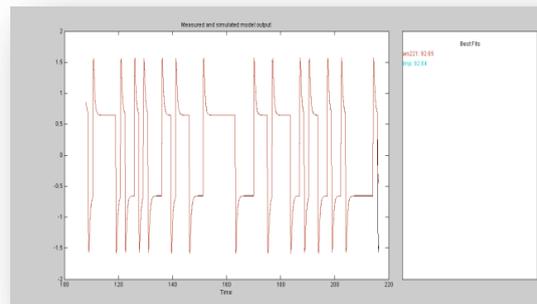


Figura 7. Método Arx221

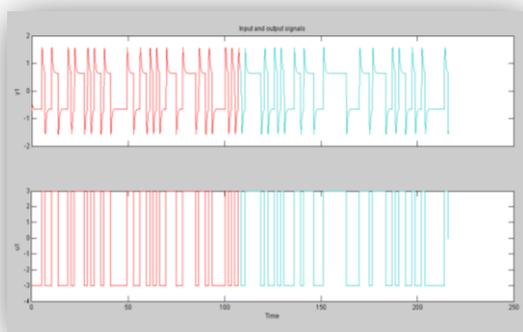


Figura 5. Señales de entrada y salida señal Y

## 4. Identificación del Sistema

Haciendo uso del IDENT de Matlab se realizaron algunos ensayos con cada uno de los métodos de error de predicción mencionados anteriormente para probar con cada estructura hasta dar con un modelo que se ajuste la planta.

Los métodos de error de predicción fueron seleccionados tomando en cuenta criterios como Autocorrelación, Corss-correlación, Best Fit, respuesta escalón, respuesta de frecuencia, y una prueba adicional en Simulink utilizando ID Model, a continuación se presentan las respuestas de los métodos seleccionados para la coordenada X y Y respectivamente:

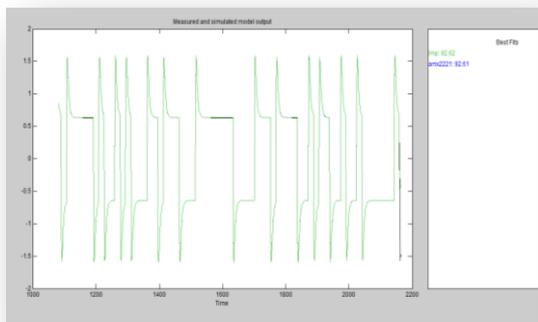


Figura 6. Método Armax2221

## 5. Diseño del controlador

### 5.1 Proceso del Diseño

El controlador tiene como objetivo principal mantener la estabilidad del sistema frente a cambios en su entrada y posibles perturbaciones.

En Matlab se encuentra una aplicación llamada Sisotool, la cual presenta un asistente que permite diseñar el controlador según los requerimientos deseados.

En la siguiente figura se muestra la ventana principal de Sisotool (Control and Estimation Tools Manager)

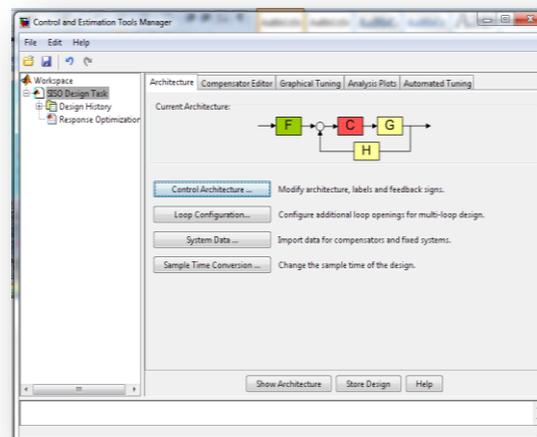


Figura 9. Ventana de la herramienta Sisotool

Para continuar con el diseño del controlador, hay que tener en cuenta que el modelo seleccionado previamente debe estar en el Workspace, en el caso de la coordenada X el modelo ARMAX con coeficientes 2221 y para la coordenada Y el modelo ARX con coeficientes 221. Luego en Sisotool se importan desde el Ident los datos para el compensador, se debe tener en cuenta que el sistema está representado con la letra G. A continuación se muestra mediante las gráficas, las respuestas de cada uno de los modelos sin ningún

controlador, por tanto la respuesta de paso será igual a la que se obtuvo cuando se trabajó con el Ident.

Para X

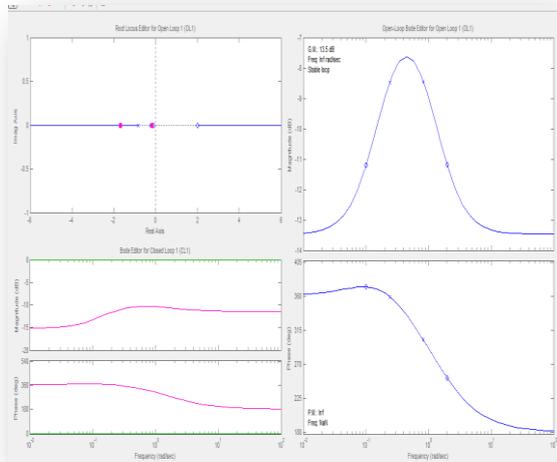


Figura 10. Respuesta del sistema sin controlador

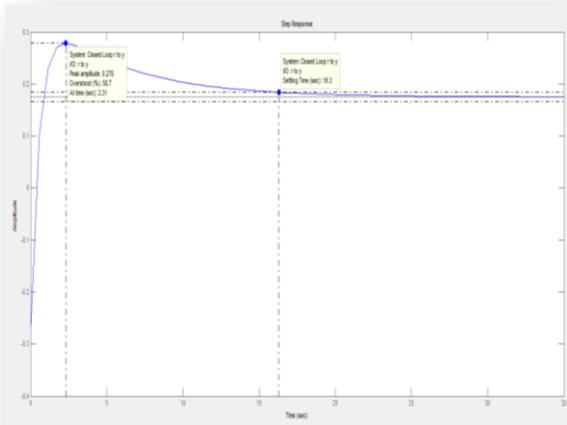


Figura 11. Respuesta de paso del sistema

Para Y

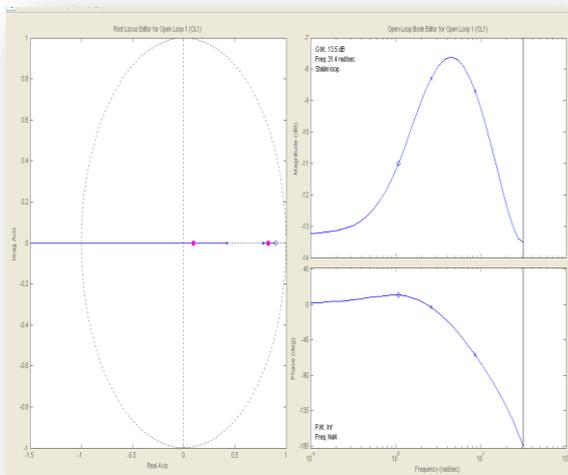


Figura 12. Respuesta del sistema sin controlador

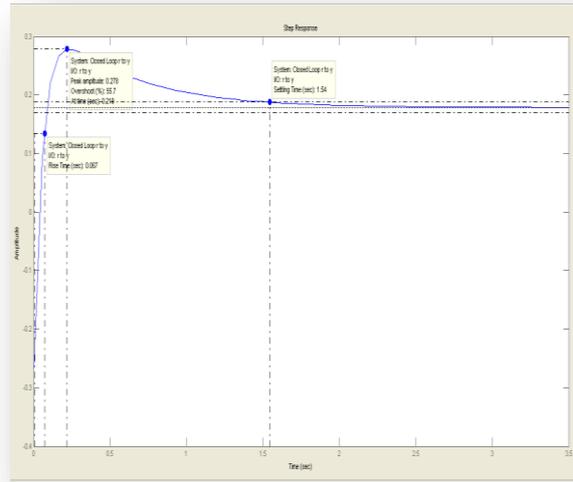


Figura 13. Respuesta de paso del sistema

En las gráficas de las respuestas escalón se observa que el overshoot para la coordenada  $x$  es de 58.7% y para la coordenada  $y$  es de 55.7% en el controlador a desarrollar este valor será mejorado con el fin de tener un mejor tiempo de repuesta.

## 5.1 Selección del controlador

Para el siguiente paso de debe seleccionar el método de diseño en Automated Tuning, SISO Tool presenta algunas opciones tales como: PID tuning, Internal Model Control, LQG Synthesis y Loop shaping.

Para este trabajo la opción seleccionada fue PID, dentro de éste nuevamente hay que seleccionar las especificaciones del controlador que son tres: P (proporcional), PI (proporcional integral) y PID (Proporcional Integral Derivativo).

Como se ha visto en el capítulo anterior en las respuestas de salida, el controlador a desarrollar debería ser un Proporcional Integral, ya que se necesita un tiempo rápido de respuesta esto se logrará con la acción proporcional y para lograr eliminar el error de residuos se necesita de la acción integral.

En las figuras mostradas a continuación, se observa cada una de las respuestas con el controlador, recalcamos que hay un controlador por cada una de las coordenadas.

Para X

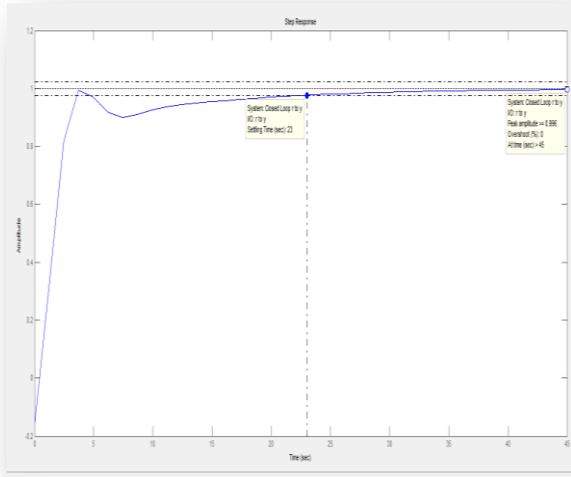


Figura 14. Respuesta escalón del sistema con controlador (Coordenada X)

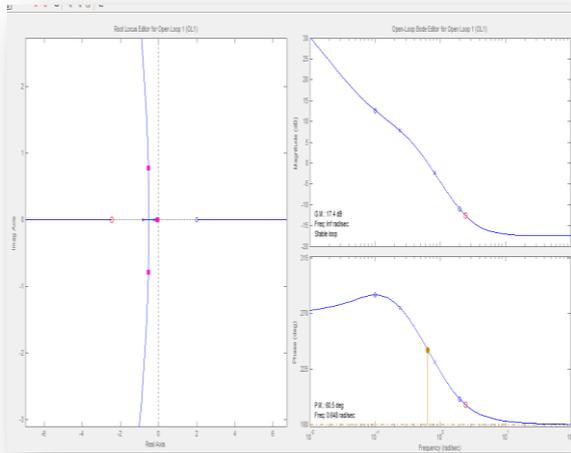


Figura 15. Trayectoria de raíces y diagramas de Bode (Coordenada X)

Para Y

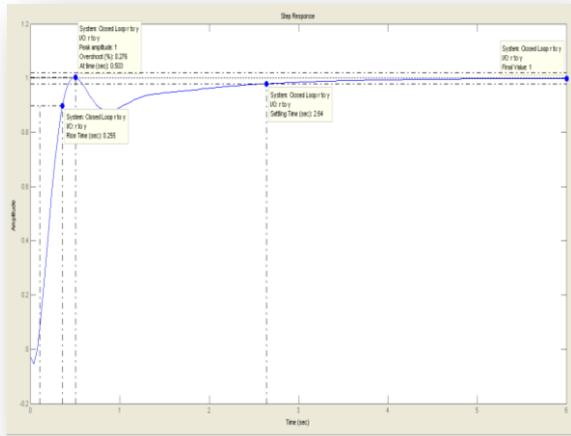


Figura 16. Respuesta escalón del sistema con controlador (Coordenada y)

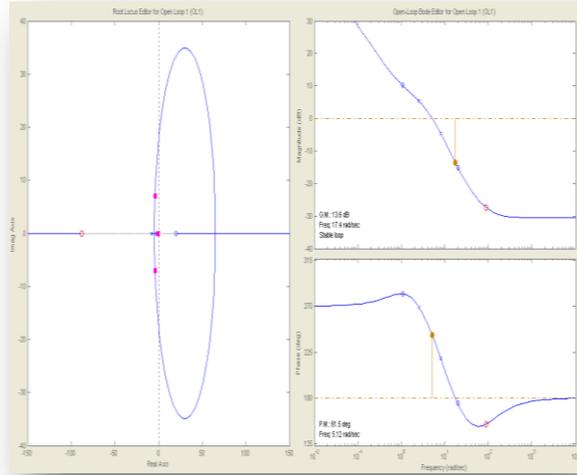


Figura 17. Respuesta del sistema con controlador (Coordenada Y)

Como se observó en las gráficas anteriores de las respuestas escalón, con el controlador diseñado logramos disminuir el overshoot a un valor aproximado al 0% cumpliendo así con lo esperado.

Una vez obtenido el compensador, en la opción herramientas del SISO Design Task seleccionamos Dibujar diagrama en Simulink, se procede a colocar una entrada paso para observar cómo es la respuesta del sistema con el controlador diseñado.

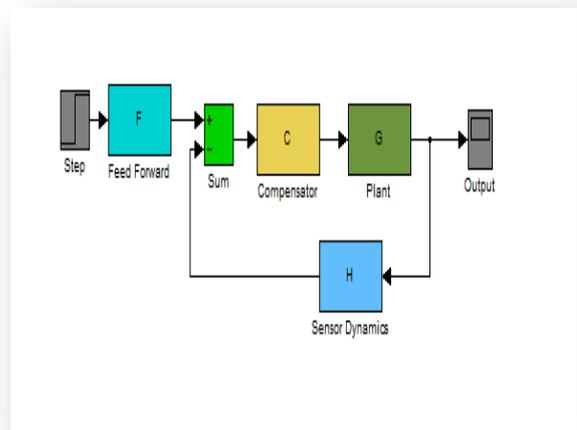


Figura 18. Diagrama en Simulink (Coordenada X)

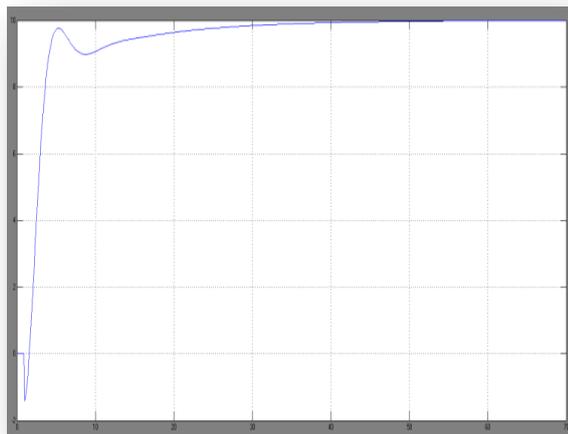


Figura 19. Respuesta escalón del sistema (Coordenada X)

Para X

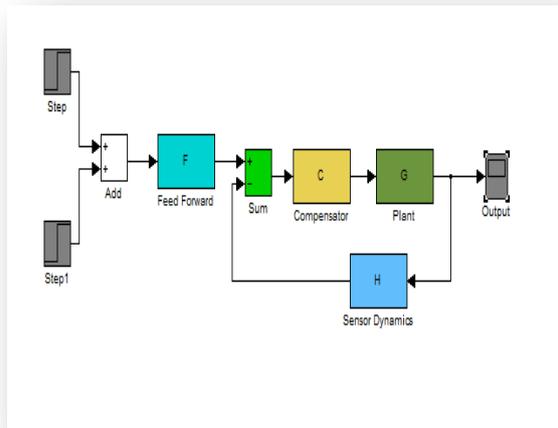


Figura 22. Diagrama en Simulink modificado

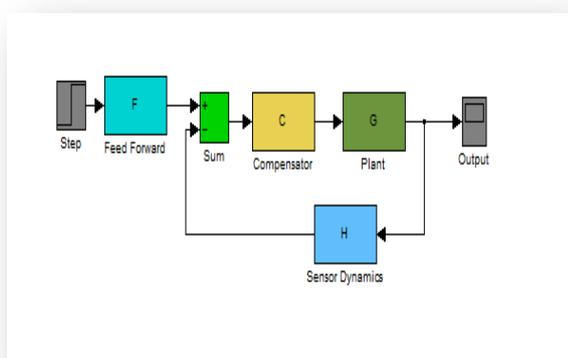


Figura 20. Diagrama en Simulink (Coordenada y)

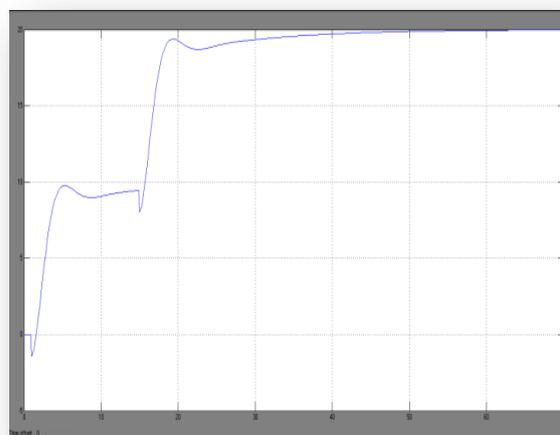


Figura 23. Respuesta escalón del sistema (Coordenada X)

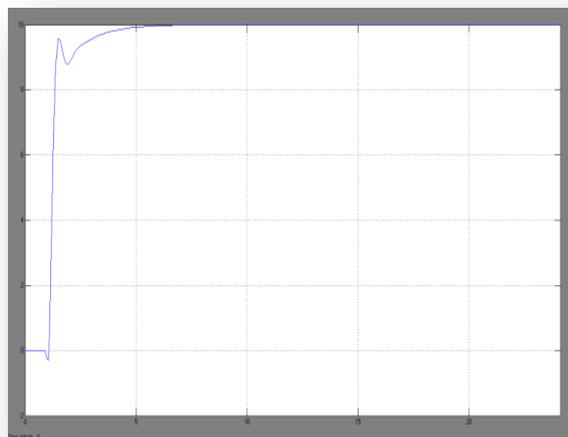


Figura 21. respuesta escalón del sistema (Coordenada Y)

PARA Y

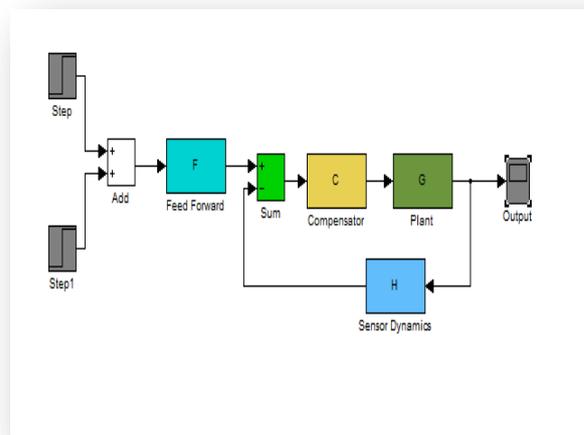


Figura 23. Diagrama en Simulink modificado

## 5.2 Pruebas del controlador

Una forma de comprobar que el controlador ha sido efectivamente el adecuado, procedemos a realizar una sencilla pero importante prueba que es añadir una nueva señal paso y cambiarle algunos de sus parámetros. Las respuestas obtenidas son las siguientes:

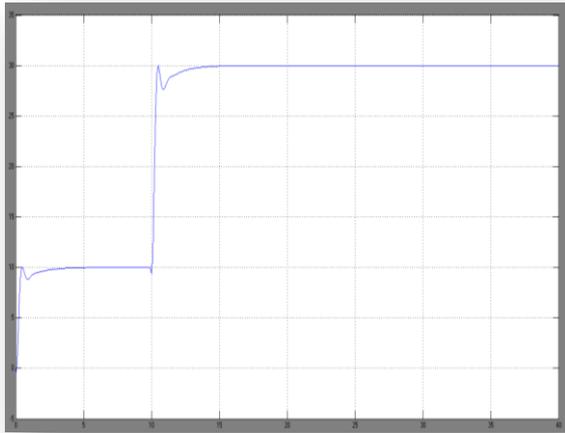


Figura 24. Respuesta escalón del sistema (Coordenada X)

Finalmente la función de transferencia para la coordenada X y para la coordenada Y respectivamente son:

X:

$$\frac{-0.21209(s + 0.1006)(s - 2)}{(s + 0.2425)(s + 0.8298)}$$

Y:

$$\frac{-0.21068(s + 1.077)(s - 20)}{(s + 2.584)(8.079)}$$

Los controladores para la coordenada X y para la coordenada Y respectivamente son:

X:

$$\frac{0.6327(s + 2.468)}{s}$$

Y:

$$\frac{0.14019(s + 87.98)}{s}$$

## 6. Conclusiones

1. La identificación de sistemas usando las herramientas de MatLab nos permitió obtener de una manera eficiente los modelos matemáticos, siendo una excelente técnica a ser usada para fines académicos y de investigación ya que por la complejidad de proceso de ciertos modelos matemáticos no

todos puede ser obtenido de manera sencilla y económica.

2. La señal de entrada debe contener el mayor número de frecuencias posibles. Por ejemplo, una señal seno pura no es adecuada en un experimento de identificación, puesto que sólo se obtendrá la respuesta del sistema para la frecuencia de dicha señal. Por el contrario, las señales escalonadas (con cambios bruscos) son muy utilizadas, puesto que contienen un espectro suficientemente amplio de frecuencias.
3. Para cumplir con el objetivo de la identificación y el desarrollo del controlador de la planta es indispensable que el sistema sea dinámico en donde el modelo debe ser preciso para fines de análisis, simulación, diseño y control para poder seguir trabajando en proyectos posteriores tomando como base todo el estudio previamente realizado.
4. Para elegir el modelo que más se ajusta a la dinámica del sistema se tomó en cuenta varios aspectos como el BEST FIST, el análisis de auto-correlación y cross-correlación, análisis de respuesta de paso, la respuesta de frecuencia y hacer el debido análisis con las gráficas obtenidas a partir del IDMODEL de Simulink. En nuestro sistema se definió un modelo diferente por variable, para X ARMAX2221 y para Y ARX221 debido a que cada sistema tiene retroalimentación con diferentes retardos simulando el sensor GPS.
5. Al escoger el modelo final para diseñar el controlador se debe hacer un análisis exhaustivo en la opción de análisis residual del System Identification Toolbox, en donde los residuos representan la parte de la validación de datos no vista en el modelo, y se considera dos análisis importantes llamados prueba de blancura y la prueba de la independencia.
6. De acuerdo con los criterios de prueba de la blancura, un buen modelo tiene la función de auto correlación residual en el interior del intervalo de confianza de las estimaciones correspondientes, lo que indica que los residuos no están correlacionados.
7. De acuerdo con el análisis de independencia de prueba, un buen modelo está correlacionado con los residuos de las entradas pasadas. Las pruebas de correlación indica que el modelo es independiente de cada entrada correspondiente. Por ejemplo un pico fuera del intervalo de confianza para un retraso k

significa que la salida  $Y(t)$  a partir de la entrada  $U(tk)$  no está bien descrita por el modelo.

## 7. Recomendaciones

1. El proyecto realizado se basa en modelos virtuales y es necesario adaptar de la forma más real posible pero para poder hacer posible esto se necesita añadir al sistema perturbaciones, bloques de Zona muerta, bloques de saturación, ZOH (Zero-Order Hold) para hacer más lineal la señal de salida del sistema y hacer una buena elección del modelo a partir de las señales de entradas generadas.
2. Se recomienda tener los conocimientos apropiados sobre el manejo de MatLab y Simulink para poder desarrollar el proyecto sin inconvenientes ya que se necesitan hacer muchas pruebas y hay que llevar un correcto orden para realizar una correcta identificación y diseño de la planta.
3. En el diseño de controlador hay que considerar las limitaciones de la planta por lo tanto se debe tener cuidado en las especificaciones del mismo tales como el sobre nivel porcentual y el tiempo de estabilización.
4. Para hacer la identificación de un modelo que sea lo más real posible se deben tomar en cuenta muchas variables tales como fricción del aire, aerodinámica del vehículo, geografía del terreno, ángulo de inclinación del volante, aceleración del vehículo tomando como pauta la planta analizada en este proyecto.

## 8. Agradecimientos

A nuestro director, el MSc. César Martín Moreno de igual manera al MSc. Dennys Cortez Álvarez por su valiosa colaboración para poder desarrollar con éxito el presente proyecto de graduación.

Un agradecimiento especial a nuestros padres, hermanos y a todas aquellas personas que siempre nos brindaron su apoyo y ayuda incondicional.

## 9. Referencias

- [1] Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, [http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria\\_moderna\\_de\\_control.htm](http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/teoria_moderna_de_control.htm), fecha de consulta Junio 2011
- [2] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M.C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Descripción, Análisis de Errores, Aplicaciones y Futuro, <http://www.iai.csic.es/users/gpa/postscript/Pozo-Ruz00a.pdf>
- [3] Ing. Agr. Michel Koolhaas, Elementos del sistema de posicionamiento global (GPS), [http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Elem.del\\_GPS1.3.pdf](http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Elem.del_GPS1.3.pdf), 2003, pàg. 1-2
- [4] Ing. Agr. Michel Koolhaas, Elementos del sistema de posicionamiento global (GPS), [http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Elem.del\\_GPS1.3.pdf](http://www.fagro.edu.uy/~topografia/docs/Elem.del_GPS1.3.pdf), 2003, pág. 2-3
- [5] María Elena López Guillén, Aplicación del Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua, <http://193.146.57.132/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>
- [6] MathWorks, Three-Axis inertial Measurement Unit, [http://www.mathworks.com/help/toolbox/aeroblks/three\\_axisinertialmeasurementunit.html](http://www.mathworks.com/help/toolbox/aeroblks/three_axisinertialmeasurementunit.html)
- [7] G. Hamm, G. Burk, Reverte, Tablas De La Técnica Del Automóvil, Reverte, 1992
- [8] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- [9] Katsuhiko Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, Pearson Educación, 1996
- [10] L. Ljung, "System Identification. Theory for the user", Prentice Hall, 1987.
- [11] M.S.E. César Martín Moreno, Material de clases de Introducción a la identificación de sistema, <https://www.sidweb.espol.edu.ec/>, Marzo 2010.
- [12] V. Milanés, J.E. Naranjo, C. González, J. Alonso, R. García, T. de Pedro, Sistema de Posicionamiento para Vehículos Autónomos, 2008