

# PROCESO DE SYSTEM IDENTIFICATION PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE UNA PLANTA SISO: TV TRACKER

**Santiago García Bravo, Ladislao Mathé, Gabriela S. Arri**

*Grupo Guiado y Control, Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico.  
Av. Fuerza Aérea 6500, Córdoba, Argentina, [cia@iua.edu.ar](mailto:cia@iua.edu.ar), <http://www.iua.edu.ar/>*

**Palabras clave:** System Identification, modelo matemático, planta SISO, TV Tracker.

**Resumen.** Como parte de las prácticas de aprendizaje de las asignaturas de Control, se utilizó a una montura servo orientable como un caso de estudio. En este trabajo se describe el proceso para la determinación del modelo matemático de una montura de seguimiento óptico, TV Tracker, a partir del procesamiento de señales conocidos mediante una herramienta llamada System Identification (SI) de National Instruments.

En la primera etapa se procedió con la selección del modelo matemático (función de transferencia) que se desea obtener, así como también la selección de las señales que se deberán generar partiendo del hardware disponible y teniendo en cuenta la naturaleza mecánica de la montura, y del sistema electrónico para comando de los motores.

Luego se continuó con la programación en el lenguaje G, LabVIEW de National Instruments, para la implementación de todo el proceso de generación de señales, su adquisición, y la totalidad del procesamiento necesario para la obtención del modelo matemático buscado.

La validación del modelo estimado se realizó contrastando la respuesta teórica de la planta, con la respuesta real del sistema, cuando ambos son excitados por una misma señal.

Por último se trasladó el modelo ya calculado en LabVIEW, al entorno de MATLAB, particularmente al SISO Tools, para el desarrollo futuro de un controlador que permitirá optimizar el control del sistema TV Tracker.

## 1 INTRODUCCION

Dentro del proceso de diseño de un sistema de control, el primer paso es lograr un modelo matemático del sistema físico que se desea controlar. Para esto, se debe tener un conocimiento previo los parámetros característicos de cada componente de la planta, tales como el momento de inercia, rozamientos, corrientes de arranque y de régimen del motor, etc.

Una alternativa de encontrar el modelo matemático es a partir de su respuesta a una excitación determinada: función impulso, escalón, etc.(*Ogata98*). Sin embargo, cuando la planta es de una naturaleza más compleja, el método clásico resulta en un modelo insuficiente que puede divergir del comportamiento dinámico real sistema. Es por ello necesario involucrar procesos de estimación más potentes que puedan salir al rescate en estas circunstancias. Dado que durante las etapas previas de este proyecto se estuvo utilizando el software

System Identification (i.e.: SI) hace referencia al proceso de desarrollo del modelo matemático de una planta, a partir de datos experimentales que, luego de ser procesados por algoritmos de carácter predictivo, describen el comportamiento dinámico de la entidad física ensayada (*Jer-Nan y Minh04*).

Una característica destacable de los procesos de System Identification, es que permiten trabajar a partir de lo que se describe como los modelos de “caja gris” y de “caja negra”, según se tenga poco o ningún conocimiento previo de la planta.

A lo largo de este trabajo, se focalizará la atención en las capacidades previamente nombradas, aplicándolas a una montura de seguimiento automático llamada TV Tracker, que por encontrarse en etapa de desarrollo electromecánico puede presentar modificaciones futuras. Además, una vez finalizado el proyecto, la montura podrá soportar una amplia gama de dispositivos como por ejemplo, varias familias de cámaras y antenas que se usarán en tareas de telemetría.

## 2 LA PLANTA: TV TRACKER

El TV Tracker es una plataforma de seguimiento óptico, que se encuentra en desarrollo. Físicamente está compuesto por está constituido por dos mecanismos, el de movimiento en azimut y el de elevación, actuados por sendos motorreductores de corriente continua Faulhaber 3863-024C.

Asociados a los ejes de cada motor se dispone de encoders Faulhaber HEDS 5500J que sirven para determinar la velocidad y la posición de cada eje en cada instante. El control de la montura se realiza a través de la placa PCI – 7344 de National Instruments, alojada en una PC dedicada al procesamiento de datos, y monitoreo del funcionamiento.

Las señales de comando generadas en la PCI-7344 son entregadas a las etapas de potencia que excitan los motores de acuerdo a una orden de comando.

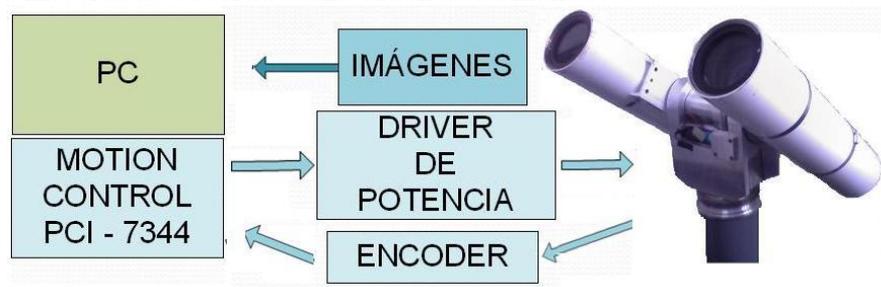


Figura 1: Diagrama Del Sistema TV Tracker

La representación en bloques de la planta es entonces cómo se muestra en la Figura 1; en la

que C representa al controlador, G a la etapa de potencia, motores y carga, y H es la realimentación proveniente de la señal del encoder con su correspondiente acondicionamiento de la señal.

### 3 SELECCIÓN DEL TIPO DE MODELO MATEMÁTICO

La función de transferencia es un modelo matemático sencillo que permite analizar rápidamente la respuesta transitoria de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo. Es por esto que se decidió trabajar con este modelo, y posponer para etapas futuras el problema del control óptimo, en el que resultará provechoso usar representaciones en espacio de estados (Ogata98).

Por otro lado, resulta conveniente ensayar la planta en su configuración de funcionamiento, es decir en lazo cerrado.

En un sistema de lazo cerrado, el estímulo de entrada se correlaciona con la señal de salida. Aunque en muchos casos la estimación del sistema en lazo abierto puede ser llevada a lazo cerrado, no todos los métodos de estimación de lazo abierto tienen en cuenta correlaciones entre la señal de estímulo y el ruido de salida.

Es en este punto en el que se aprovechará el tener cierto conocimiento sobre la planta, y realizar la estimación de modo indirecto. Este acercamiento indirecto, estima la función de transferencia de lazo cerrado basándose en la señal de referencia del sistema y su señal de respuesta. Luego se recupera la función de transferencia de lazo abierto a partir del conocimiento que se posee sobre la planta. Esta aproximación por vía indirecta permite identificar la función de transferencia aún cuando la relación señal-ruido del sistema es baja y, además, no se ve afectada si el ruido de salida es blanco o de color (SI Manual06).

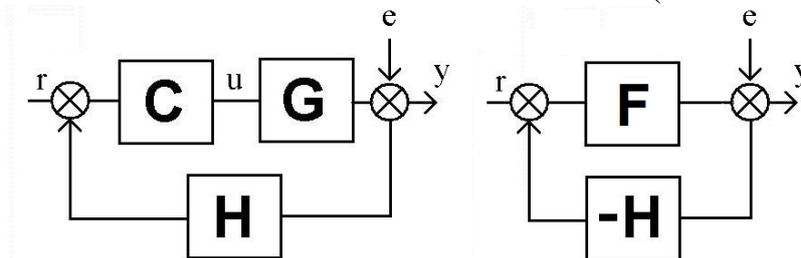


Figura 2: Diagrama en Bloques Para Estimación Indirecta.

Remitiéndonos a la Figura 2, se puede ver que la función de transferencia de lazo cerrado es:

$$F = \frac{CG}{1 + CGH}. \quad (1)$$

Es sencillo probar que si F se coloca ahora en un lazo cerrado con una realimentación dada por -H, la función de transferencia de este segundo sistema será:

$$M = \frac{F}{1 + FH} = \frac{\frac{CG}{1 + CGH}}{1 + \frac{CGH}{1 + CGH}} = CG. \quad (2)$$

Entonces, a partir de la estimación de la función F, se conoce indirectamente la estimación de la planta G, siempre y cuando sean conocidas H y C.

Por estas razones, se modelará según el modelo "Transfer Function" que es un método de estimación paramétrico que describe la dinámica del sistema separadamente de la dinámica

estocástica, y se ajusta según:

$$y(t) = G(s)u(t) + e(t),$$

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_{m-1}s^{m-1} + b_ms^m}{a_0 + a_1s + \dots + a_{n-1}s^{n-1} + a_ns^n}. \quad (3)$$

Donde  $u(t)$  es la entrada al sistema,  $y(t)$  es la salida corrompida por la señal perturbación  $e(t)$ .  $G(s)$  representa a la función de transferencia a estimar, que está dada por los coeficientes reales  $b_i$  y  $a_i$ .

El proceso de estimación que utiliza este método es el de cuadrados mínimos, que es un caso especial del método de predicción del error.

#### 4 GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES

Como se adelantó previamente, el proceso de SI opera procesando las señales de estímulo y de respuesta de la planta.

La elección de la señal estímulo cumple un rol importante en la observación del sistema y en la precisión del modelo estimado. Esta señal determina el punto de operación de la planta, y debe ser capaz de generar una respuesta que provea la información necesaria para obtener un modelo preciso. Por esto, el ensayo deber realizarse en condiciones similares a las de su punto de operación.

En el caso de sistemas no lineales, esta característica es extremadamente importante, ya que la excitación de los modos del sistema es dependiente del espectro en frecuencia de la señal estímulo.

Es además deseable que la amplitud de la señal, cubra un amplio rango de variaciones para que de este modo abarque al modo normal de operación. Y por último, el estímulo debe entregar toda la potencia que sea posible, ya que de este modo se mejora la relación señal ruido. Una forma de cuantificar esta última característica, es mediante el factor de cresta, dado por:

$$C_f^2 = \frac{\max_t \{u^2(t)\}}{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u^2(t)}. \quad (4)$$

El ruido blanco gausseano filtrado y la forma onda chirp, son dos señales que cumplen con estas características, y cuya implementación es relativamente simple. En el caso del TV Tracker se decidió trabajar con la primera.

##### 4.1 Ruido blanco gausseano

Ruido blanco implica que los valores del ruido no son correlacionados en el tiempo. Dicho de una manera más simple: si se conoce el valor del ruido en este instante, ésta información no ayuda a predecir el valor del ruido en el instante siguiente. Blanco, también significa que el ruido tiene la misma potencia para todas las frecuencias. Como esto implica ruido de infinita potencia, es evidente que este ruido no puede existir físicamente (*Maybeck79*). Más aún, su factor de cresta sería infinito.

Sin embargo si se recorta la amplitud de la señal, a por ejemplo una señal cuadrada, su factor de cresta teórico será 1, y su espectro de frecuencias se verá afectado mínimamente.

## 4.2 Generación de la señal estímulo

Para generar la señal se toma una señal de ruido blanco gausseano con media cero, y se la filtra para eliminar las componentes superiores de frecuencia para las cuales la planta funcionará como un filtro pasa bajos. Esto además tiene como fin proteger la planta de estímulos excesivamente violentos que podrían dañar los engranajes y los acoples del motor. Nótese, además que la implementación de este “filtro protector”, no altera la característica “blanca” de la señal en el rango inferior de la frecuencia de corte, y que sí limita el modelo resultante ya que se disminuye la influencia de los modos superiores de la planta que, se supone, tienen una influencia despreciable a fines prácticos.

Una vez filtrado el ruido blanco gausseano, es convertido en una señal cuadrada mediante un discriminador de signo. Y así, todos los valores que originalmente eran superiores a cero son convertidos en unos, y el resto en el valor opuesto.

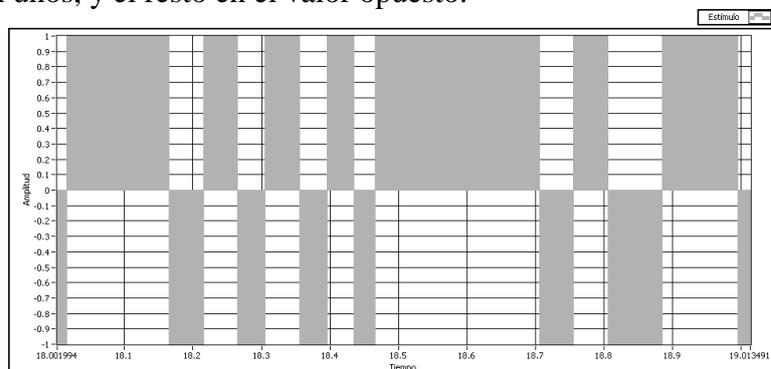


Figura 3: Señal Estímulo Representada En Modo De Área Rellena

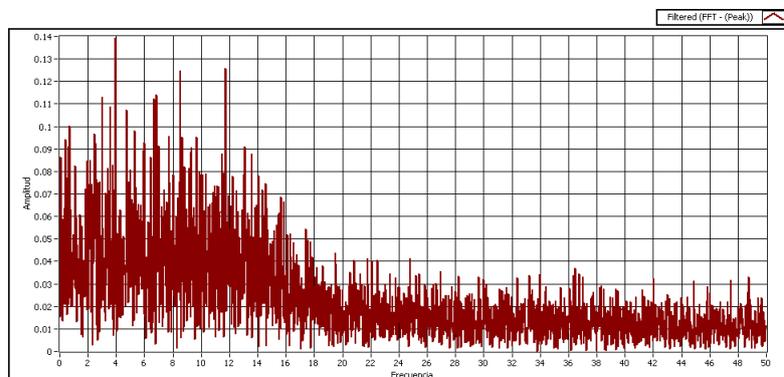


Figura 4: Análisis Espectral de la Señal Estímulo

Figura 3 muestran la señal estímulo resultante, que se presenta en modo de área rellena para facilitar su lectura. Y la Figura 4 muestra el análisis espectral de la señal estímulo, que fue limitada mediante un filtro pasa bajo, a 15Hz. para proteger a la planta de daños mecánicos.

El factor de cresta de la onda estímulo es, tal como lo predice el cálculo teórico: 1.

Por último se puede escalar la señal a una amplitud que cumpla con los requisitos nombrados al principio de esta sección.

## 4.3 Adquisición de la señal respuesta

La respuesta del sistema se adquirió leyendo la posición del encoder del eje correspondiente. Para asegurar la integridad y sincronismo entre la señal de estímulo y la de respuesta, la rutina de adquisición se sincronizó mediante las “*Timed Structures*” de LabVIEW, que aseguran la periodicidad de las tareas independientemente de la carga de

tareas y/o de la velocidad de procesamiento del microprocesador de la computadora en la que se opera.

De este modo, la frecuencia de muestreo en los ensayos quedó establecida en 100Hz., que cubre ampliamente los requerimientos según el teorema del muestreo de Nyquist.

Las señales fueron almacenadas en un archivo LVM para su posterior procesamiento.

## 5 ENSAYO

Para realizar el ensayo y obtener las mediciones de las señales estímulo y respuesta, se decidió excitar a la planta con la señal escalada al rango  $\pm 10000$  cuentas de encoder, lo cual corresponde a  $\pm 2.4$  revoluciones en el eje del motor, y a  $\pm 8.96$  grados de rotación de la montura. De este modo se cumplen las condiciones de amplitud de la señal comentadas en el apartado 4 de este informe.

El controlador PID disponible en la placa PCI-4344 fue configurado según  $P = 1$ ,  $I = D = 0$ , y la realimentación se configuró de modo que fuera unitaria. Las señales resultantes son como se presentan en la Figura 5.

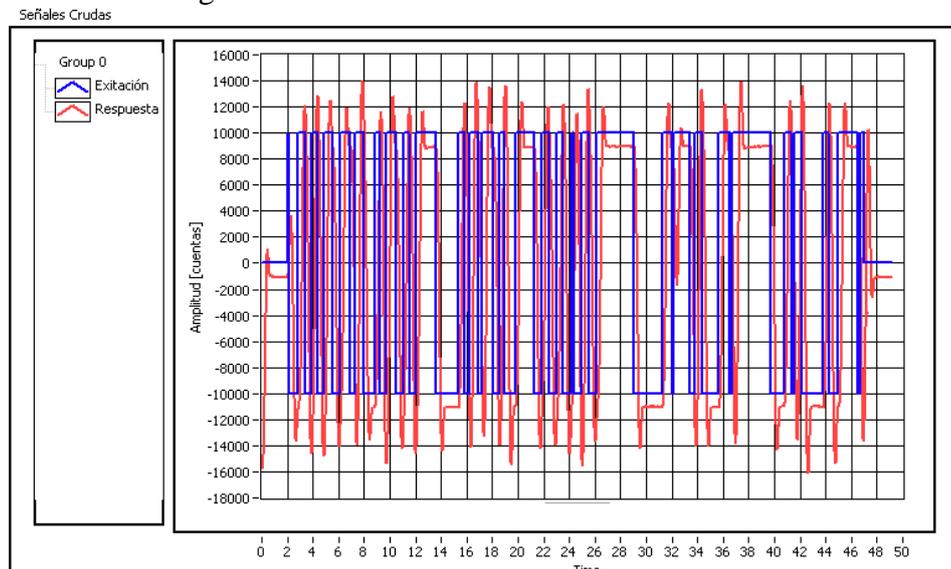


Figura 5: Señales Estímulo (Excitación) Y Respuesta Adquiridas En El Ensayo

### 5.1 Pre procesamiento

El pre procesamiento de las señales adquiridas asegurará que los cálculos sucesivos no se vean afectados por ruidos externos, problemas de escalas, sesgos, etc (SI Manual06).

Con este fin se eliminó el offset que se observa en la Figura 5, ya que el modelo estimado es una linealización alrededor del punto de operación. Además se normalizaron las señales de entrada y de salida, para poder unificar criterios con ensayos futuros.

## 6 ESTIMACIÓN DE MODELOS

Para cuantificar la calidad del modelo resultante, se simuló su respuesta al ser excitado por la misma señal estímulo del ensayo, y finalmente se graficaron las señales: estímulo, respuesta (medida) y respuesta del modelo estimado (simulación).

Luego para poder cuantificar la proximidad entre el modelo estimado y el real, se definió la señal error, como el módulo de la diferencia entre la respuesta medida y la simulada.

Si el modelo fuese una aproximación exacta a la real, entonces la señal error sería cero, por lo que la media y su desviación estándar serían nulas. En consecuencia, la aproximación será

más cercana a la realidad mientras menor sea la señal error.

De este modo se repitió el análisis para diferentes ensayos, obteniendo así varios modelos que fueron evaluados según el valor medio de la señal error y su desviación estándar.

El modelo matemático que posee el menor error asociado, fue finalmente procesado según el proceso indirecto para así obtener el modelo de la planta a controlar; que luego se trasladó a SISO TOOLS de MATLAB, que se usará en el desarrollo del controlador.

Finalmente se presenta la respuesta al escalón calculada en MATLAB. Los resultados se presentan en la siguiente sección para cada eje evaluado.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Azimut TV Tracker

El modelo matemático con un error promedio asociado de 0.09 y una desviación estándar de 0.13 es:

$$F_{azimut} = \frac{0.9743 + 0.1434s - 0.0134s^2 + 0.000403s^3}{1 + 0.3833s + 0.0648s^2 + 0.00563s^3 + 0.000325s^4} \quad (5)$$

La Figura 6, muestra un intervalo de diez segundos del total del ensayo que duró 55 segundos. En este intervalo se puede observar la respuesta de la planta real y la modelada, así como también la evolución de la señal error (Figura 7). Este intervalo fue seleccionado especialmente, ya que es el más representativo porque contiene zonas de una magnitud de error mínima y máxima del ensayo.

Luego de aplicar la Ecuación 2, el modelo matemático de la planta determinada por cálculo indirecto es:

$$G_{azimut} = \frac{0.9743 + 0.1435s - 0.0134s^2 + 0.000403s^3}{0.02567 + 0.239s + 0.0781s^2 + 0.00521s^3 + 0.000325s^4} \quad (6)$$

Y la respuesta al escalón estimada por SISO TOOLS se puede observar en la Figura 8.

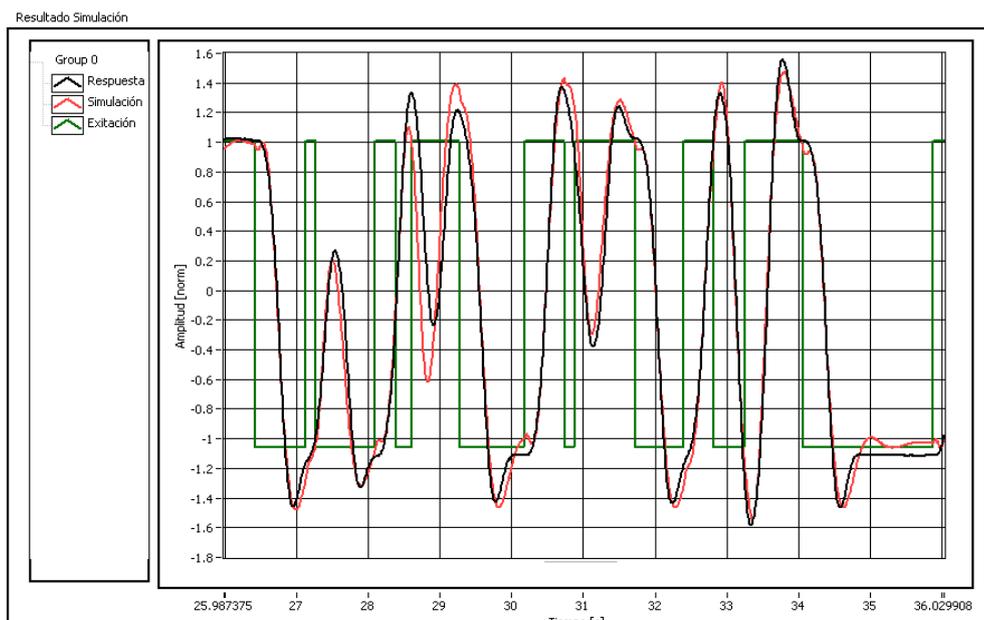
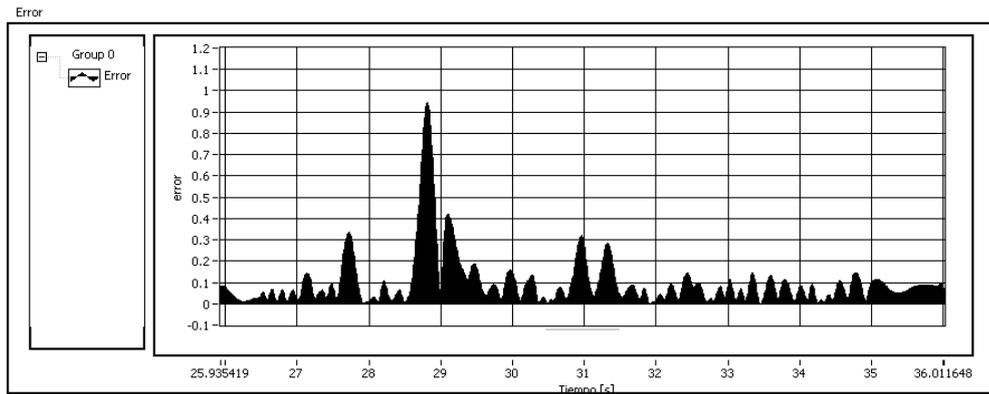
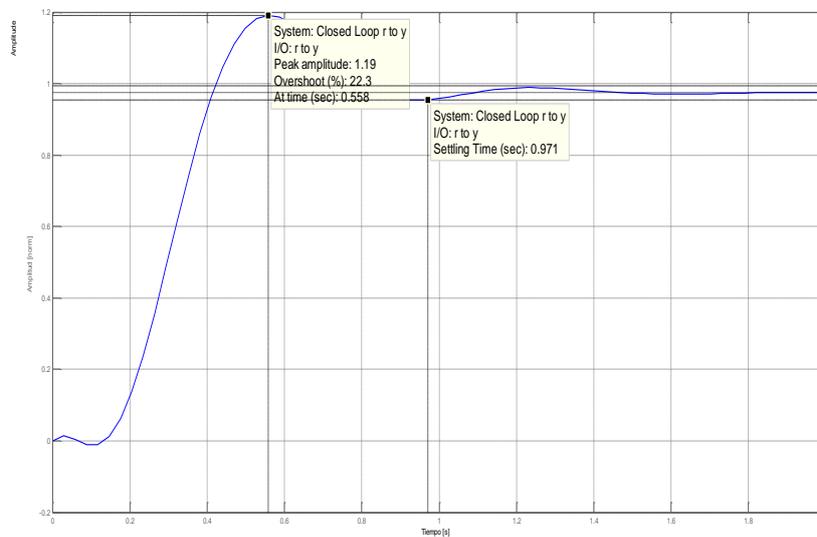


Figura 6: Señales Estimulo, Respuesta De La Planta, Y Respuesta Del Modelo Estimado (Azimut)



**Figura 7: Señal Error Correspondiente Al Ensayo En Azimut**



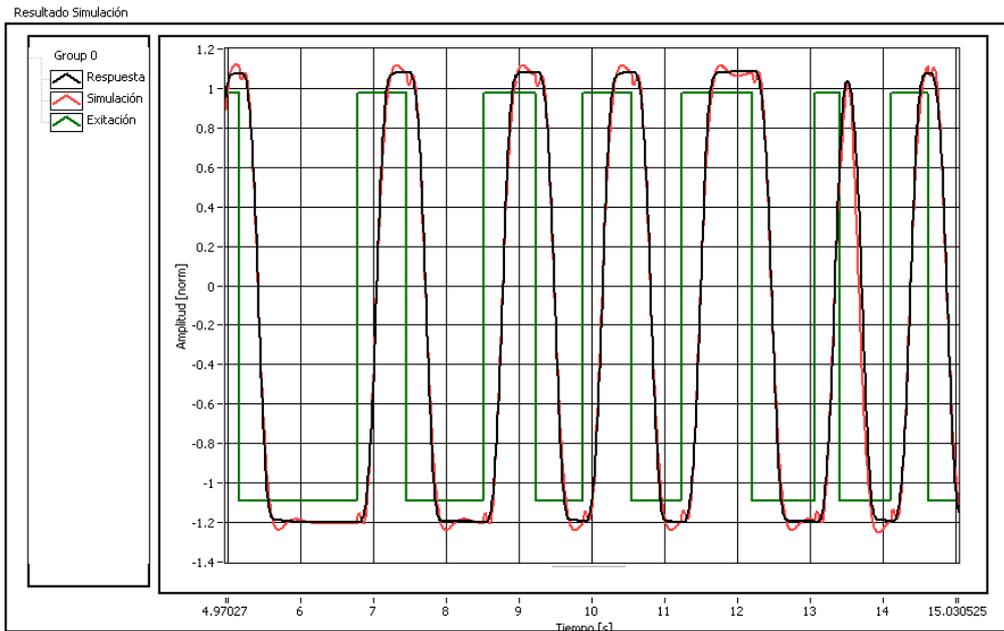
**Figura 8: Respuesta Al Escalón Unitario De La Planta G (Azimut)**

## 7.2 Elevación TV Tracker

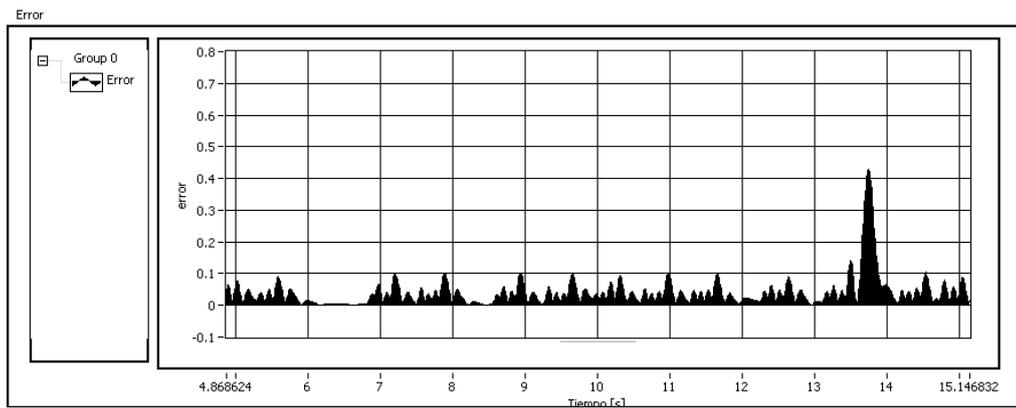
El modelo matemático con un error promedio asociado de 0.04 y una desviación estándar de 0.07 es:

$$F_{\text{elevación}} = \frac{1.1055 + 0.047s - 0.001810s^2}{1 + 0.207s + 0.0170s^2 + 0.000776s^3} \quad (7)$$

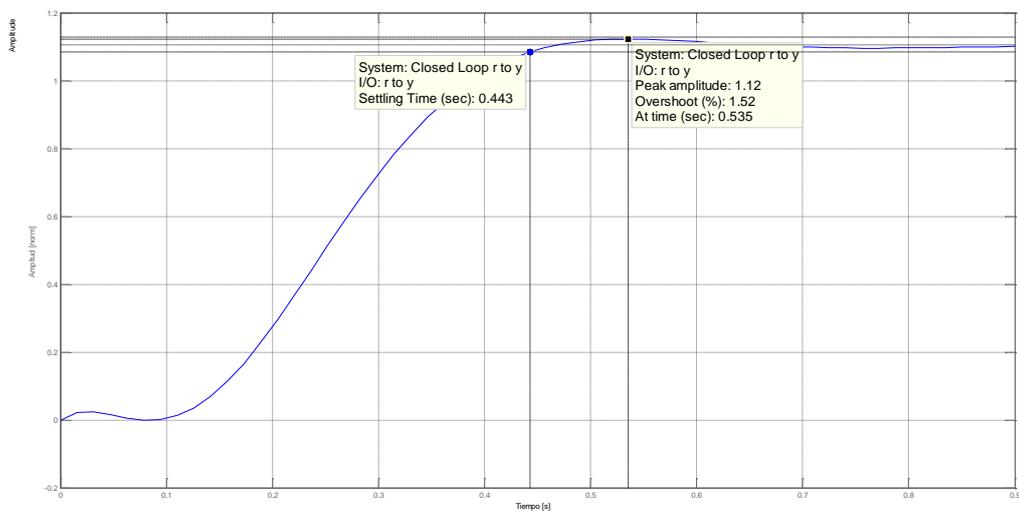
$$G_{\text{elevación}} = \frac{1.105 + 0.0647s - 0.00181s^2}{0.1055 + 0.2714s + 0.01517s^2 + 0.0007759s^3} \quad (8)$$



**Figura 9: Señales Estímulo, Respuesta De La Planta, Y Respuesta Del Modelo Estimado (Elevación)**



**Figura 10: Señal Error Correspondiente Al Ensayo En Elevación**



**Figura 11: Respuesta Al Escalón Unitario De La Planta G (Elevación)**

## 8 CONCLUSIONES

Mediante el proceso de system identification, se logró obtener el modelo matemático de cada uno de los ejes del pedestal de seguimiento, TV Tracker.

Esto permitirá calcular los parámetros del controlador PID. Cabe destacar que por estar en una etapa de desarrollo, en caso de desear modificar la configuración de la montura cambiando algún servomotor, el agregado de alguna carga adicional (cámara de televisión, antenas, etc), se puede lograr determinar el nuevo modelo matemático sin grandes dificultades para la luego calcular un controlador de precisión.

Las cualidades de system identification observadas en este trabajo: i) la capacidad de estimación en configuración de lazo cerrado, ii) modelos estimativos de caja gris o caja negra, y iii) la precisión del modelo estimado, hacen de éste un proceso prometedor y confiable para la resolución de un paso fundamental en el control automático.

## REFERENCIAS

- Jer-Nan, J., y Minh Q. Phan, Identification and Control of Mechanical Systems. *Cambridge University Press*, 2004
- Maybeck, S. Peter, Stochastic Models, Estimation, and Control, Volume 1". *Academic Press, Inc.* 1979
- Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. *Prentice Hall*, 1998
- System Identification User's Manual, *National Instruments*, 2006