

Identificación de sistemas usando MATLAB®

3.1. Antecedentes

Debido a los avances en las tendencias tecnológicas a nivel industrial y comunicacional, y al constante mejoramiento de las industrias locales es necesario familiarizar a los estudiantes con los ambientes laborales actuales para de esta manera llegar a un nivel competitivo acorde con las exigencias del medio.

En la actualidad la mayoría de las propuestas de sistemas de control están basadas en un modelo del proceso considerado y sujeto a parámetros determinados, por lo que el modelado y la identificación se convierten en etapas importantes en los diseños. Para satisfacer los requerimientos deseados en un proceso, el sistema de control debe garantizar la operación de este con un buen desempeño sobre un rango amplio de condiciones de operación.

Modelos matemáticos utilizados comúnmente en la representación de los sistemas físicos se basan en una representación teórica que describe los procesos en forma aproximada. Los modelos matemáticos de plantas o procesos son obtenidos mediante dos técnicas fundamentales, modelamiento e identificación. Debido a la mayor complejidad de los modelos matemáticos se recurre generalmente al método de la identificación experimental del proceso.

3.2. Teoría

La identificación de sistemas es un proceso útil para modelar sistemas que no pueden ser fácilmente representados en términos de sus ecuaciones matemáticas. El objetivo concreto que se persigue mediante la identificación de un proceso determinado es la obtención de un modelo matemático del sistema. El modelo matemático proporciona la información de los ceros y polos del sistema en el plano de la variable compleja s , información que permite conocer el comportamiento dinámico en el dominio del tiempo del sistema. En todo sistema podemos distinguir dos tipos de señales:

1. Señales de entrada: Las señales de entrada pueden ser:

Señales de Referencia: Son aquellas señales que pueden ser fijadas por el operador del sistema para establecer el nivel de las señales de salida.

Señales de Perturbación: Son señales que afectan el comportamiento del sistema y generalmente no están bajo el control del operador del proceso.

2. Señales de salida: Son señales que nos indican como se está comportando el sistema.

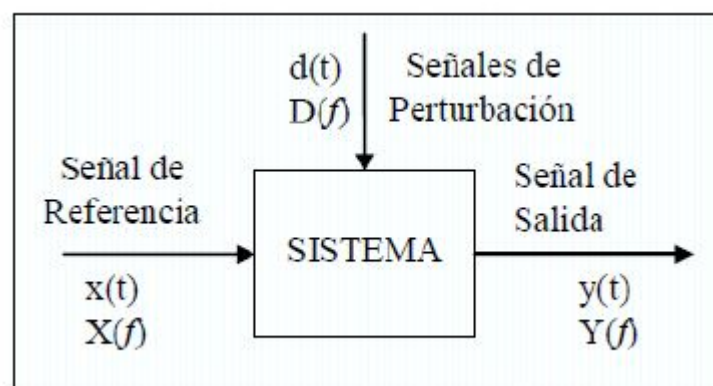


Figura 3.1: Señales de un sistema de control

Las señales del sistema están en el dominio del tiempo, pero pueden ser manipuladas matemáticamente usando la transformada de Laplace, para llevarlas al dominio de la variable compleja "s". Para efecto de identificación, las señales son muestreadas a tiempos discretos que usualmente están igualmente distanciados T unidades de tiempo. Para realizar la identificación de un sistema, MATLAB® ofrece una herramienta llamada **System Identification** que permite realizar este procedimiento de manera sencilla.

3.3. Procedimiento para la identificación

1. Diseño del experimento.- Se especifican los parámetros a utilizar para la identificación, tales como: tiempo de muestreo, tiempo de simulación, período del tren de pulsos, etc.
2. Adquisición de datos.- Se obtienen datos de la planta para su posterior procesamiento.
3. Acondicionamiento de señales.- Se diseña y aplica el filtro, y luego se determinan y restan los puntos de operación a la entrada y salida del sistema.

4. Selección de grupos de datos para identificación y validación.
5. Identificación hasta obtener un porcentaje de ajuste aceptable.

3.4. Ejemplo

Como ejemplo se realizará la simulación e identificación de un sistema de aire acondicionado donde la entrada del sistema corresponde al voltaje y la salida del sistema corresponde a la temperatura.

3.4.1. Diseño del experimento

Al realizar el diagrama de bloques para el experimento, debe obtener algo similar a lo mostrado en la figura 3.2. Como se observa en la imagen, se debe incluir un tren de pulsos sumado a un escalón para excitar el sistema, el bloque de la planta o función de transferencia y un Scope para visualizar la salida del sistema. De manera opcional, puede utilizar un Mux para multiplexar varias señales y poder visualizar en un sólo Scope tanto la entrada como salida del sistema. Debe usar el bloque To Workspace o configurar el Scope para poder exportar los datos hacia el espacio de trabajo.

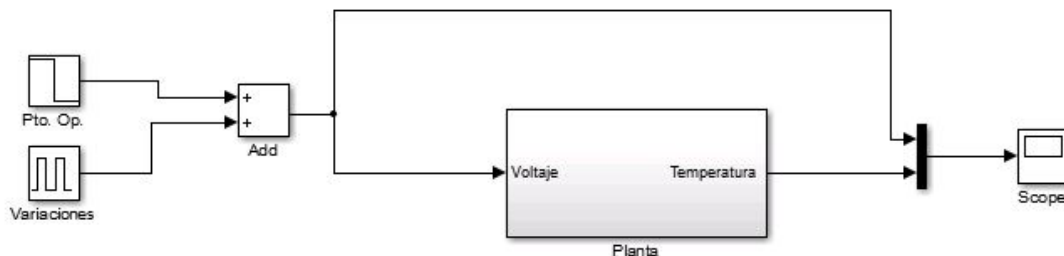


Figura 3.2: Diagrama de bloques

Para realizar la adquisición de datos de manera correcta, es necesario configurar ciertos parámetros como:

1. Amplitud del tren de pulsos: Se la configura como dos veces el valor de la variación de la entrada (ΔIn).
2. Período del tren de pulsos: Se lo configura con un valor mayor o igual a dos veces el tiempo de estabilización del sistema (T_{ss}). La mitad de este parámetro indica cada cuánto tiempo se produce una variación al punto de operación del sistema; este parámetro debe ser múltiplo del tiempo de muestreo.

3. Ancho del tren de pulsos: También conocido como duty cycle; se configura en 50 %.
4. Retraso del tren de pulsos: Se lo configura con el tiempo de arranque del sistema (T_{arr}). Recuerde que se requiere energizar al sistema en $t=0$ y que la salida se estabilice en el punto de operación antes de realizar la variación en la entrada.
5. Tiempo de paso de la señal escalón: Se configura para que sea igual al tiempo de arranque del sistema.
6. Valor inicial de la señal escalón: Se configura para que sea igual al valor de operación de la entrada ($inop$).
7. Valor final de la señal escalón: Se configura para que sea igual al punto de operación de la entrada menos la variación de la entrada ($inop - \Delta In$). Se realiza una variación negativa ya que el tren de pulsos, que se suma a la señal escalón, toma el valor de 0 el valor de $2\Delta In$. Al sumar dichos valores al valor final del bloque Step se genera el efecto deseado a la entrada del sistema.
8. Duración del experimento: El tiempo de simulación o duración del experimento debe ser **al menos** $4P_{TP} + T_{arr}$.
9. Tiempo de muestreo: Se selecciona de manera que se cumpla el teorema de muestreo de Nyquist; dependerá del ancho de banda del sistema en estudio y su estimación se detalla más adelante. Este parámetro indica cada cuánto tiempo se almacena una muestra del sistema.

Para configurar los 8 parámetros desconocidos del sistema, se requiere conocer o estimar los siguientes parámetros:

Punto de operación: Niveles o estados donde normalmente opera el sistema y el mismo se encuentra estable. Se selecciona en base a las especificaciones del operador y de la curva característica del sistema.

Variación o incremental de entrada: Indica cuánto se desvía o varía la señal de entrada con respecto al punto de operación. Para la identificación, estas variaciones deben ser tanto positivas como negativas y de igual amplitud; se selecciona en base a las especificaciones del operador y de la curva característica del sistema.

Tiempo de arranque del sistema: Es el tiempo requerido para que la salida se estabilice en su punto de operación al energizar el sistema.

Tiempo de estabilización: Es el tiempo requerido para que la salida quede encerrada en la banda del 2 % luego de realizar una variación en el punto de operación de la entrada.

Sobrenivel porcentual y tiempo pico: Para sistemas cuya dinámica sea similar a la de un sistema de segundo orden subamortiguado, se requiere estimar el coeficiente de amortiguamiento a través del sobrenivel porcentual para la estimación del tiempo de muestreo. De manera alternativa, se puede estimar el tiempo pico en vez del tiempo de estabilización para mejorar la precisión de la estimación del tiempo de muestreo cuando se presenta esta dinámica.

Los tres últimos parámetros se estiman de manera experimental a partir de una prueba escalón. Dicha prueba consiste en llevar el sistema a su punto de operación y luego realizar una variación (ya sea positiva o negativa) a la entrada. El tiempo escogido para realizar la variación a la entrada correspondería al tiempo de arranque y los otros parámetros se hallan experimentalmente de la dinámica del sistema **luego del cambio**.

Para hallar el tiempo de muestreo se utilizarán las siguientes expresiones, dependiendo si la dinámica es de primer orden o de segundo orden subamortiguada respectivamente:

$$T_m = \frac{\tau\pi}{10} \quad (3.1)$$

$$T_m = \frac{\tau\zeta\pi}{10} \quad (3.2)$$

Sin embargo, como se mencionó en clases, se tratará de utilizar la notación $a \times 10^n$, donde n corresponde a un número entero y se preferirá usar 1, 2 o 5 para la variable a siempre “redondeando” hacia el menor. Por ejemplo, si $T_m = 0,45$, el tiempo de muestreo a configurar en el experimento sería 2×10^{-1} .

Para más información acerca de los parámetros del experimento, consulte el **Anexo A** del documento.

En la figura 3.3 se muestra la configuración del bloque Step(Escalón) que representa el punto de operación del sistema. Para el ejemplo el punto de operación es de 3 V por lo que el Initial value es este mismo valor. Note que se utiliza un Step time de 30 segundos para permitir que el sistema llegue estabilizarse en el punto de operación; este valor depende de la dinámica de cada sistema. Luego de que transcurra el Step time, en la simulación, se realiza la primera variación al punto de operación. Para este ejemplo, la variación escogido fue de 0.5 V por lo que el Final Value es 2.5 V. No es necesario modificar el parámetro **Sample Time** de este bloque; se puede utilizar el valor que aparezca por default.

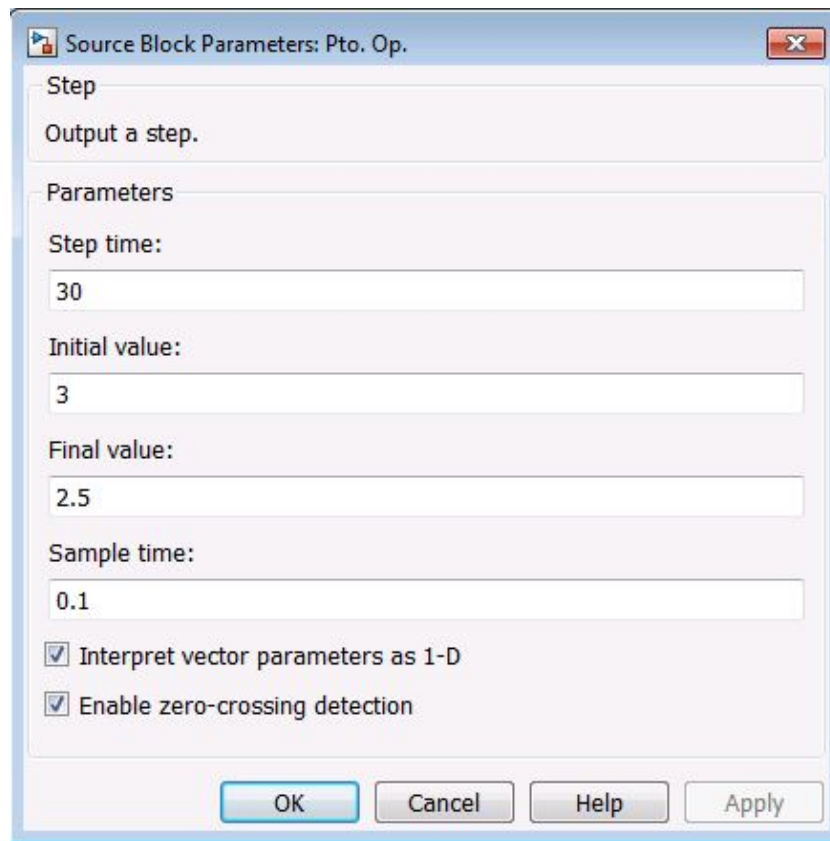


Figura 3.3: Parámetros de Referencia del Sistema

La señal del Step se suma a un tren de pulsos cuyos parámetros para este ejemplo son los que se muestran en la figura 3.4. La amplitud del tren de pulsos es igual a la amplitud total de las variaciones; para este ejemplo este valor es 1 ya que las variaciones son de $\pm 0,5$ V. El período del tren de pulsos debe ser mayor o igual a dos veces el tiempo de estabilización y a su vez tiene que ser múltiplo del tiempo de muestreo del sistema. Por último el Phase Delay necesario para el tren de pulsos es igual al Step time, ya que es el tiempo que debe transcurrir sin variaciones en la referencia para que el sistema se estabilice en el punto de operación.

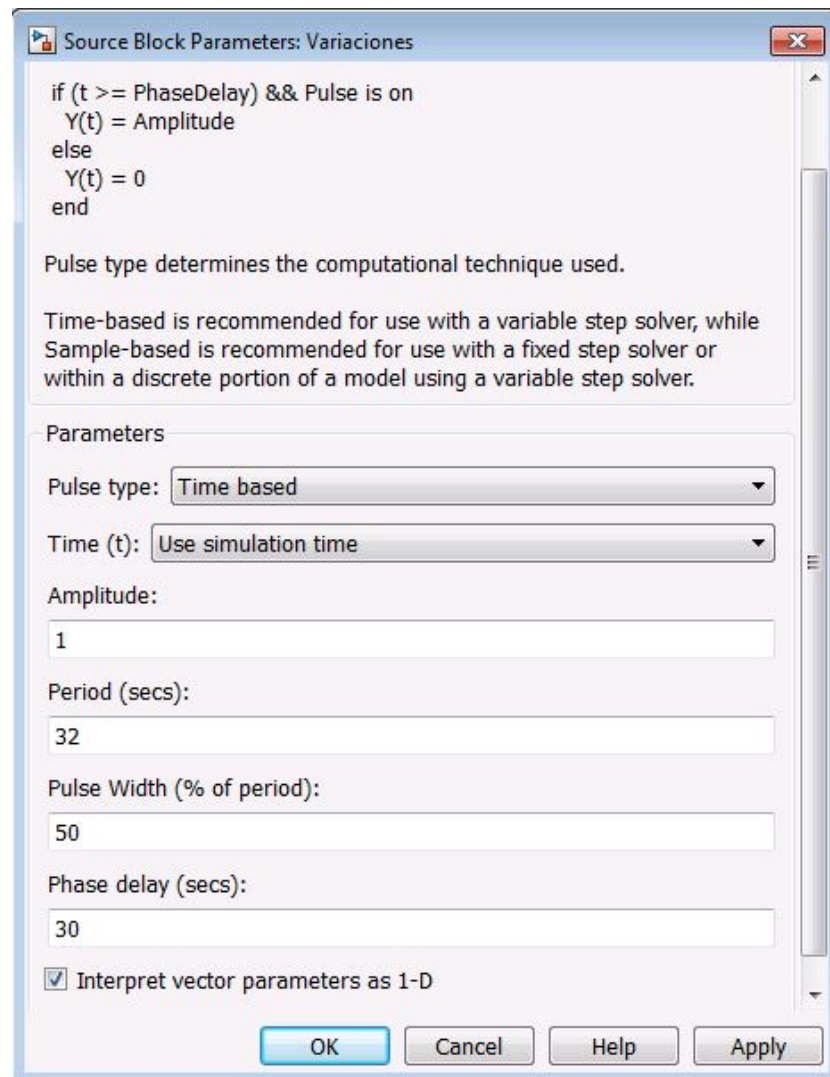


Figura 3.4: Parámetros de Variaciones de la Referencia

Para configurar el tiempo de muestreo debe acceder a la ventana de Model Configuration Parameters haciendo click en el ícono del engranaje que se muestra en la figura 3.5. Le aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 3.6. Dar click en Variable-Step y seleccionar Fixed-Step; la ventana deberá parecerse a la mostrada en la figura 3.7. Escribir en el casillero alado de Fixed-step size(fundamental sample time) el valor de tiempo de muestreo (T_m) calculado según el **Anexo A**. Para este ejemplo, este valor fue de 0.1 segundos.



Figura 3.5: Menú

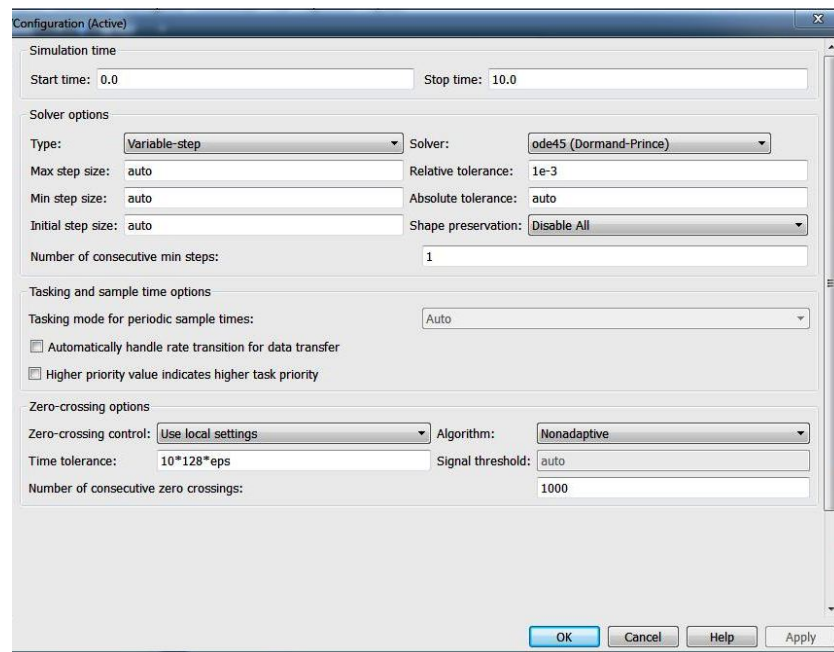


Figura 3.6: Model Configuration Parameters: Variable Step

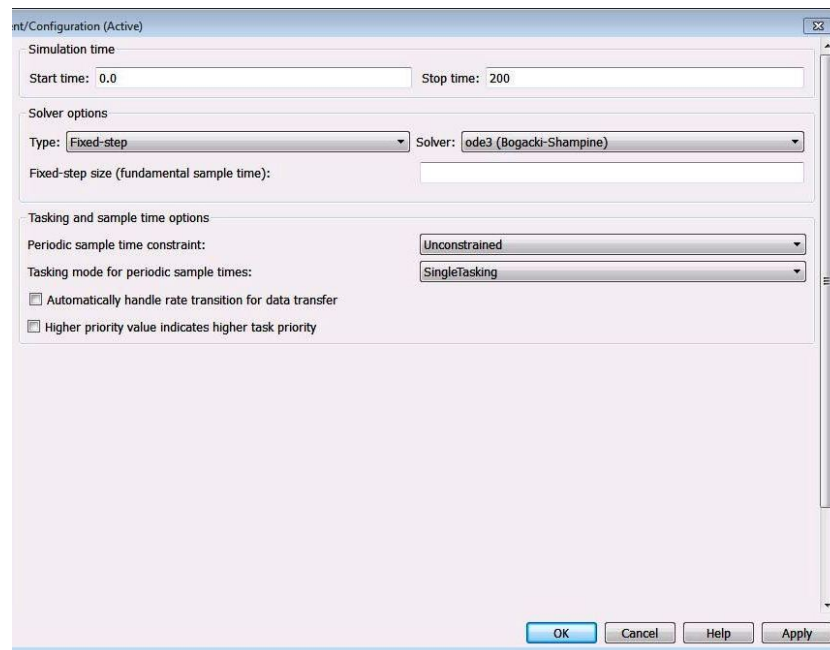


Figura 3.7: Model Configuration Parameters: Fixed Step

Por último el tiempo de simulación debe ser fijado al llamar a simular el modelo desde el script o directamente en Simulink; para este ejemplo se escogió un tiempo de simulación de 200 segundos, tal como se muestra en la figura 3.5.

3.4.2. Adquisición de datos

Para almacenar los datos de la simulación o de de la planta en el workspace se debe utilizar el bloque To Workspace o configurar el Scope para que realice esta función.

Presione el botón Start simulation para que empiece la simulación o empiece a correr la planta o ejecute la simulación desde el script. Al transcurrir el tiempo de simulación previamente seteado, la simulación se detendrá automáticamente y en el Workspace de MATLAB® aparecerá la variable descrita en las configuraciones del Scope o bloque To Workspace. Esta variable será una matriz donde cada columna representa una señal o dato diferente. Al usar el Scope, la primera columna siempre corresponde al vector de tiempo, es decir el tiempo en el que se tomó cada muestra; los valores de este vector deben ir en pasos igual al tiempo de muestreo. El resto de columnas corresponderán a las señales que se observan en el Scope y el orden de las mismas dependerá del puerto del Mux en que se hayan conectado dichas señales.

Para este ejemplo se obtuvieron los datos mostrados en la figura 3.8. La variable almacenada en este caso fue llamada data y cuenta con 3 columnas; la primera columna es el vector de tiempo, la segunda

columna es la señal de referencia o entrada de la planta y la tercera columna es la respuesta o salida de la planta. Note que en la figura 3.2 la señal de entrada de la planta se conecta al puerto número uno del Mux por lo que corresponde a la segunda columna de la matriz data, y la señal de salida de la planta se conecta al puerto número dos del Mux por lo que corresponde a la tercera columna de la matriz data.

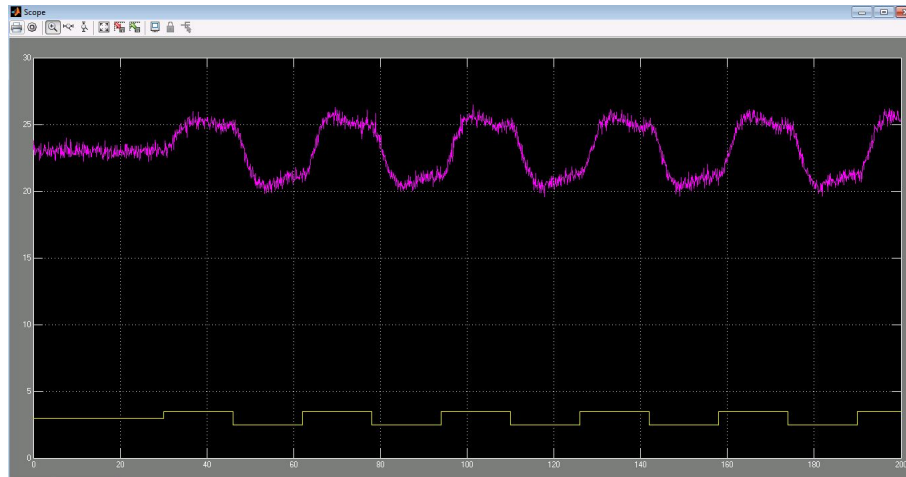


Figura 3.8: Adquisición de Datos

Para los reportes debe mostrar las gráficas de entrada y salida del sistema vs. tiempo; puede ser ambas gráficas en una sola figura o cada gráfica en una figura diferente, pero siempre se deben mostrar las señales con respecto al tiempo y detallando título de la gráfica y leyenda si fuese necesario. En la figura 3.9 se muestra en una sola ventana la entrada y salida del sistema del ejemplo con respecto al tiempo. En casos donde la escala de la entrada y salida son muy distantes es preferible trabajar con dos ventanas separadas, por ejemplo si se trabajara con una entrada en el orden de los miliamperios y una salida en rpm.

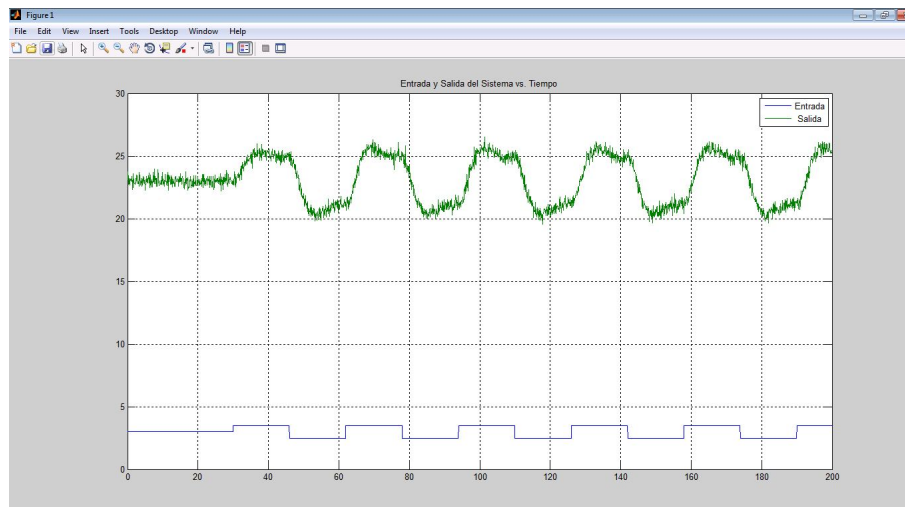


Figura 3.9: Entrada y Salida del Sistema

3.4.3. Acondicionamiento de señales

Los datos obtenidos de plantas reales normalmente tienen un nivel de ruido significativo que puede afectar el proceso de identificación del sistema en gran medida, por lo tanto es necesario filtrar los datos antes de realizar la identificación. Los filtros más sencillos tienen la siguiente forma: $F(s) = \frac{p_f}{s + p_f}$ donde p tiene que ser al menos 5 veces mayor al polo dominante de la planta. Para el ejemplo asumimos un tiempo de estabilización de 16 segundos, por lo tanto:

$$T_{ss} = 4\tau$$

$$\tau = \frac{16}{4} = 4$$

$$\tau = \frac{1}{p_1}; \text{ donde } p_1 \text{ representa el polo dominante de la planta.}$$

$$p_1 = \frac{1}{4} = 0,25$$

$$p_f \geq 5 * 0,25$$

$$p_f \geq 1,25$$

Para el ejemplo se decidió utilizar $p_f = 10p_1 = 2,5$. Una vez ingresada la función de transferencia del filtro se utiliza el comando **lsim** para filtrar los datos, y se realiza la gráfica de los datos filtrados y sin filtrar vs. tiempo en una misma figura como se muestra en la imagen 3.10. El filtro se encuentra bien diseñado siempre y cuando la señal filtrada no varíe su dinámica con respecto a la señal sin filtrar; esto es, que la señal filtrada se encuentre dentro de la señal sin filtrar pero que tenga menor nivel de ruido. Consulte la ayuda de MATLAB® para información acerca del comando **lsim**.

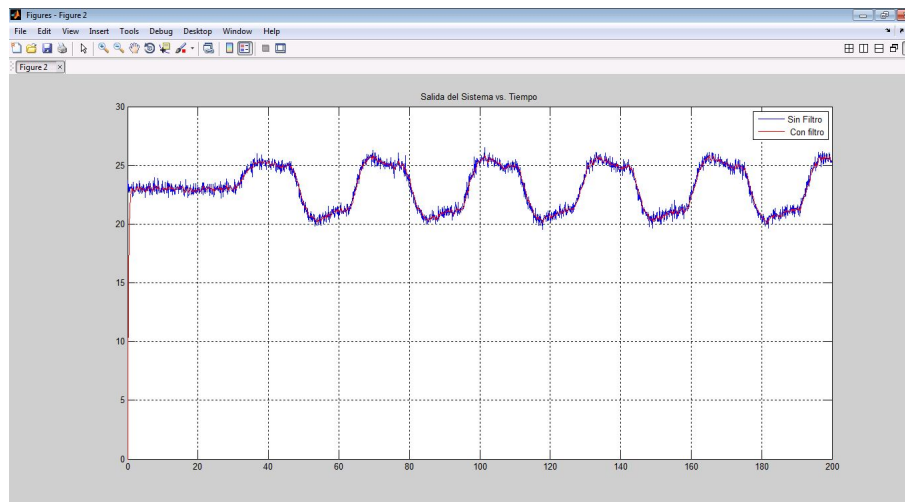


Figura 3.10: Salida del Sistema: Filtrada y Sin filtrar

Luego de filtrar los datos, es necesario hallar y restar el punto de operación de las señales de entrada y salida del sistema. Recuerde que en control se trabajan con las variaciones de los sistemas alrededor de sus distintos puntos de operación. El punto de operación de la entrada es conocido ya que es escogido al inicio del experimento, pero el punto de operación correspondiente en la salida debe ser hallado debido al ruido del sistema y variaciones que pueden ocurrir con respecto al valor referencial de la curva característica. Para hallar este valor, se deben promediar algunos datos de la salida cuando el sistema se encontraba estable, antes de realizar variaciones alrededor del punto de operación (antes del tiempo de arranque). Para este ejemplo, esto quiere decir que se deben promediar datos antes de $t=30$ segundos. Utilice el comando **mean** y consulte la ayuda de MATLAB® de ser necesario.

NOTA: Debe considerar un rango de datos en el que el sistema se encuentre estable, no tomar en cuenta todo el arranque de la planta.

El punto de operación en la salida fue de 23 grados centígrados correspondientes a una entrada de 3V. Luego de restar los puntos de operación de la entrada y salida del sistema, se debe graficar lo obtenido para adjuntarlo al reporte y verificar que los puntos de operación hayan sido bien calculados. Para el experimento se obtuvo lo mostrado en la figura 3.11. Note como ambas gráficas están centradas en cero; las gráficas reflejan cómo varía la salida del sistema alrededor del punto de operación cuando se realizan variaciones en la entrada del sistema alrededor del punto de operación.

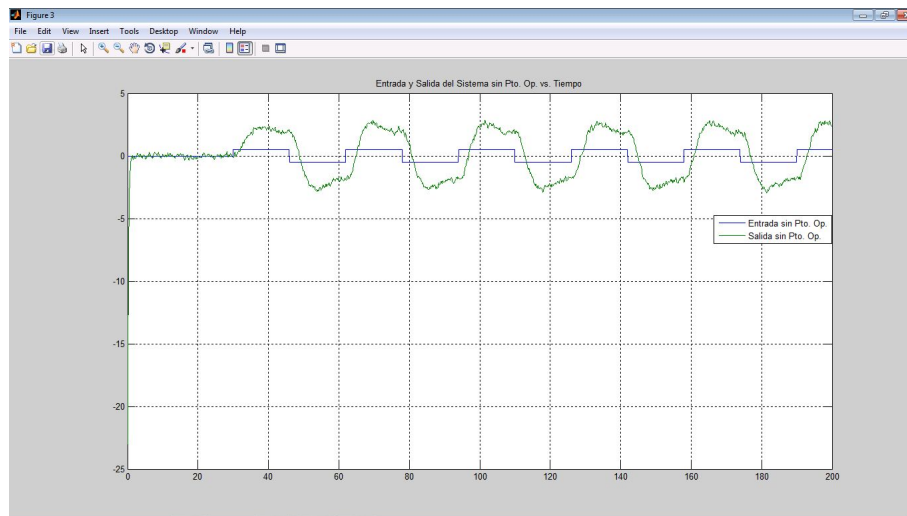


Figura 3.11: Variaciones en la entrada y salida del sistema

Para empezar a hacer la identificación usando el toolbox System Identification de MATLAB[®], debe escribir el comando `ident` en el Command Window y presionar Enter. La ventana mostrada en la figura 3.12 aparecerá. Alternativamente, puede usar el comando `SystemIdentification`.

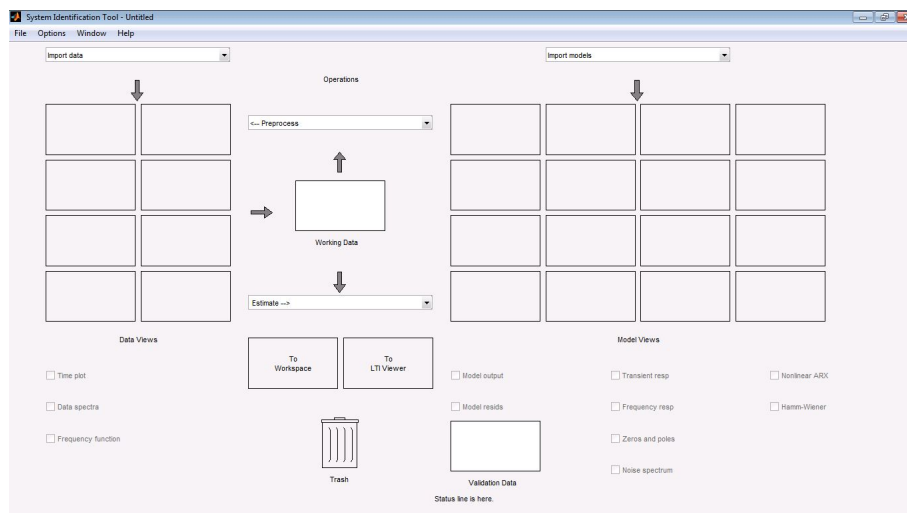


Figura 3.12: System Identification

El siguiente paso es importar los datos para la identificación, por lo que debe dar click a `Import data` y luego seleccionar `Time Domain data` como se muestra en la figura 3.13.

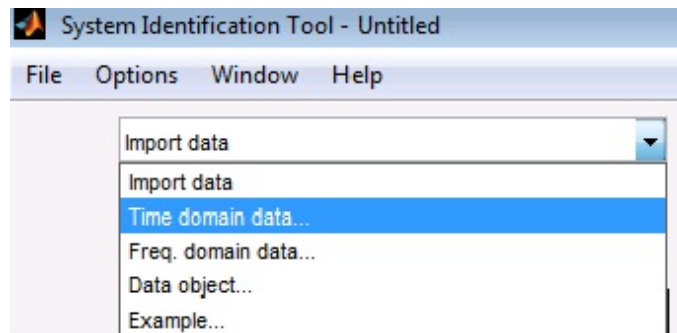


Figura 3.13: Import Data

Luego aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 3.14. En Input deberá escribir el nombre de la variable que contenga la señal de entrada sin el punto de operación así como también indicar el rango de datos que se desea importar en caso de ser necesario. De manera similar para Output, deberá escribir el nombre de la variable que contenga la señal de salida sin el punto de operación así como también indicar el rango de datos que se desea importar en caso de ser necesario. Por ejemplo si se desea importar todos los datos de la segunda columna de una variable llamada altura, debería escribir `altura(:,2)`.

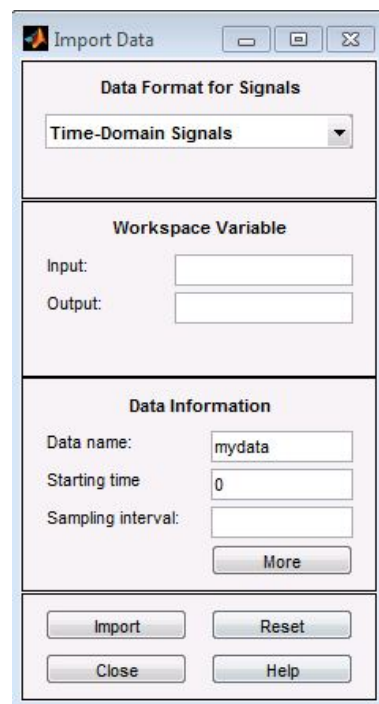


Figura 3.14: Import Data: Time Domain Signals

En Starting time escriba cero y en Sampling interval escriba el tiempo de muestreo calculado y usado (T_m); luego dé click en Import. La ventana del System Identification deberá verse como la figura 3.15.

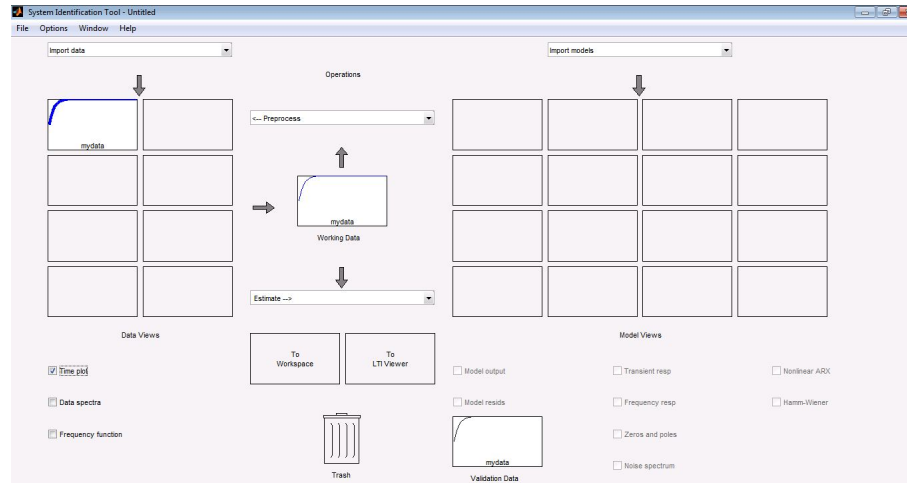


Figura 3.15: System Identification: Datos importados

Si activa la casilla time plot, podrá visualizar los datos importados tal como se muestra en la figura 3.16.

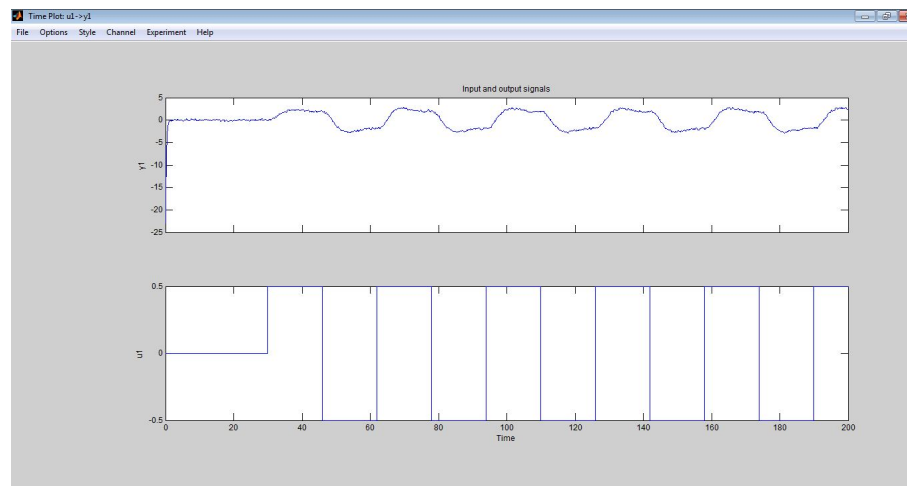


Figura 3.16: Datos importados

3.4.4. Selección de grupos de datos para identificación y validación.

Se deben seleccionar dos grupos de datos para realizar la identificación.

Working data: Son los datos con los que el programa estima la función de transferencia del sistema.

Validation data: Son los datos contra los que se compara la respuesta de la función de transferencia encontrada.

Para seleccionar un rango de datos, dar click en Preprocess y seleccione la opción Select Range, tal como se muestra en la figura 3.17. Se abrirá una ventana como la mostrada en la figura 3.18; debe seleccionar al menos un período completo del tren de pulsos y luego dar click al botón Insert. El grupo de datos seleccionado aparecerá junto a los datos importados en la ventana del System Identification.

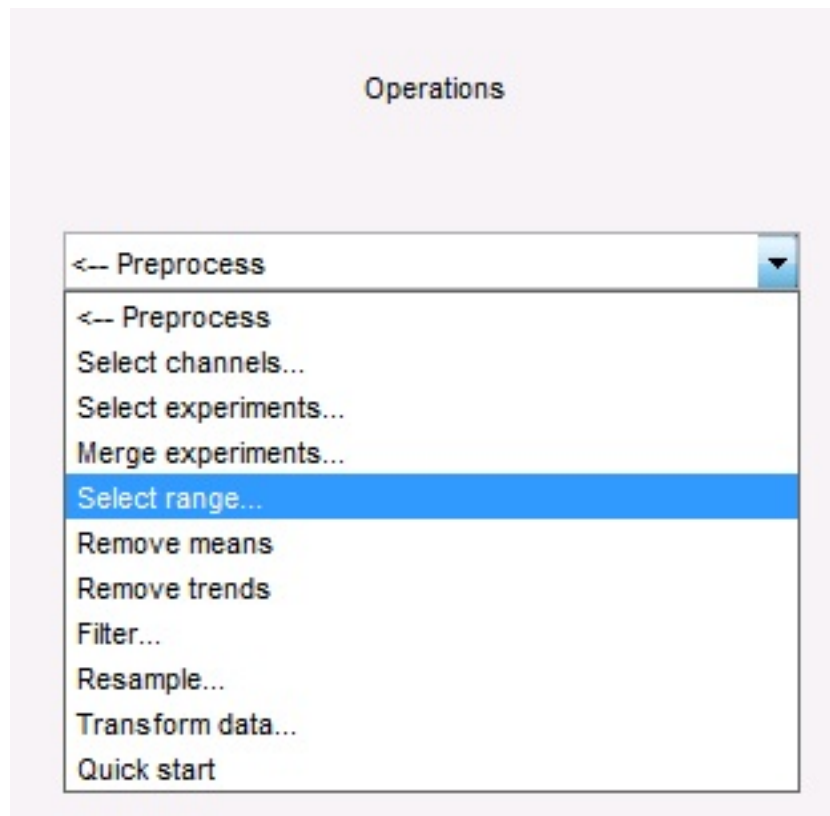


Figura 3.17: Select Range

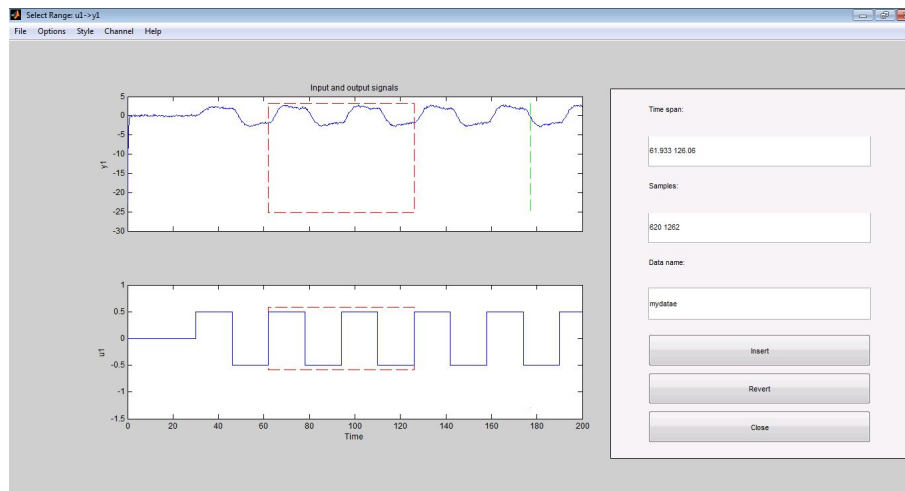


Figura 3.18: Time plot: Select Range 1

Repetir el proceso anterior pero esta vez seleccione un grupo de datos diferente al escogido anteriormente: de igual manera debe escoger al menos un período completo del tren de pulsos. Para este ejemplo se escogieron los datos como se muestran en las figuras 3.18 y 3.19. Trate de que estos dos grupos de datos sean similares entre sí.

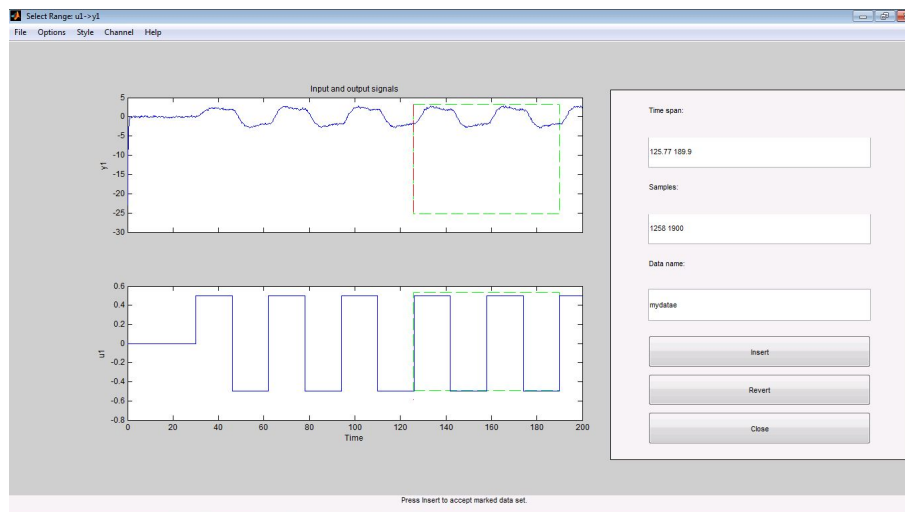


Figura 3.19: Time plot: Select Range 2

Si desactiva los datos importados dando click una vez sobre los mismos en la ventana principal del System Identification y revisa el time plot, se tendrá algo similar a lo que se muestra en la figura 3.20. Observe que los pulsos están de dos colores diferentes, donde cada color representa un conjunto de datos diferente. La ventana del System Identification debe ser similar a la mostrada en la figura 3.21.

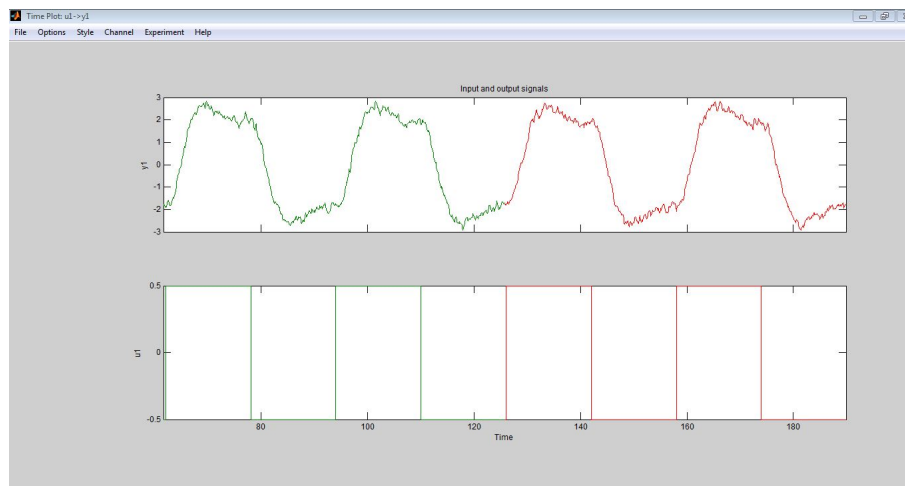


Figura 3.20: Time plot: Datos

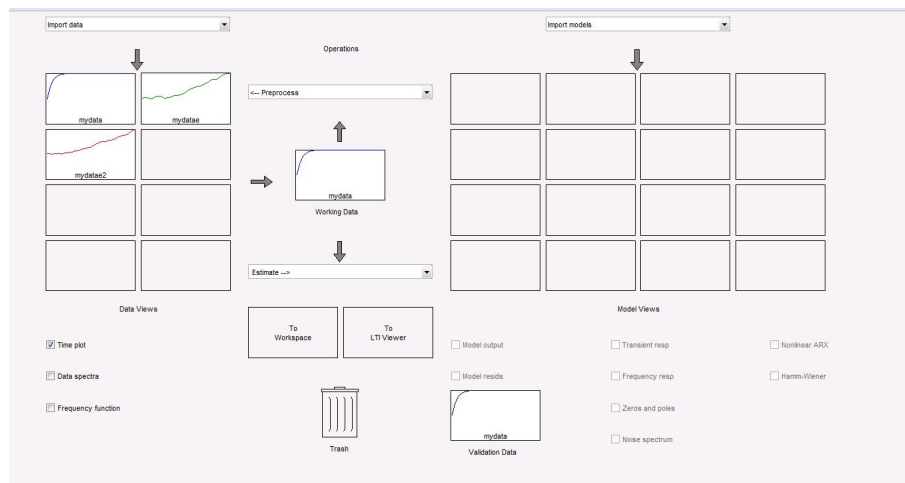


Figura 3.21: System Identification: Datos

Debe seleccionar uno de los conjuntos de datos para que sean los datos de trabajo y otro para que sean los datos de validación. Arrastre los datos escogidos a los recuadros de Working Data y Validation Data correspondientes, recuerde que estos deben ser dos grupos de datos distintos. Luego de realizar esto, la ventana del System Identification queda como la de la figura 3.22.

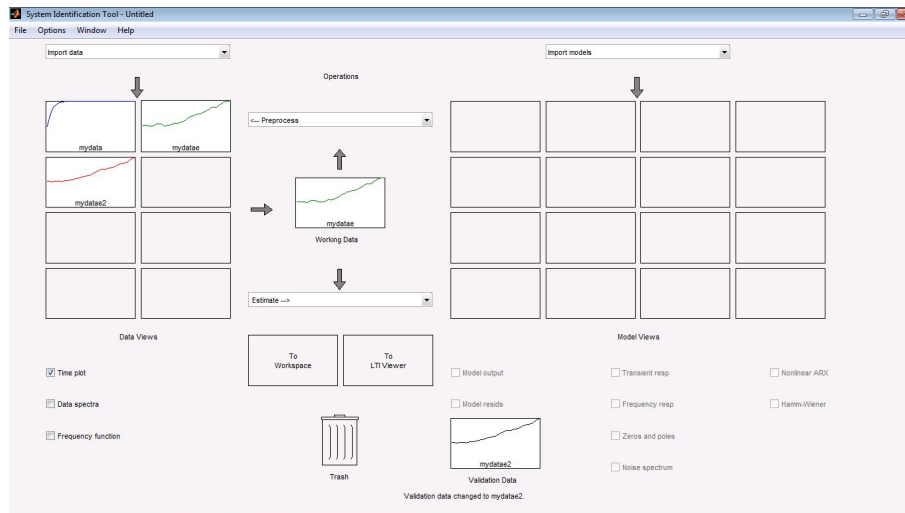


Figura 3.22: System Identification: Working Data y Validation Data

3.4.5. Identificación hasta obtener un porcentaje de ajuste aceptable.

El siguiente paso es estimar el modelo; es decir que el System identification encuentre una función de transferencia cuya respuesta a la entrada dada sea similar a la respuesta dada. Dar click en Estimate y luego en Process Models como se muestra en la figura 3.23.

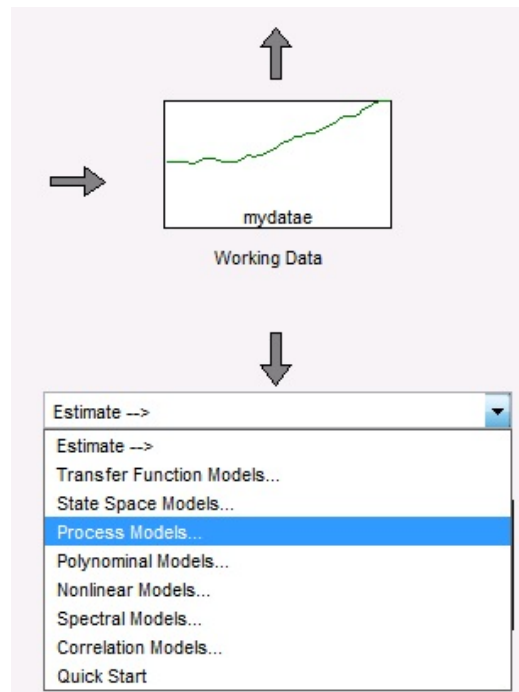


Figura 3.23: Estimate:Process Models

Aparecerá la ventana mostrada en 3.24; en esta ventana se le puede indicar al System Identification características del modelo a estimar como el orden de la función de transferencia, presencia de ceros, delay, o integrador, o si existen polos complejos conjugados en el caso de orden 2 o superior. También se puede indicar si se conoce algún parámetro como ganancia estática o algún polo o cero de la función de transferencia resultante. En la figura 3.25 puede observar que se pueden estimar modelos hasta de tres polos.

The screenshot shows the 'Process Models' dialog box. On the left, the 'Model Transfer Function' is displayed as $\frac{K}{(1 + T_{p1} s)}$. Below this, the 'Poles' section shows a dropdown menu set to '1' and a text box containing 'All real'. There are checkboxes for 'Zero', 'Delay', and 'Integrator', all of which are currently unchecked. On the right, a table lists parameters: K, Tp1, Tp2, Tp3, Tz, and Td. Each row has a checkbox, a 'Value' input field, an 'Initial Guess' dropdown (all set to 'Auto'), and 'Bounds'. The 'Initial Guess' section at the bottom right has three radio buttons: 'Auto-selected' (selected), 'From existing model:', and 'User-defined:'. Below these are input fields and a 'Value-->Initial Guess' button. At the bottom of the dialog, there are sections for 'Disturbance Model' (set to 'None'), 'Focus' (set to 'Simulation'), 'Initial condition' (set to 'Auto'), and 'Covariance' (set to 'Estimate'). There are also buttons for 'Options...', 'Display progress', 'Stop iterations', and a 'Name' field set to 'P1'.

Figura 3.24: Process Models

This screenshot is identical to the previous one, but the 'Poles' dropdown menu is open, showing a list of options: '1', '0', '1', '2', and '3'. The option '0' is currently selected and highlighted in blue. The rest of the interface remains the same.

Figura 3.25: Process Models: Número de polos

Los parámetros se escogen de acuerdo a previo conocimiento del modelo matemático del sistema. Por ejemplo si se conoce que la función de transferencia de un motor de corriente continua tiene un modelo de segundo orden y se requiere realizar la identificación del mismo, se debería escoger el número dos en la opción de Poles y se podrían realizar dos estimaciones, una con polos reales y una con polos complejos conjugados. Luego se debe verificar cuál se parece más al comportamiento real del sistema. Sin previo conocimiento del modelo, puede realizar diferentes combinaciones de los parámetros y mediante prueba y error escoger el modelo cuya respuesta se asemeje más a la respuesta real del sistema. Cuando termine de escoger los parámetros, dé click al botón Estimate. La ventana del System Identification deberá verse de la siguiente manera:

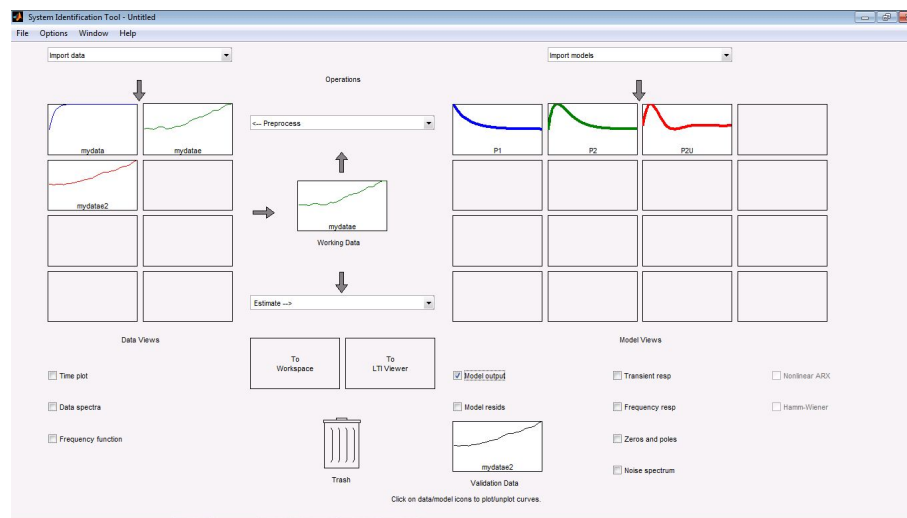


Figura 3.26: System Identification: Modelos

Dé click sobre la casilla de Model Output y se abrirá una ventana similar a la de la figura 3.27. Esta ventana indica de manera gráfica y numérica cuánto se parece o se aproxima la respuesta de los modelos estimados a la respuesta real del sistema. Note que cada sistema se representa por un color y nombre diferente. En el lado derecha de la ventana se observa el porcentaje de aproximación de la respuesta de cada modelo con la respuesta real. Recuerde que para considerar la identificación válida este valor debe ser mayor o igual al 80 % cuando se trabaja con datos obtenidos de una simulación. Además se debe tomar en cuenta la complejidad de la función de transferencia obtenida. Por ejemplo, suponiendo que para una función de segundo orden con polos reales se tenga un ajuste de 88 % y para una función de tercer orden, con un cero y dos polos complejos conjugados se obtenga un porcentaje de ajuste del 93 %, se debería optar por el modelo de segundo orden debido a que, aunque tiene un menor porcentaje de ajuste este sigue siendo bueno. Además la función de transferencia más sencilla resulta ser una ventaja al momento de diseñar controladores para dicha planta.

Para el ejemplo, se observa que el modelo P2U, representado de color rojo, es el que tiene mejor aproximación con un porcentaje del 93 %. El nombre del modelo indica que se trata de dos polos (P2)

y que los mismos son complejos conjugados(U).

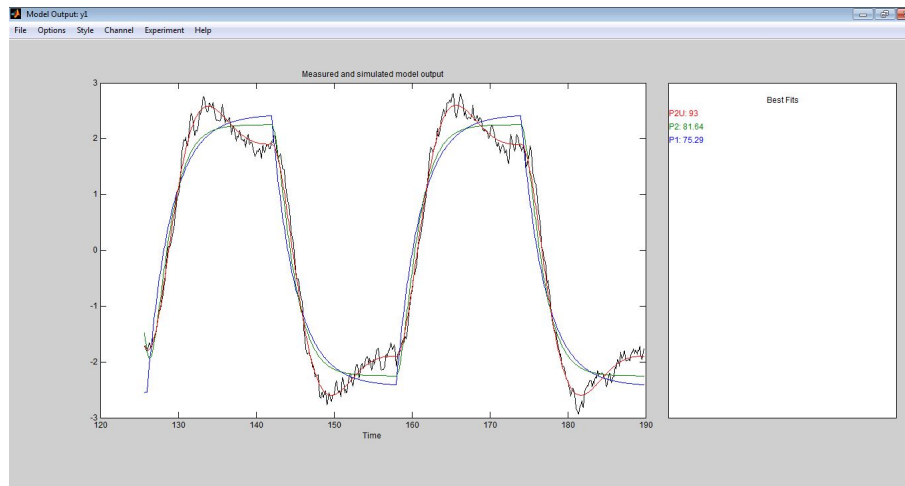


Figura 3.27: Model Output

Una vez que decida cuál es el modelo que mejor simula el comportamiento del sistema, dé click sobre el mismo y arrástrelo al recuadro To Workspace. El modelo escogido deberá aparecer ahora en el Workspace como se muestra en la figura 3.28.

Workspace		
Name	Value	Min
P2U	<1x1 idproc>	
data	<2001x3 double>	0
entrada	<2001x1 double>	-0.5000
filtro	<1x1 tf>	
salida	<2001x1 double>	-23.00
t	<2001x1 double>	0
tout	<1000x1 double>	100.10
y	<2001x1 double>	0

Figura 3.28: Workspace

Escriba el nombre del modelo escogido en el Command Window o de manera alternativa escriba el comando `tf(nombre del modelo)` para visualizar la función de transferencia del modelo que representa el sistema. El resultado para este ejemplo se observa en la figura 3.29.

```

>> G=tf(P2U)

G =

    From input "u1" to output "y1":
           3.986
    -----
    4.416 s^2 + 2.144 s + 1

Name: P2U
Continuous-time transfer function.
  
```

Figura 3.29: Función de Transferencia

Diseño de Controladores PID usando Sisotool

4.1. Antecedentes

Sisotool es una herramienta de gran importancia ya que nos permite simplificar el proceso de diseño del controlador y pre-filtro; de otra manera, se debieran utilizar métodos matemáticos más complejos para hallar el controlador indicado dependiendo de las características de cada sistema. Esta herramienta fue creada para sistemas SISO, es decir para sistemas de una entrada y una salida, y es por eso que lleva el mismo nombre.

Sisotool es una herramienta de MATLAB® que permite al usuario diseñar con mayor facilidad un controlador que permita al sistema operar bajo las condiciones requeridas. Sisotool es una herramienta dinámica e interactiva que nos permite visualizar los cambios que se producen en el lugar geométrico de las raíces o en la respuesta de frecuencia de un sistema conforme se va modificando el controlador; así como visualizar la respuesta en el tiempo del sistema en lazo cerrado ante una entrada escalón unitario. Además, esta herramienta nos permite escoger entre diferentes arquitecturas de control lo cual hace que tengamos mayor libertad al momento de realizar el diseño del mismo. Adicionalmente, Sisotool permite al usuario diseñar un pre-filtro que es un componente necesario en muchos casos para compensar la presencia de ceros en el sistema.

4.2. Sisotool

Para acceder a esta herramienta es necesario conocer de antemano la función de transferencia de la planta y del sensor (realimentación), y haberlos ingresado previamente en el Workspace de MATLAB®. En esta guía identificaremos a la función de transferencia de la planta como G y a la función de transferencia del sensor como H. El comando a utilizar es:

$$\text{sisotool}(G,C,H,F)$$

Donde C es la función de transferencia del controlador y F el pre-filtro en caso de ser conocidas. En caso contrario, se reemplazan estos valores por 1 ya que el controlador y el pre-filtro son modificables dentro del aplicativo con lo que el comando sería el siguiente:

$$\text{sisotool}(G,1,H,1)$$

En caso de que se tenga realimentación unitaria para llamar al aplicativo de sisotool se puede escribir simplemente:

sisotool(G)

Nota: Para mayor información acerca de Sisotool refiérase a la documentación de MATLAB® escribiendo la palabra sisotool en el Command Window y presionando la tecla F1.

4.2.1. Estructura de Ventanas

Al ingresar el comando correctamente, se inicializará el aplicativo de sisotool con lo que aparecerán dos ventanas:

SISO Design: Por default, en esta ventana se puede visualizar el lugar geométrico de las raíces y el diagrama de bode de lazo abierto del sistema. Además, en esta ventana podemos acceder a diferentes funciones y herramientas con lo que se puede obtener la respuesta del sistema al escalón unitario, importar y exportar datos del sistema, cambiar ciertas opciones de Sisotool y dibujar el diagrama del sistema en Simulink. Es en esta ventana, donde visualizaremos los cambios que se dan en el lugar geométrico, se establecerán las regiones de interés de acuerdo a lo que se solicite para el diseño del controlador y se escogerá la ubicación de los polos de lazo cerrado del sistema.

Control and Estimation Tools Manager: Desde esta ventana se puede acceder a la mayoría de las funcionalidades que presenta la ventana de SISO Design, así como a otras funcionalidades.

A continuación se detalla como acceder a estas funcionalidades desde cada ventana.

4.2.2. Arquitectura de los controladores

En la ventana Control and Estimation Tools Manager, bajo la pestaña de “Architecture” se puede visualizar la arquitectura utilizada actualmente. Si se desea cambiar la misma, debe hacer click sobre el botón “Control Architecture..”. Luego se abrirá una ventana del mismo nombre donde podrá seleccionar entre las diferentes arquitecturas de control disponibles. Haga click sobre la estructura requerida para visualizar los nombres con los que MATLAB® identifica a cada señal bajo esa arquitectura (ej: a la entrada se le asigna la letra r y a la salida la letra y). En esta misma ventana puede renombrar estas señales y cambiar los signos de la realimentación o realimentaciones en caso de ser necesario. Presione el botón “Ok” una vez que haya realizado los cambios.

Si desea importar un modelo o función de transferencia a Sisotool, en la ventana Control and Estimation Tools Manager, bajo la etiqueta de Architecture dé click sobre “System Data..”. Luego dé click sobre el botón “Browse”, escoja para qué sistema va a importar el modelo, si lo va a importar desde el Workspace de MATLAB® o desde un archivo .mat, seleccione el modelo a importar de la lista y dé click al botón “Import” y luego al botón “Ok”.

Desde la ventana de SISO Design no se puede realizar el cambio de arquitectura de control, pero se pueden importar los modelos de los sistemas. En esta ventana dé click en “File” y luego en “Import”. Luego dé click sobre el botón “Browse”, escoja para qué sistema va a importar el modelo, si lo

va a importar desde el Workspace de MATLAB® o desde un archivo .mat, seleccione el modelo a importar de la lista y dé click al botón “Import” y luego al botón “Ok”.

4.2.3. Graphical Tuning

Desde la ventana Control and Estimation Tools Manager, bajo la pestaña de “Graphical Tuning” podemos seleccionar las diferentes gráficas que se deseen visualizar en la ventana SISO Design. Para esta práctica sólo se necesita el lugar geométrico de las raíces por lo que se desactivarán los otros diagramas que aparezcan en la ventana SISO Design. Dé click sobre cada una de las opciones diferentes a “Root Locus” bajo el título “Plot Type” y seleccione la opción “None”. Verifique que las opciones queden como la figura 4.1.

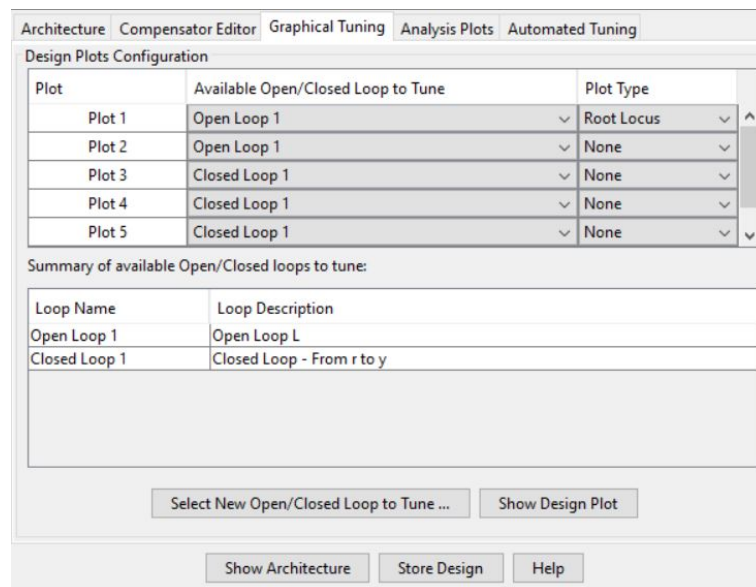


Figura 4.1: Pestaña Graphical Tuning

En caso de que por error haya cerrado la ventana SISO Design, acceda a la pestaña “Graphical Tuning” y dé click sobre el botón “Show Design Plot”.

Desde la ventana SISO Design puede dar click sobre “View” y luego sobre “Design Plot Configurations” lo que lo llevará a la pestaña “Graphical Tuning” mostrada en la figura 4.1 y a las opciones mencionadas anteriormente.

4.2.4. Analysis Plots

Desde la ventana Control and Estimation Tools Manager, bajo la pestaña “Analysis Plots” podemos seleccionar las diferentes gráficas que se deseen visualizar, tales como: la respuesta en el tiempo del sistema ante una entrada escalón unitaria o ante una entrada impulso, el diagrama de bode, diagrama

de Nichols entre otros. Sisotool nos permite tener hasta 6 gráficas diferentes. Para esta práctica el plot de interés es el de la respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario. Seleccione en “Plot Type” la opción Step para el Plot 1, luego marque la casilla que indica “Closed loop r to y”, verificando que las opciones queden como la figura 4.2.

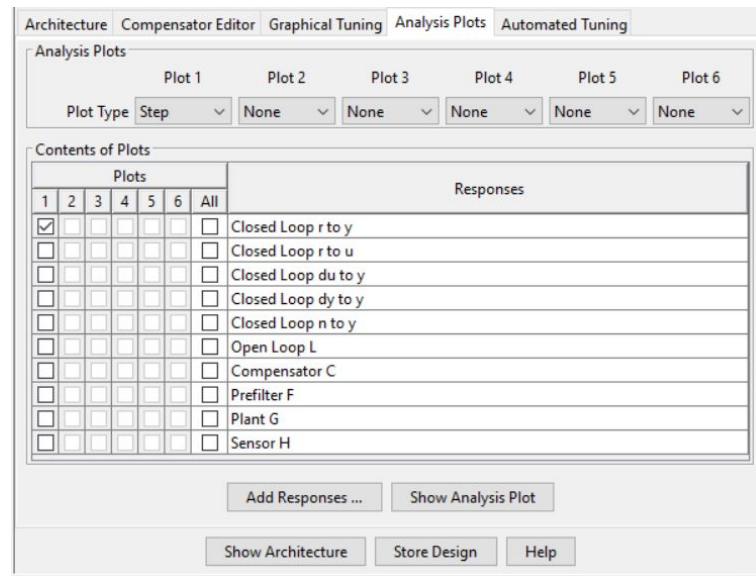


Figura 4.2: Pestaña Analysis Plots

A continuación MATLAB® abrirá una nueva ventana con la respuesta del sistema de lazo cerrado ante una entrada escalón unitario. En caso de haber cerrado esta ventana, puede acceder a la pestaña “Analysis Plots” y dar click sobre el botón “Show Analysis Plot” para que le muestre los gráficos nuevamente.

Desde la ventana SISO Design, también se puede acceder a las gráficas dando click sobre Analysis y luego escogiendo el plot de interés; en este caso se seleccionaría la opción “Response to Step Command”. Si dentro de las opciones de Analysis no se encuentra el plot de interés puede hacer click sobre la opción “Other Loop Responses”, lo que lo llevará a la pestaña “Analysis Plots” en la ventana Control and Estimation Tools Manager. Luego de seleccionar el gráfico de interés se abrirá una ventana con la gráfica solicitada. Podrá notar que al realizar el plot de esta manera, se visualizan dos gráficas o respuestas en la nueva ventana. En este caso una gráfica corresponde a la respuesta del sistema tomando como salida del sistema a la salida del controlador y la otra corresponde a la respuesta del sistema en lazo cerrado. La respuesta que se quiere visualizar es la de lazo cerrado; para desactivar la otra respuesta, dé click derecho sobre un espacio en blanco en la gráfica, seleccione la opción Systems y deje marcada sólo la opción “Closed Loop r to y”.

Note que la pestaña Analysis Plots en la ventana Control and Estimation Tools Manager me permite elegir un mayor rango de opciones.

Sin importar el método escogido para generar la gráfica, en la ventana con la respuesta al escalón dé click derecho en un espacio en blanco y seleccione la opción “Characteristics” y marque la opción “Peak Response” que corresponde a información del sistema sobre la respuesta pico del mismo, es decir el Sobrenivel en caso de que existiera. Repita el paso anterior y marque también la opción “Settling Time” que corresponde a información del sistema sobre el tiempo de estabilización del mismo así como también a las marcas de la banda del 2 por ciento utilizadas para estimar el tiempo de estabilización. Por último repita nuevamente el paso anterior y marque la opción Steady State que corresponde a la respuesta en estado estable del sistema, esta opción muestra el valor final que toma el sistema una vez que se ha estabilizado. Ver figura 4.3.

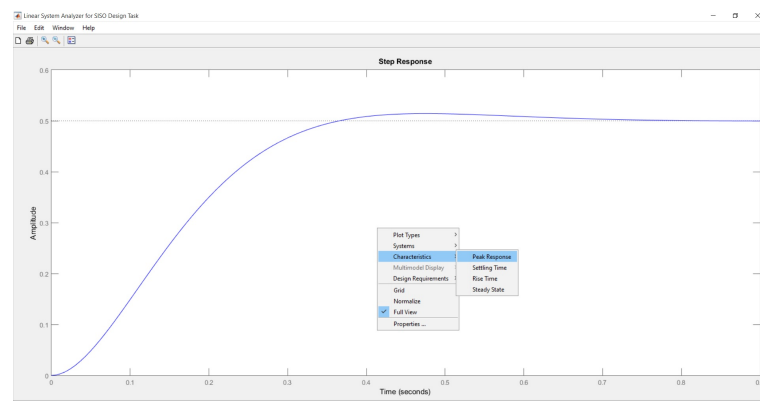


Figura 4.3: Characteristics: Step Response

4.2.5. Diseño del Controlador

El diseño del controlador puede realizarse a través de la ventana SISO Design o a través de la ventana Control and Estimation Tools Manager.

Para agregar polos o ceros al controlador desde la ventana Control and Estimation Tools Manager, acceda a la pestña “Compensator Editor”, dé click derecho bajo la etiqueta Pole/Zero y seleccione la opción “Add Pole/Zero”(Ver figura 4.4). Aparecerá un menú donde podrá seleccionar lo que desee agregar a su controlador, es decir polo real, polos complejos, integrador, cero real, ceros complejos, derivador, entre otros.

Por omisión los polos o ceros reales se agregan en -1 , esto es $(s + 1)$ o $\frac{1}{s + 1}$. Para cambiar la ubicación de los polos o ceros, seleccione el término que quiera modificar dando click izquierdo sobre el mismo y luego en el cuadro de texto “Location” modifique el valor con la ubicación deseada. Para cambiar la ganancia del controlador, modifique el valor en el cuadro de texto que se muestra junto a la función de transferencia del controlador.

Para eliminar polos y ceros desde esta ventana dé click izquierdo sobre el término que necesite eliminar, luego dé click derecho sobre cualquier lugar bajo la etiqueta Pole/Zero y seleccione la opción “Delete Pole/Zero”.

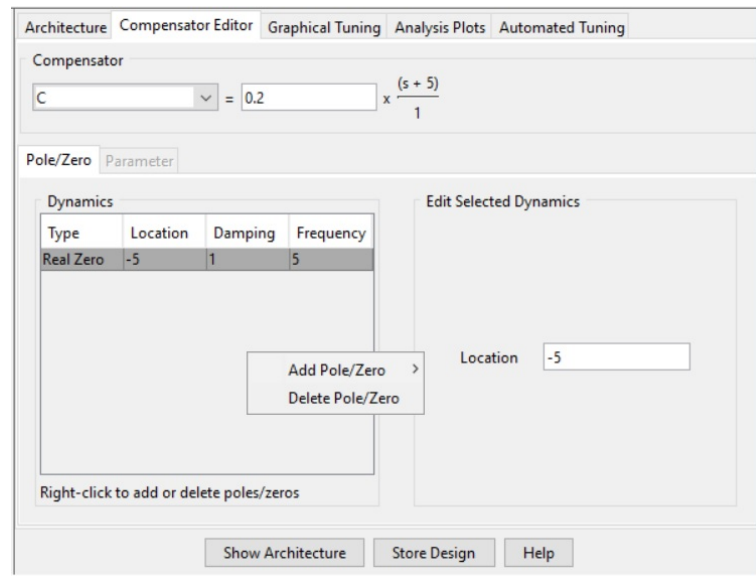


Figura 4.4: Pestaña Compensator Editor

Para agregar polos o ceros al controlador desde la ventana SISO Design, dé click sobre el símbolo de polo, cero, polos complejos o ceros complejos en la barra de herramientas (Ver figura 4.5) y luego dé click sobre la ubicación donde desee colocar el mismo. Para mover el polo o cero a una nueva ubicación dé click sobre el símbolo del cursor en la barra de herramientas y luego presione el botón izquierdo del mouse sobre el polo o cero que desee mover y arrástrelo hacia la posición deseada.

Para cambiar la ubicación de los polos de lazo cerrado, mientras está activo el botón de cursor en la barra de herramientas, arrastre los cuadrados fucsia que representan a los polos de lazo cerrado hacia su nueva ubicación.

Para eliminar polos y ceros desde esta ventana, dé click sobre el símbolo del borrador en la barra de herramientas y luego dé click sobre el polo o cero del controlador que desee eliminar. En el caso de que elimine un polo o cero complejo recuerde que su respectivo polo o cero conjugado también se eliminará automáticamente.

Recuerde que la ganancia cambia la ubicación de los polos de lazo cerrado sobre el lugar geométrico mientras que los polos y ceros cambian el lugar geométrico de las raíces. Los polos de lazo cerrado sólo pueden ser ubicados sobre el lugar geométrico de las raíces.

Note que cualquier cambio que realice en el controlador en la ventana Control and Estimation Tools Manager se verá reflejado en el lugar geométrico de las raíces mostrado en la ventana SISO Design y cualquier cambio realizado en el lugar geométrico en la ventana SISO Design, se verá reflejado en la función de transferencia del controlador mostrada en la ventana Control and Estimation Tools

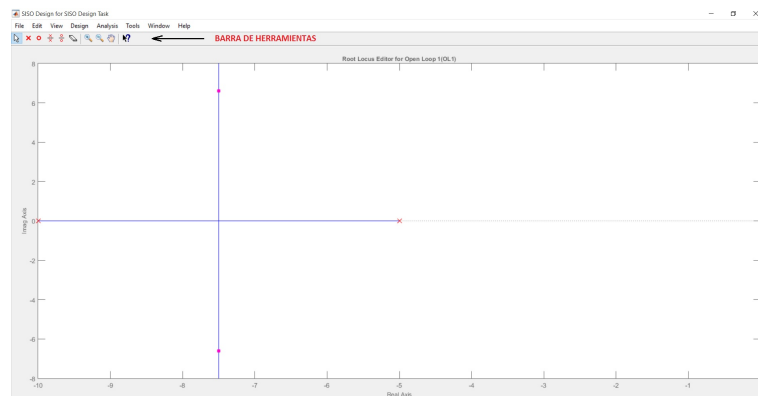


Figura 4.5: Barra de herramientas:SISO Design

Manager. Por lo tanto puede editar el controlador en cualquiera de las dos ventanas dependiendo de su necesidad; para ubicar ceros o polos en ubicaciones específicas o para ubicar integradores o derivadores utilice la ventana Control and Estimation Tools Manager, en caso de que desconozca la ubicación de los polos o ceros que deba utilizar es más conveniente hacer uso de la ventana SISO Design.

Para el diseño del pre-filtro acceda a la ventana Control and Estimation Tools Manager y seleccione la opción “F” como se muestra en la figura 4.6.

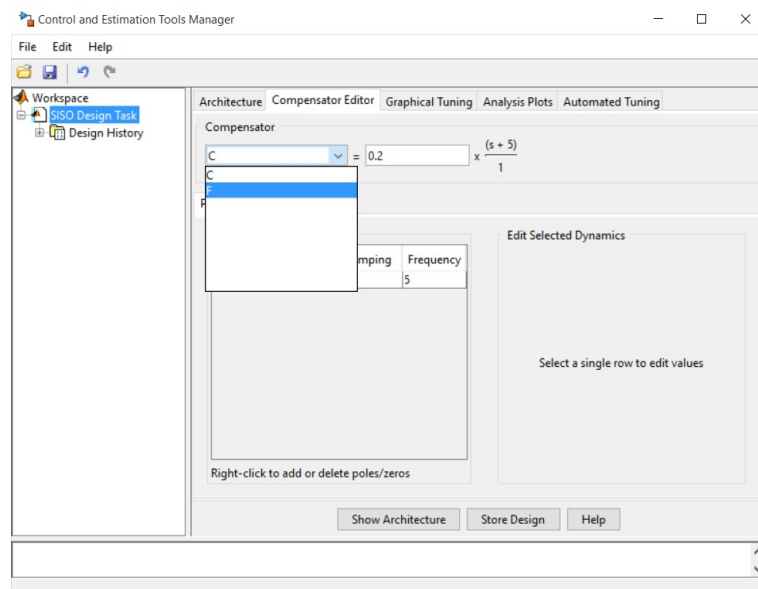


Figura 4.6: Pestaña Compensator Editor: Filtro

Design Requirements

La ubicación de ceros y polos del controlador debe ser escogida en base a las especificaciones de funcionamiento que se espera del sistema como dominancia, error de estado estacionario, sobrenivel porcentual o tiempo de estabilización. Para facilitar el diseño del controlador en base a algunas de estas especificaciones, en la ventana SISO Design dé click en un espacio en blanco sobre el lugar geométrico y seleccione la opción Design Requirements y luego seleccione New. En esta ventana puede establecer límites y regiones que cumplan con las especificaciones de tiempo de estabilización, sobrenivel porcentual, coeficiente de amortiguación y frecuencia natural.

Antes de dar por terminado el proceso de diseño del controlador, verifique que las especificaciones requeridas se cumplan en la respuesta en el tiempo (respuesta al escalón). Refiérase a la Subsección Analysis Plots.

4.2.6. Otras Opciones

Una vez diseñado el controlador y pre-filtro, Sisotool nos permite exportar los resultados hacia un archivo .mat o hacia el Workspace.

Para exportar los modelos desde la ventana de Control and Estimation Tools Manager, dé click sobre File, luego sobre Export y en la ventana que se abre seleccione el modelo que quiera exportar, cambie el nombre del mismo si lo considera necesario y dé click a Export to Workspace en caso de que quiera exportar el modelo al Workspace o dé click sobre Export to Disk en caso de que quiera generar un archivo .mat con los modelos a exportar. Una vez que haya exportado los modelos que considere necesario cierre la ventana.

Para exportar los modelos desde la ventana de SISO Design, dé click sobre la opción File, luego sobre Export y en la ventana que se abre seleccione el modelo que quiera exportar, cambie el nombre del mismo si ya existe una variable con el mismo nombre en el workspace y dé click a Export to Workspace en caso de que quiera exportar el modelo al Workspace o dé click sobre Export to Disk en caso de que quiera generar un archivo .mat con los modelos a exportar. Una vez que haya exportado los modelos que considere necesario cierre la ventana.

Para acceder a otras opciones de Sisotool desde la ventana Control and Estimation Tools Manager, dé click sobre Edit, luego sobre SISO Tool Preferences.. y aparecerá una ventana con varias opciones de Sisotool.

Si desea hacerlo desde la ventana SISO Design, dé click sobre Edit, luego sobre SISO Tool Preferences.. y aparecerá una ventana con varias opciones de Sisotool.

En esta ventana aparecerán varias opciones que puede editar como unidades o escalas, estilo de los títulos y marcas en las gráficas, colores de las líneas y opciones de formato. Normalmente se prefiere visualizar el controlador en forma de ganancia, polos y ceros en vez de las constantes de tiempo por

lo que puede acceder a la etiqueta Options, elegir la opción “Zero/pole/gain”, dar click en el botón “Apply” y luego en el botón “Ok”.

Por último podemos encontrar una herramienta muy útil en la ventana SISO Design bajo el menú “Tool”. Dé click sobre dicho menú y luego seleccione la opción “Draw Simulink Diagram...”. Esta opción crea un archivo de Simulink con la arquitectura de control seleccionada y exporta los modelos utilizados en Sisotool hacia el diagrama de bloques, lo que ahorra tiempo al momento de querer simular el sistema ya que sólo es necesario configurar la entrada del sistema y el tiempo de simulación y en caso de ser requerido colocar un Mux en la salida para visualizar la entrada y salida del sistema en un solo Scope.

Recuerde que si el grado del numerador es mayor al grado del denominador en cualquiera de sus modelos(bloques), Simulink no le permitirá realizar la simulación por lo que debe tener especial cuidado al trabajar con controladores PID o PD; en estos casos es necesario sustituir el bloque del Controlador, que normalmente es representado por la letra C, por un controlador PID que se lo encuentra en la librería de Simulink bajo la librería Continuous.

Para usar el bloque PID es necesario conocer los valores de las constantes K_p , k_i y K_d . La forma más sencilla de determinar estos valores es exportar el controlador al workspace y usar el comando tf con el controlador. Por ejemplo, para el siguiente controlador PID :

```
>> tf(C)

ans =

    0.2 s^2 + 1.2 s + 1
    -----
           s

Continuous-time transfer function.
```

Figura 4.7: Parámetros del controlador PID

los parámetros mencionados son obtenidos dividiendo cada término del numerador para s, con lo que se obtendría $0,2s + 1,2 + \frac{1}{s}$ con lo que se tendría que $K_p = 1,2, K_d = 0,2, y K_i = 1$