

Anexo B.

Guía para la sintonización de un controlador de Par, Posición y Velocidad de un motor DC de imán permanente.



**Cristian Julián Solarte Rosas
Jhon Edinson Muñoz Ordoñez**

Director: Mg. Francisco Franco.

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.
Popayán, marzo 2015.**

Tabla De Contenido

1. Introducción.....	3
2. Estructura del lazo de control.....	3
2.1. Controlador PID interactivo.....	3
2.2. Controlador PID no interactivo.....	4
2.3. Controlador PID Paralelo.....	5
2.4. Equivalencia entre las constantes de las diferentes estructuras de algoritmos PID.....	6
3. Métodos Sintonización.....	7
3.1. Método de Ziegler y Nichols en Lazo Cerrado o de Oscilaciones sostenidas (método de Última Ganancia.).....	7
3.2. Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado:.....	8
4. Sintonización Controlador PID Simple.....	9
4.1. Funciones de transferencia de las variables a controlar.....	9
4.2. Sintonización por sisotool.....	10
4.3. Sintonización del controlador PID para Posición.....	11
4.3.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.....	28
4.4. Sintonización del controlador PID para Velocidad.....	28
4.4.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.....	45
5. Sintonización Constante De Control PID, Posición Y Velocidad En Cascada.....	46
5.1. Sintonización del controlador PID Hibrido para Posición y Velocidad en cascada.....	46
5.1.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.....	68
6. Método De Sintonización Automático De Sisotool.....	69
6.1.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.....	85
7. Desarrollo Del Controlador De Par Para Un Motor DC De Imán Permanente.....	86
8. Bibliografía.....	88

1. Introducción.

En esta guía se muestra el proceso de sintonización de los controladores PID de Velocidad y Posición, y los principios de funcionamiento del controlador proporcional de par.

2. Estructura del lazo de control.

Un controlador PID, basa su comportamiento en un lazo de realimentación y su esquema general se muestra en la Figura 1:

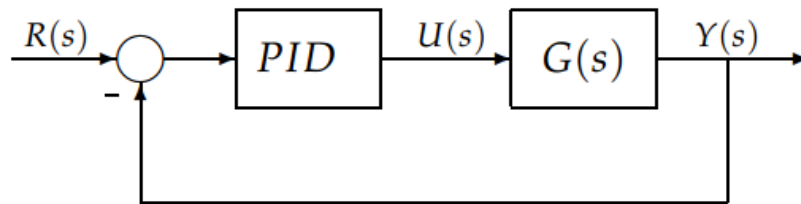


Figura 1. Esquema General Planta de proceso con Controlador PID.
Fuente: Controladores PID.- Virginia Mazzone.

Donde $R(s)$ es el valor de consigna o setpoint, $Y(s)$ es la variable a controlar que puede ser Posición, Velocidad o par, y $U(s)$ es el esfuerzo de control generado por el controlador PID el cual ingresa a la planta modelada por $G(s)$.

El bloque del controlador PID puede ser de 3 formas: Interactivo, no Interactivo y paralelo.

2.1. Controlador PID interactivo.

Un controlador PID interactivo se representa con la expresión (1) en el dominio del tiempo.

$$u_i(t) = Kci \left(\left(e(t) + \frac{1}{Tii} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \left(e(t) + Tdi \frac{de(t)}{dt} \right) \right) \quad (1)$$

Dónde:

$u_i(t)$ = Es la variable de control o esfuerzo de control.

Kci = Constante Proporcional interactiva

$e(t)$ = Es el error de control

Tii = Constante tiempo integral interactivo.

T_{di} = Constante tiempo de derivacion interactivo.

La expresión (1) en el dominio de la frecuencia es:

$$G_i(S) = \frac{U_i(S)}{e(s)} = K_{ci} * \left(\left(1 + \frac{1}{T_{ii}S} \right) (1 + T_{di}S) \right) \quad (2)$$

La expresión (2) corresponde a la función de transferencia de un controlador PID Interactivo el cual está representado en el diagrama de bloques en la Figura 2:

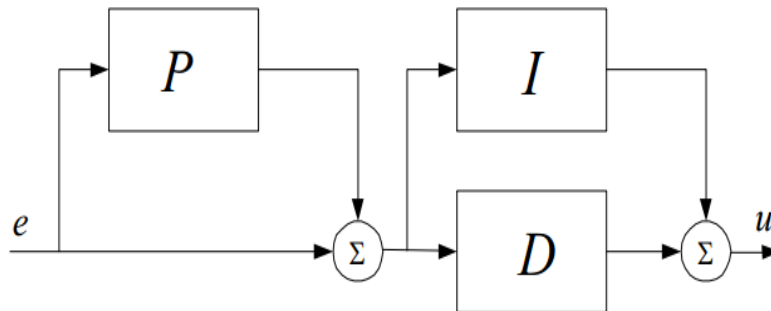


Figura 2. Forma interactiva controlador PID.

Fuente: APUNTES DE CONTROL PID - Ing. Mauricio Améstegui Moren.

2.2. Controlador PID no interactivo.

Un controlador PID no interactivo se representa con la expresión (3) en el dominio del tiempo.

$$u_n(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Dónde:

$u_n(t)$ = Es la variable de control o esfuerzo de control.

K_c = Constante Proporcional.

$e(t)$ = Es el error de control

T_i = Constante tiempo integral.

T_d = Constante tiempo Derivacion.

La expresión (3) el dominio de la frecuencia es:

$$G_n(S) = \frac{U_n(S)}{e(s)} = K_c * \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S\right) \quad (4)$$

La expresión (4), representada en diagramas de bloques en la Figura 3, es:

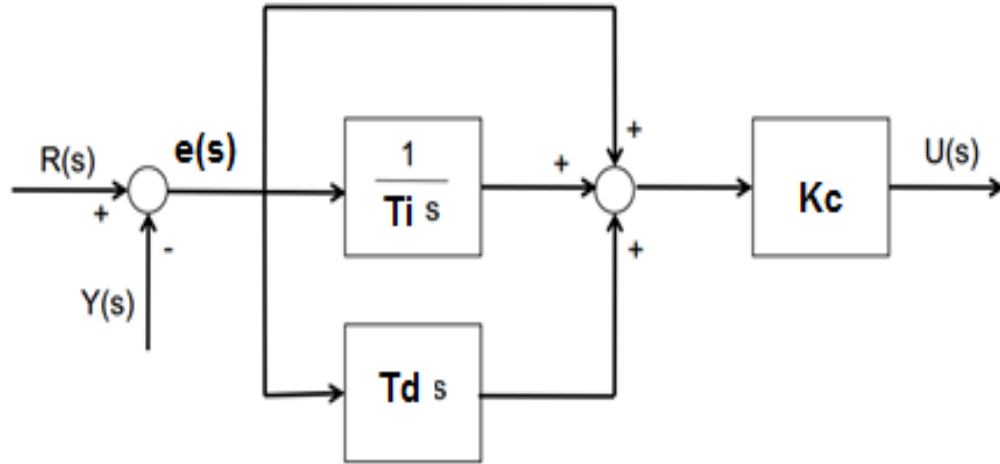


Figura 3. Forma no interactiva Controlador PID.
Fuente: Material Didáctico, Aspectos Prácticos – F. Morilla.

2.3. Controlador PID Paralelo.

La función de transferencia de un controlador PID en paralelo es muy similar a la de uno no interactivo ya que provienen de la misma expresión (3) de un controlador PID en el dominio del tiempo. Agrupando y pasándolo al dominio de la frecuencia se llega de la expresión (3) a la expresión (5)

$$G(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (5)$$

Dónde:

K_p = Constante Proporcional.

K_i = Constante proporcional integral.

K_d = Constante proporcional de Derivacion.

La expresión (5) representada en diagrama de bloques se encuentra en la Figura 4:

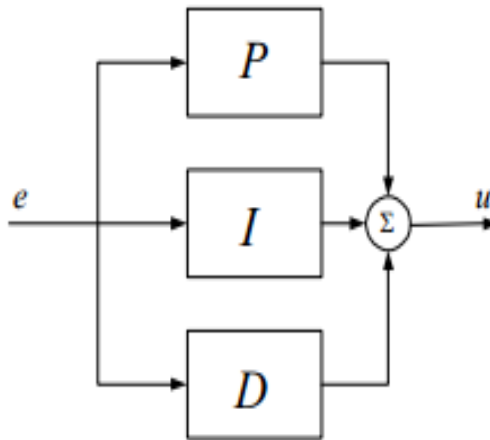


Figura 4. Forma paralela controlador PID.
 Fuente: APUNTES DE CONTROL PID - Ing. Mauricio Améstegui Moren.

2.4. Equivalencia entre las constantes de las diferentes estructuras de algoritmos PID.

Para un PID interactivo se tiene:

$$K_{ci} = \frac{K_c}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \quad (6)$$

$$T_{ii} = \frac{T_i}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \quad (7)$$

$$T_{di} = \frac{T_i}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \quad (8)$$

Para un PID no interactivo se tiene:

$$K_c = K_{ci} \left(1 + \frac{T_{di}}{T_{ii}} \right) \quad (9)$$

$$T_i = T_{ii} + T_{di} \quad (10)$$

$$T_d = \frac{T_{ii} T_{di}}{T_{ii} + T_{di}} \quad (11)$$

Para un PID paralelo se tiene:

$$K_p = K_c \quad (12)$$

$$K_i = \frac{K_c}{t_i} \quad (13)$$

$$K_d = K_c * T_d \quad (14)$$

3. Métodos Sintonización.

3.1. Método de Ziegler y Nichols en Lazo Cerrado o de Oscilaciones sostenidas (método de Última Ganancia.)

El objetivo de este método es obtener oscilaciones de amplitud constante de un sistema con controlador proporcional ante una perturbación, se manipula la ganancia del controlador hasta obtener la respuesta deseada en la salida asegurándose que no sea amortiguada y que sea de oscilaciones de amplitud constante. Un esquema de lo que se busca gráficamente se puede ver en la Figura 5.

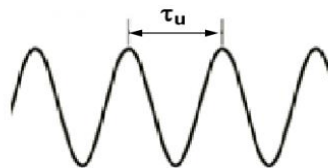


FIGURA 5. PERIODO Y AMPLITUD DE ONDA - CONTROL DE PROCESOS – FACET – UNT
MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID
http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_4/Tp4a.pdf

La ganancia del controlador (proporcional) en este caso se denomina “Ganancia Última” y se nota K_{cu} y el período de la oscilación se llama “Período Último” τ_u . Los valores recomendados de sintonización se muestran en la Tabla 1:

CONTROLADOR	Kc	T _I	T _D
P	$K_{cu}/2$	∞	0
PI	$K_{cu}/2.2$	$\tau_u/1.2$	0
PID	$K_{cu}/1.7$	$\tau_u/2$	$\tau_u/8$

Tabla 1. Valores de los parámetros del controlador PID en lazo cerrado- MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID
http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_4/Tp4a.pdf

3.2. Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado:

Se evalúan, los parámetros del controlador y a partir del valor conocido como la ganancia última K_{cu} y el periodo último τ_u . Este método se aplica fundamentalmente a plantas que poseen un integrador.

Los valores recomendados de sintonización se muestran en la Tabla 2:

CONTROLADOR	Kc	T _I	T _D
PI	$K_{cu}/3.2$	$\tau_u/0.45$	0
PID	$K_{cu}/2.2$	$\tau_u/0.45$	$\tau_u/6.3$

Tabla 2. Valores de los parámetros del controlador PID con el método de ganancia y frecuencia última- MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID
http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_4/Tp4a.pdf

Justificando en qué consisten algunos métodos de sintonización, se procede a la sintonización de los controladores PID de Posición y Velocidad haciendo uso de la herramienta SISOTOOL de MATLAB.

4. Sintonización Controlador PID Simple.

4.1. Funciones de transferencia de las variables a controlar.

Para un motor DC de imán permanente se tienen las siguientes funciones de transferencia denotadas de la siguiente manera:

PAR:

$$G_{par}(S) = \frac{T_m(s)}{I_a(s)} = K_e \quad (15)$$

La expresión (15) determina la dependencia del par únicamente de la corriente aplicada al motor DC de imán permanente.

Dónde:

T_m = Torque mecanico del Rotor.

I_a = Corriente de armadura. (Amperios)

K_e = Constante Electromotriz.

POSICIÓN:

$$G_{\theta}(S) = \frac{\theta(s)}{V_a(S)} = \frac{K_t}{J_t L_a S^3 + (J_t R_a + B L_a) S^2 + (B R_a + K_e K_t) S + K_t} \quad (16)$$

Dónde:

K_t = Constante de Torque

J_t = Momento de Inercia del rotor.

L_a = Inductancia de Armadura.

R_a = Resistencia de Armadura.

B = Constante de Friccion de Coulomb.

La expresión (16) determina la dependencia de la Posición y sentido de giro del motor, de la polaridad y magnitud del voltaje aplicado al motor.

VELOCIDAD:

$$G_{Wm}(S) = \frac{W_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{J_t L_a S^2 + (J_t R_a + B L_a) S + (B R_a + K_e K_t + K_t)} \quad (17)$$

La expresión (17) determina la dependencia de la Velocidad únicamente de la magnitud y polaridad del voltaje aplicado al motor DC de imán permanente.

En esta guía se ejemplificará con un motor de DC con caja reductora cuyos valores nominales son: $W_m = 200\text{rpm}$, $T_m = 1.8\text{Kg-cm}$, $V_a = 6\text{v}$ con caja reductora de relación 100-1. En la tabla 3 se indican los parámetros internos del modelo del motor y las funciones de transferencia

<i>Parámetro.</i>	<i>Valor.</i>
$Ra(\text{ohm})$	$21.1\ \text{ohm}$
$La(\text{mH})$	$4.981\ \text{mH}$
$ke(\text{v/rad*s})$	$0.5130\ \text{v/rad*s}$
τ	0.0002295
$Kt(\text{v/rad*s})$	$0.5130\ \text{v/rad*s}$
$Tm(\text{Nm/A})$	$0.007801\ \text{Nm/A}$
$\tau m(\text{s})$	$0.00125\ \text{s}$
$Jt(\text{kg*m}^2)$	$0.000015159\ \text{kg*m}^2$
$Iarr(\text{mA})$	$10.7\ \text{mA}$
$Tf(\text{Nm})$	$0.0054891\ \text{Nm}$
B	0.0004942

Tabla 3. Valores de los parámetros internos del motor.

4.2. Sintonización por sisotool.

En esta sección se realizará la sintonización de los controladores de Posición y Velocidad se hace, uso de las funciones de transferencia (16) Posición y (17) Velocidad; como herramienta se hace uso del software Matlab, el cual contiene el toolbox de sisotool y el toolbox de simulink que permitirán observar el comportamiento del controlador.

- Cree una nueva carpeta llamada *ControladorPID* en cualquier localización que escoja dentro de su equipo en esta carpeta se guardarán los archivos creados en esta guía.
- Abra *Matlab*, cambie la localización actual del folder de trabajo de Matlab a la carpeta *ControladorPID*, haciendo click sobre la imagen del recuadro verde de la Figura 6.

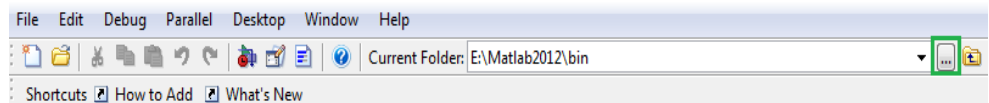


Figura 6. Opción cambio carpeta de trabajo Matlab Posición.

- Se desplegará la pantalla de búsqueda de Windows elija su carpeta y de click en Aceptar, como en la Figura 7.

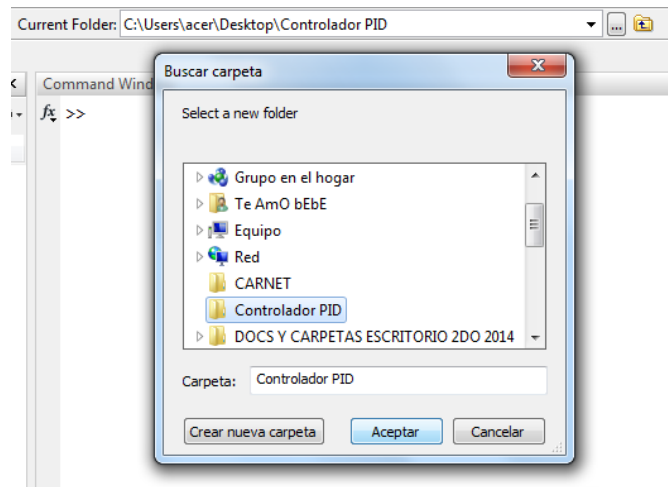


Figura 7. Cambio de carpeta de trabajo matlab.

4.3. Sintonización del controlador PID para Posición.

Para este procedimiento se debe abrir Matlab y crear un nuevo script donde se almacenen los parámetros internos del motor, así como la función de transferencia de la variable a controlar. Para lo cual se debe realizar los siguientes pasos:

- En la pantalla principal de Matlab, haga click en *file*, después en *new script*. Como en la Figura 8. Se abrirá la pantalla *Editor*.

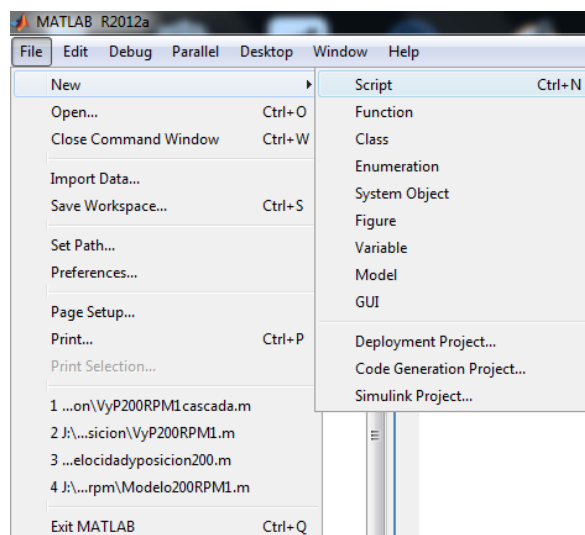


Figura 8. Procedimiento creación nuevo Script.

- En la pantalla *Editor* ingrese los parámetros del modelo interno del motor a controlar tal como se muestra en la Figura 9, recuadro Azul. (En el script se cargaron los parámetros del motor que se ejemplariza en esta guía).
- Se debe cargar la función de transferencia de la expresión (16). Con la función *tf* de Matlab, *transfer function* tal como se ve en la parte final de la Figura 9, recuadro rojo.

```

1  %Limpiar el Workspace de Matlab.
2  clear all;
3  %Seleccionar el formato numerico de los datos.
4  format long;
5  % Parámetros del motor
6  Ra = 21.7; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
7  La =4.981; % uH --> La = Inductancia de Armadura.
8  Jt = 1.5159; % g*cm^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor.
9  B = 4.942e-4; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
10 Ke = 0.5130; % mV*s/rad --> Ke = Constante Electromotriz.
11 Kt = 0.5130; % mN*m/A --> Kt = Constante de Torque.
12 % Parámetros del motor en SI
13 Ra = Ra; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
14 La = La * 10^(-3); % uH --> La = Inductancia de Armadura.
15 Jt = Jt * 10^(-5); % kg*m^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor.
16 B = B; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
17 Ke = Ke * 10^(-0); % V*s/rad --> Ke = Constante Electromotriz.
18 Kt = Kt * 10^(-0); % N*m/A --> Kt = Constante de Torque.
19 % -----
20 % Función de transferencia del motor en lazo cerrado
21 num2 = Kt;
22 den2 = [Jt*La (Jt*Ra + B*La) (B*Ra + Ke*Kt) Kt];
23 G = tf (num2,den2);

```

Figura 9. Código en Matlab para la caracterización del sistema Motor DC, con función de transferencia de Posición.

- Dar click sobre el ícono de play recuadro verde Figura 9, para compilar y guardar.
- Se genera una ventana para guardar tal como se ve en la Figura 10. Nombre al archivo *Sintonizarposicion* y guárdelo en la carpeta *ControladorPID*.

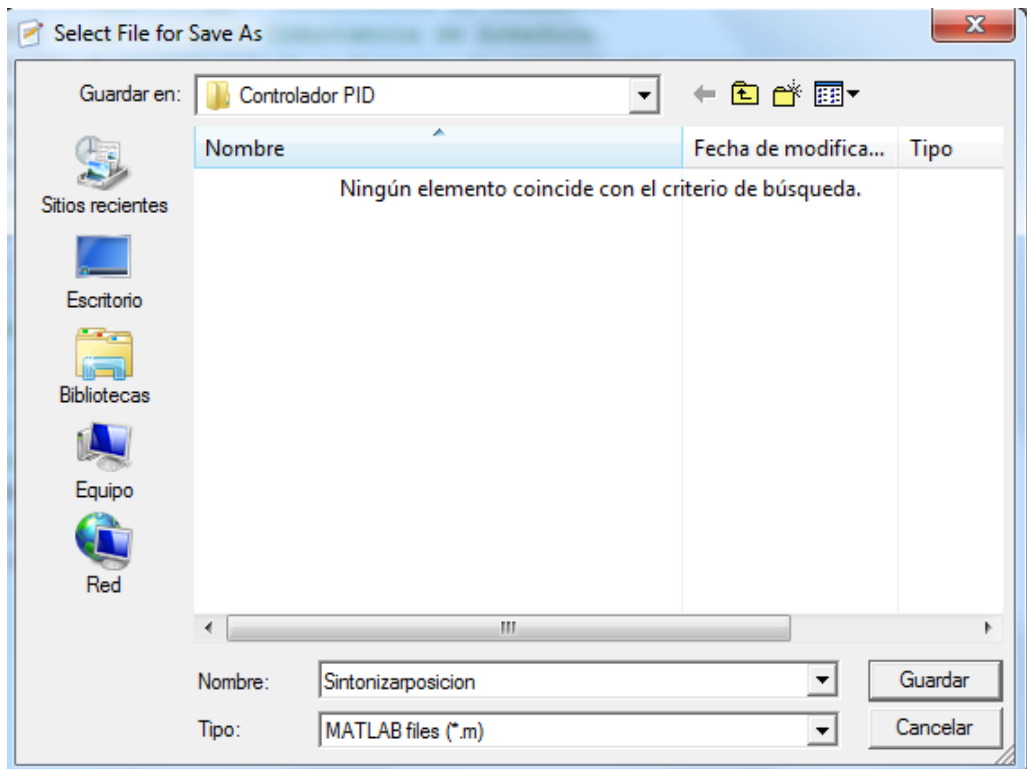


Figura 10. Guardar script para sintonización Posición.

- Abra la herramienta Sisotool escribiendo en la pantalla Command Window de Matlab la palabra sisotool y oprima enter tal como se ve en la Figura 11.

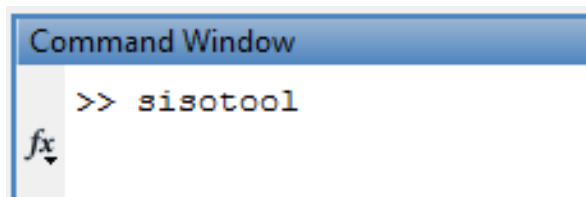


Figura 11. Inicialización Herramienta de Sintonización Sisotool.

- Se abrirá la pantalla principal de la herramienta, escoja la arquitectura para el controlador PID de Posición haciendo click en la opción *Control Architecture* recuadro azul Figura 12, se abrirá la pantalla para escoger el tipo de arquitectura.
- Elija la opción 1 haciendo click sobre ella. Esta se encuentra dentro del recuadro verde de la Figura 13.
- La casilla que se encuentra dentro del recuadro rojo corresponde con el tipo de realimentación del sistema que puede ser tanto negativa (-1), como positiva (1). Para este caso deje esta opción en -1. Para finalizar click en OK, como se ve en la Figura 13.

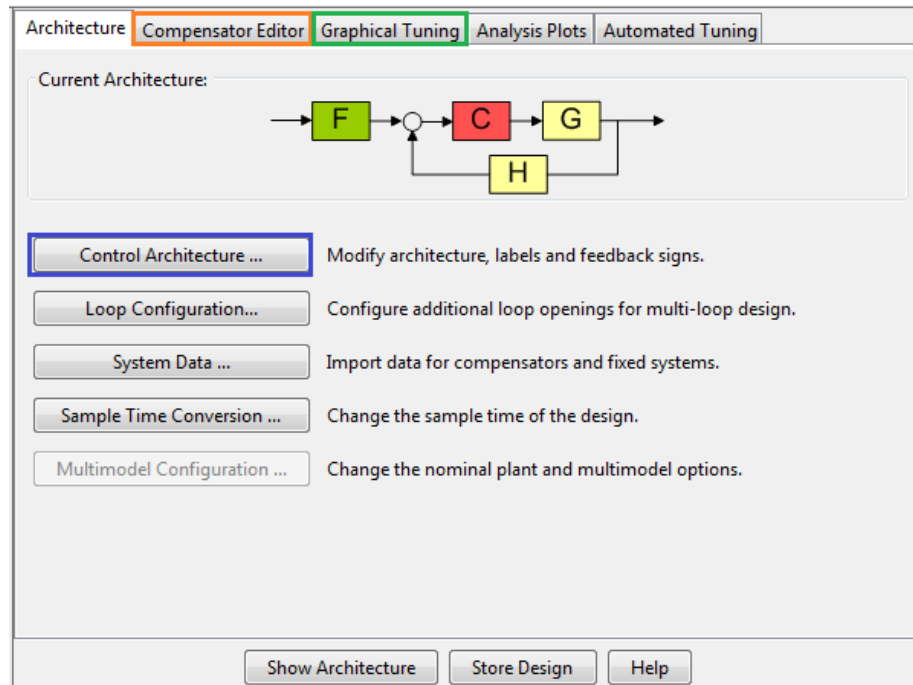


Figura 12. Opción arquitectura de control.

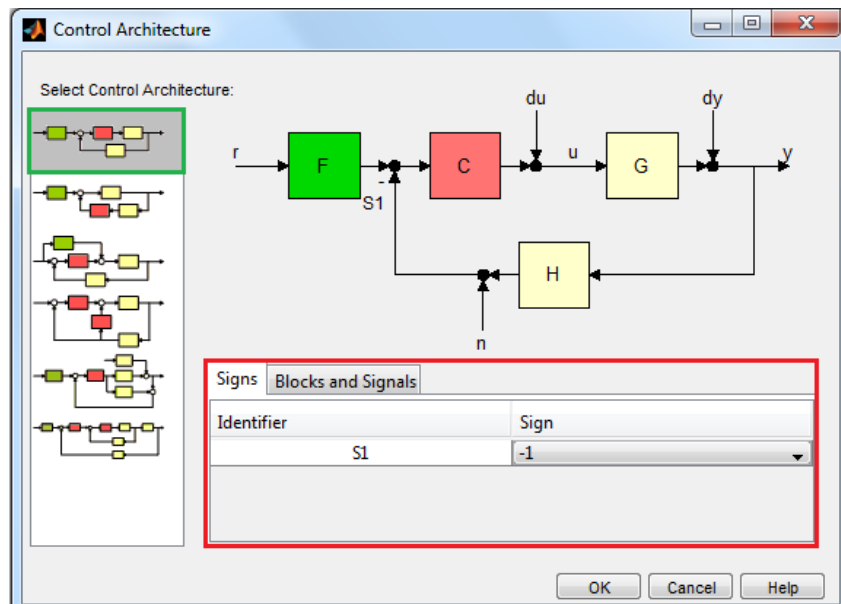


Figura 13. Arquitectura en lazo cerrado para controlador PID de Posición y planta en sisotool.

- Configure los bloques del controlador en la pantalla principal de sisotool haciendo click en *System Data* recuadro azul Figura 14. Se abrirá la ventana de carga de funciones.
- En la ventana *System Data* configure todos los valores excepto G recuadro verde Figura 14, en 1 que es el valor por defecto.

- Para modificar el bloque G, escoger G recuadro verde Figura 14, de click en Browse. Como se muestra en la Figura 14, se abrirá una nueva ventana.

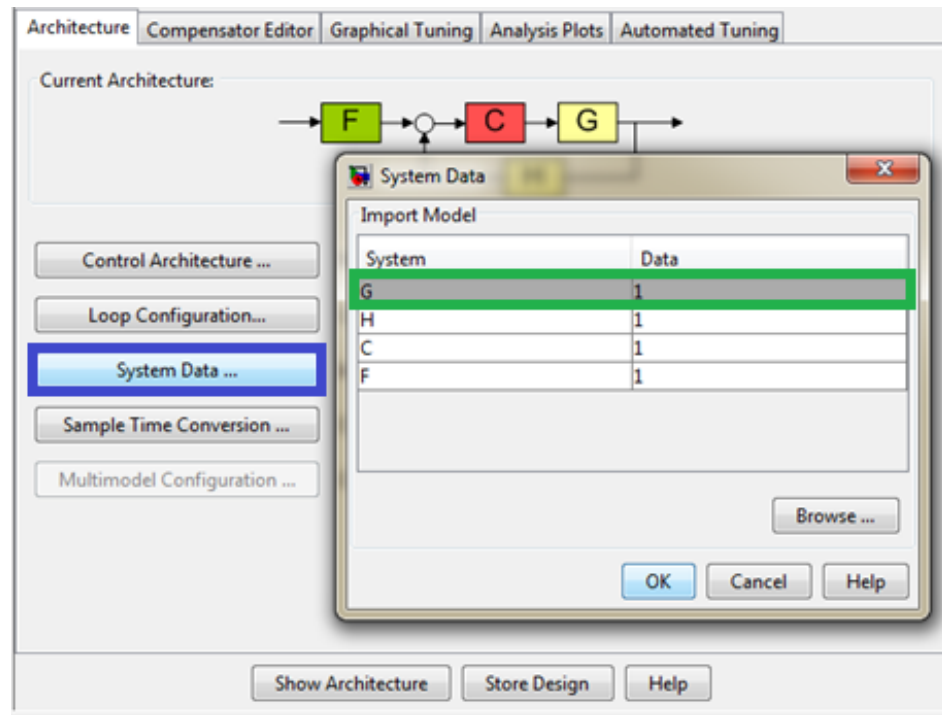


Figura 14. Esquema pestaña Architecture.

- En la ventana *Model Import* escoja la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G recuadro verde Figura 15, que se genera al compilar el archivo *Sintonizarposicion.m* escoja G, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana *System Data* y ciérrela.

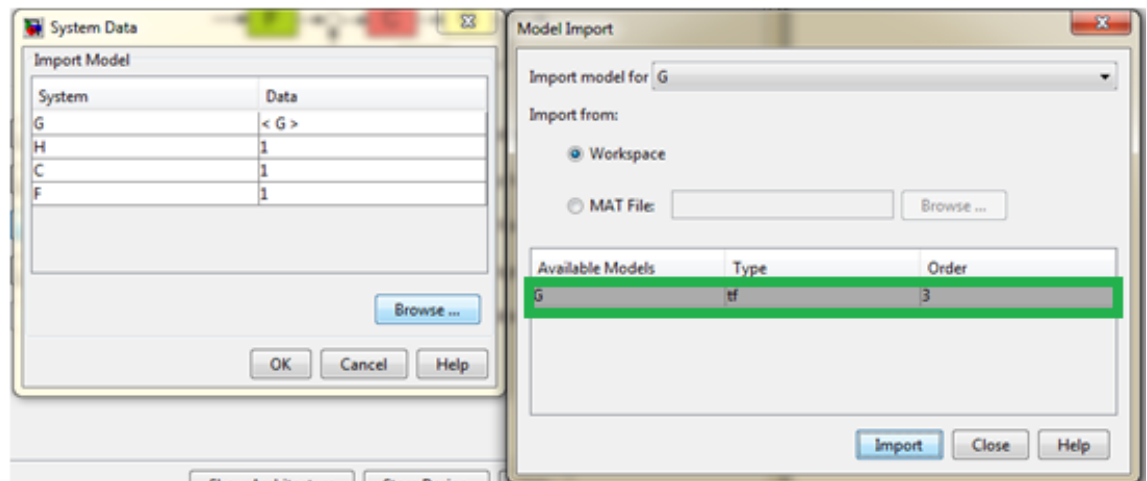


Figura 15. Esquema para importar función de transferencia Posición al bloque G.

- En la pantalla principal de Sisotool dé click en la pestaña *Compesator Editor* recuadro naranja Figura 12. Es el lugar donde numéricamente se procede a cambiar el valor de la constante de proporcionalidad ubicada en la casilla dentro del recuadro rojo de la Figura 16.
- El lugar de las raíces se cambia y se agregan polos y ceros en la casilla Dynamics dentro del cuadro verde en la figura 16. para crear integradores, diferenciadores, lag, ceros complejos etc.

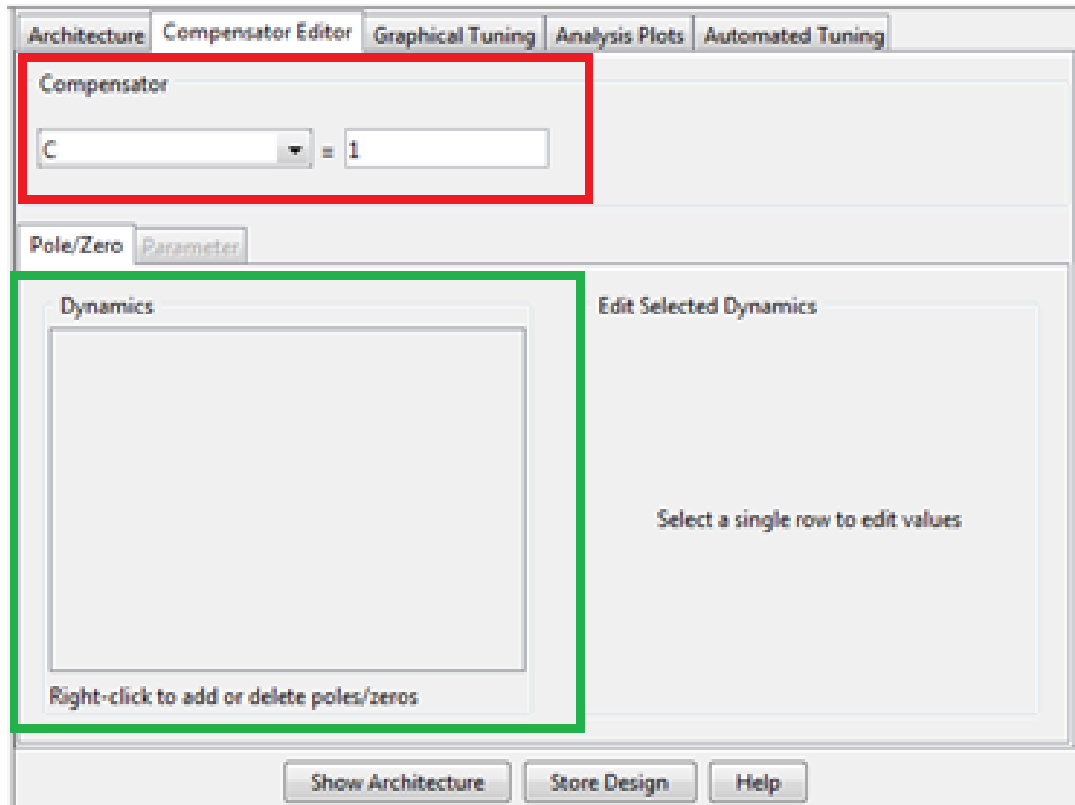


Figura 16. Esquema pestaña Compensator Editor.

Al ser una herramienta de sintonización con ayuda gráfica se deben configurar:

- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña de *Graphical Tuning* recuadro verde Figura 12. En la pantalla desplegada por la pestaña *Graphical Tuning* se tiene la posibilidad de observar 6 gráficas, recuadro rojo Figura 17, las cuales a su vez pueden representar lazos tanto cerrados como abiertos recuadro azul Figura 17. En el recuadro verde se puede escoger entre 3 tipos de gráficas, Root Locus: que gráfica El lugar de las raíces, los diagramas de bode: para el lazo cerrado, abierto y Nichols.
- Configure la pestaña *Graphical Tuning*, igual que en la figura 17:

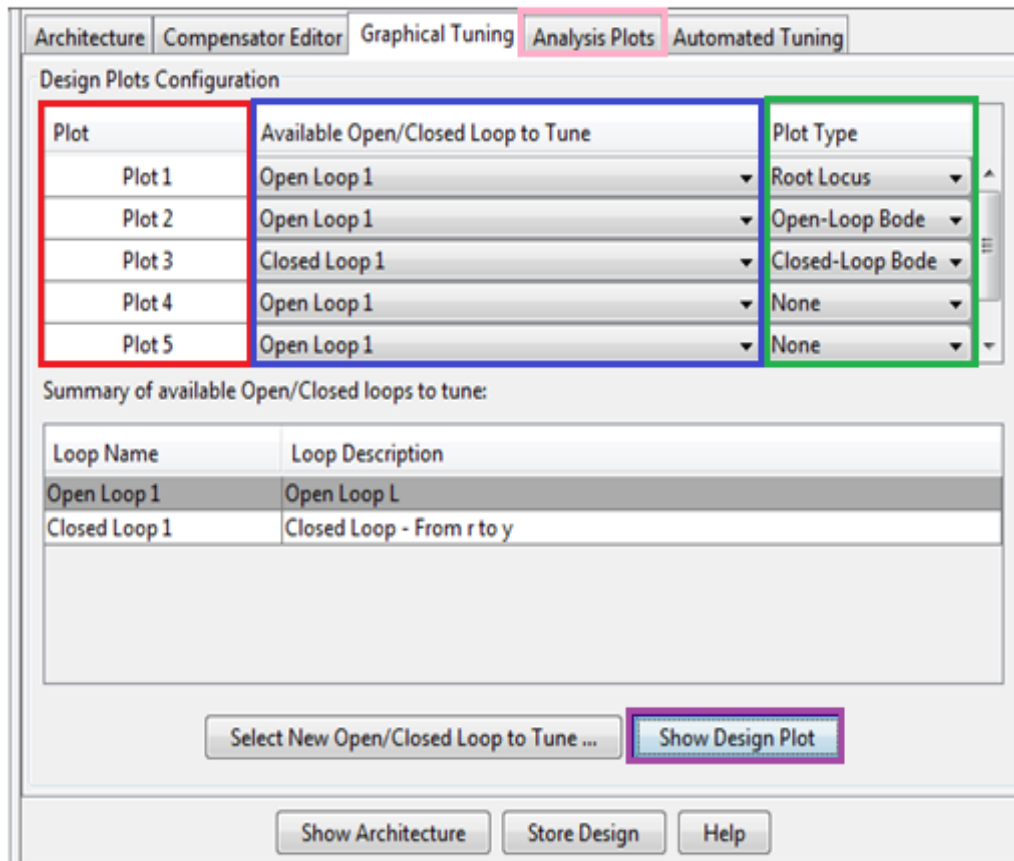


Figura 17. Esquema pestaña Graphical Tuning.

- Para observar la gráfica se debe dar click en la opción *Show Design Plot* recuadro morado Figura 17, y se despliega la ventana *SISO design* de la Figura 18.
- En la pantalla de la Figura 18, en el recuadro rojo, se pueden cambiar el lugar de las raíces dando click sobre los pequeños cuadros de color rosa y deslizándolos a diferentes posiciones. Al hacer esto se puede observar cómo cambian las otras gráficas facilitando así la sintonización. Lo que se busca en esta ayuda gráfica es suavizar las curvas de respuesta de frecuencia y evitar elevaciones en su curva. En el caso del diagrama de bode se busca que este tenga curvas suaves sin indicios de oscilaciones, o elevaciones.

Existe otra pantalla en Sisotool donde se pueden observar los cambios que se generan al cambiar parámetros en la pestaña *Compensator Editor*. Es en esta pantalla donde se centrará la sintonización implementada en esta guía por cuanto se puede observar de manera clara la respuesta del sistema a los cambios en el controlador. A esta ayuda gráfica se accede de la siguiente forma:

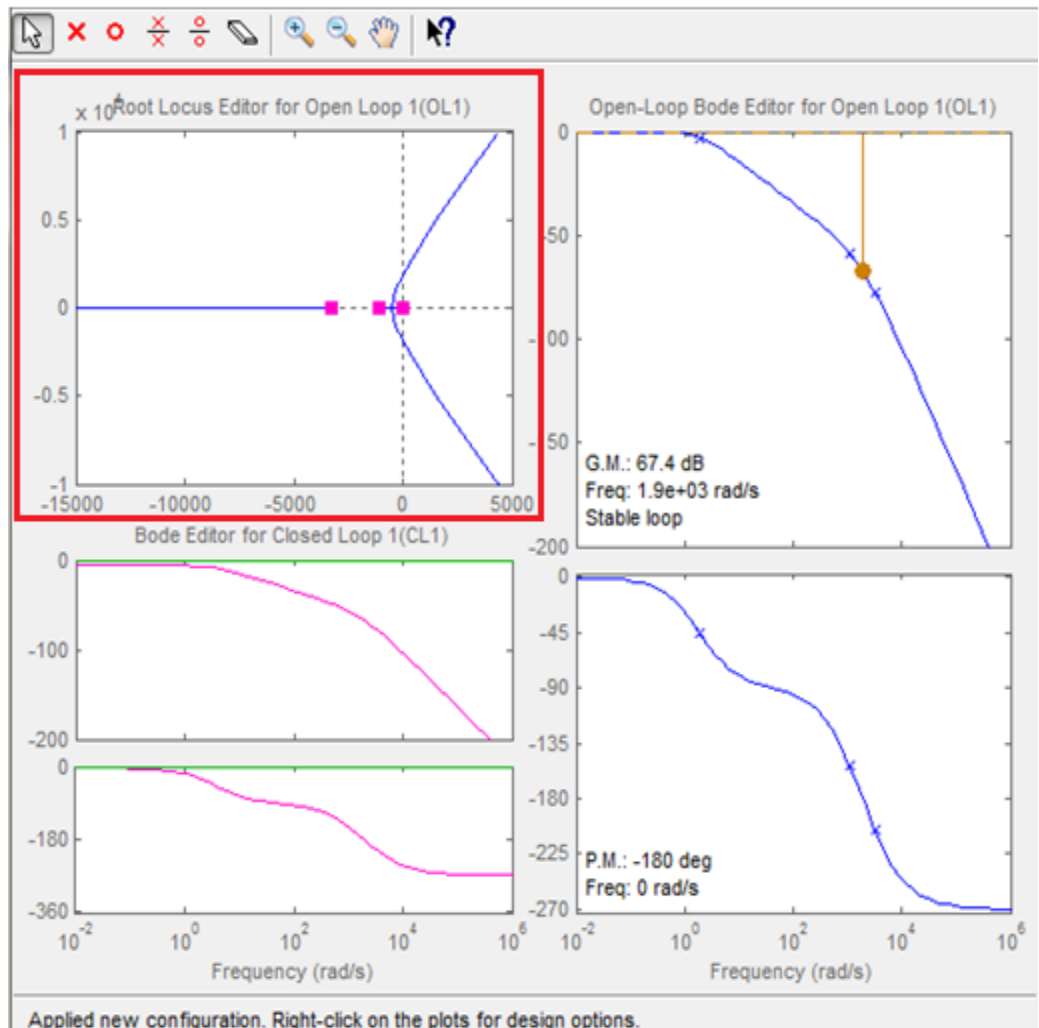


Figura 18. Sintonización Gráfica sisotool, lugar de las raíces.

- De Click en la pestaña *Analysis Plots*, recuadro rosa Figura 17. Se desplegará la pantalla *Analysis Plots* de la Figura 19.

En el recuadro Rojo de la Figura 19, se tienen hasta 6 tipos de diagramas para usar, en el recuadro verde de la Figura 19, se puede observar cuales son:

Step: Respuesta del sistema al escalón (esta gráfica es la ayuda gráfica a usar en esta guía por cuanto representa la información más útil y sencilla de interpretar), Impulse: respuesta del sistema al impulso, Bode: diagramas de Bode del sistema, Nyquist: diagramas de Nyquist del sistema, Nichols y Polos y ceros.

En el recuadro azul de la Figura 19, se habilitan los diferentes tipos de diagramas del 1 al 6, para ver su efecto sobre los bloques del sistema y combinaciones de lazos cerrados entre bloques.

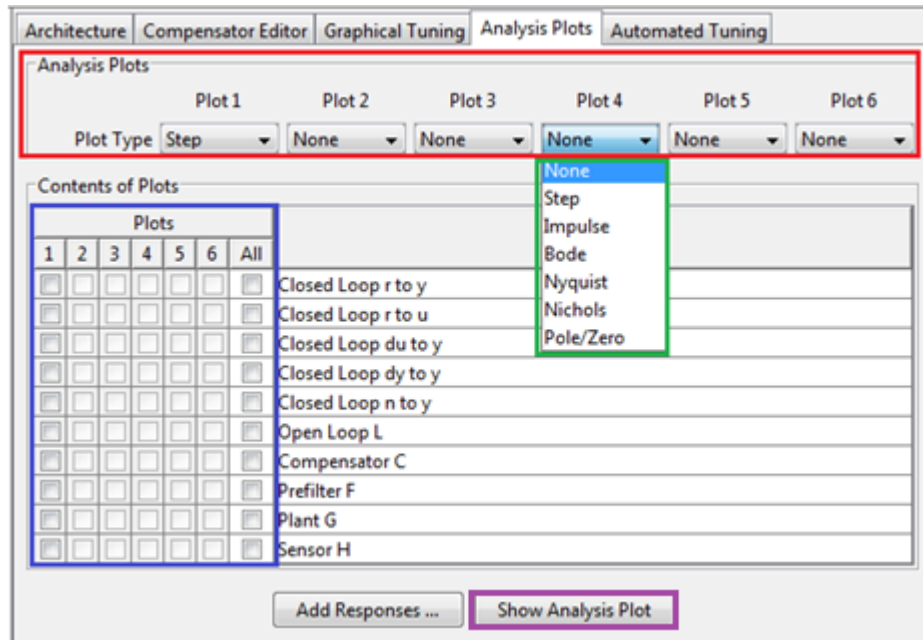


Figura 19. Pestaña Analysis Plots.

- Configure como se muestra en la Figura 20, los diagramas de sintonización siguiendo el esquema de salidas y entradas propio de Sisotool de la figura 13.

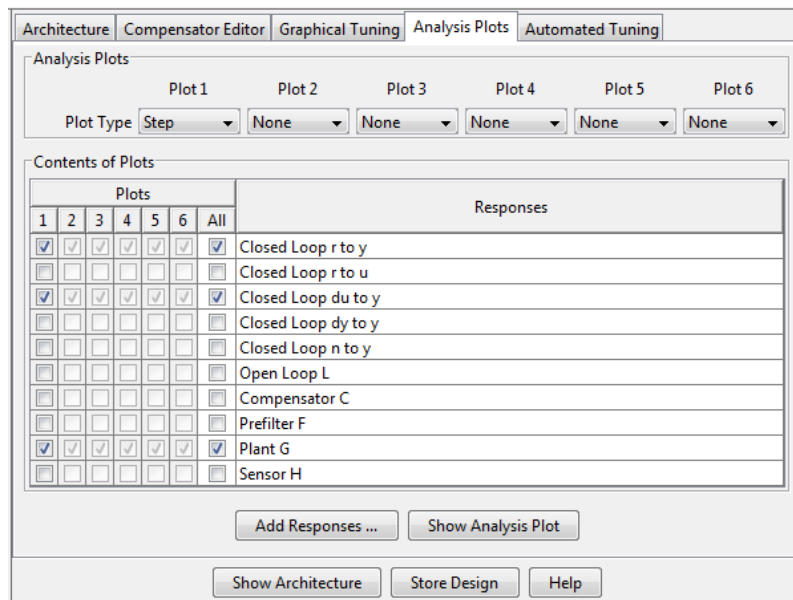


Figura 20. Configuración parámetros pestaña Analysis Plots.

- De click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 18, se obtienen las curvas de la figura 21, dónde:

ClosedLoop r to y: Corresponde a la respuesta desde la entrada r de la arquitectura hasta y . ésta es la respuesta del sistema completo, es la curva a sintonizar. En ella se busca obtener una curva muy semejante a un escalón, con tiempo de subida muy bajo, nada de oscilaciones y cero sobre elongaciones. Curva color azul Figura 21.

ClosedLoop du to y: Corresponde a la respuesta de sobreesfuerzo del controlador. Se busca en la sintonización que esta curva tenga valores pequeños al inicio y se establezca en valores muy cercanos a cero. Curva color rojo. Figura 21.

Plant G: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia de Posición del Motor DC esta curva no presenta cambios en la sintonización se usa como referencia del comportamiento del sistema a controlar en este caso el motor DC ejemplarizado en esta guía. Curva azul punteado. Figura 21.

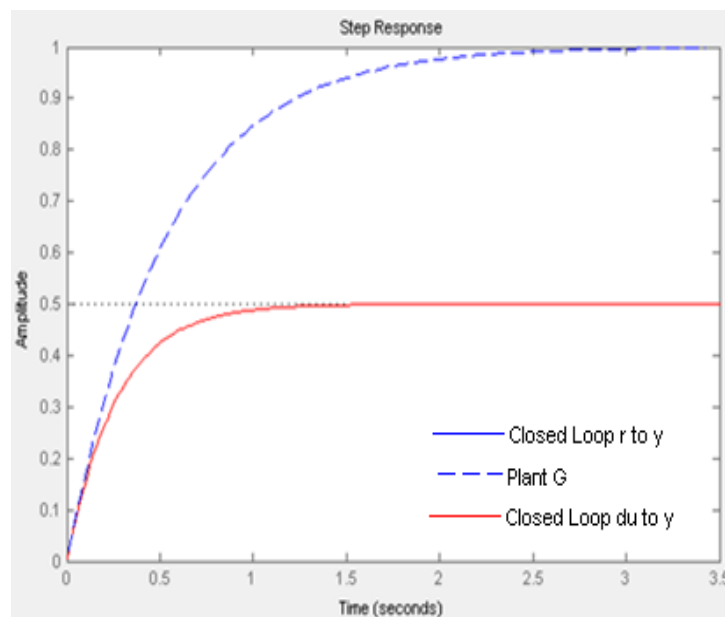


Figura 21. Respuesta de la función de transferencia para la Posición, Respuesta del lazo cerrado con controlador, y sobrecompensación del controlador.

- La herramienta permite configurar los parámetros de diseño deseados, para esto haga click derecho sobre la imagen de la Figura 21.
- En el menú emergente elija *Design Requirements* y luego de click en *New*. Observe la Figura 22.
- En la ventana emergente configure los requerimientos de diseño como se muestra en la figura 23 y haga click en *Ok*, estos requerimientos siguen la premisa de crear una respuesta de estado dinámico estable.

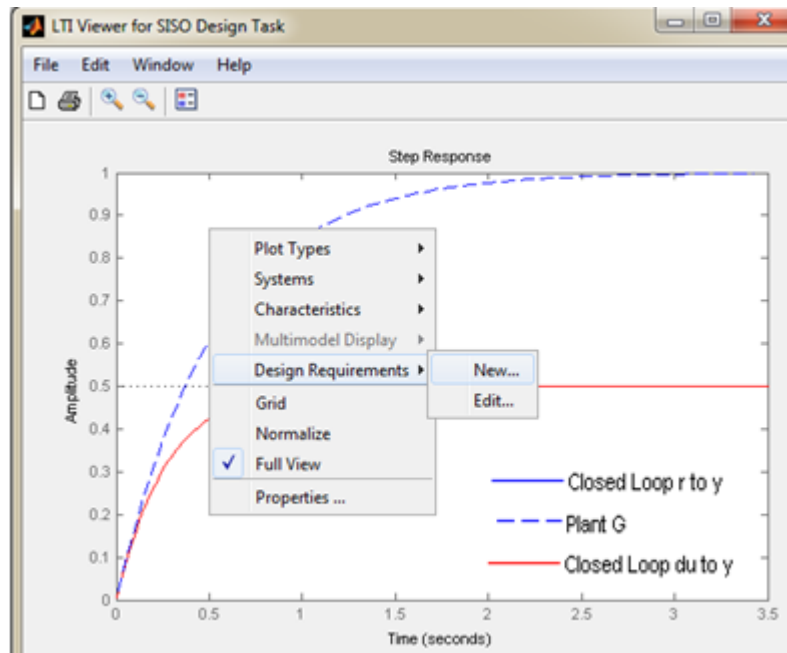


Figura 22. Esquema Agregar Requerimientos de Diseño.

Design requirement type:

Design requirement parameters

Initial value:	<input type="text" value="0"/>	Final value:	<input type="text" value="1"/>
Step time:	<input type="text" value="0"/> seconds		
Rise time:	<input type="text" value="1.1000"/> seconds	% Rise:	<input type="text" value="90"/>
Settling time:	<input type="text" value="2"/> seconds	% Settling:	<input type="text" value="1.0000"/>
% Overshoot:	<input type="text" value="3.0000"/>	% Undershoot:	<input type="text" value="1"/>

Ok Close Help

Figura 23. Requerimientos de Diseño utilizados.

Estos parámetros obedecen a los requerimientos de sintonización y permiten por medio de la ayuda gráfica facilitar el trabajo de sintonización, así los parámetros establecidos son un tiempo de subida menor a 1 segundo, un tiempo de establecimiento menor a 2 segundos, y un porcentaje de sobre paso del 3%, así como asegurar una ganancia cercana al 90% del valor final deseado en este caso 1 esto para minimizar las pérdidas del sistema.

- Una vez se han introducido los requerimientos de diseño y comportamiento deseados, para el sistema, haga click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 19. Se obtiene la Figura 24.

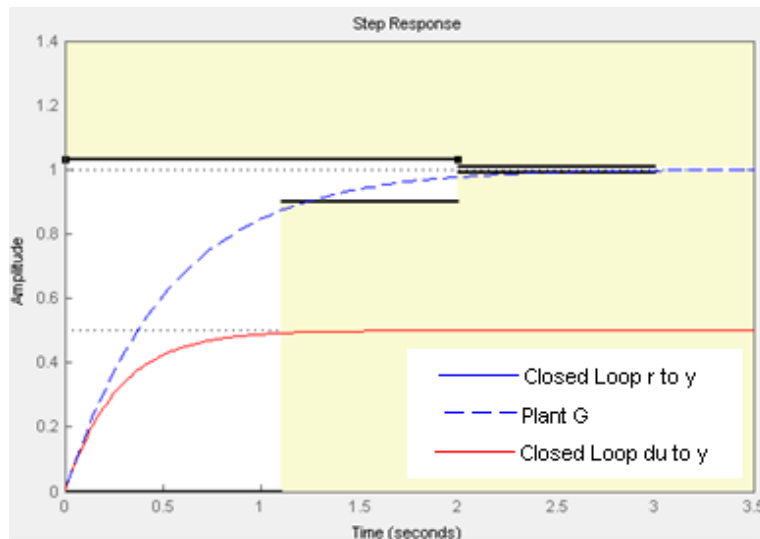


Figura 24. Respuestas del sistema a compensar con los requerimientos de comportamiento del lazo cerrado para Posición.

Observe cómo en la Figura 24. Se monitorea, en todo momento el comportamiento del sistema a los cambios que se efectúen sobre los valores del controlador, la sintonización consiste en que la respuesta de la planta con el compensador se comporten de tal forma que la curva de color azul se localice dentro de las zonas blancas. Estas zonas delimitan la curva para que tenga el comportamiento deseado para un sistema controlado de forma exitosa. Esta zona delimita los requerimientos de diseño implementados en la Figura 23.

Esta gráfica siempre está disponible durante la sintonización en el grupo de ventanas de Matlab.

Para sintonización Manual hacer lo siguiente:

Para hacer uso de la herramienta de sintonización manual, se pueden llevar a cabo muchos métodos mover las raíces en las curvas y observar en éstas la reacción y que se comporten según los requerimientos de diseño.

En la pantalla de *Compensator Editor* agregar polos y ceros que se verán reflejados en la ayuda gráfica, si se tienen valores ya determinados es la forma más exacta y eficaz de añadir los polos y ceros necesarios para lograr el comportamiento deseado del sistema.

- Inicie la sintonización insertando un integrador en la pestaña *Compensator Editor*, haciendo click derecho sobre el recuadro dynamics de color azul de la Figura 25, escoja *add pole/zero* y luego haga click en *Integrator*.

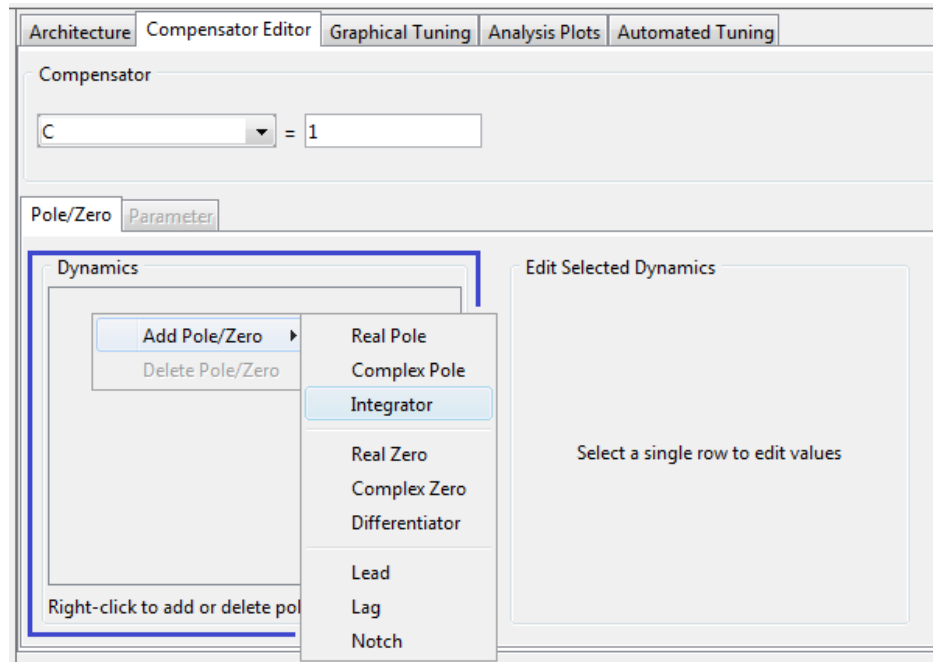


Figura 25. Esquema pestaña Compensator Editor agregar integrador.

- El integrador se ubica en el recuadro azul *dynamics* de la figura 26, y su localización puede cambiarse en el recuadro *edit dynamics* de color rojo de la figura 26.

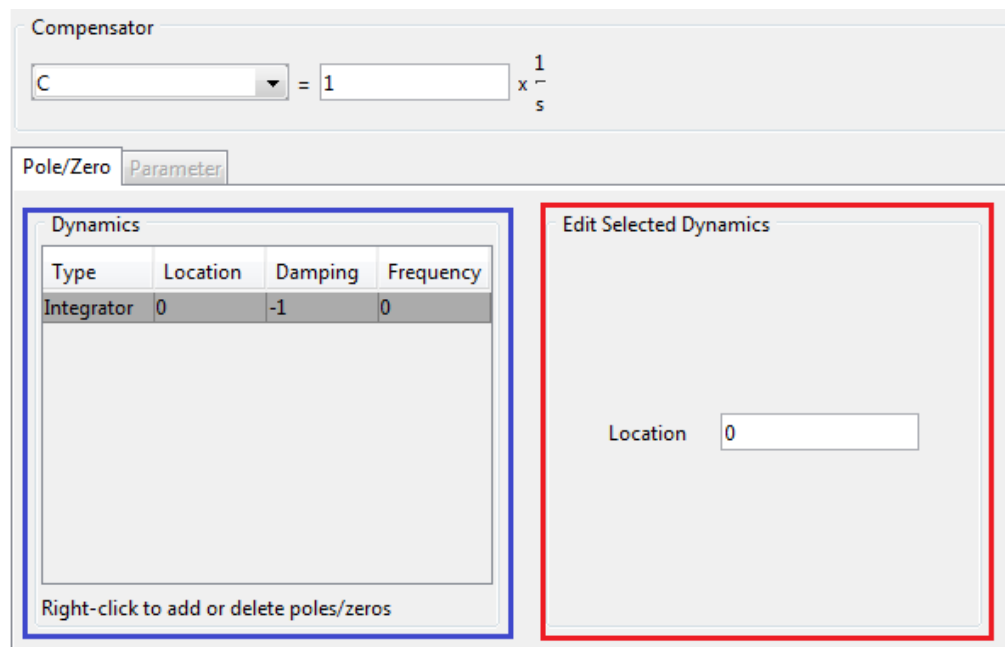


Figura 26. Esquema pestaña Compensator Editor con integrador.

Obteniendo las curvas de la Figura 27. Este integrador eleva la ganancia del sistema llevándolo desde 0.5 hasta 1, agregando una pequeña sobreoscilación que se puede observar en la curva de color azul. En la curva de color rojo puede verse como el esfuerzo del controlador mejoro ya que tiene en un inicio una elevación para finalizar su comportamiento con una caída y estabilización en cero.

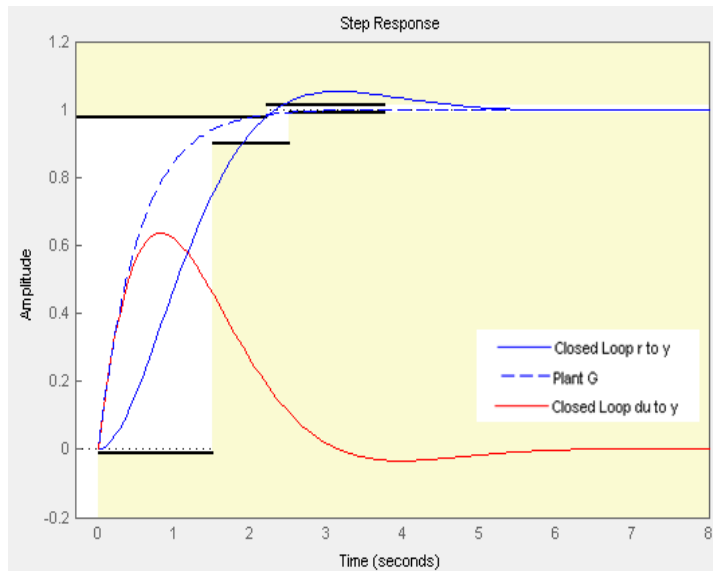


Figura 27. Respuestas al insertar un integrador en la función de transferencia del controlador PID, para la Posición.

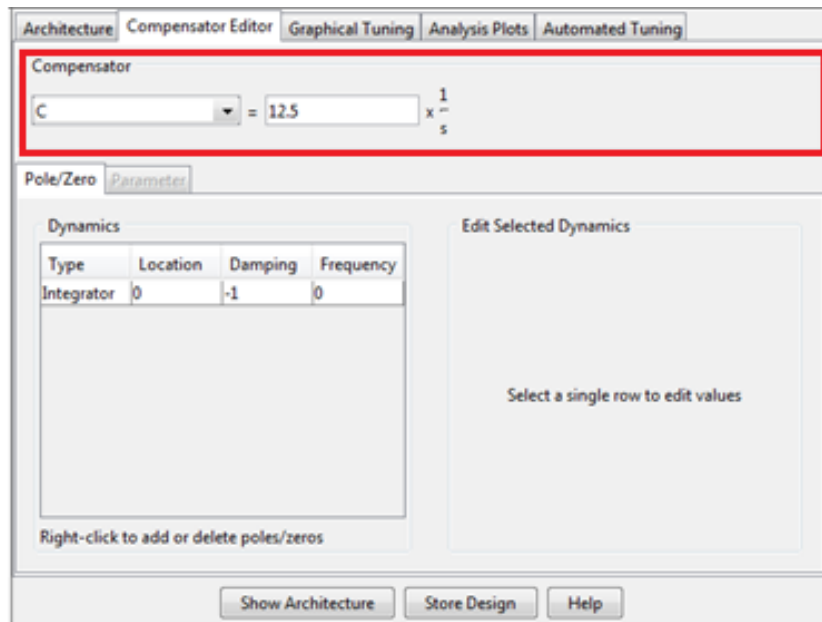


Figura 28. Insertar valores en el recuadro Compensator editor.

- Inserte en el recuadro *Compensator* de color rojo de la figura 28, uno a uno los posibles valores probando hasta encontrar el valor que proporcione la ganancia adecuada para los requerimientos de diseño. Para el motor ejemplarizado en esta guía se insertaron uno a uno los valores (5, 8, 10, 12.5) encontrando que el valor adecuado era 12.5. Observe los resultados en la Figura 29.

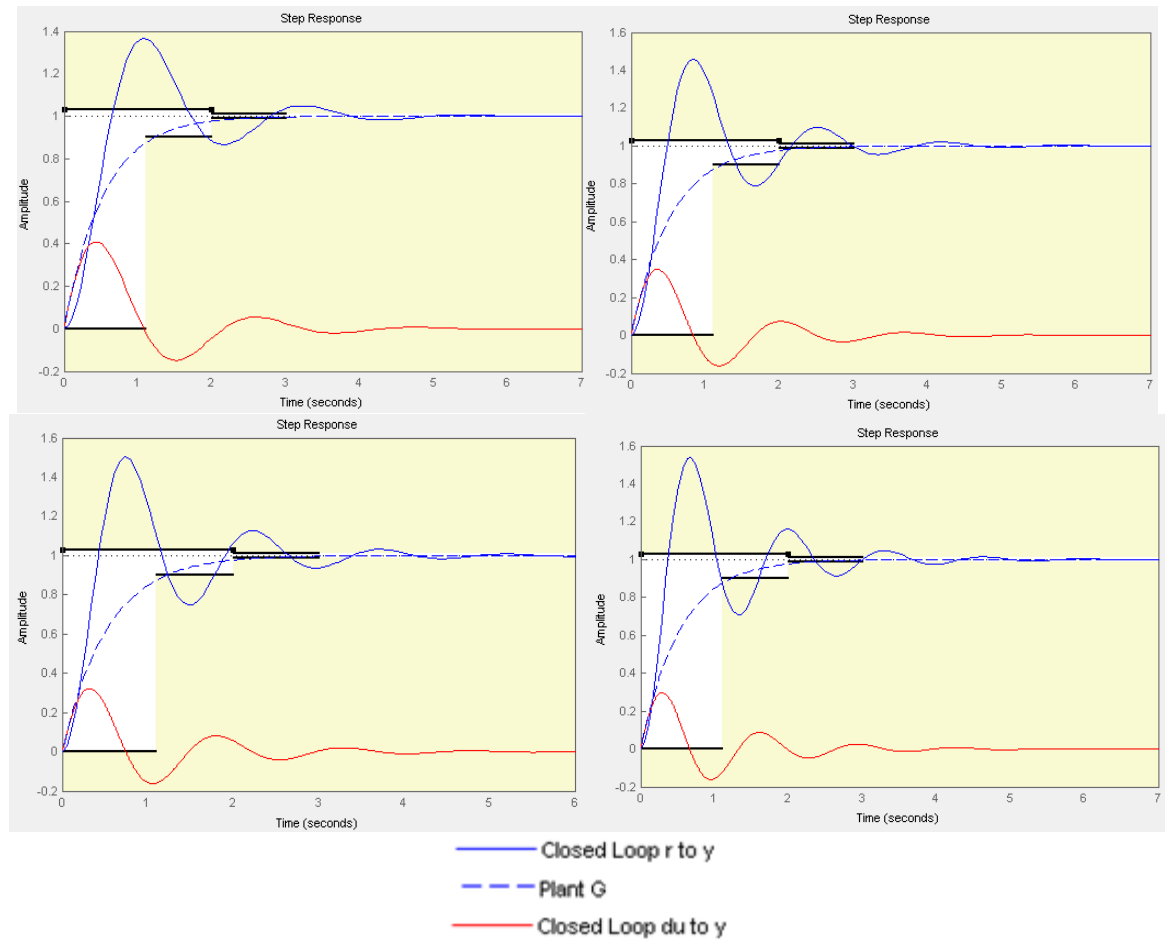


Figura 29. Respuestas al insertar un integrador y aumentar la constante de proporcionalidad en la función de transferencia del controlador PID, para la Posición.

En este ejemplo observe cómo en la Figura 29. Al insertar un valor de ganancia proporcional el sistema mejoró su tiempo de subida y ganancia, pero se generaron oscilaciones, para eliminarlas:

- Inserte un Cero Real en el sistema haciendo click derecho sobre recuadro *Dynamics* de color azul de la Figura 30, escoger Add-Pole/Zero y luego en Real Zero.

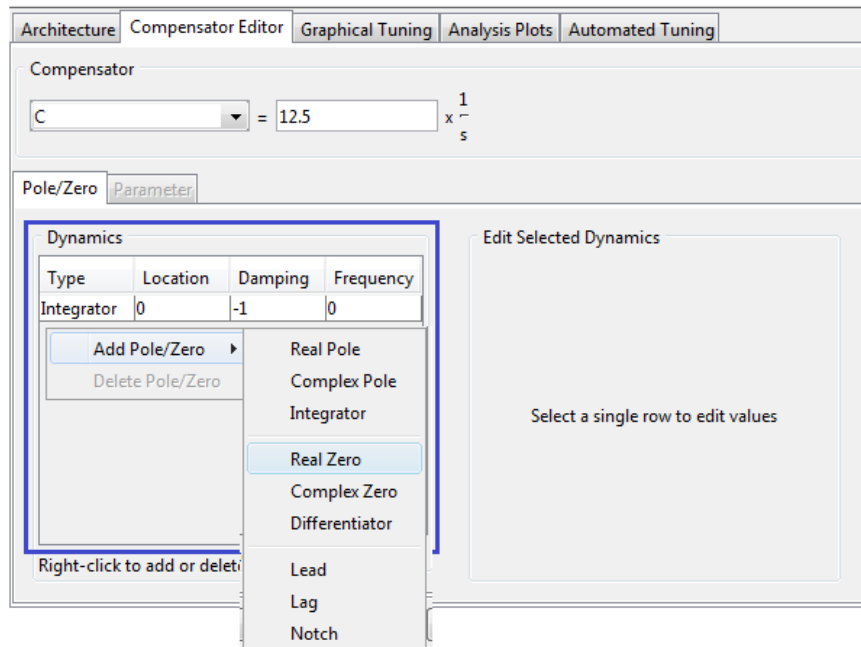


Figura 30. Inserción cero real Posición.

- Modifique su localización haciendo click sobre él y en el recuadro *location* de color rojo de la Figura 31 pruebe uno a uno los valores hasta encontrar el correcto, para el motor ejemplarizado es 0.25 obteniendo los resultados del recuadro de color azul de la figura 31 y las curvas resultado de la figura 32, finalizando así el proceso de sintonización en Sisotool.

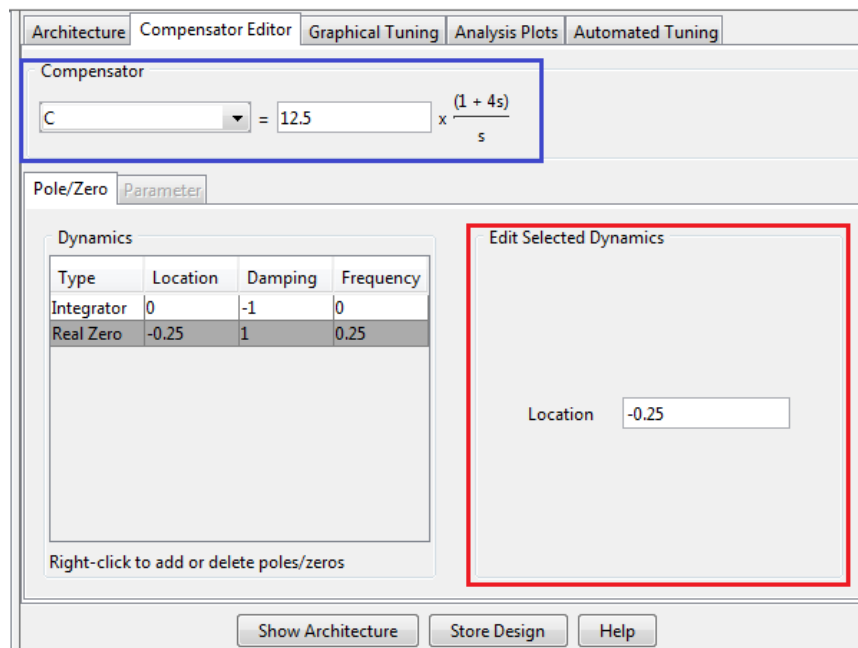


Figura 31. Modificación Posición cero real Posición y resultado sintonización.

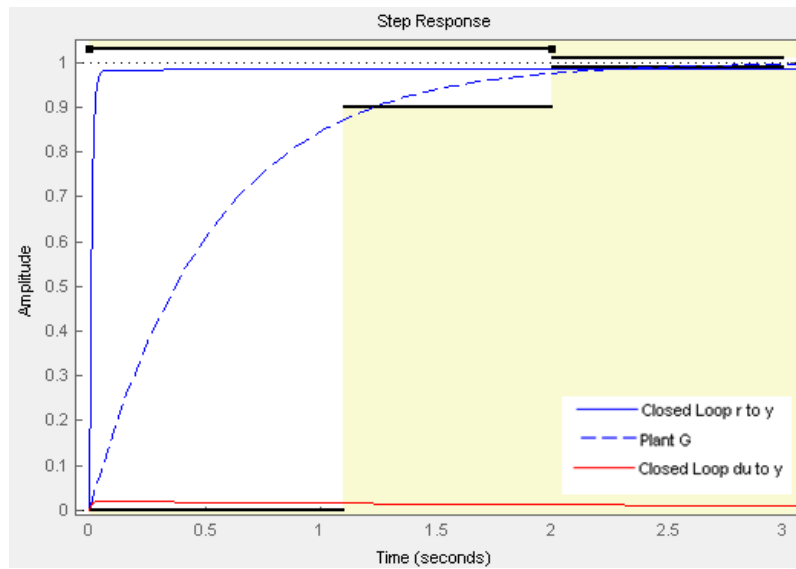


Figura 32. Curva resultado de la sintonización finalizada para Posición.

En la curva resultado de la Figura 32, observe cómo la curva de color azul que representa la salida del sistema completo se asemeja a un escalón que es lo ideal, la curva de color rojo que representa el esfuerzo del controlador se encuentra en valores cercanos a cero durante todo el proceso.

- Guarde el modelo de sintonización haciendo Click sobre el dibujo del disquete del recuadro verde de la figura 33, se despliega una ventana, en ella escoja la opción *SISO Design Task* y de click en OK.
- Se abrirá como contenedor la Carpeta Control PID, nombre al archivo *posicionsisotool* y guarde.

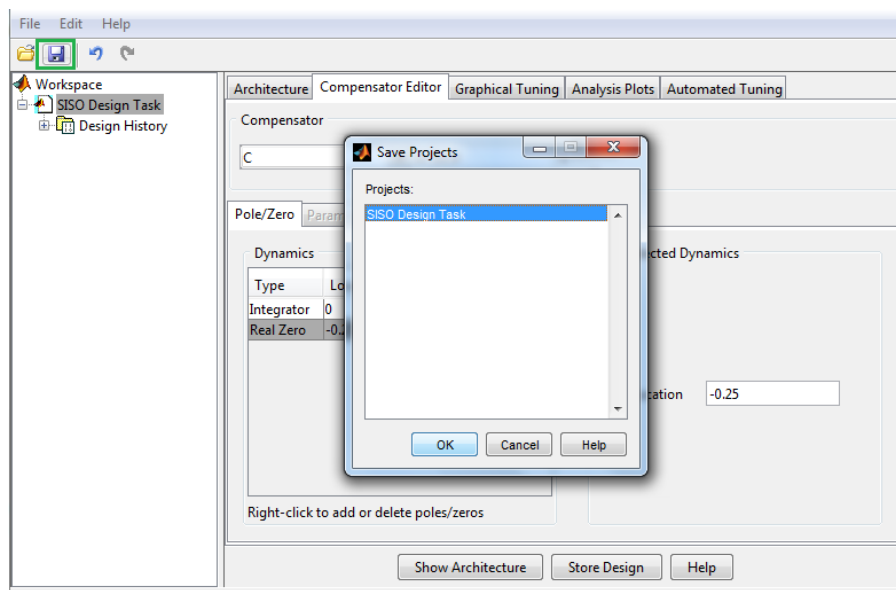


Figura 33. Esquema guardado archivos Sisotool.

4.3.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.

- La herramienta Sisotool entrega como resultado de sintonización la expresión (18): el resultado se encuentra en el recuadro azul de la figura 31.

$$c = \frac{12.5 * (1 + 4s)}{s} \quad (18)$$

La cual debe ser igualada a la función de transferencia que se determinó en la expresión (5)

- Igualar las expresiones (5) y (18):

$$\frac{12.5 * (1 + 4s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{S} + KdS$$
$$(12.5 * (1 + 4s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$
$$12.5 + 50s = KpS + Ki + KdS^2$$

Igualando término a término se obtienen las constantes a usar en el controlador PID interactivo en paralelo.

$$Kp = 50$$
$$Ki = 12.5$$
$$Kd = 0$$

Obteniendo un controlador PID de tipo proporcional integral ya que no se insertó una fase derivativa en la función de transferencia del controlador. En el resultado se debe más que pensar en valores exactos para las dos variables observar la relación que guardan entre sí.

4.4. Sintonización del controlador PID para Velocidad.

Para este procedimiento se debe abrir Matlab y crear un nuevo script donde se almacenen los parámetros internos del motor, así como la función de transferencia de la variable a controlar. Para lo cual se debe realizar:

- En la pantalla principal de Matlab, haga click en *file*, después en *new script* como se puede observar en la Figura 34. Se abrirá la pantalla *Editor*.

- En la Pantalla *editor* ingrese los parámetros del modelo interno del motor a controlar tal como se muestra en la Figura 35, recuadro Azul. (En el script se cargaron los parámetros del motor que se ejemplariza en esta guía)
- Se debe cargar la función de transferencia de la expresión (17). Con la función *tf* de Matlab, *transfer function* tal como se ve en la parte final de la Figura 35, recuadro rojo.
- Dar click sobre el ícono de play recuadro verde Figura 35 para compilar y guardar.
- Se genera una ventana para guardar tal como se ve en la Figura 36, nombre al archivo *SintonizarVelocidad* y guárdelo en la carpeta *ControladorPID*.

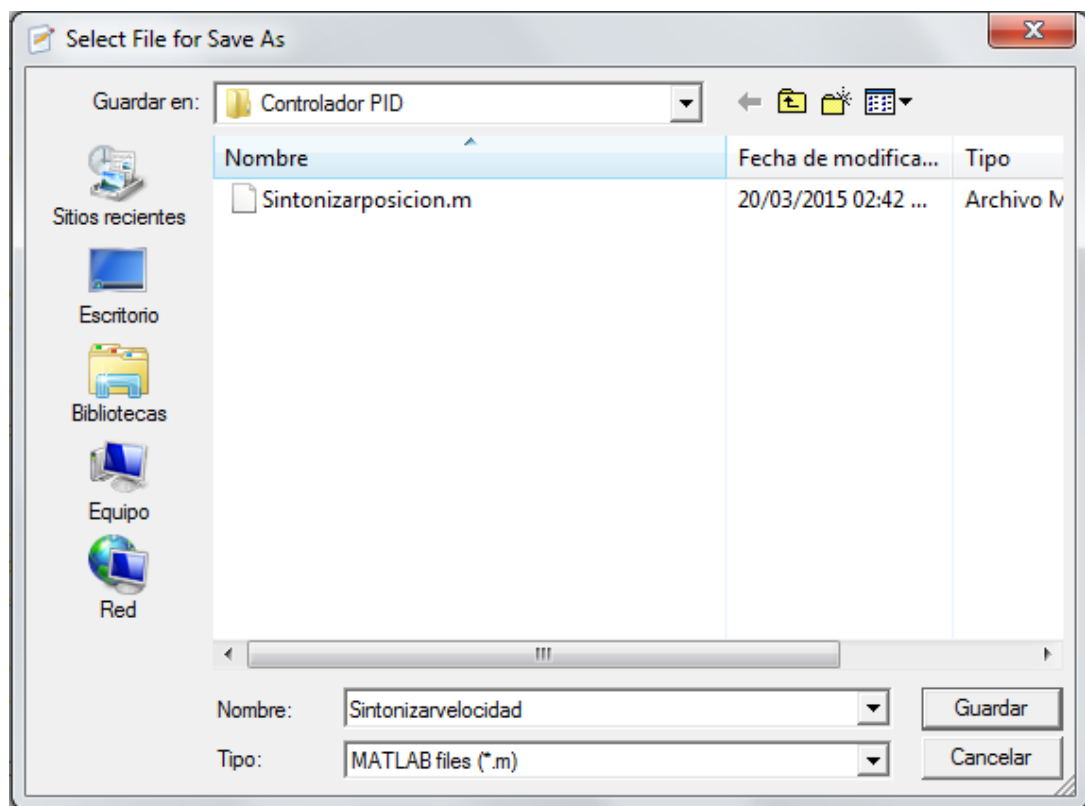


Figura 36. Guardar script para sintonización de Velocidad.

- Abra la herramienta Sisotool escribiendo en la pantalla Command Window de Matlab la palabra *sisotool* y oprima enter tal como se ve en la Figura 37.

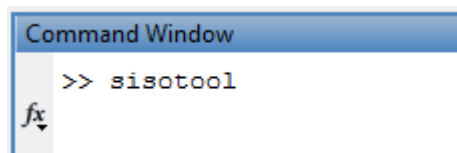


Figura 37. Inicialización Herramienta de Sintonización Sisotool.

- Se abrirá la pantalla principal de la herramienta, escoja la arquitectura para el controlador PID de Velocidad haciendo click en la opción *Control Architecture* recuadro azul Figura 38, se abrirá la pantalla para escoger el tipo de arquitectura.

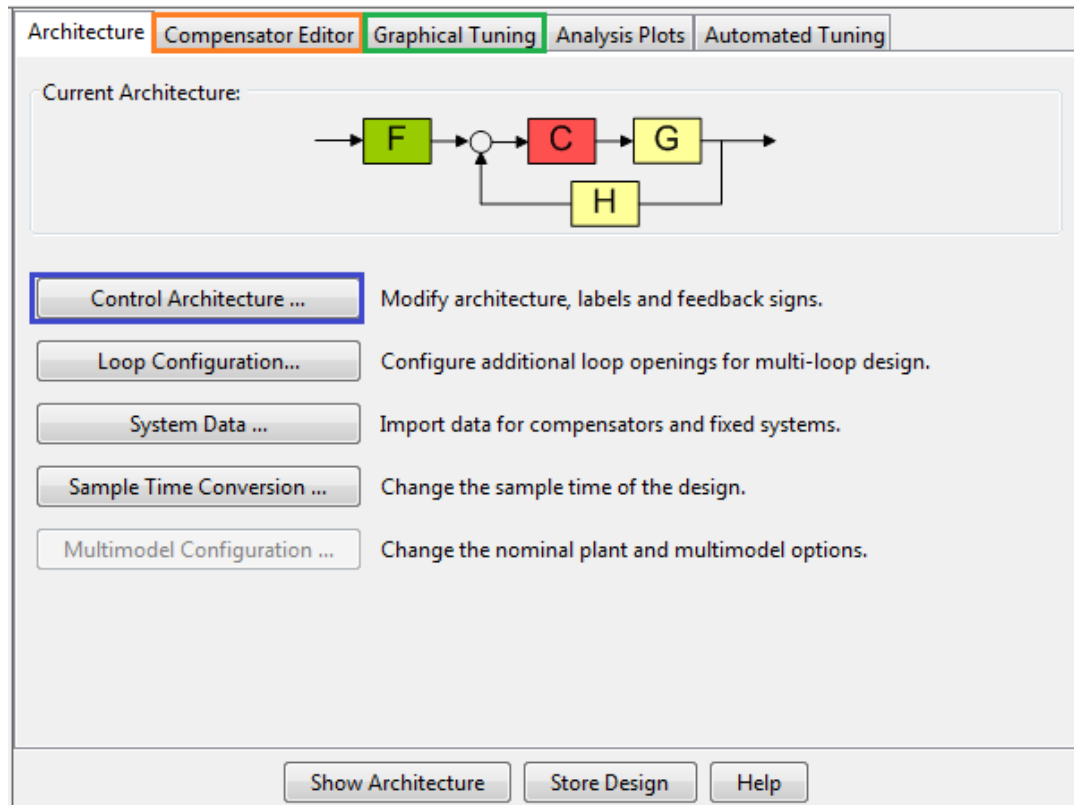


Figura 38. Opción arquitectura de control.

- Elija la opción 1 haciendo click sobre ella esta se encuentra dentro del recuadro verde de la Figura 39.
- La casilla que se encuentra dentro del cuadro rojo corresponde con el tipo de realimentación del sistema que puede ser tanto negativa (-1), como positiva (1). Para este caso deje esta opción en -1. Para finalizar click en OK. Como se ve en la Figura 39.
- Configure los bloques del controlador en la pantalla principal de Sisotool haciendo click en *System Data* recuadro azul Figura 40 se abrirá la ventana de carga de funciones.
- En la ventana *System Data* configure todos los valores excepto G recuadro verde Figura 40, en 1 que es el valor por defecto. Para modificar el bloque G, escoger G recuadro verde Figura 40. de click en Browse. Como se muestra en la Figura 40, se abrirá una nueva ventana.

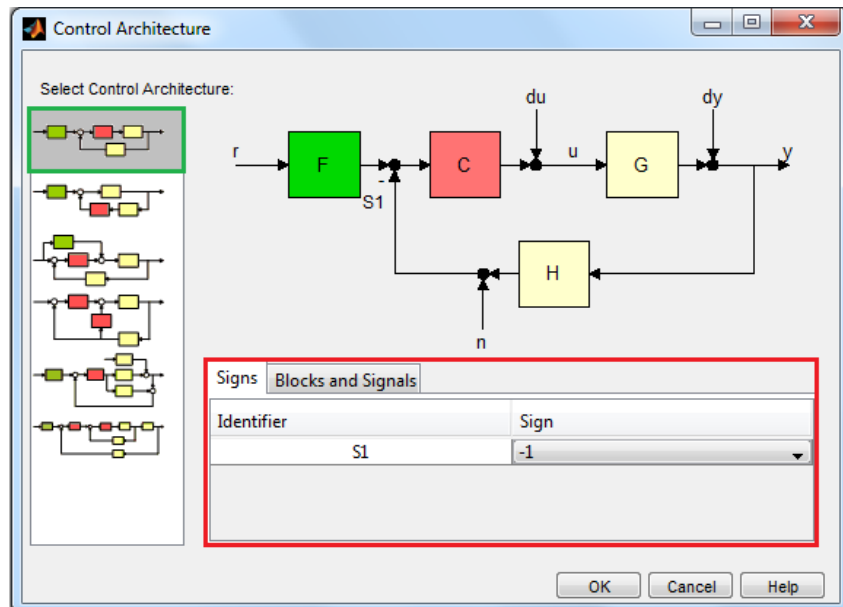


Figura 39. Arquitectura en lazo cerrado para controlador PID de Velocidad y planta en sisotool.

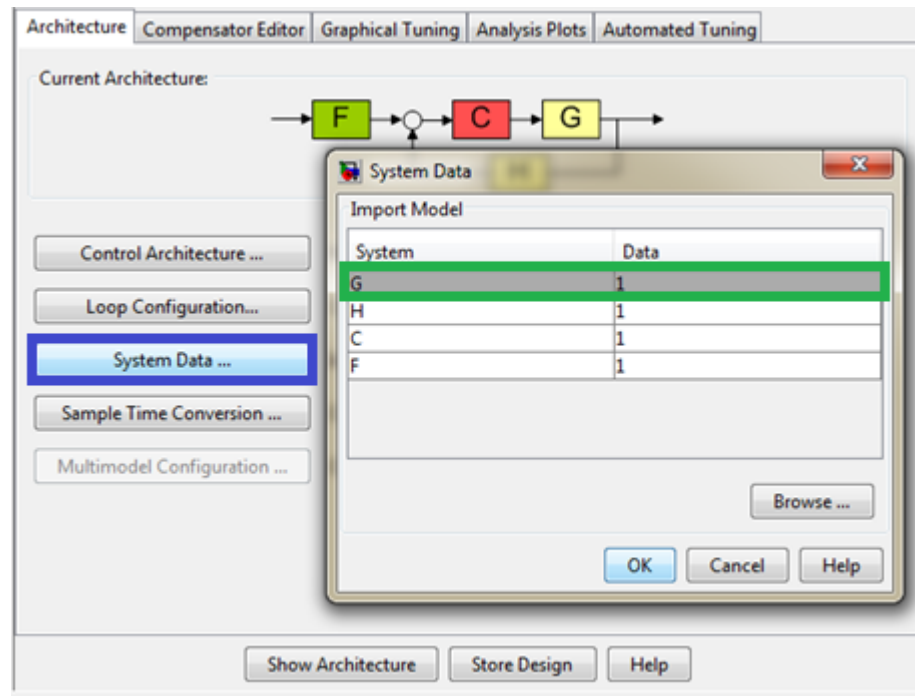


Figura 40. Esquema pestaña Architecture.

- En la ventana *Model Import* escoger la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G recuadro verde Figura 41. que se genera al compilar el archivo *SintonizarVelocidad.m* escoja G, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana *System Data* y ciérrela.

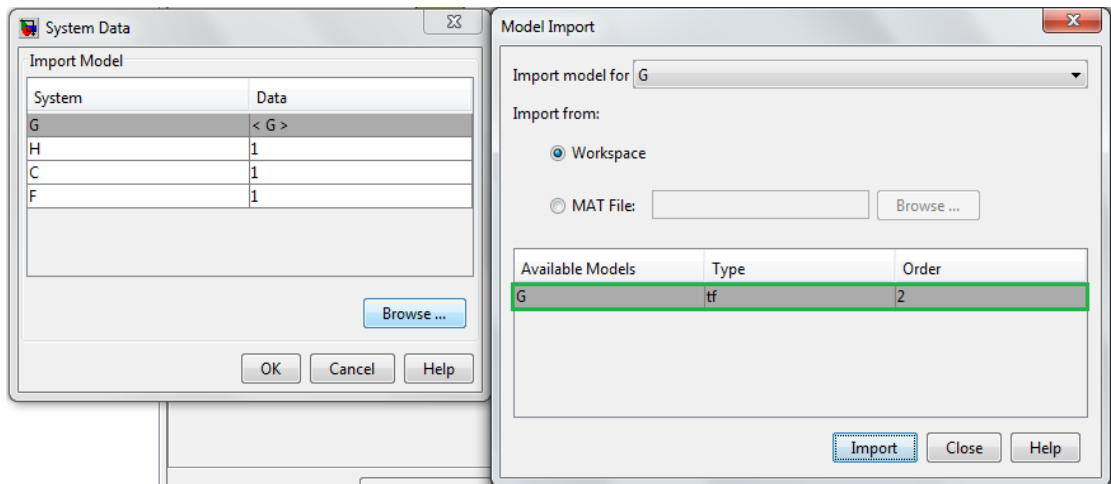


Figura 41. Esquema para importar función de transferencia Velocidad al bloque G.

- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *compesator Editor* recuadro naranja Figura 38. Es el lugar donde numéricamente se procede a cambiar el valor de la constante de proporcionalidad ubicada en la casilla dentro del recuadro rojo de la Figura 42.
- El lugar de las raíces se cambia y se agregan polos y ceros en la casilla Dynamics dentro del recuadro verde en la Figura 42, para crear integradores, diferenciadores, lag, ceros complejos etc.

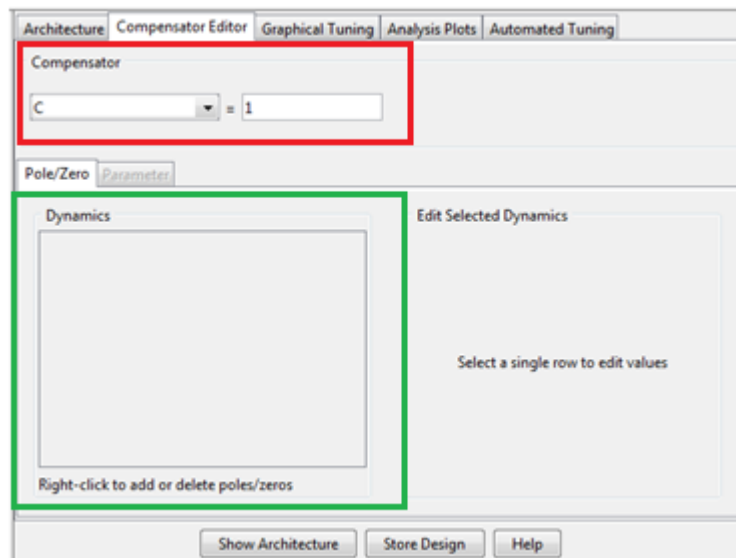


Figura 42. Esquema pestaña Compensator Editor.

- Al ser una herramienta de sintonización con ayuda gráfica se deben configurar las pantallas de ayuda gráfica.
- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *Graphical Tuning* recuadro verde Figura 38.

En la pantalla desplegada por la pestaña *Graphical Tuning* se tiene la posibilidad de observar 6 gráficas recuadro rojo Figura 43, las cuales a su vez pueden representar lazos tanto cerrados como abiertos recuadro azul Figura 43. En el recuadro verde se puede escoger entre 3 tipos de gráficas, Root Locus: que gráfica el lugar de las raíces, los diagramas de bode: para el lazo cerrado, abierto y Nichols.

- Configure la pestaña *Graphical Tuning* igual que en la figura 43:

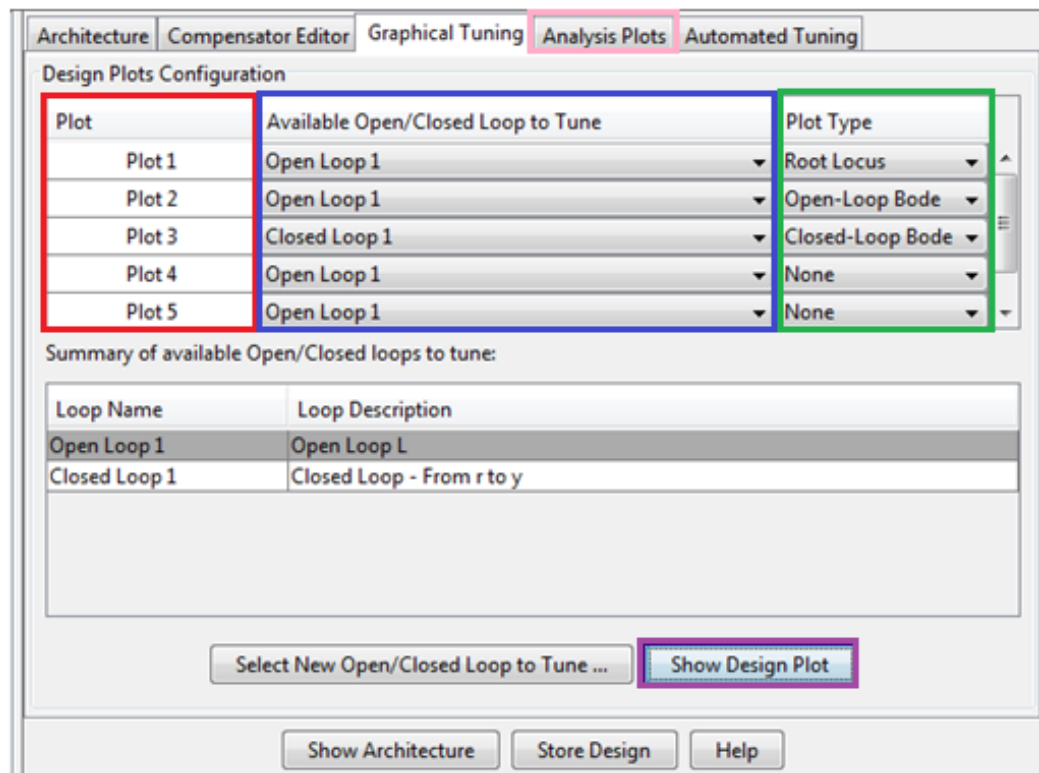


Figura 43. Esquema pestaña *Graphical Tuning*.

- Para observar la gráfica se debe dar click en la opción *Show Design Plot* recuadro morado Figura 43, y se despliega la ventana *SISO design* de la Figura 44.
- En la pantalla de la Figura 44 en el recuadro rojo, se pueden cambiar el lugar de las raíces dando click sobre los pequeños cuadros de color rosa y deslizándolos a diferentes posiciones, al hacer esto se puede observar cómo cambian las otras gráficas facilitando así la sintonización. Lo que se busca en esta ayuda gráfica es suavizar las curvas de respuesta de frecuencia y evitar elevaciones en su curva, en el caso del diagrama de bode se busca que este tenga curvas suaves sin indicios de oscilaciones, o elevaciones.

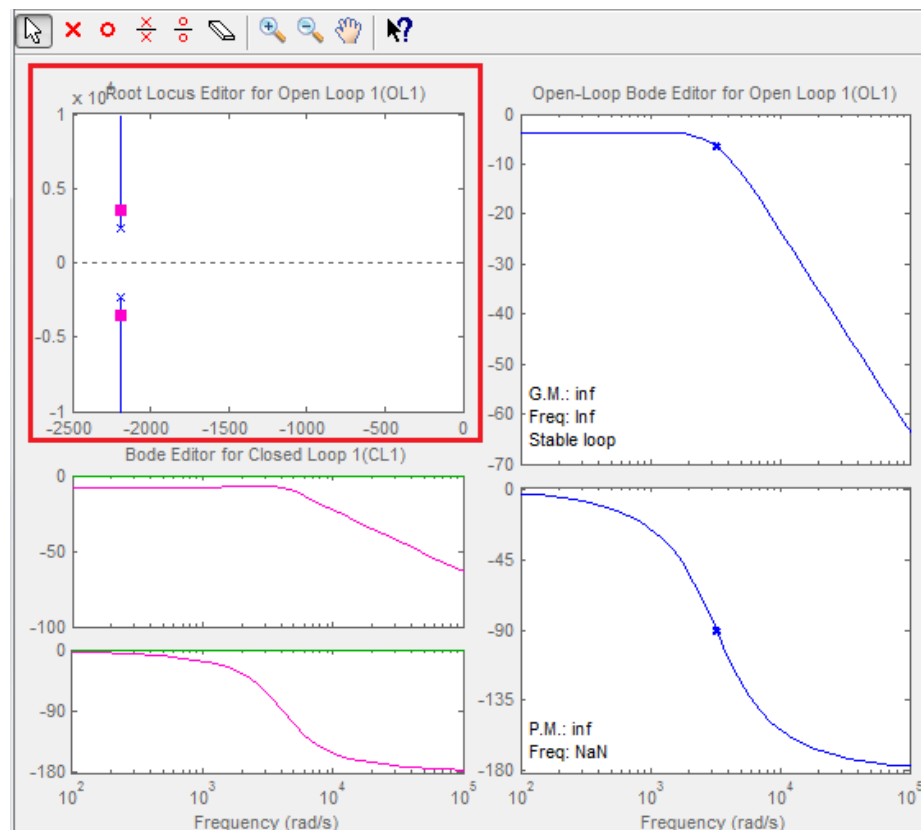


Figura 44. Sintonización Gráfica sisotool, lugar de las raíces.

Existe otra pantalla en Sisotool donde se pueden observar los cambios que se generan al cambiar parámetros en la pestaña *Compensator Editor* es en esta pantalla donde se centrara la sintonización implementada en esta guía por cuanto se puede observar de manera clara la respuesta del sistema a los cambios en el controlador. A esta ayuda gráfica se accede de la siguiente forma:

- Dé Click en la pestaña Analysis Plots, recuadro rosa Figura 43. Se desplegará la pantalla Analysis Plots de la Figura 45. En el recuadro rojo de la Figura 45, se tienen hasta 6 tipos de diagramas para usar, en el recuadro verde de la Figura 45. Se puede observar cuales son:
 Step: Respuesta del sistema al escalón (esta gráfica es la ayuda gráfica a usar en esta guía por cuanto representa la información más útil y sencilla de interpretar), Impulse: respuesta del sistema al impulso, Bode: diagramas de Bode del sistema, Nyquist: diagramas de Nyquist del sistema, Nichols y Polos y ceros.
 En el recuadro azul de la Figura 45, se habilitan los diferentes tipos de diagramas del 1 al 6, y ver su efecto sobre los bloques del sistema y combinaciones de lazos cerrados entre bloques.

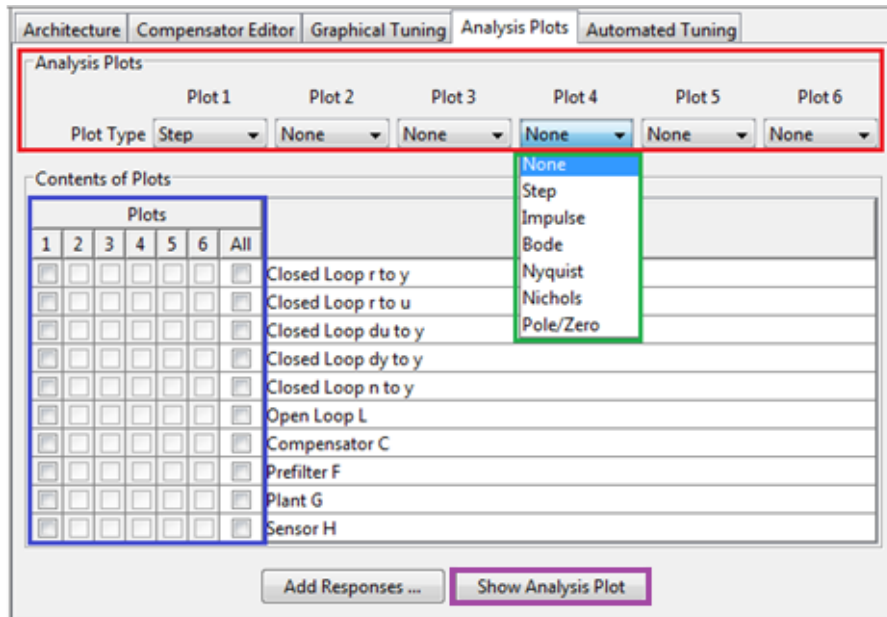


Figura 45. Pestaña Analysis Plots.

- Configure como se muestra en la Figura 46. Los diagramas de sintonización siguiendo el esquema de salidas y entradas propio de Sisotool de la figura 39.

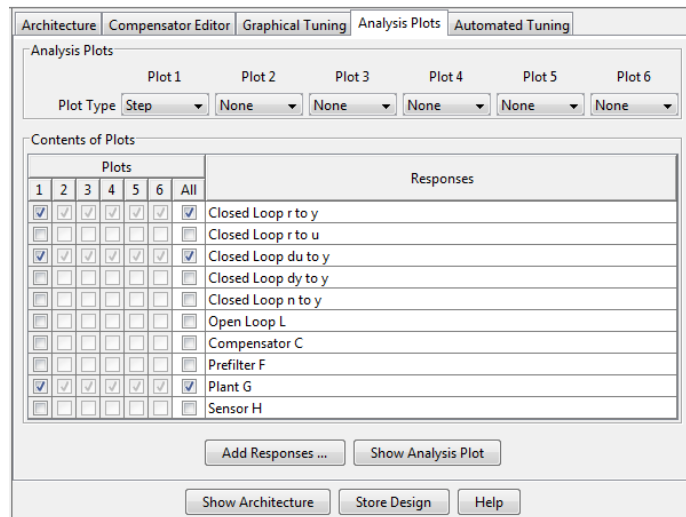


Figura 46. Configuración parámetros pestaña Analysis Plots.

- Dé click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 45, se obtienen las curvas de la figura 47, dónde:

ClosedLoop r to y: Corresponde a la respuesta desde la entrada r de la arquitectura hasta y. Esta es la respuesta del sistema completo, es la curva a sintonizar. En ella se busca obtener una curva muy semejante a un

escalón, con tiempo de subida muy bajo, nada de oscilaciones y cero sobre elongaciones. Curva Color azul Figura 47.

ClosedLoop du to y: Corresponde a la respuesta de sobreesfuerzo del controlador, se busca en la sintonización que esta curva tenga valores pequeños al inicio y se estabilice en valores muy cercanos a cero. Curva color rojo. Figura 47.

Plant G: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia del Motor DC. Esta curva no presenta cambios en la sintonización se usa como referencia del comportamiento del sistema a controlar en este caso el motor DC ejemplarizado en esta guía. Curva azul punteado. Figura 47.

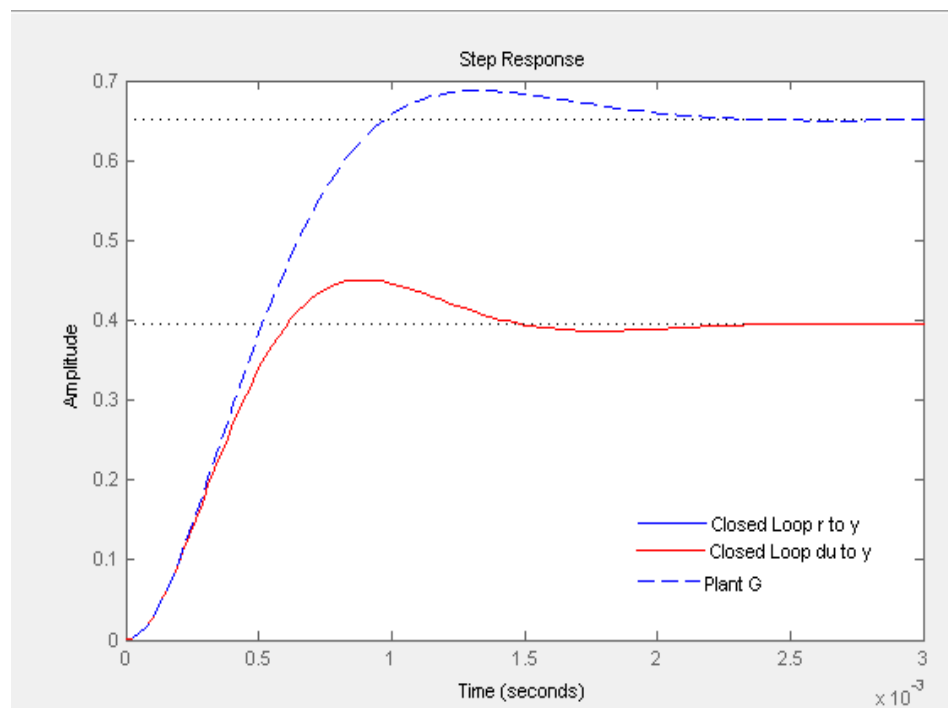


Figura 47. Respuesta de la función de transferencia para la Velocidad y Respuesta del lazo cerrado con controlador, y compensación del controlador.

- La herramienta permite configurar los parámetros de diseño deseados. Haga click derecho sobre la imagen de la Figura 47.
- En el menú emergente elija *Design Requirements* y luego de click en *New*. Observe la Figura 48.
- En la ventana emergente configure los requerimientos de diseño como se muestra en la figura 49 y haga click en *Ok*. Estos requerimientos siguen la premisa de crear una respuesta de estado dinámico estable.

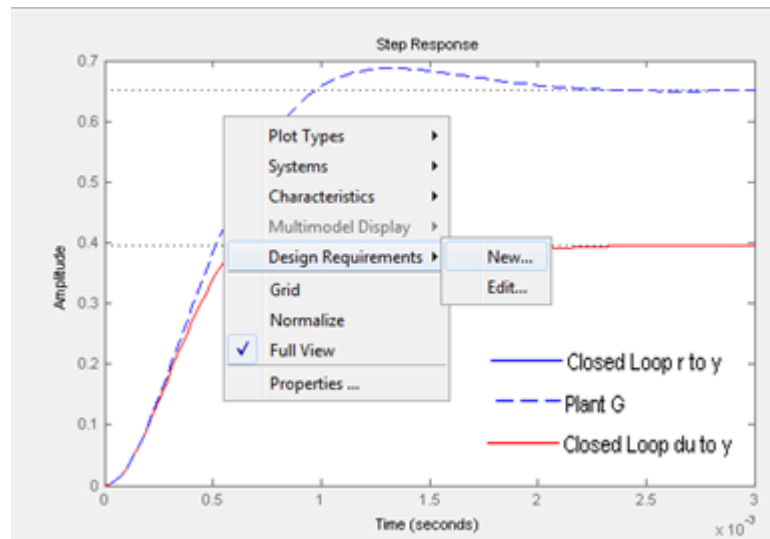


Figura 48. Esquema Agregar Requerimientos de Diseño.

Design requirement type:

Design requirement parameters

Initial value:	<input type="text" value="0"/>	Final value:	<input type="text" value="1"/>
Step time:	<input type="text" value="0"/> seconds		
Rise time:	<input type="text" value="1.1000"/> seconds	% Rise:	<input type="text" value="90"/>
Settling time:	<input type="text" value="2"/> seconds	% Settling:	<input type="text" value="1.0000"/>
% Overshoot:	<input type="text" value="3.0000"/>	% Undershoot:	<input type="text" value="1"/>

Ok Close Help

Figura 49. Requerimientos de Diseño utilizados.

Estos parámetros obedecen a los requerimientos de sintonización y permiten por medio de la ayuda gráfica facilitar el trabajo de sintonización, así los parámetros establecidos son un tiempo de subida menor a 1 segundo, un tiempo de establecimiento menor a 2 segundos, y un porcentaje de sobre paso del 3%, así como asegurar una ganancia cercana al 90% del valor final deseado en este caso 1. Esto para minimizar las pérdidas del sistema.

- Una vez se han introducido los requerimientos de diseño y comportamiento deseados, para el sistema, haga click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 45. Se obtiene la Figura 50.

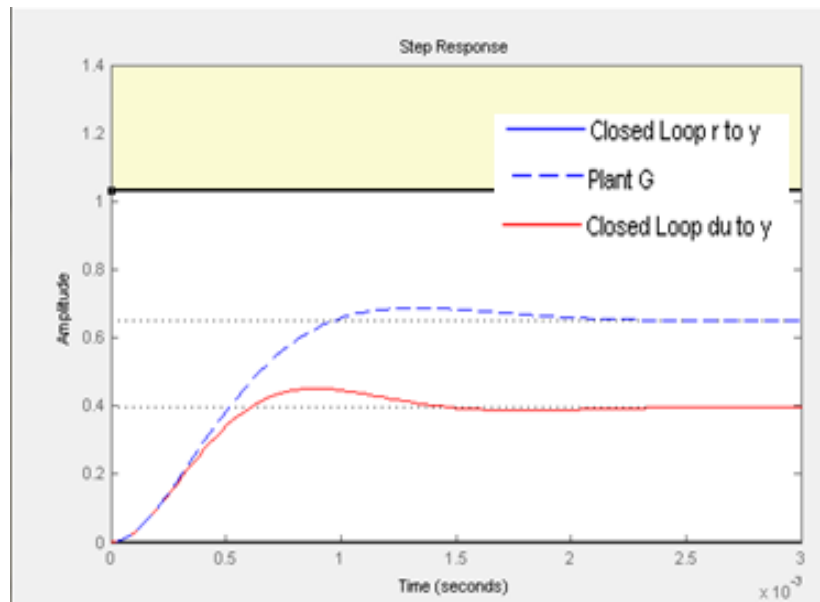


Figura 50. Respuestas del sistema a compensar con los requerimientos de comportamiento del lazo cerrado para Velocidad.

Observe como en la Figura 50. Se monitorea, en todo momento el comportamiento del sistema a los cambios que se efectúen sobre los valores del controlador, la sintonización consiste en que la respuesta de la planta con el compensador se comporte de tal forma que la curva de color azul se localice dentro de las zonas blancas, estas zonas delimitan la curva para que tenga el comportamiento deseado para un sistema controlado de forma exitosa, esta zona delimita los requerimientos de diseño implementados en la Figura 49. Esta gráfica siempre está disponible durante la sintonización en el grupo de ventanas de Matlab.

Para sintonización Manual hacer lo siguiente:

Para hacer uso de la herramienta de sintonización manual, se pueden llevar a cabo muchos métodos mover las raíces en las curvas y observar en estas la reacción y que se comporten según los requerimientos de diseño.

En la pantalla de *Compensator Editor* agregar polos y ceros que se verán reflejados en la ayuda gráfica, si se tienen valores ya determinados es la forma más exacta y eficaz de añadir los polos y ceros necesarios para lograr el comportamiento deseado del sistema.

- Inicie la sintonización insertando un integrador en la pestaña *Compensator Editor*, haciendo click derecho sobre el recuadro dynamics de color azul de la Figura 51, escoja *add pole/zero* y luego haga click en *Integrator*.

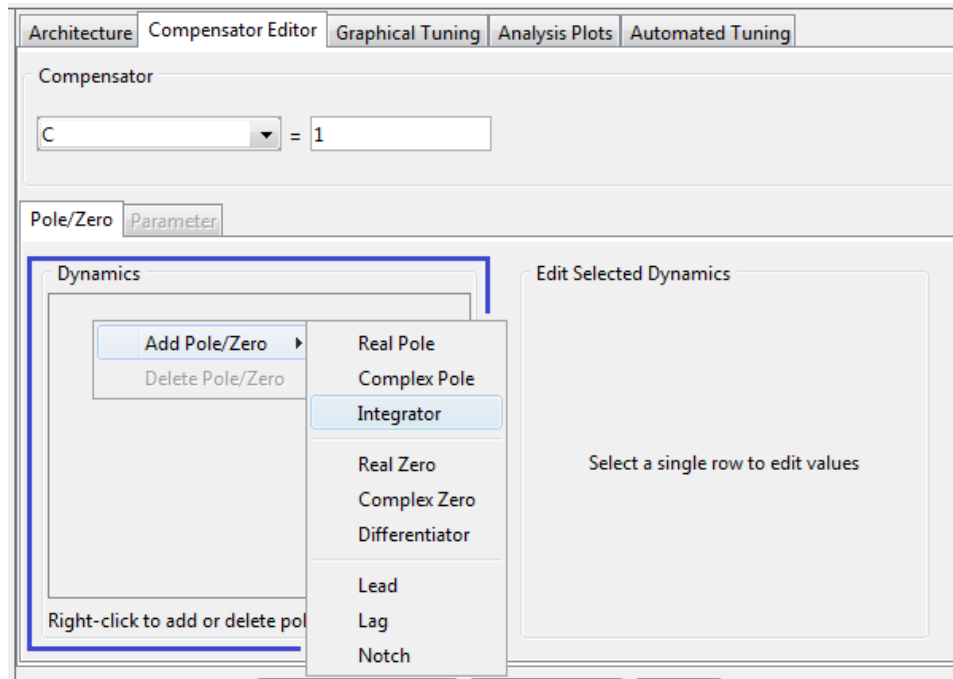


Figura 51. Esquema pestaña Compensator Editor agregar integrador.

- El integrador se ubica en el recuadro azul *dynamics* de la figura 52, y su localización puede cambiarse en el recuadro *edit dynamics* de color rojo de la figura 52.

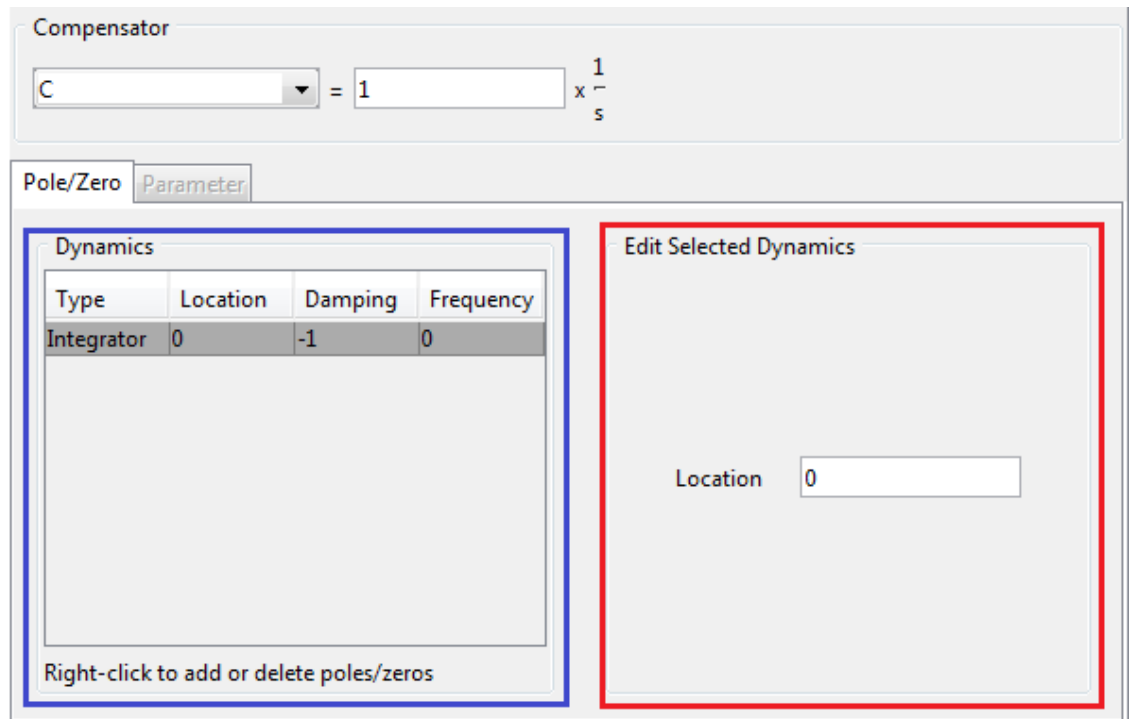


Figura 52. Esquema pestaña Compensator Editor con Integrador.

Obteniendo las curvas de la Figura 53. Este integrador eleva la ganancia del sistema llevándolo desde 0.4 hasta 1. El sistema alcanzó el valor de ganancia requerido pero con tiempos demasiado largos como se puede observar en la curva de color azul, en la curva de color rojo puede verse como el esfuerzo del controlador mejoró ya que tiene en un inicio una elevación importante pero para finalizar su comportamiento obtuvo una caída y estabilización en cero.

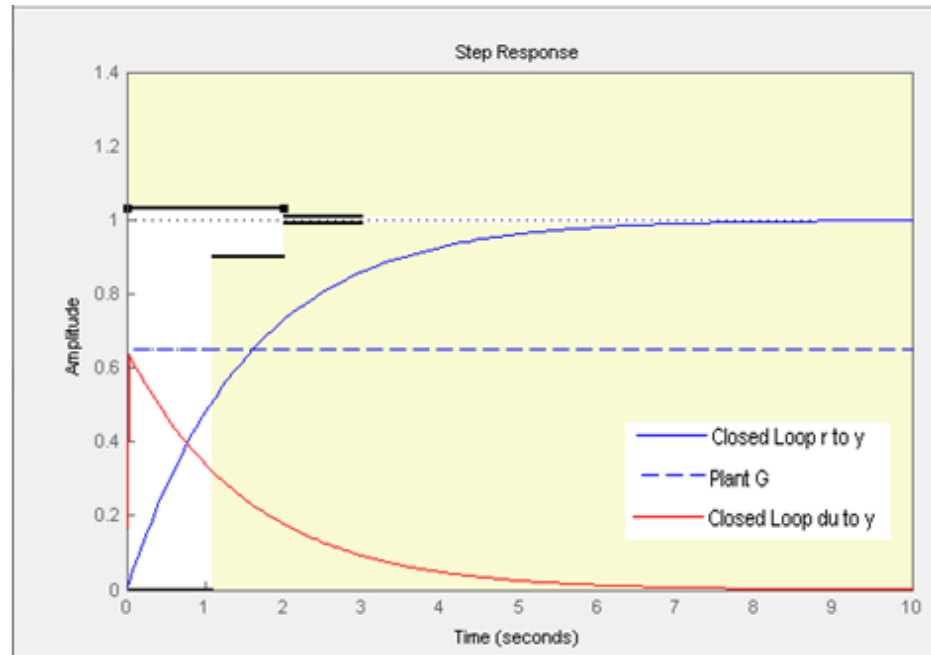


Figura 53. Respuestas al insertar un integrador en la función de transferencia del controlador PID, para la Velocidad.

- Inserte en el recuadro *Compensator* de color rojo de la figura 54, uno a uno los posibles valores probando hasta encontrar uno que proporcione la ganancia adecuada para los requerimientos de diseño. Para el motor ejemplarizado en esta guía se insertaron uno a uno los valores (3, 4, 5, 7) encontrando que el valor adecuado es 7 observe los resultados en la Figura 55.

En este ejemplo observe cómo en la Figura 55. Al insertar un valor de ganancia proporcional el sistema mejoró su tiempo de subida considerablemente, y se observa cómo la ausencia de oscilaciones, implica que el sistema de segundo orden que caracteriza la Velocidad del motor ejemplarizado es naturalmente integrable y tiende a ser estable.

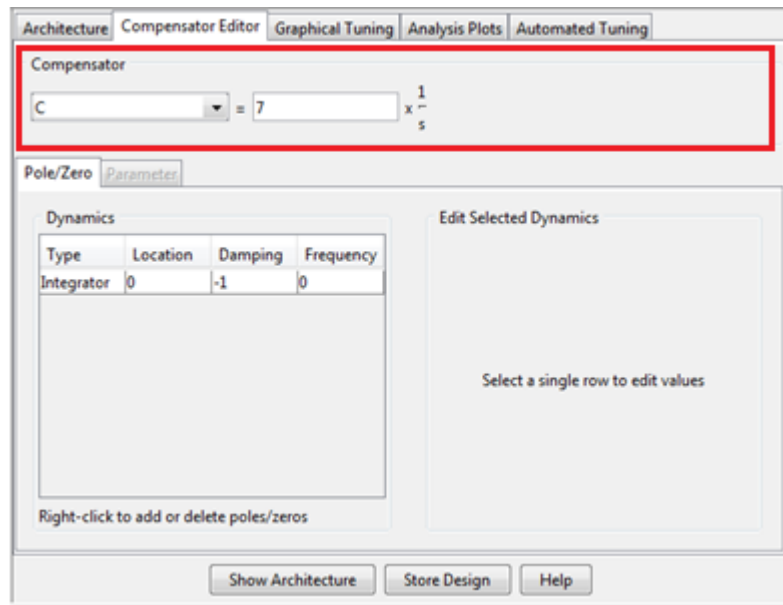


Figura 54. Insertar valores en recuadro Compensator editor.

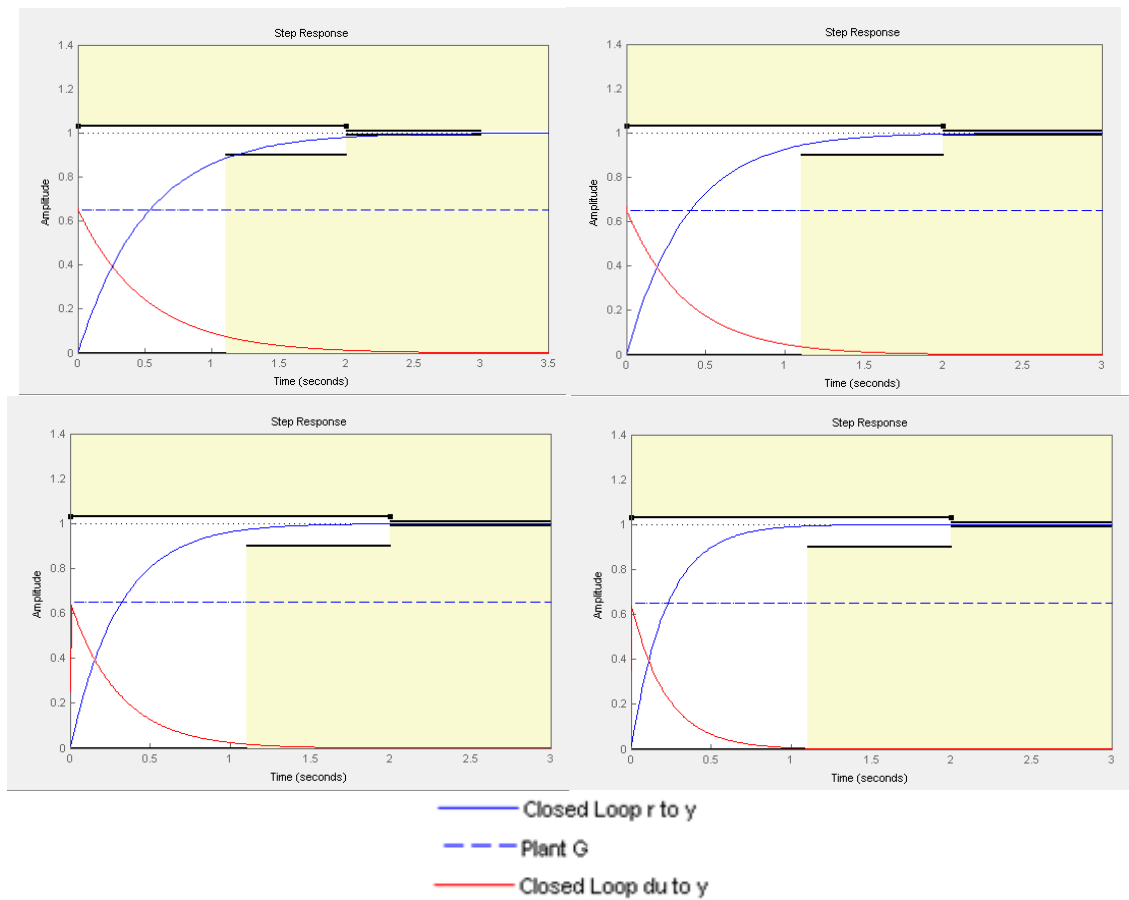


Figura 55. Respuestas al insertar un integrador y aumentar la constante de proporcionalidad en la función de transferencia del controlador PID, para la Velocidad.

- Inserte un Cero Real en el sistema haciendo click derecho, sobre el recuadro *Dynamics* de color azul de la Figura 56, escoger Add-Pole/Zero y luego escoger Real Zero.

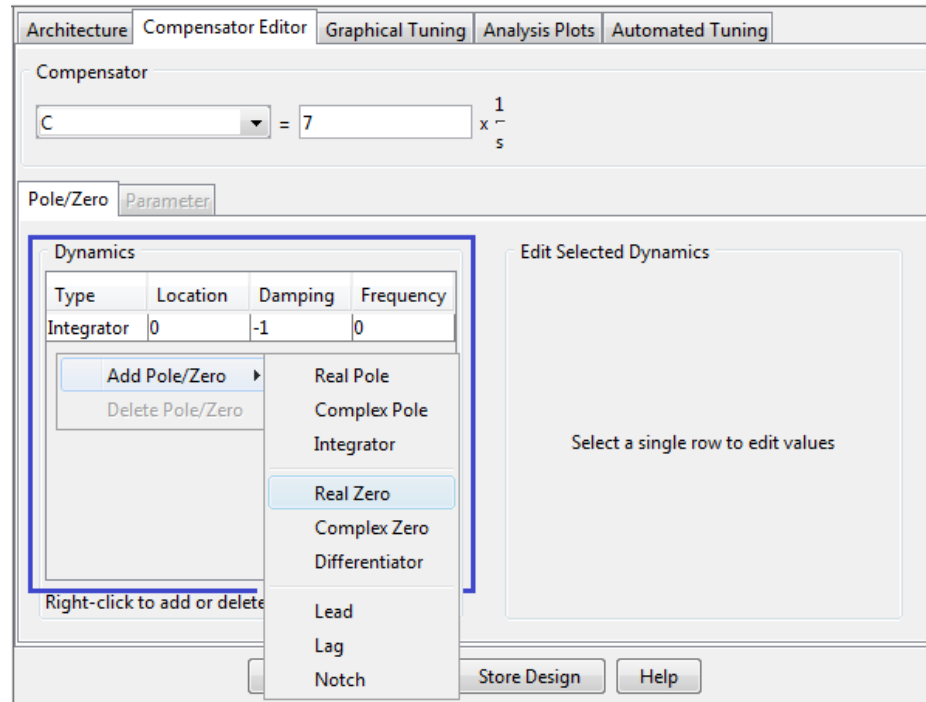


Figura 56. Inserción cero real Velocidad.

- Modifique su localización haciendo click sobre él y probando uno a uno diferentes valores o posiciones del cero real hasta encontrar el que le otorgue al sistema el comportamiento adecuado en el recuadro *location* de color rojo de la Figura 57. Para el motor ejemplarizado es 50 se aleja el cero real del origen por cuanto el sistema ya era estable y se requería mejorar un poco su ganancia y tiempos de establecimiento, al hacer pruebas se puede determinar que en muchos casos una vez obtenido un valor efectivo de sintonización. Se pueden probar sus múltiplos para afinar la sintonización. obteniendo los resultados del recuadro de color azul de la figura 57 y las curvas resultado de la figura 58, finalizando así el proceso de sintonización en Sisotool.

En la curva resultado de la Figura 58, observe cómo la curva de color azul que representa la salida del sistema completo está dentro de las zonas blancas lo que indica que los tiempos de establecimiento y subida están dentro de los requerimientos de diseño, tampoco posee sobre-elongaciones ni oscilaciones que es lo ideal. La curva de color rojo que representa el esfuerzo del controlador presenta un gran esfuerzo al iniciar el proceso por cuanto el aumento de Velocidad hasta el valor deseado lo requiere por

características inherentes del sistema. Una vez alcanza la Velocidad deseada el controlador al lograr estabilidad dinámica, hace que el sobre esfuerzo del controlador se establezca en valores cercanos a cero.

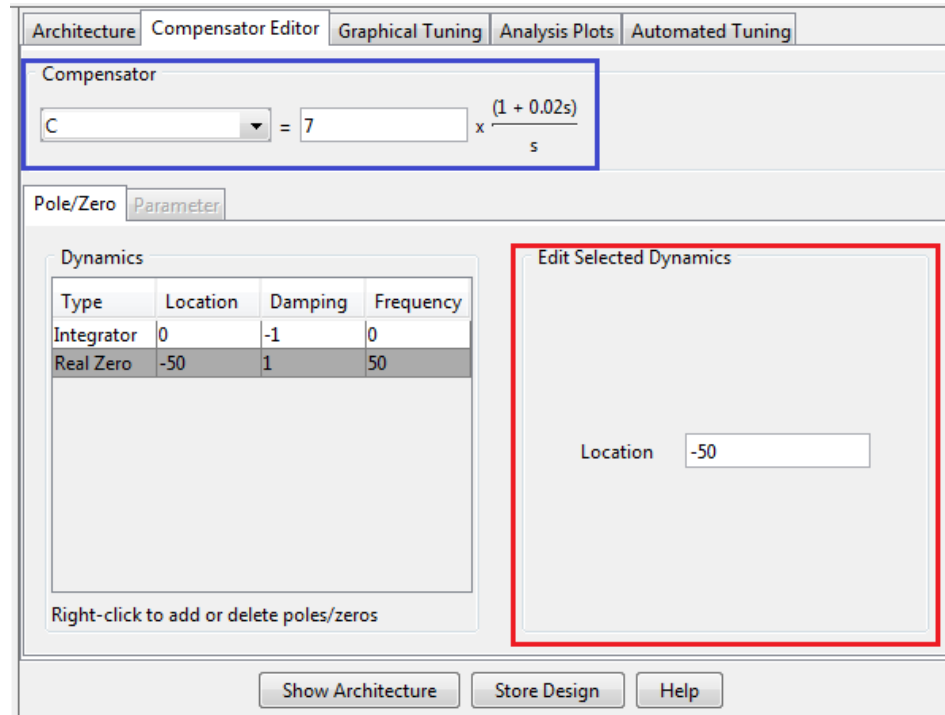


Figura 57. Modificación Posición cero real Velocidad y resultado sintonización.

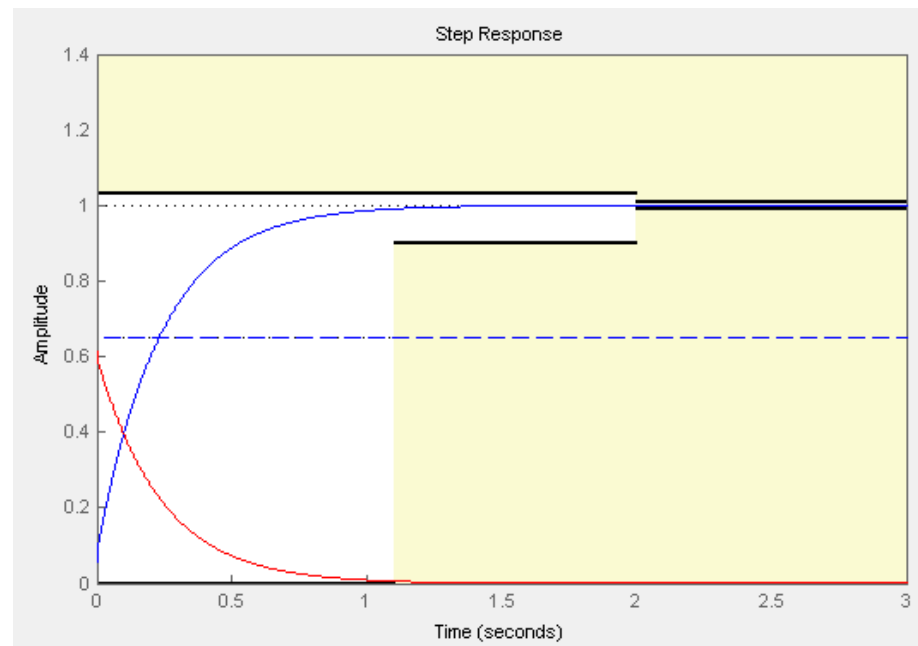


Figura 58. Curva resultado de la sintonización finalizada Velocidad.

- Guarde el modelo de sintonización haciendo Click sobre el dibujo del disquete del recuadro verde de la figura 59, se despliega una ventana, en ella escoja la opción *SISO Design Task* y de click en OK.
- Se abrirá como contenedor la Carpeta *ControlPID*, nombre al archivo *Velocidadsisotool* y guarde.

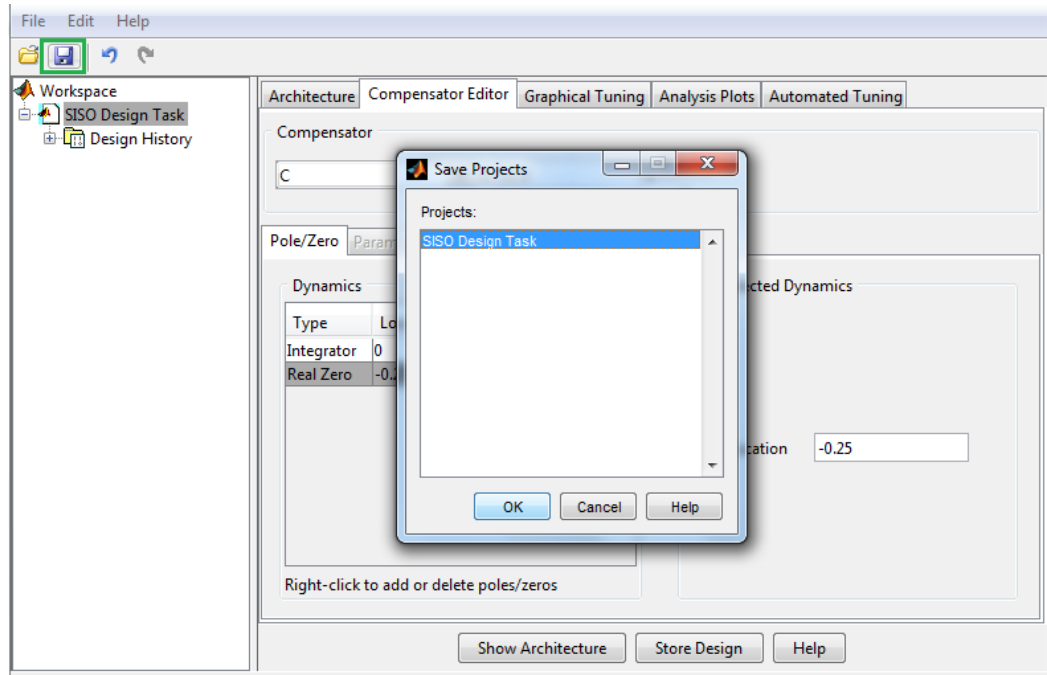


Figura 59. Esquema guardado archivos Sisotool.

4.4.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.

- La herramienta Sisotool entrega como resultado de sintonización la expresión, el resultado se encuentra en el recuadro verde de la figura 30.

$$c = \frac{7 * (1 + 0.02s)}{s} \quad (19)$$

La cual debe ser igualada a la función de transferencia que se determinó en la ecuación (5)

- Igualar las ecuaciones (5) y (19):

$$\frac{7 * (1 + 0.02s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{S} + KdS$$

$$(7 * (1 + 0.02s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$

$$7 + 0.14s = KpS + Ki + KdS^2$$

Igualando término a término se obtienen las constantes a usar en el controlador PID interactivo.

$$Kp = 0.14$$

$$Ki = 7$$

$$Kd = 0$$

Obteniendo un controlador PID, de tipo proporcional e integral ya que no se insertó una fase derivativa en la función de transferencia de controlador.

5. Sintonización Constante De Control PID, Posición Y Velocidad En Cascada.

5.1. Sintonización del controlador PID Híbrido para Posición y Velocidad en cascada.

Para este procedimiento se debe abrir Matlab y crear un nuevo script donde se almacenen los parámetros internos del motor, así como la función de transferencia de la variable a controlar. Para lo cual se debe realizar:

- En la pantalla principal de Matlab, haga click en *file*, después en *new script*. Como en la Figura 60. Se abrirá la pantalla *Editor*.

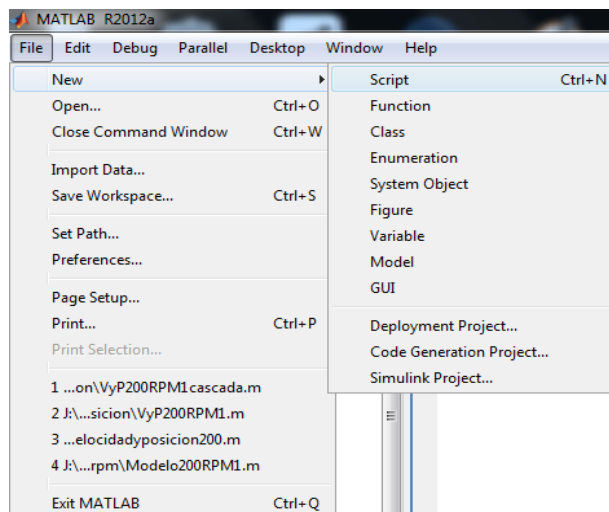


Figura 60. Procedimiento creación nuevo Script.

- En la pantalla *Editor* ingrese los parámetros del modelo interno del motor a controlar tal como se muestra en la Figura 61, recuadro Azul. (En el script se cargaron los parámetros del motor que se ejemplariza en esta guía)
- Se deben cargar las funciones de transferencia de la expresión (16) Posición y (17) Velocidad. Con la función *tf* de Matlab, transfer function tal como se ve en la parte final de la Figura 61.

```

1
2 %Limpiar el workspace de Matlab.
3 clear all;
4 %Seleccionar el formato numerico de los datos.
5 format long;
6 % Parámetros del motor en SI
7 Ra = 21.7; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
8 La =4.981; % uH --> La = Inductancia de Armadura.
9 Jt = 1.5159; % g*cm^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor
10 B = 4.942e-4; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
11 Ke = 0.5130; % mV*s/rad --> Ke = Constante electromotriz
12 Kt = 0.5130; % mN*m/A --> Kt = Constante de Torque.
13 % Parámetros del motor en SI
14 Ra = Ra; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
15 La = La * 10^(-3); % uH --> La = Inductancia de Armadura.
16 Jt = Jt * 10^(-5); % kg*m^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor
17 B = B; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
18 Ke = Ke * 10^(-0); % V*s/rad --> Ke = Constante Electromotriz.
19 Kt = Kt * 10^(-0); % N*m/A --> Kt = Constante de Torque.
20
21 % Función de transferencia Posicion del motor en lazo cerrado
22 nump = Kt;
23 denp = [Jt*La (Jt*Ra + B*La) (B*Ra + Ke*Kt) Kt];
24 Gp = tf (nump,denp);
25 format long;
26
27 % Función de transferencia Velocidad del motor en lazo cerrado
28 numv = [Kt];
29 denv = [Jt*La (Jt*Ra + B*La) (B*Ra + Ke*Kt+Kt)];
30 Gv = tf (numv,denv);
31

```

Figura 61. Script en Matlab para la caracterización del sistema Motor DC, con funciones de transferencia de Velocidad y Posición.

- Dar click sobre el ícono de play recuadro verde Figura 61, para compilar y guardar.
- Se genera una ventana para guardar tal como se ve en la Figura 62. Nombre al archivo *SintonizarposicionyVelocidad.m* y guárdelo en la carpeta *ControladorPID*.

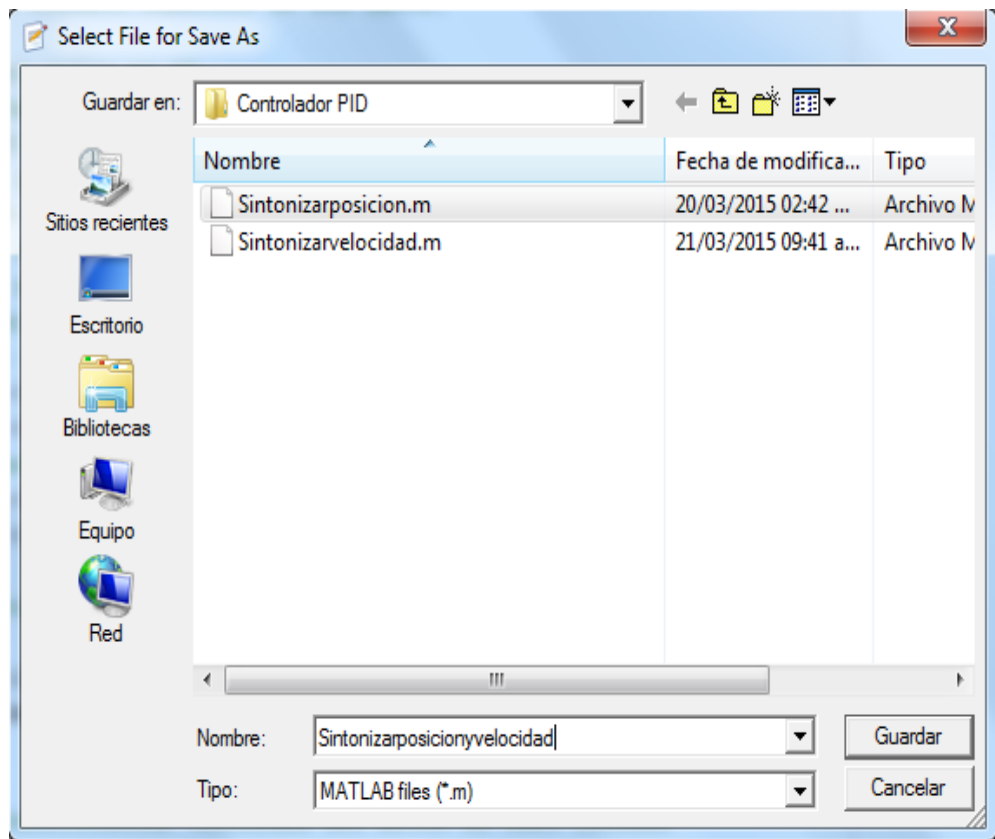


Figura 62. Guardar script para sintonización Posición y Velocidad en cascada.

- Abra la herramienta Sisotool escribiendo en la pantalla *Command Window* de Matlab la palabra *sisotool* y oprima enter tal como se ve en la Figura 63.

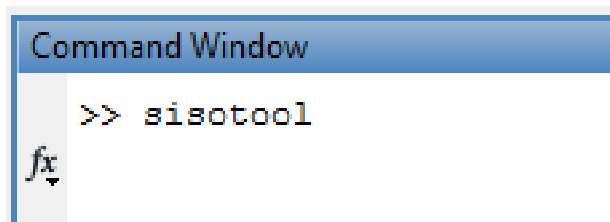


Figura 63. Inicialización Herramienta de Sintonización Sisotool.

- Se abrirá la pantalla principal de la herramienta, Escoja la arquitectura para el controlador PID de Posición y Velocidad haciendo click en la opción *Control Architecture* recuadro azul Figura 64, se abrirá la pantalla para escoger el tipo de arquitectura.

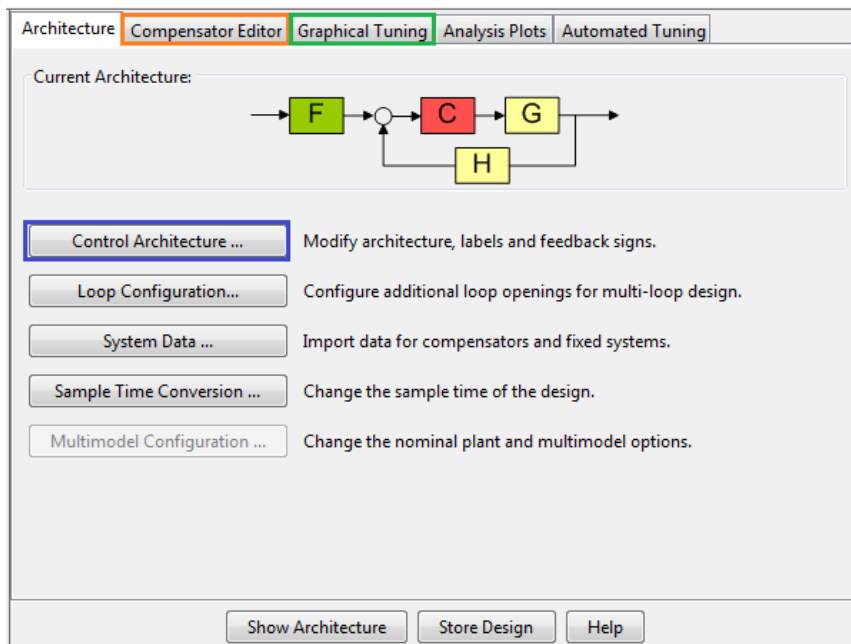


Figura 64. Opción arquitectura de control.

- Elija la opción 4 haciendo click sobre ella esta se encuentra dentro del recuadro verde de la Figura 65.
- La casilla que se encuentra dentro del cuadro rojo corresponde con el tipo de realimentación del sistema que puede ser tanto negativa (-1), como positiva (1). Para este caso deje esta opción en -1. Para finalizar click en OK. Como se ve en la Figura 65.

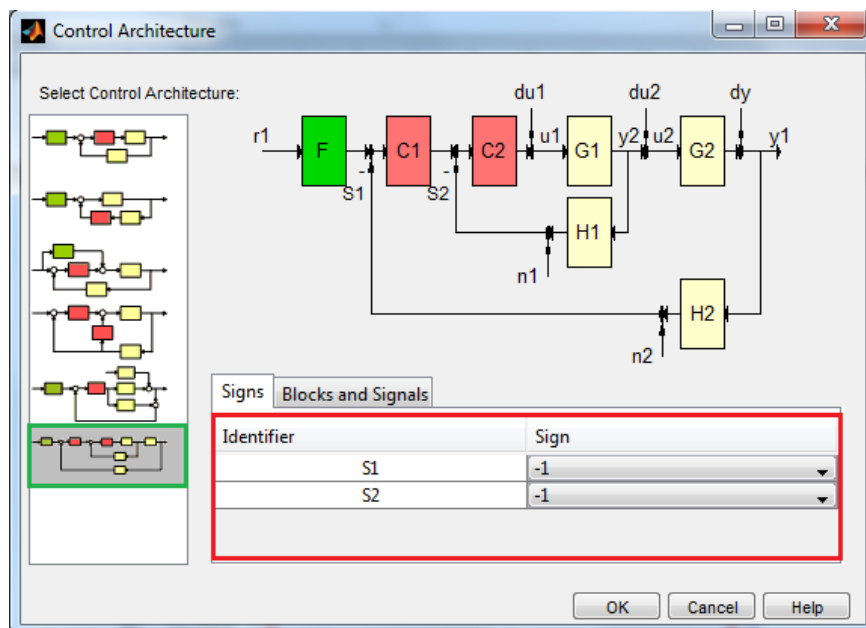


Figura 65. Arquitectura en lazo cerrado para controlador PID de Velocidad y planta en sisotool.

- Configure los bloques del controlador en la pantalla principal de sisotool haciendo click en *System Data* recuadro azul de la Figura 66, se abrirá la ventana de carga de funciones.
- En la ventana *System Data* configure todos los valores excepto G1 recuadro verde y G2 recuadro Rojo Figura 66, en 1 que es el valor por defecto.

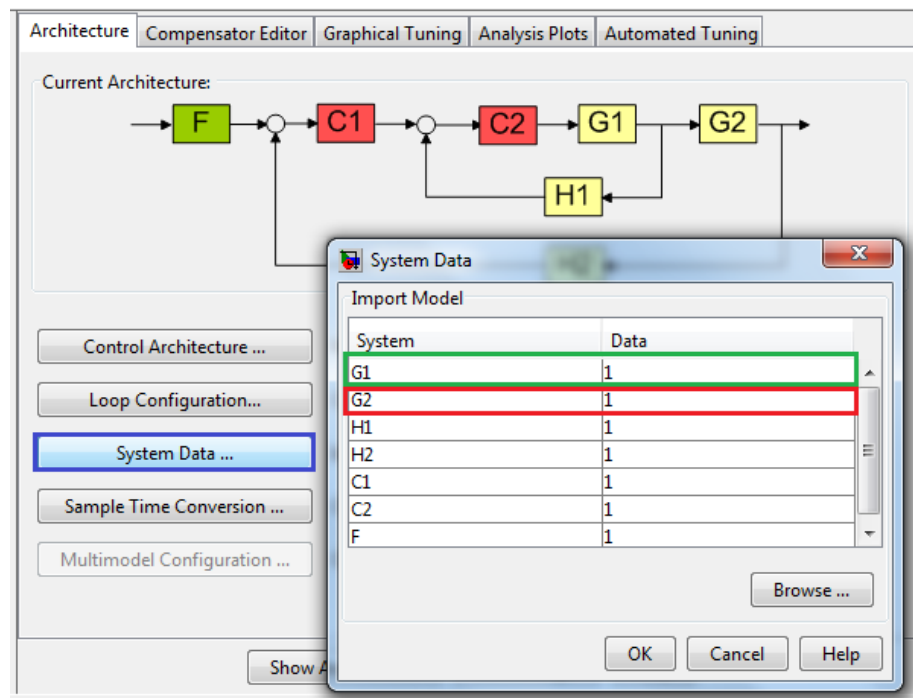


Figura 66. Esquema pestaña Architecture.

- Para modificar el bloque G1 (Bloque función de transferencia Velocidad), escoger G1, recuadro verde Figura 66, de click en Browse. Como se muestra en la Figura 66, se abrirá una nueva ventana.
- En la ventana *Model Import* escoja la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G1 recuadro verde Figura 67, que se genera al compilar el archivo *SintonizarposicionyVelocidad.m* escoja Gv, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana *System Data* y ciérrela.
- Para modificar el bloque G2 (Bloque función de transferencia Posición), escoja G2 en el recuadro rojo Figura 66, de click en Browse. Como se muestra en la Figura 66, se abrirá una nueva ventana.
- En la ventana *Model Import* escoja la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G2 recuadro rojo Figura 67, que se genera al compilar el archivo *SintonizarposicionyVelocidad.m* escoja Gp, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana *System Data* y ciérrela.

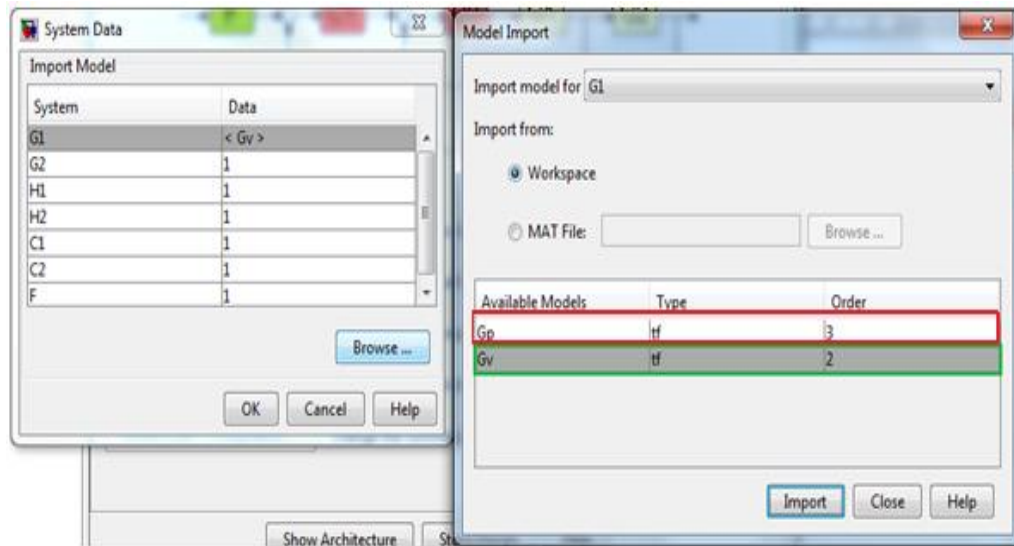


Figura 67. Esquema para importar función de transferencia Posición al bloque G2.

- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *compesator Editor* recuadro naranja Figura 64, es el lugar donde numéricamente se procede a cambiar el valor de la constante de proporcionalidad recuadro rojo de la figura 68.
- En este caso se puede escoger entre sintonizar el compensador C2 (compensador de Velocidad), o el compensador C1 (compensador de Posición) cuadro azul figura 68,
- El lugar de las raíces se cambia y se agregan polos y ceros en la casilla Dynamics dentro del recuadro verde en la figura 68, para crear integradores, diferenciadores, lag, ceros complejos etc.

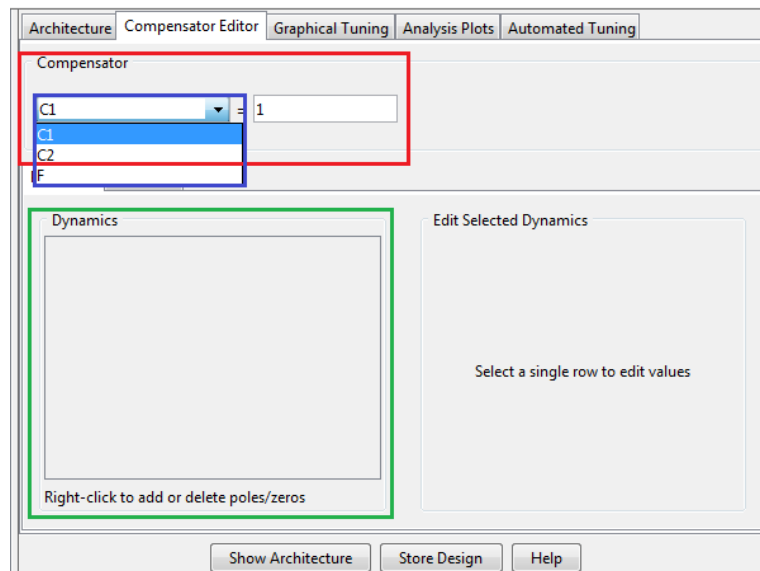


Figura 68. Esquema pestaña Compensator Editor.

Al ser una herramienta de sintonización con ayuda gráfica se deben configurar las pantallas de ayuda gráfica:

- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *Graphical Tuning* recuadro verde Figura 64.
En la pantalla desplegada por la pestaña *Graphical Tuning* se tiene la posibilidad de observar 6 gráficas recuadro rojo Figura 69, las cuales a su vez pueden representar los lazos abiertos desde la entrada hasta la salida de los dos bloques C1 y C2 de forma independiente recuadro azul Figura 69. En el recuadro verde se puede escoger entre 3 tipos de gráficas, Root Locus: que gráfica El lugar de las raíces, los diagramas de bode: para el lazo cerrado, abierto y Nichols.
- Configure la pestaña *Graphical Tuning* Igual que en la figura 69:

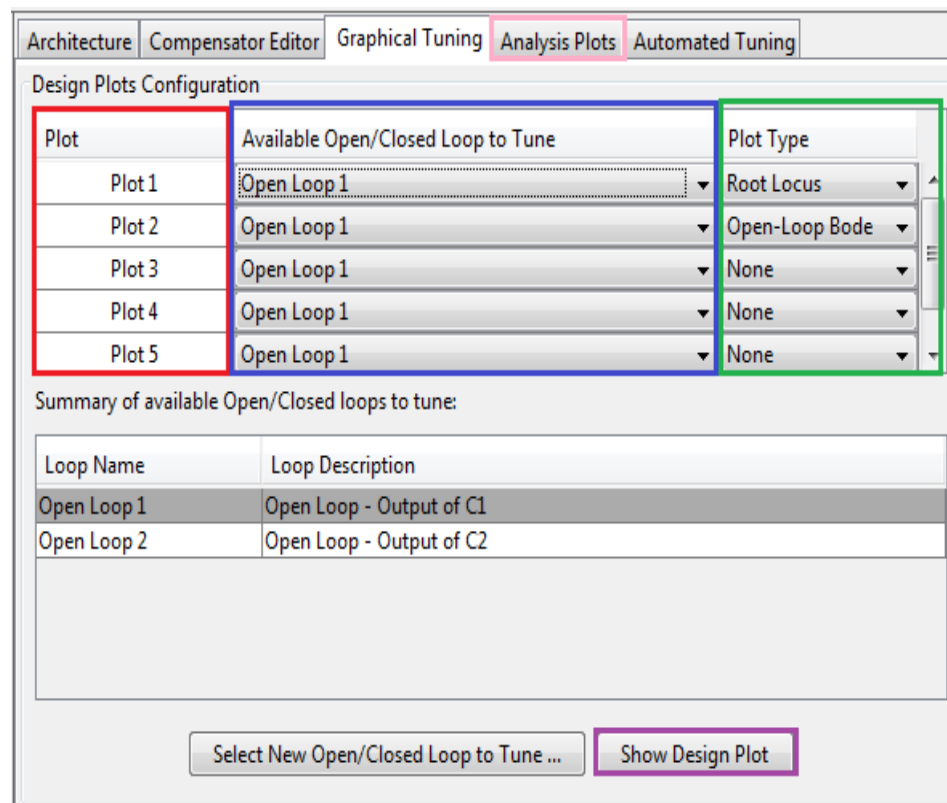


Figura 69. Esquema pestaña Graphical Tuning.

- Para observar la gráfica se debe dar click en la opción *Show Design Plot* recuadro morado Figura 69, y se despliega la ventana *SISO design* de la Figura 70.

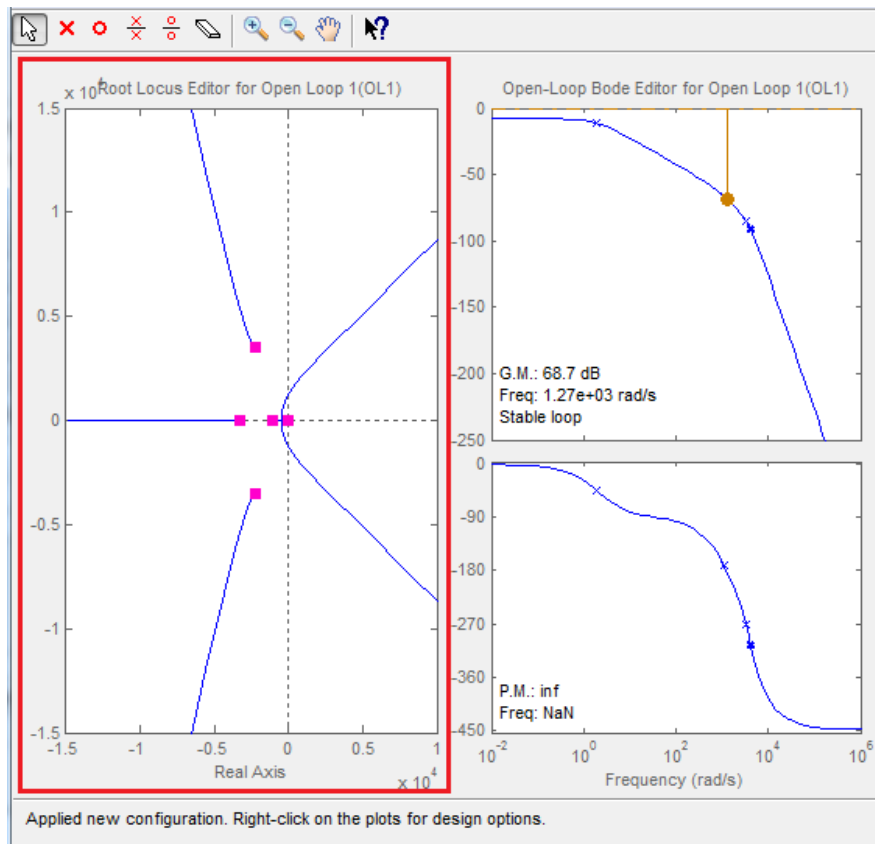


Figura 70. Sintonización Gráfica sisotool, lugar de las raíces.

- En la pantalla de la Figura 70, en el recuadro rojo, se pueden cambiar el lugar de las raíces dando click sobre los pequeños cuadros de color rosa y deslizándolos a diferentes posiciones. Al hacer esto se puede observar cómo cambian las otras gráficas facilitando así la sintonización. Lo que se busca en esta ayuda gráfica es suavizar las curvas de respuesta de frecuencia y evitar elevaciones en su curva.

Existe otra pantalla en Sisotool donde se pueden observar los cambios que se generan al cambiar parámetros en la pestaña *Compensator Editor*. Es en esta pantalla donde se centrara la sintonización implementada en esta guía por cuanto se puede observar de manera clara la respuesta del sistema a los cambios en el controlador. A esta ayuda gráfica se accede de la siguiente forma:

- Dé Click en la pestaña Analysis Plots, recuadro rosa Figura 69. Se desplegara la pantalla Analysis Plots de la Figura 71. En el recuadro rojo de la Figura 71, se tienen hasta 6 tipos de diagramas para usar, en el recuadro verde de la Figura 71. Se puede observar cuales son:
 Step: Respuesta del sistema al escalón (esta gráfica es la ayuda gráfica a usar en esta guía por cuanto representa la información más útil y sencilla de interpretar), Impulse: respuesta del sistema al impulso, Bode: diagramas de

Bode del sistema, Nyquist: diagramas de Nyquist del sistema, Nichols y Polos y ceros.

En el recuadro azul de la Figura 71, se habilitan los diferentes tipos de diagramas del 1 al 6, y ver su efecto sobre los bloques del sistema y combinaciones de lazos cerrados.

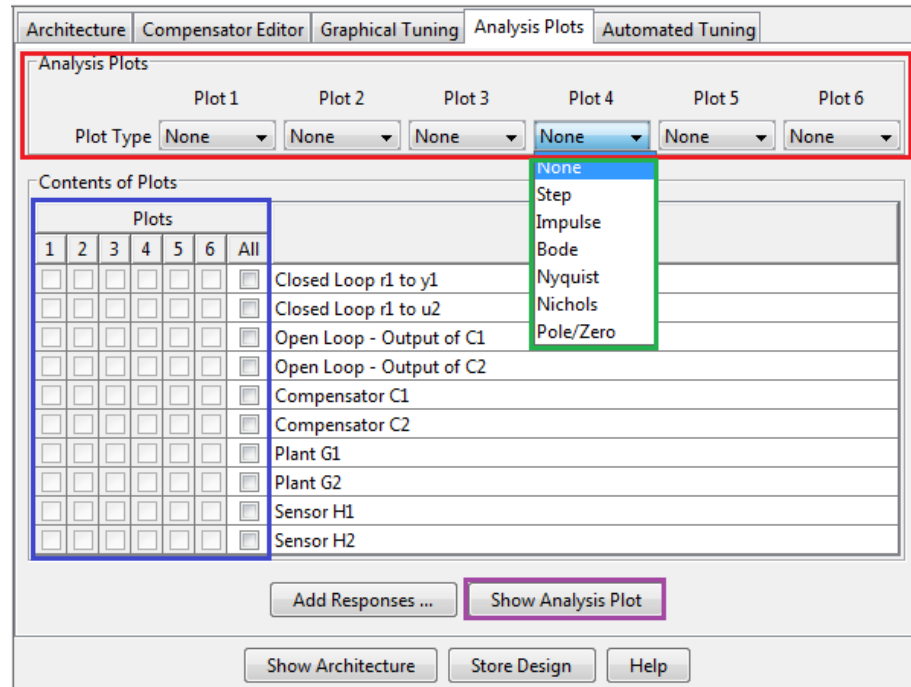


Figura 71. Pestaña Analysis Plots.

- Configure como se muestra en la Figura 72, los diagramas de sintonización siguiendo el esquema de salidas y entradas propio de Sisotool de la figura 65.
- Dé click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 71, se obtienen las curvas de la figura 73, dónde:

ClosedLoop r1 to y1: Corresponde a la respuesta del sistema completo, se debe procurar al sintonizar el sistema que esta gráfica se asemeje a un escalón, minimizando al máximo, las sobre elongaciones, oscilaciones y tiempos de subida y establecimiento. Curva de color azul, Figura 73.

Plant G1: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia de Velocidad del Motor DC. Curva de color verde Figura 73.

Plant G2: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia de Posición del Motor DC. Curva de color rojo. Figura 73.

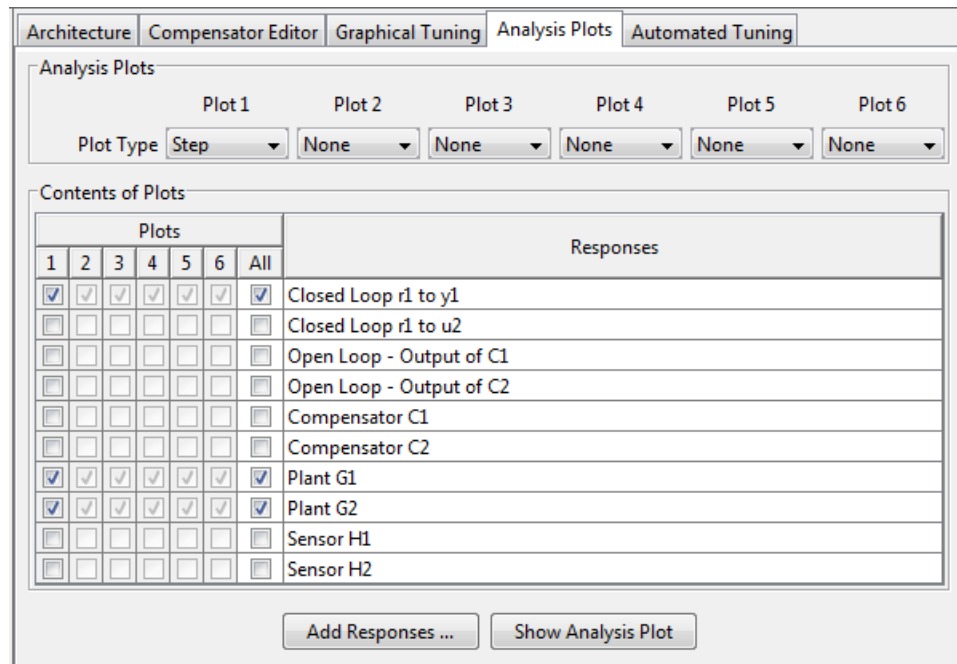


Figura 72. Configuración parámetros pestaña Analysis Plots.

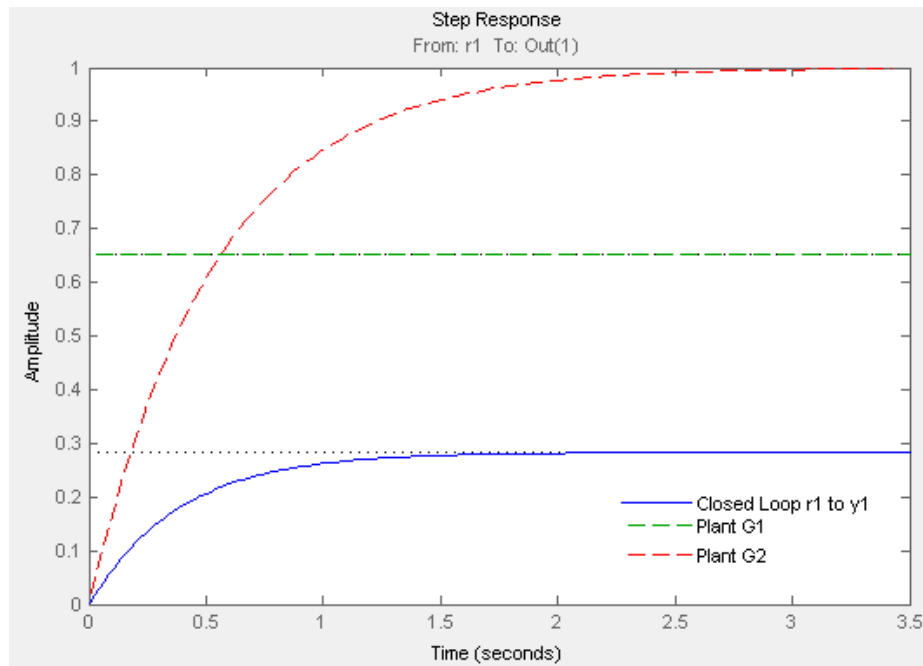


Figura 73. Respuesta de la función de transferencia para la Velocidad y Posición, Respuesta del lazo cerrado con controlador, y compensación del controlador.

- La herramienta permite configurar los parámetros de diseño deseados. Haga click derecho sobre la imagen de la Figura 73.
- En el menú emergente elija *Design Requirements* y luego de click en *New*. Observe la Figura 74.

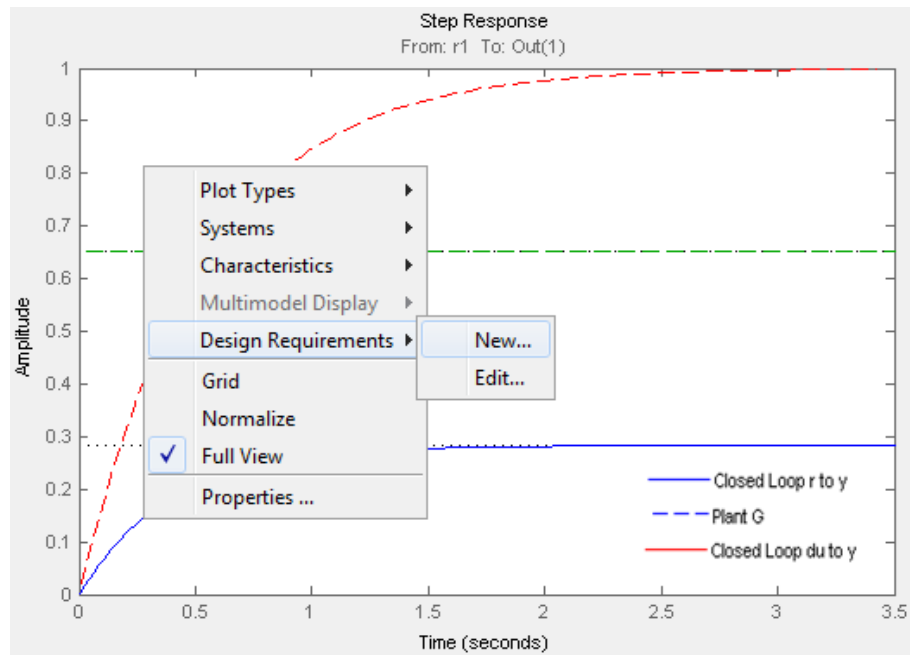


Figura 74. Esquema Agregar Requerimientos de Diseño.

- En la ventana emergente configure los requerimientos de diseño como se muestra en la figura 75 y haga click en *Ok*, estos requerimientos siguen la premisa de crear una respuesta de estado dinámico estable.

Figura 75. Requerimientos de Diseño utilizados.

Estos parámetros obedecen a los requerimientos de sintonización y permiten por medio de la ayuda gráfica facilitar el trabajo de sintonización, así los parámetros establecidos son un tiempo de subida menor a 1 Segundo, un tiempo de establecimiento menor a 2 segundos, y un porcentaje de sobre paso del 3%, así como asegurar una ganancia cercana al 90% del valor final deseado en este caso 1. Esto para minimizar las pérdidas del sistema.

- Una vez se han introducido los requerimientos de diseño y comportamiento deseados, para el sistema, haga click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 71. Se obtiene la Figura 76.

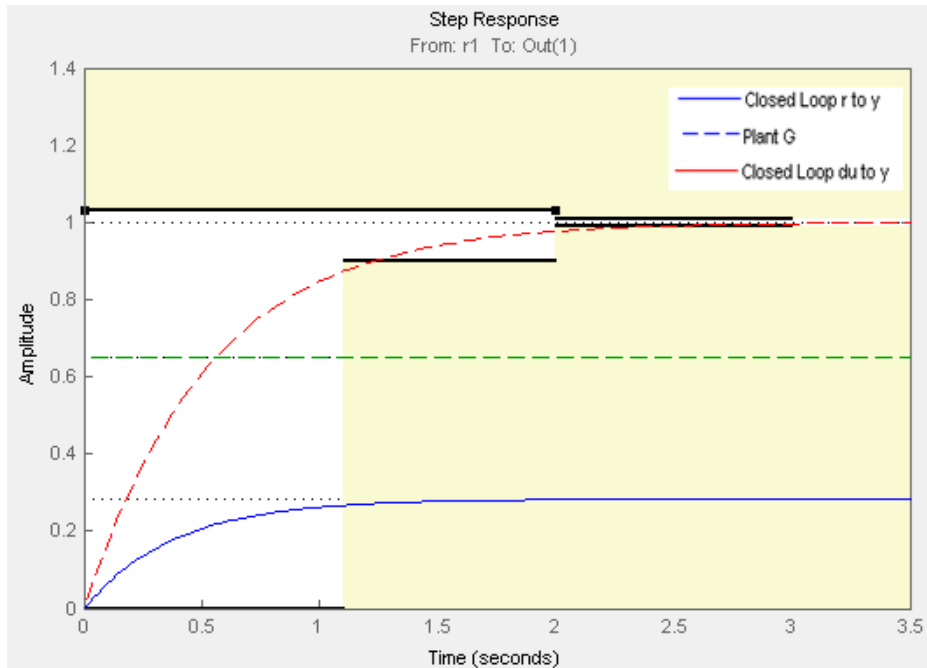


Figura 76. Respuestas del sistema a compensar con los requerimientos de comportamiento del lazo cerrado para Velocidad y Posición.

Observe cómo en la Figura 76, se monitorea, en todo momento el comportamiento del sistema a los cambios que se efectúen sobre los valores del controlador. La sintonización consiste en que la respuesta de la planta con el compensador se comporte de tal forma que la curva de color azul se localice dentro de las zonas blancas. Estas zonas delimitan la curva para que tenga el comportamiento deseado para un sistema controlado de forma exitosa. Esta zona delimita los requerimientos de diseño implementados en la Figura 75. Esta gráfica siempre está disponible durante la sintonización en el grupo de ventanas de Matlab.

Para sintonización Manual hacer lo siguiente:

Para hacer uso de la herramienta de sintonización manual, se pueden llevar a cabo muchos métodos mover las raíces en las curvas y observar en estas la reacción y que se comporten según los requerimientos de diseño.

En la pantalla de *Compensator Editor* agregar polos y ceros que se verán reflejados en la ayuda gráfica, si se tienen valores ya determinados es la forma más exacta y eficaz de añadir los polos y ceros necesarios para lograr el comportamiento deseado del sistema.

- Inicie la sintonización eligiendo en la pestaña, Compensator Editor, sintonizar C2, dando click sobre el menú desplegable de la figura 77, y elija C2 recuadro color verde. Se inicia con el compensador C2 de Velocidad por cuanto es el compensador interno y porque la función de transferencia de Velocidad es más estable.

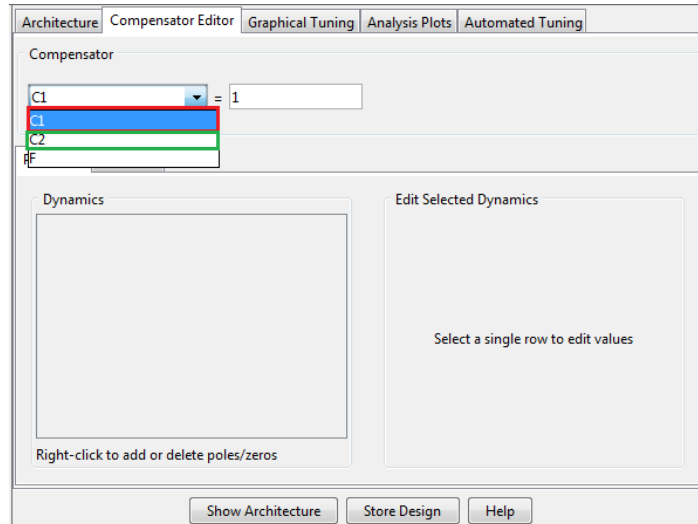


Figura 77. Elección controlador a sintonizar Velocidad o Posición.

- Inserte un integrador en la pestaña *Compensator Editor*, haciendo click derecho sobre el recuadro dynamics de color azul de la Figura 78, escoja *add pole/zero* y luego haga click en *Integrator*.

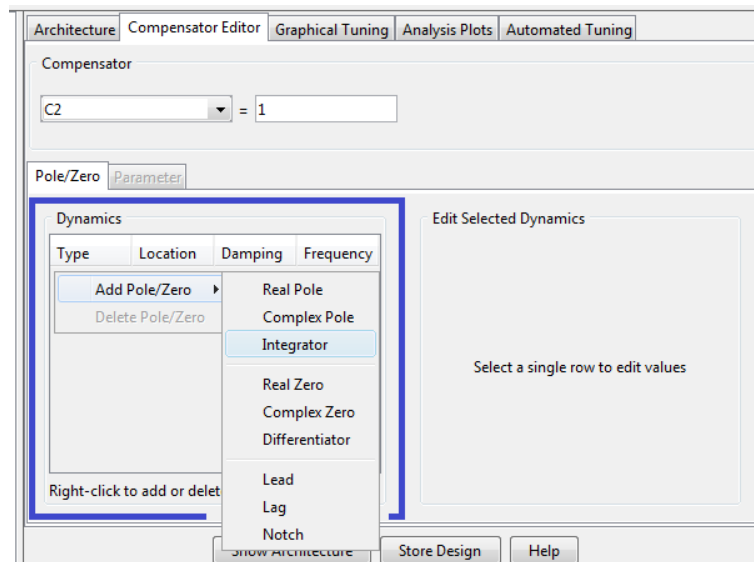


Figura 78. Esquema pestaña Compensator Editor agregar integrador.

- El integrador se ubica en el recuadro azul *dynamics* de la figura 79, y su localización puede cambiarse en el recuadro *Edit Selected dynamics* de color rojo de la figura 79.

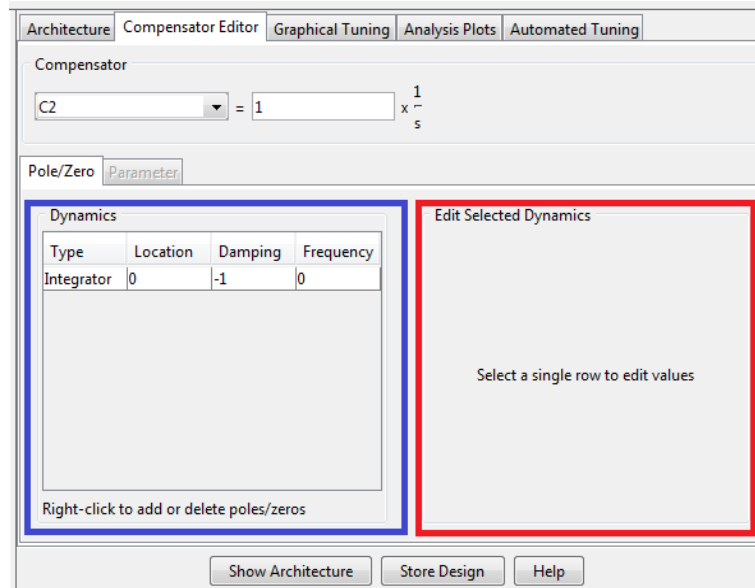


Figura 79. Esquema pestaña Compensator Editor con integrador.

Obteniendo las curvas de la Figura 80, Este integrador eleva la ganancia del sistema llevándolo desde 0.3 hasta 0.4, el sistema mejoro su comportamiento en cuanto a ganancia pero aun no alcanza los tiempos requeridos, se debe ser cuidadoso de no incrementar demasiado la ganancia ya que al ser un sistema hibrido de control es más inestable, los tiempos de establecimiento aún deben mejorarse.

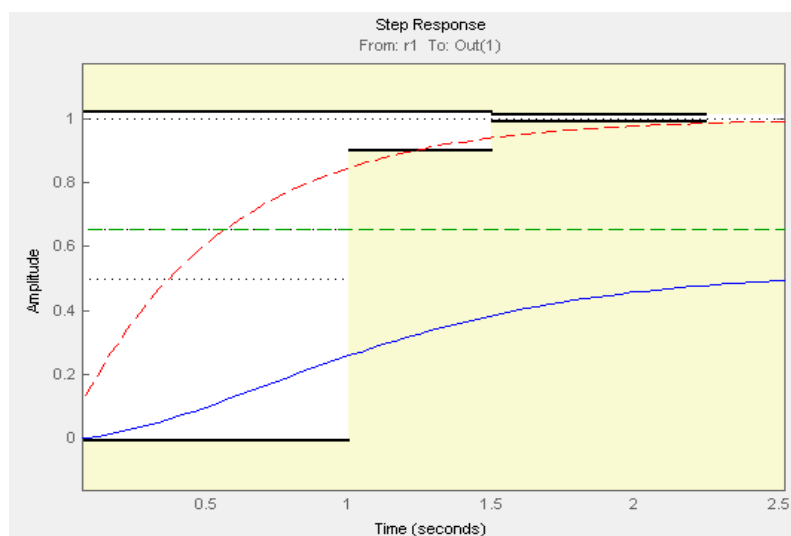


Figura 80. Respuestas al insertar un integrador en la función de transferencia del controlador PID, para la Velocidad y Posición.

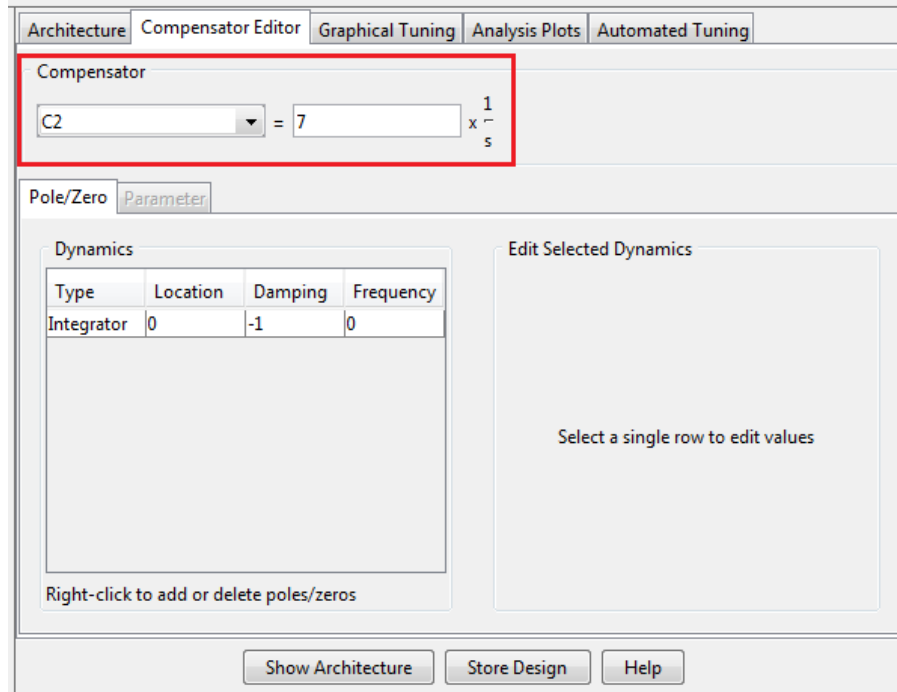


Figura 81. Insertar valores en recuadro Compensator editor.

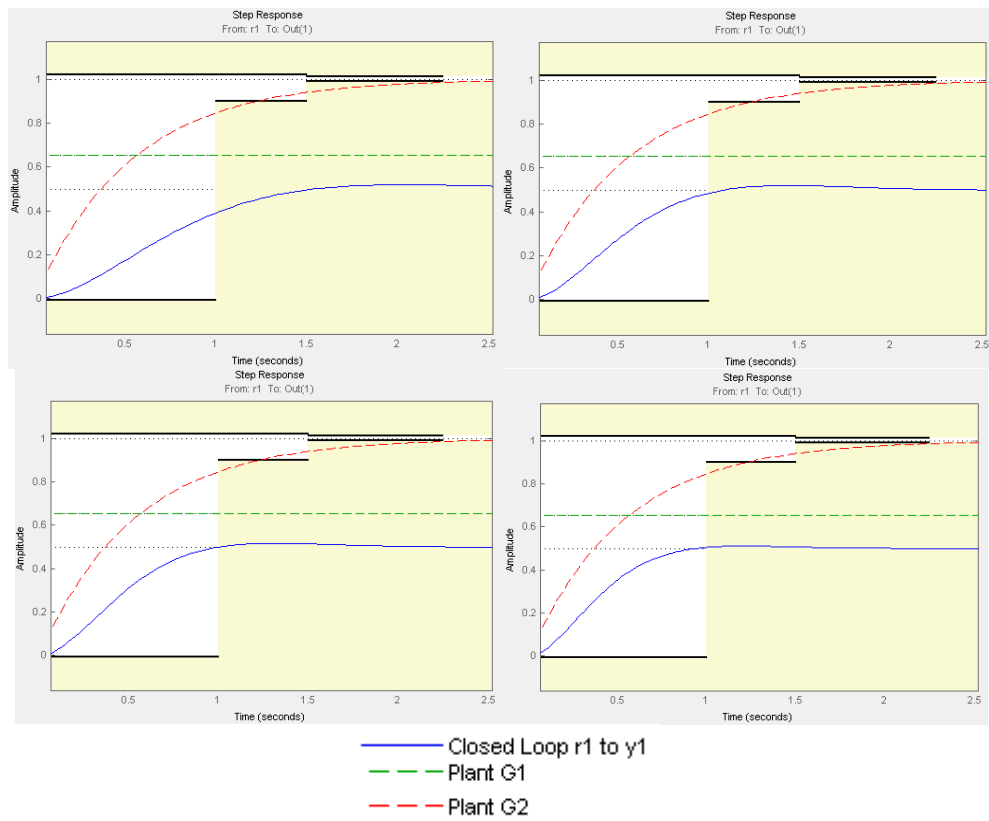


Figura 82. Respuestas al insertar un integrador y aumentar la constante de proporcionalidad en la función de transferencia del controlador PID, para la Posición y Velocidad.

- Inserte en el recuadro *Compensator* de color rojo de la figura 81, uno a uno los posibles valores probándolos hasta encontrar el que proporcione la ganancia adecuada para los requerimientos de diseño. Para el motor ejemplarizado en esta guía se insertaron uno a uno los valores (2, 4, 5, 7) encontrando que el valor adecuado es 7 observe las curvas resultado en la Figura 82.

En este ejemplo observe cómo en la Figura 82, al insertar un valor de ganancia proporcional el sistema mejoró sus tiempos de subida y establecimiento así como mejoró su estabilidad y se mantiene en valores estables pero no alcanza la ganancia de los requerimientos. Se debe ser cuidadoso de mantener un margen de ganancia más bajo por cuanto los sistemas híbridos en cascada son de naturaleza multiplicativa con las constantes de control.

- Inserte un Cero Real en el sistema haciendo click derecho sobre recuadro *Dynamics* de color azul de la Figura 83, escoger Add-Pole/Zero y luego en Real Zero.

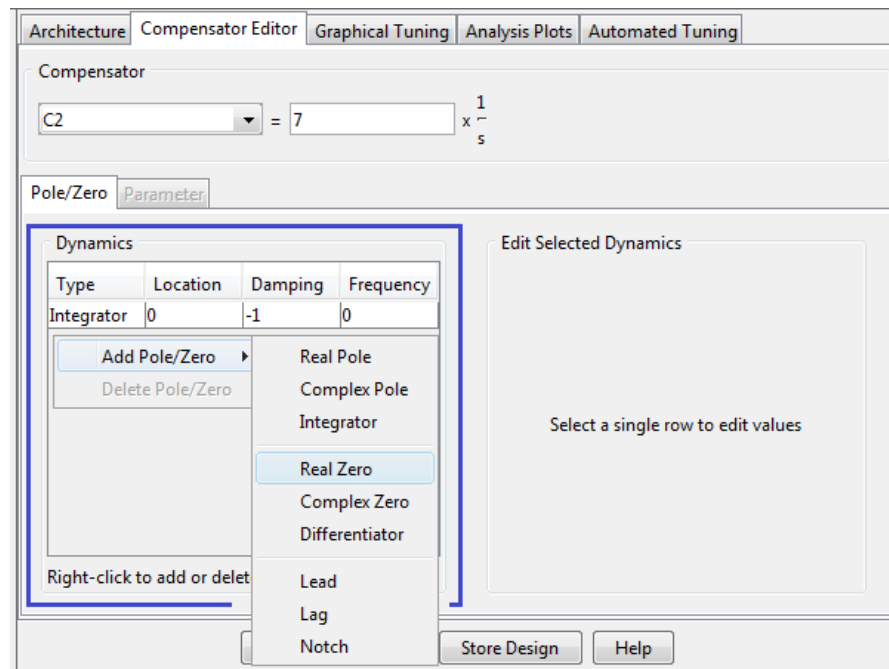


Figura 83. Inserción cero real Posición y Velocidad.

- Modifique su localización haciendo click sobre él y pruebe uno a uno valores cercanos al origen hasta encontrar el adecuado. Esto en el recuadro agréguelos en la casilla *location* de color rojo de la Figura 84. para el motor ejemplarizado es 0.5 este valor cercano al origen del cero real

otorga ganancia al sistema y estabilidad. Al hacer pruebas se puede determinar que en muchos casos una vez obtenido un valor efectivo de sintonización, se pueden probar sus múltiplos para afinar la sintonización, obteniendo los resultados del recuadro de color azul de la figura 84 y las curvas resultado de la figura 85, finalizando así el proceso de sintonización en Sisotool.

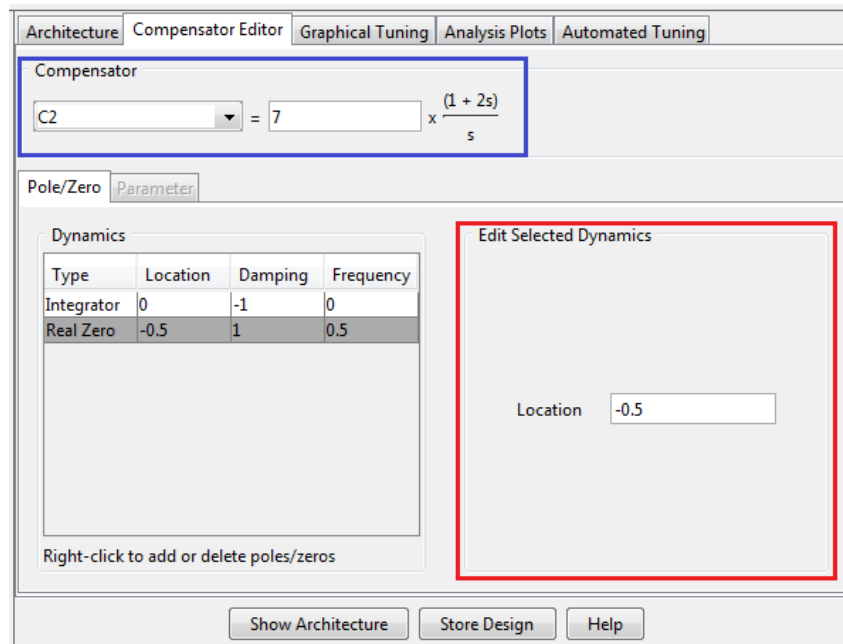


Figura 84. Modificación Posición cero real Velocidad y Posición y resultado sintonización.

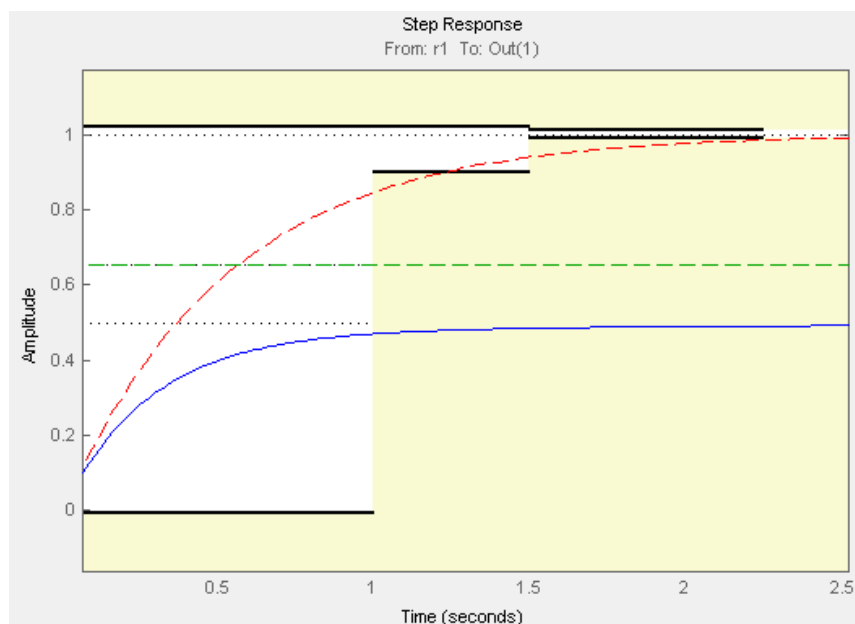


Figura 85. Curva resultado Sintonización insertar cero real C2.

En la curva resultado de la Figura 85. Se observa una mejoría en la ganancia del sistema así como en los tiempos de estabilización y subida. El sistema es estable aunque tiene problemas con la ganancia.

- Elija en la pestaña, Compensator Editor, sintonizar C1, dando click sobre el menú desplegable de la figura 77 y elija C1 recuadro color rojo.
- Inserte un integrador en la pestaña *Compensator Editor*, haciendo click derecho sobre el recuadro dynamics de color azul de la Figura 86, escoja *add pole/zero* y luego haga click en *Integrator*.

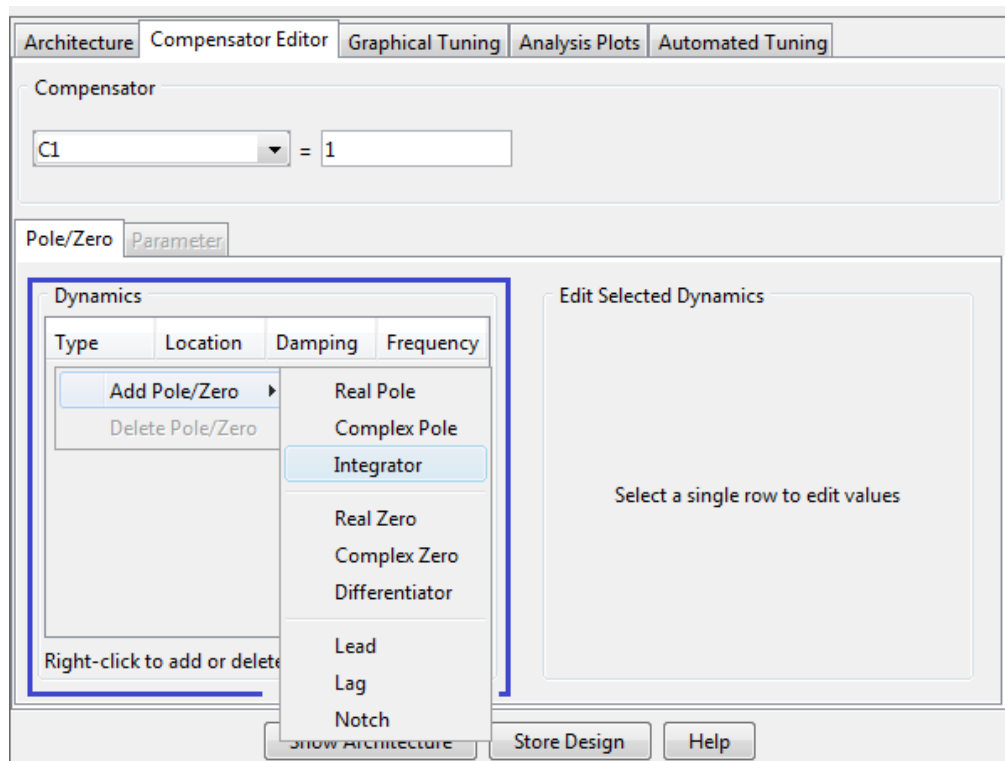


Figura 86. Esquema pestaña Compensator Editor agregar integrador.

- El integrador se ubica en el recuadro azul *dynamics* de la figura 87, y su localización puede cambiarse en el recuadro *edit dynamics* de color rojo de la figura 87.

Obteniendo las curvas de la Figura 88. Este integrador eleva la ganancia del sistema y mejora considerablemente los tiempos de reacción del sistema sin ser los óptimos.

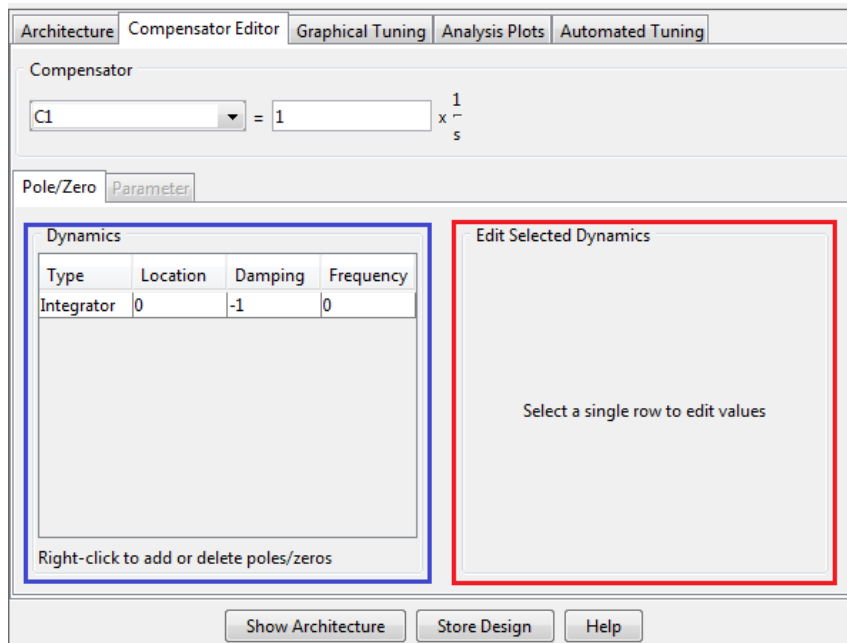


Figura 87. Esquema pestaña Compensator Editor con integrador.

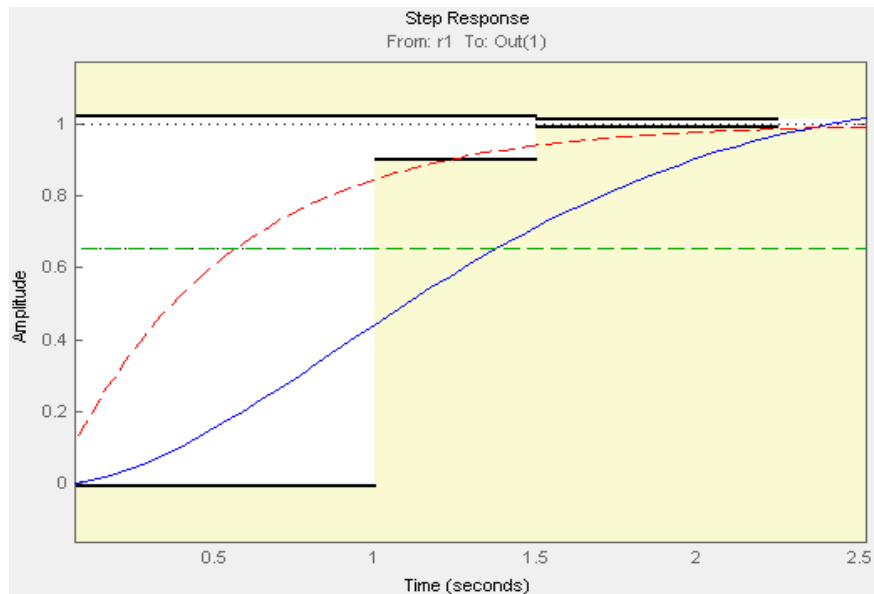


Figura 88. Respuestas al insertar un integrador en la función de transferencia del controlador PID, para la Velocidad y Posición.

- Inserte un Cero Real en el sistema haciendo click derecho sobre recuadro *Dynamics* de color azul de la Figura 89, escoger Add-Pole/Zero y luego en Real Zero.

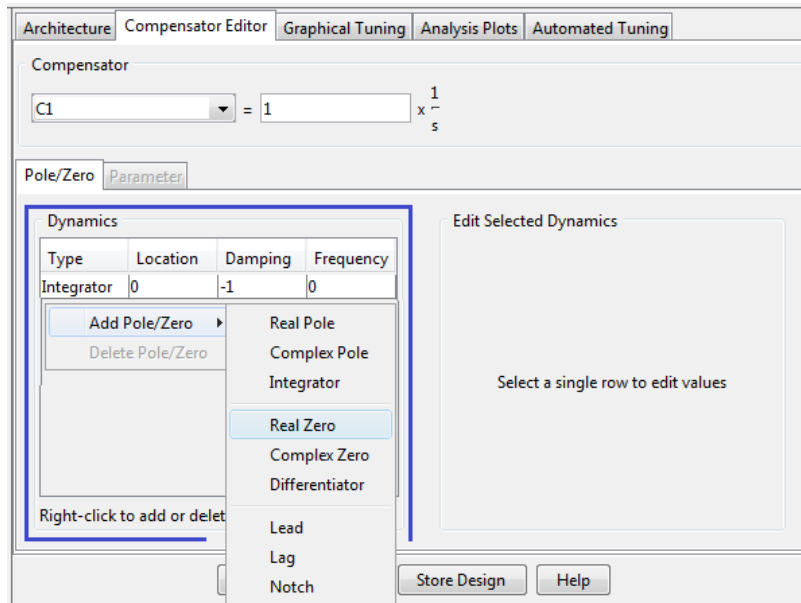


Figura 89. Inserción cero real Posición y Velocidad.

- Modifique su localización haciendo click sobre él, probando uno a uno los posibles valores en el recuadro *location* de color rojo de la Figura 90. Se intenta acercar lo más posible el cero al origen para mejorar los tiempos de respuesta del sistema y mejorar su ganancia, para el motor ejemplarizado este valor es de 0.005.

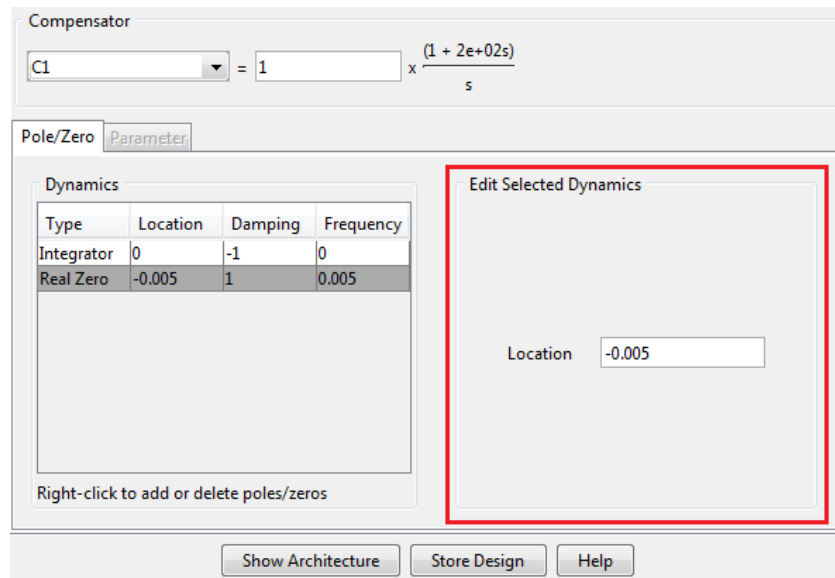


Figura 90. Modificación Posición cero real Velocidad y Posición y resultado sintonización.

Se obtiene la curva de la figura 91, donde se puede observar que el insertar un cero real muy cercano al origen mejora significativamente los tiempos, de respuesta y ganancia del sistema.

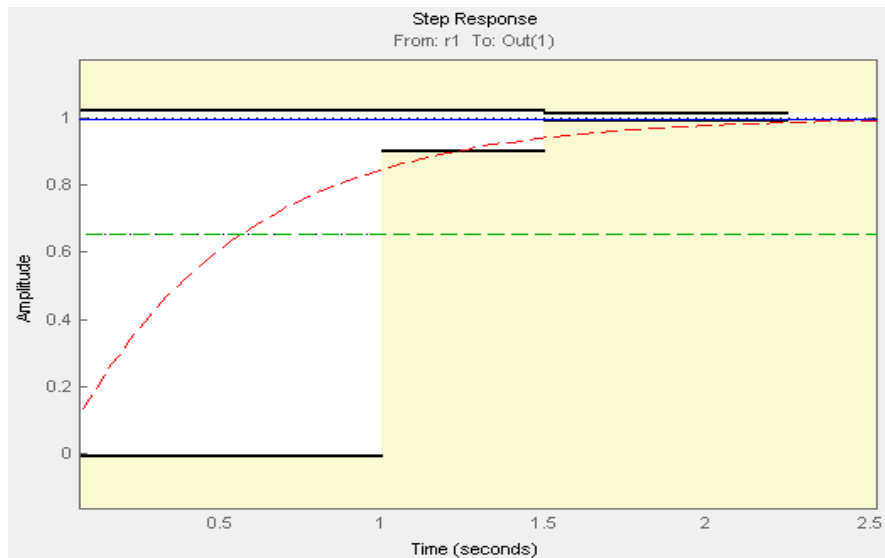


Figura 91. Respuestas al insertar un cero real en la función de transferencia del controlador PID, para la Posición y Velocidad.

- Inserte en el recuadro *Compensator* de color rojo de la figura 92, uno a uno los posibles valores probando hasta encontrar el que proporcione la ganancia adecuada para los requerimientos de diseño. Para el motor ejemplarizado en esta guía se insertaron uno a uno los valores (15, 5, 1.5 y 0.015) encontrando que el valor adecuado es 0.015 obteniendo el resultado final en el recuadro azul de la figura 92, y las curvas resultado de la Figura 93.

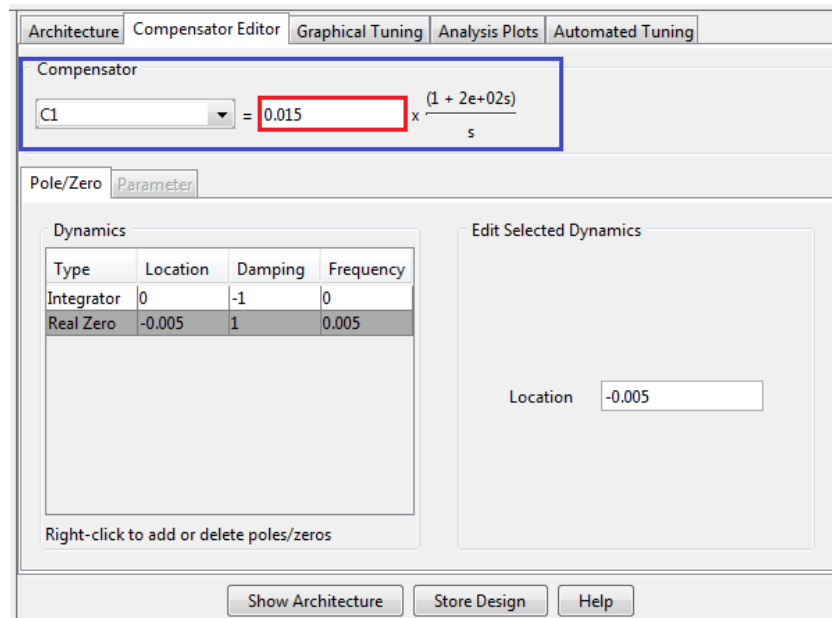


Figura 92. Insertar valores en recuadro Compensator editor.

En este ejemplo observe cómo en la Figura 93, al insertar un valor de ganancia proporcional el sistema mejoró su tiempo de subida considerablemente, se mejoró el comportamiento y estabilidad general, así como los tiempos de reacción. Al hacer pruebas se puede determinar que en muchos casos una vez obtenido un valor efectivo de sintonización, se pueden probar sus múltiplos para afinar la sintonización. Obteniendo los resultados del recuadro de color azul de la Figura 92 y las curvas resultado de la Figura 93, finalizando así el proceso de sintonización del controlador híbrido en cascada de Sisotool.

- Guarde el modelo de sintonización haciendo Click sobre el dibujo del disquete del recuadro verde de la figura 94, se despliega una ventana, en ella escoja la opción SISO Design Task y de click en OK.

Se abrirá como contenedor la Carpeta ControlPID, nombre al archivo *PosicionyVelocidadsisotool* y guarde.

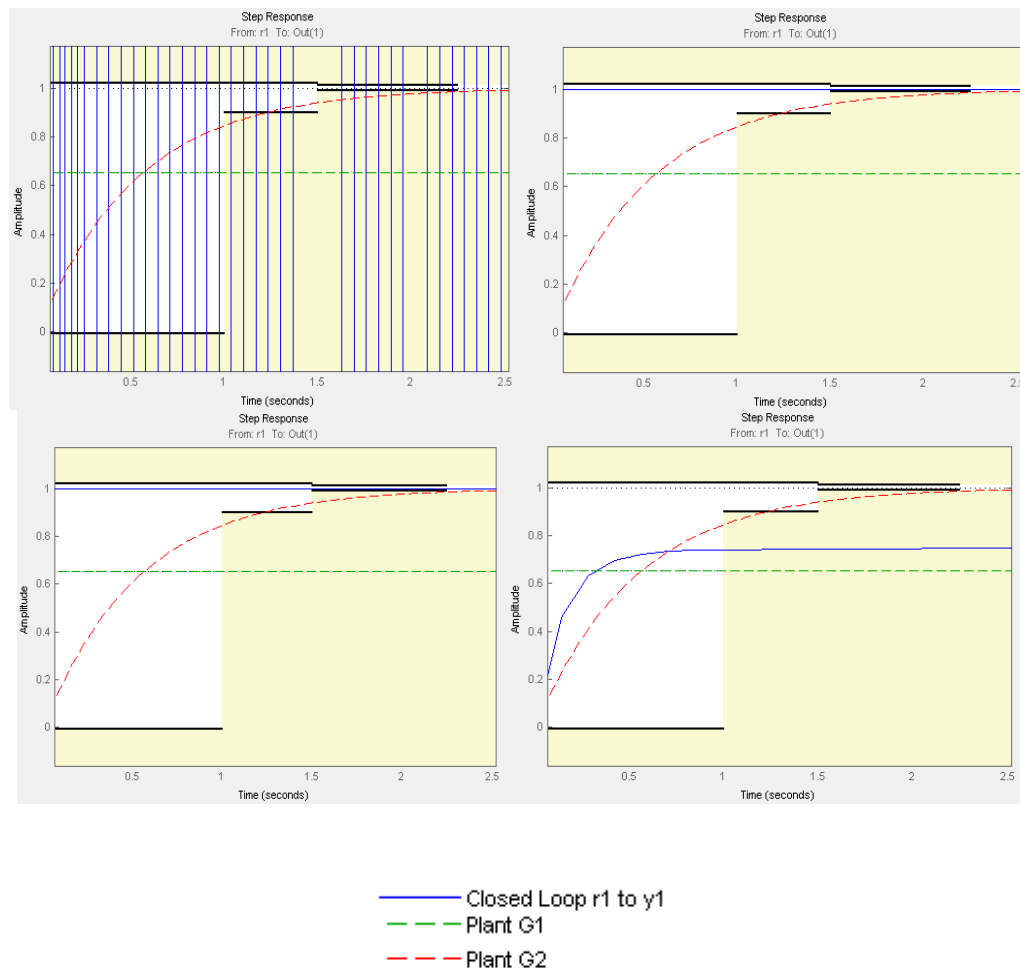


Figura 93. Resultado Sintonización para la función de transferencia del controlador PID, para la Posición y Velocidad.

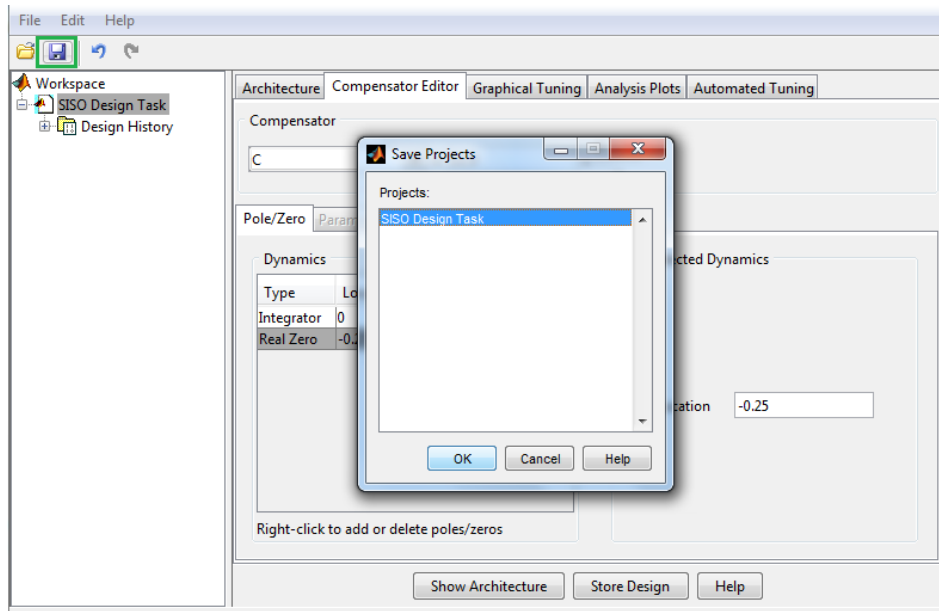


Figura 94. Esquema guardado archivos Sisotool.

5.1.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.

- La herramienta Sisotool entrega como resultado de sintonización las expresiones:

$$c1 = \frac{0.015 * (1 + 200s)}{s} \quad (20)$$

$$c2 = \frac{7 * (1 + 2s)}{s} \quad (21)$$

Las cuales deben ser igualadas a la función de transferencia que se determinó en la ecuación (5)

- Igualar las ecuaciones (5) y (20) para encontrar C1.

Para C1, se tiene que:

$$\frac{0.015 * (1 + 200s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{s} + KdS$$

$$(0.015 * (1 + 200s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$

$$0.015 + 3s = KpS + Ki + KdS^2$$

$$Kp = 3$$

$$Ki = 0.015$$

$$Kd = 0$$

- Igualar las ecuaciones (5) y (21) para encontrar C2, se tiene que:

$$\frac{7 * (1 + 2s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{s} + KdS$$

$$(7 * (1 + 2s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$

$$7 + 14s = KpS + Ki + KdS^2$$

$$Kpv = 14$$

$$Kiv = 7$$

$$Kdv = 0$$

6. Método De Sintonización Automático De Sisotool.

- En la pantalla principal de Matlab, haga click en *file*, después en *new script* como en la Figura 95. Se abrirá la pantalla *Editor*.

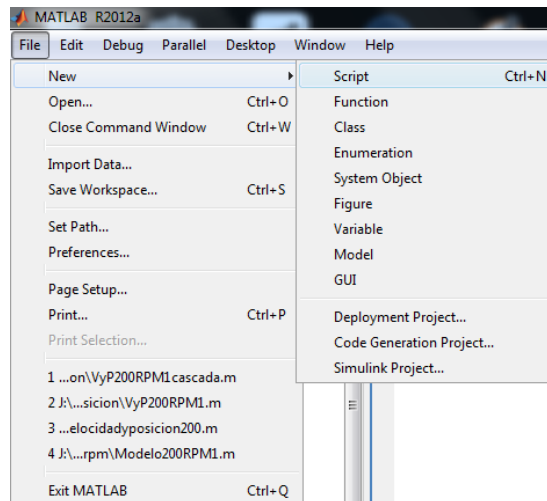


Figura 95. Procedimiento creación nuevo Script.

- Ingrese los parámetros del modelo interno del motor a controlar tal como se muestra en la Figura 96, recuadro Azul. (En el script se cargaron los parámetros del motor que se ejemplariza en esta guía)

- Se deben cargar las funciones de transferencia de la expresión (4) Posición y (5) Velocidad. Con la función *tf* de Matlab, transfer funtion tal como se ve en la parte final de la Figura 96.

```

1
2 %Limpiar el workspace de Matlab.
3 clear all;
4 %Seleccionar el formato numerico de los datos.
5 format long;
6 % Parámetros del motor en SI
7 Ra = 21.7; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
8 La =4.981; % uH --> La = Inductancia de Armadura.
9 Jt = 1.5159; % g*cm^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor
10 B = 4.942e-4; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
11 Ke = 0.5130; % mV*s/rad --> Ke = Constante electromotriz
12 Kt = 0.5130; % mN*m/A --> Kt = Constante de Torque.
13 % Parámetros del motor en SI
14 Ra = Ra; % Ohm --> Ra = Resistencia de Armadura.
15 La = La * 10^(-3); % uH --> La = Inductancia de Armadura.
16 Jt = Jt * 10^(-5); % kg*m^2 --> Jt = Momento de inercia del rotor
17 B = B; % N*m*rad/s --> B = Constante de Friccion de Coulomb.
18 Ke = Ke * 10^(-0); % V*s/rad --> Ke = Constante Electromotriz.
19 Kt = Kt * 10^(-0); % N*m/A --> Kt = Constante de Torque.
20
21 % Función de transferencia Posicion del motor en lazo cerrado
22 nump = Kt;
23 denp = [Jt*La (Jt*Ra + B*La) (B*Ra + Ke*Kt) Kt];
24 Gp = tf (nump,denp);
25 format long;
26
27 % Función de transferencia Velocidad del motor en lazo cerrado
28 numv = [Kt];
29 denv = [Jt*La (Jt*Ra + B*La) (B*Ra + Ke*Kt+Kt)];
30 Gv = tf (numv,denv);
31

```

Figura 96. Código en Matlab para la caracterización del sistema Motor DC, con funciones de transferencia de Velocidad y Posición.

- Dar click sobre el ícono de play recuadro verde Figura 96, para compilar y guardar. Se genera una ventana para guardar tal como se ve en la Figura 97, nombre al archivo *AutoVelocidadyPosicion.m* y guárdelo en la carpeta *ControladorPID*.

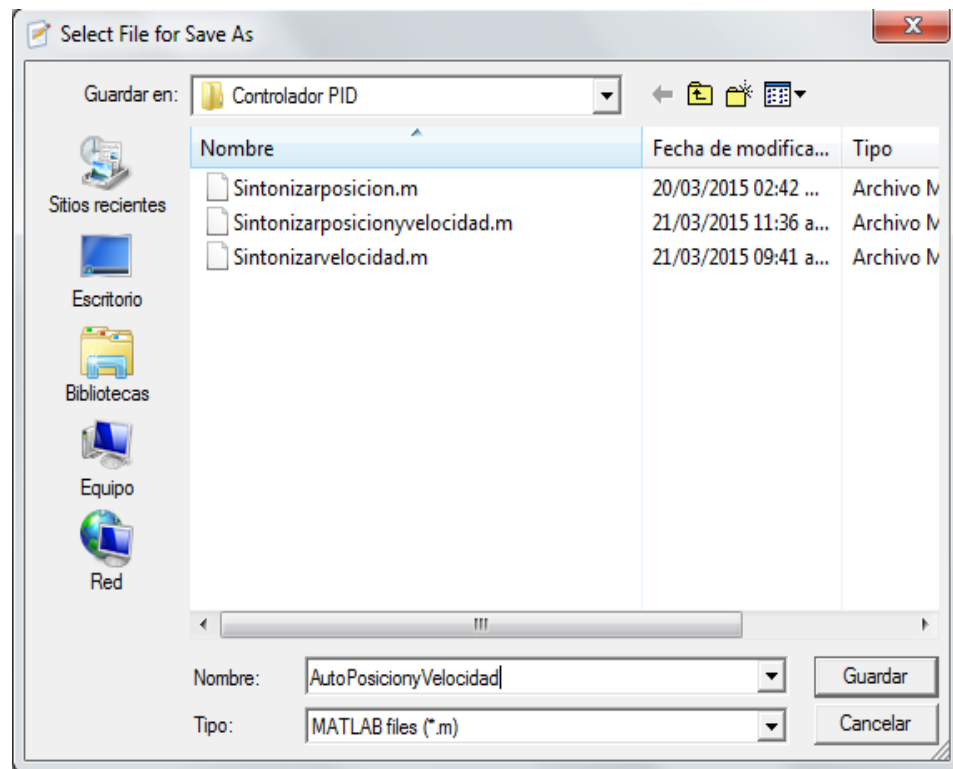


Figura 97. Guardar script para sintonización Posición y Velocidad en cascada.

- Abra la herramienta Sisotool escribiendo en la pantalla *Command Window* de Matlab la palabra *sisotool* y oprima enter tal como se ve en la Figura 98.

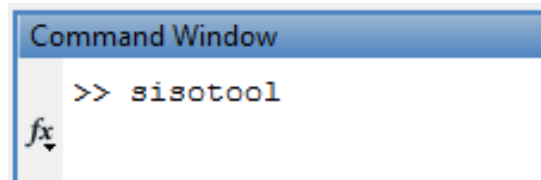


Figura 98. Inicialización Herramienta de Sintonización Sisotool.

- Se abrirá la pantalla principal de la herramienta, escoja la arquitectura para el controlador PID de Posición y Velocidad haciendo click en la opción *Control Architecture* recuadro azul Figura 90, se abrirá la pantalla para escoger el tipo de arquitectura.
- Elija la opción 4 haciendo click sobre ella esta se encuentra dentro del recuadro verde de la Figura 100.
- La casilla que se encuentra dentro del cuadro rojo corresponde con el tipo de realimentación del sistema que puede ser tanto negativa (-1), como positiva (1). Para este caso deje esta opción en -1. Para finalizar click en OK como se ve en la Figura 100.

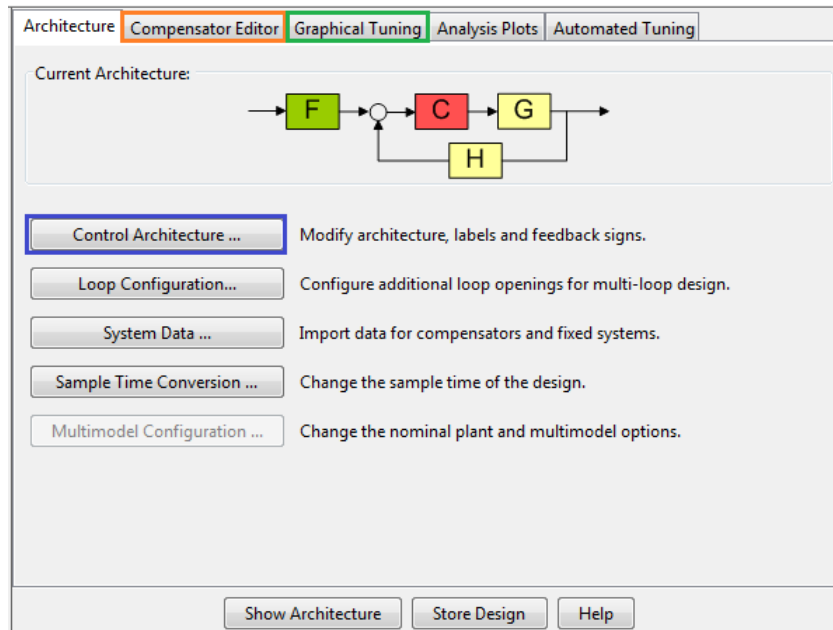


Figura 99. Opción arquitectura de control.

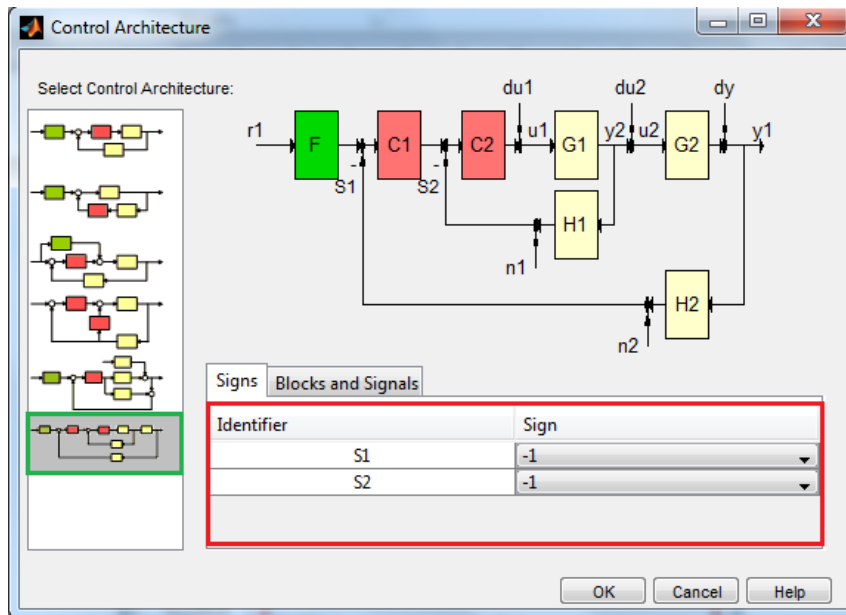


Figura 100. Arquitectura en lazo cerrado para controlador PID de Velocidad y planta en sisotool.

- Configure los bloques del controlador en la pantalla principal de sisotool haciendo click en *System Data* recuadro azul de la Figura 101, se abrirá la ventana de carga de funciones.
- En la ventana *System Data* configure todos los valores excepto G1 recuadro verde y G2 recuadro Rojo de la Figura 101, en 1 que es el valor por defecto.

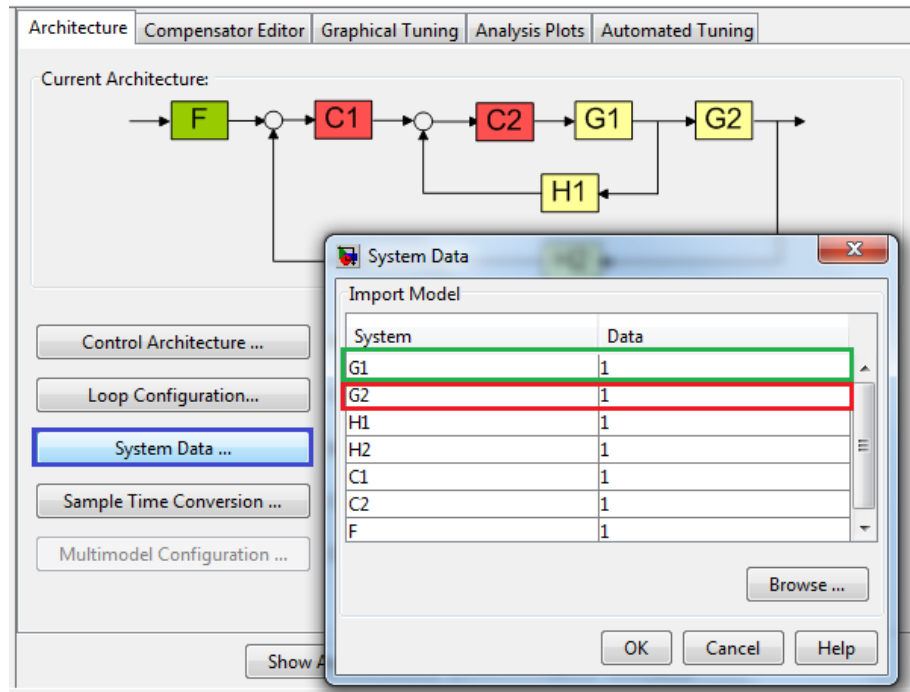


Figura 101. Esquema pestaña Architecture.

- Para modificar el bloque G1 (Bloque función de transferencia Velocidad), escoger G1 en el recuadro verde Figura 101, dé click en Browse como se muestra en la Figura 101. Se abrirá una nueva ventana.
- En la ventana *Model Import* escoger la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G1 recuadro verde Figura 102, que se genera al compilar el archivo *AutoPosicionyVelocidad.m* escoja Gv, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana *System Data* y ciérrela.

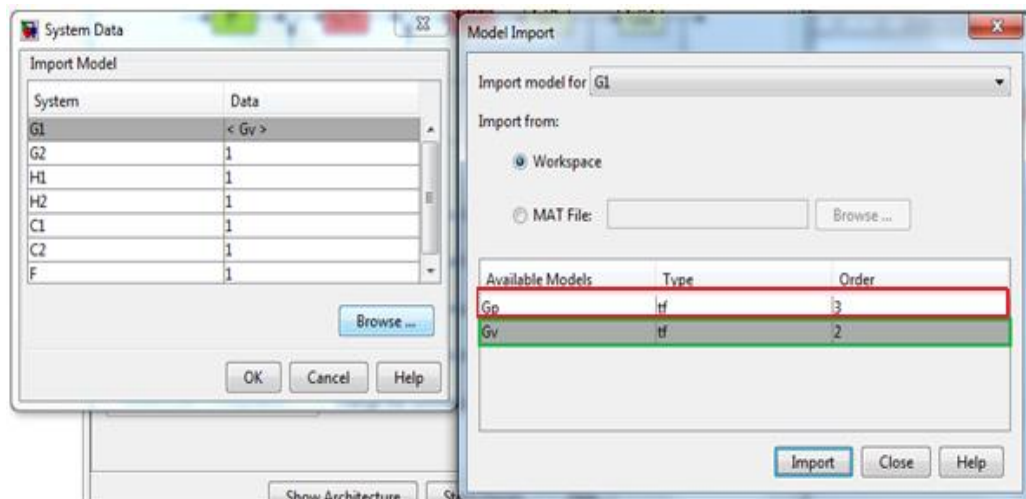


Figura 102. Esquema para importar función de transferencia Posición al bloque G2.

- Para modificar el bloque G2 (Bloque función de transferencia Posición), escoger G2 en el recuadro rojo Figura 101, dé click en Browse. Como se muestra en la Figura 101, se abrirá una nueva ventana.
- En la ventana *Model Import* escoger la opción *Workspace*, donde se encuentra la función G2 recuadro rojo en la Figura 102, que se genera al compilar el archivo *AutoPosicionyVelocidad.m* escoja Gp, de click en importar y luego en cerrar, así se cerrara la ventana *Model Import*.
- Haga click en ok en la ventana System Data y ciérrela.
- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *compesator Editor* recuadro naranja Figura 99, es el lugar donde numéricamente se procede a cambiar el valor de la constante de proporcionalidad recuadro rojo de la figura 103.
- En este caso se puede escoger entre sintonizar el compensador C2 (compensador de Velocidad) o el compensador C1 (compensador de Posición) cuadro azul Figura 103,
- El lugar de las raíces se cambia y se agregan polos y ceros en la casilla Dynamics dentro del recuadro verde en la Figura 103. para crear integradores, diferenciadores, lag, ceros complejos etc.

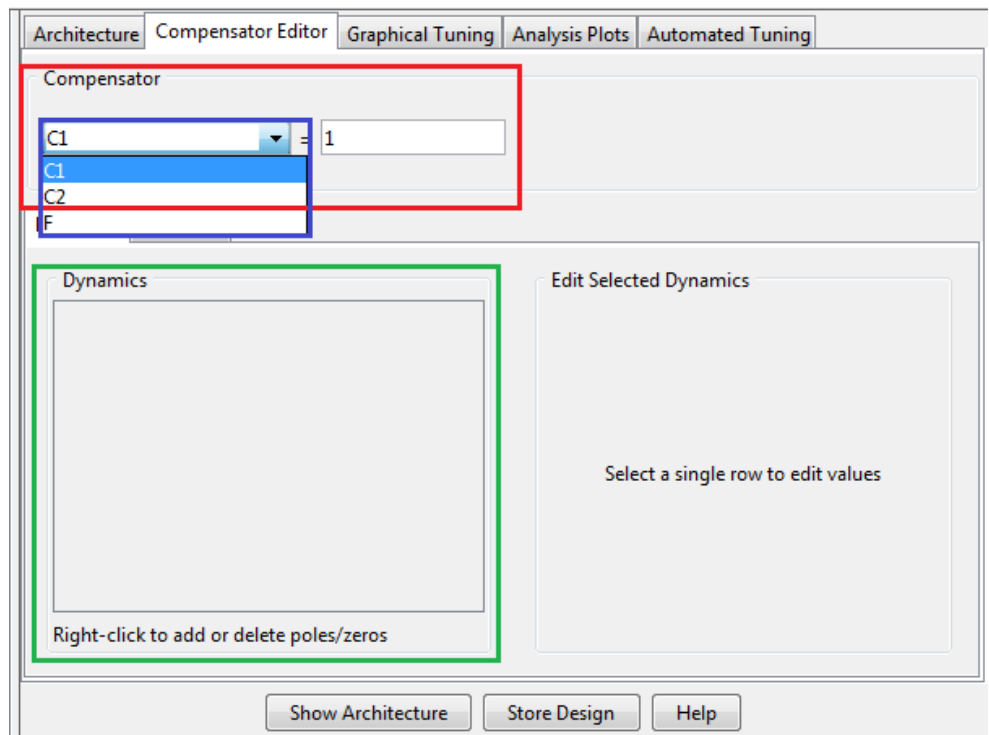


Figura 103. Esquema pestaña Compensator Editor.

Al ser una herramienta de sintonización con ayuda gráfica se deben configurar las pantallas de ayuda gráfica:

- En la pantalla principal de Sisotool de click en la pestaña *Graphical Tuning* recuadro verde Figura 99.
En la pantalla desplegada por la pestaña *Graphical Tuning* se tiene la posibilidad de observar 6 gráficas recuadro rojo Figura 104, las cuales a su vez pueden representar los lazos abiertos desde la entrada hasta la salida de los dos bloques C1 y C2 de forma independiente recuadro azul Figura 104. En el recuadro verde se puede escoger entre 3 tipos de gráficas, Root Locus: que gráfica El lugar de las raíces, los diagramas de bode: para el lazo cerrado, abierto y Nichols.
- Configure la pestaña *Graphical Tuning* igual que en la figura 104:

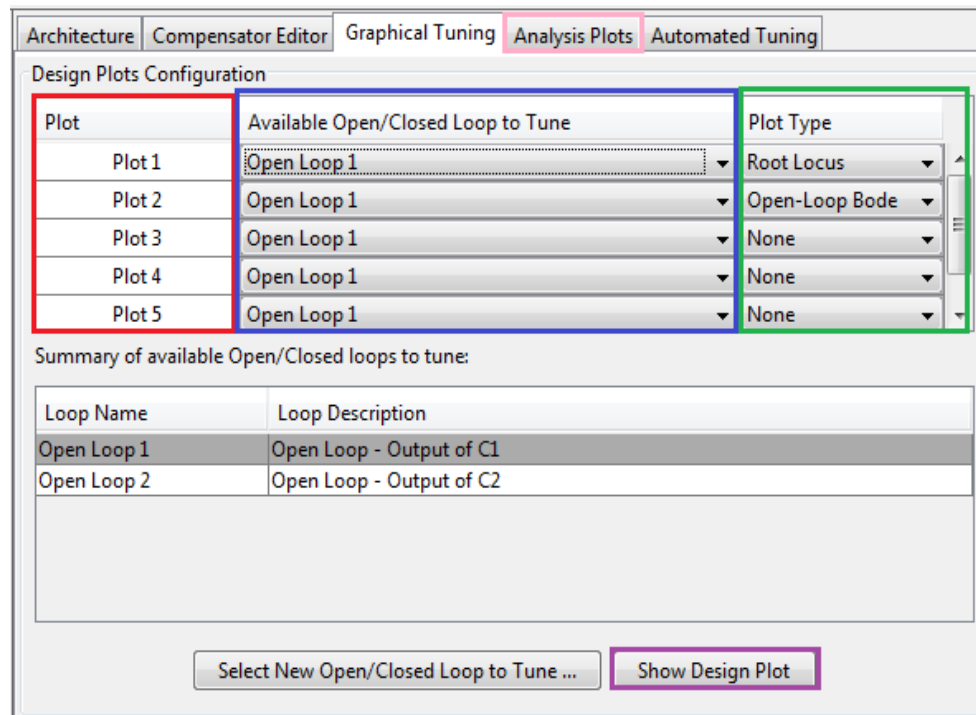


Figura 104. Esquema pestaña Graphical Tuning.

- Para observar la gráfica se debe dar click en la opción *Show Design Plot* recuadro morado Figura 104, y se despliega la ventana *SISO design* de la Figura 105.
- En la pantalla de la Figura 105, en el recuadro rojo, se pueden cambiar el lugar de las raíces dando click sobre los pequeños cuadros de color rosa y deslizándolos a diferentes posiciones. Al hacer esto se puede observar cómo cambian las otras gráficas facilitando así la sintonización. Lo que se busca en esta ayuda gráfica es suavizar las curvas de respuesta de frecuencia y evitar elevaciones en su curva.

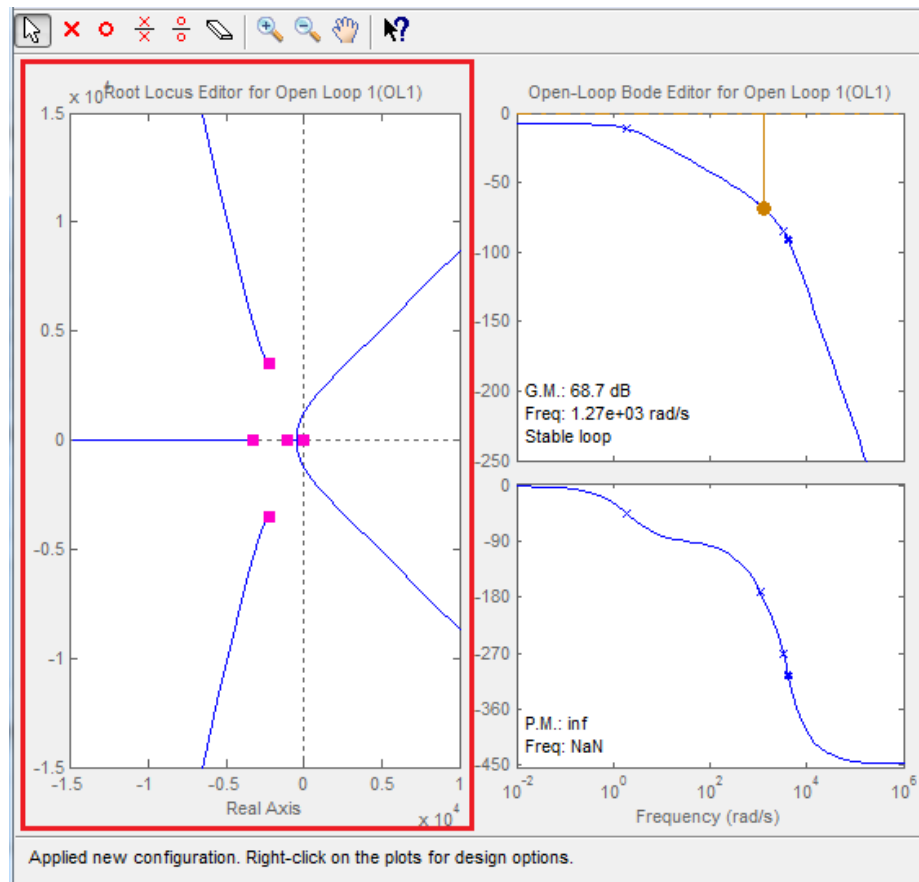


Figura 105. Sintonización Gráfica sisotool, lugar de las raíces.

Existe otra pantalla en Sisotool donde se pueden observar los cambios que se generan al cambiar parámetros en la pestaña *Compensator Editor*. Es en esta pantalla donde se centrará la sintonización implementada en esta guía por cuanto se puede observar de manera clara la respuesta del sistema a los cambios en el controlador. A esta ayuda gráfica se accede de la siguiente forma:

- Dé Click en la pestaña Analysis Plots, recuadro rosa Figura 104. Se desplegará la pantalla Analysis Plots de la Figura 106. En el recuadro rojo de la Figura 106, se tienen hasta 6 tipos de diagramas para usar, en el recuadro verde de la Figura 106. Se puede observar cuáles son:
 Step: Respuesta del sistema al escalón (esta gráfica es la ayuda gráfica a usar en esta guía por cuanto representa la información más útil y sencilla de interpretar), Impulse: respuesta del sistema al impulso, Bode: diagramas de Bode del sistema, Nyquist: diagramas de Nyquist del sistema, Nichols y Polos y ceros.
 En el recuadro azul de la Figura 106, se habilitan los diferentes tipos de diagramas del 1 al 6, y ver su efecto sobre los bloques del sistema y combinaciones de lazos cerrados entre bloques.

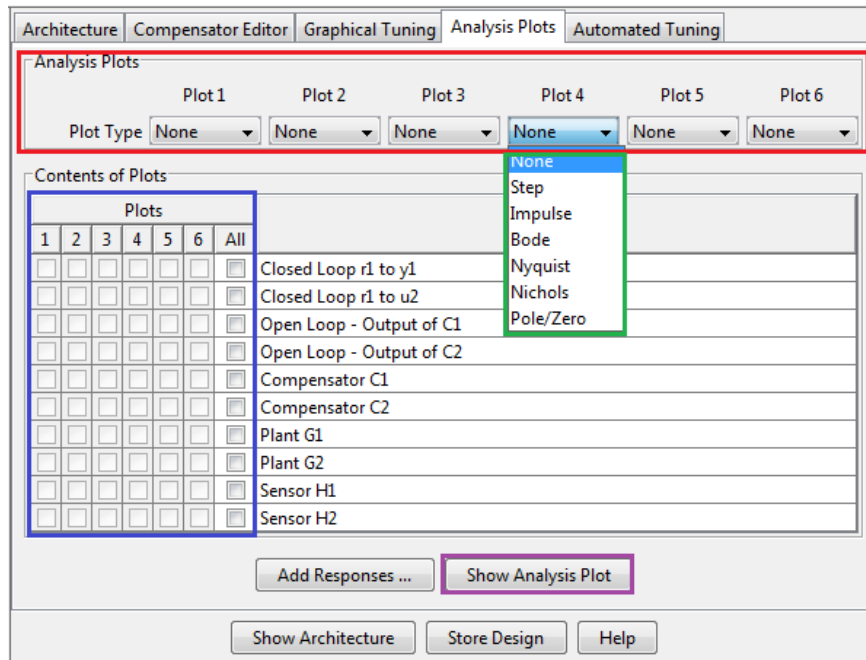


Figura 106. Pestaña Analysis Plots.

- Configure como se muestra en la Figura 107, los diagramas de sintonización siguiendo el esquema de salidas y entradas propio de Sisotool de la Figura 100.

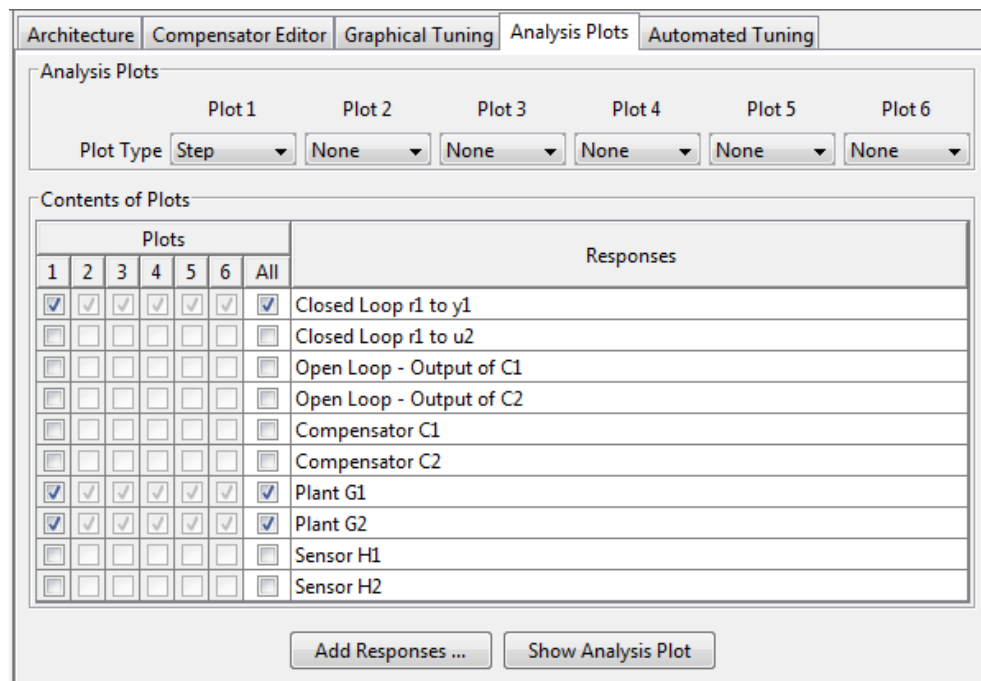


Figura 107. Configuración parámetros pestaña Analysis Plots.

- Dé click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 106, se obtienen las curvas de la Figura 108 dónde:

ClosedLoop r1 to y1: Corresponde a la respuesta del sistema completo, se debe procurar al sintonizar el sistema que esta gráfica se asemeje a un escalón, minimizando al máximo, las sobre elongaciones, oscilaciones y tiempos de subida y establecimiento, curva de color azul, Figura 108.

Plant G1: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia de Velocidad del Motor DC. Curva de color verde Figura 108.

Plant G2: Corresponde con la respuesta de la planta o en este caso la respuesta del modelo de la función de transferencia de Posición y la función de transferencia de Velocidad en cascada del Motor DC. Curva de color rojo. Figura 108.

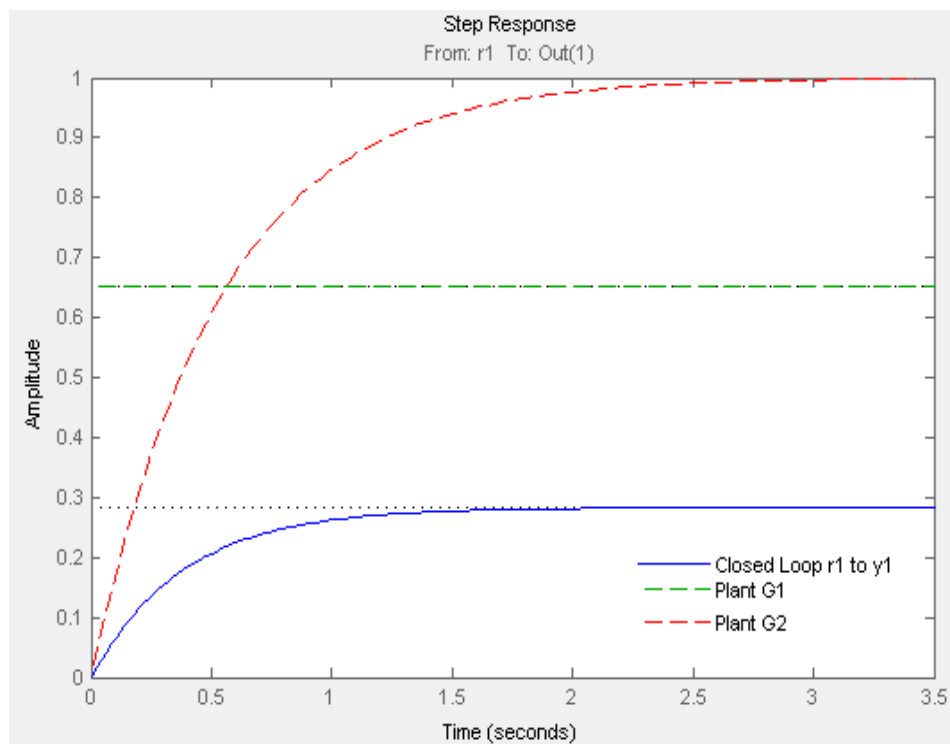


Figura 108. Respuesta de la función de transferencia para la Velocidad y Posición, Respuesta del lazo cerrado con controlador, y compensación del controlador.

- La herramienta permite configurar los parámetros de diseño deseados. Haga click derecho sobre la imagen de la Figura 109.
- En el menú emergente elija *Design Requirements* y luego de click en *New*, observe la Figura 109.

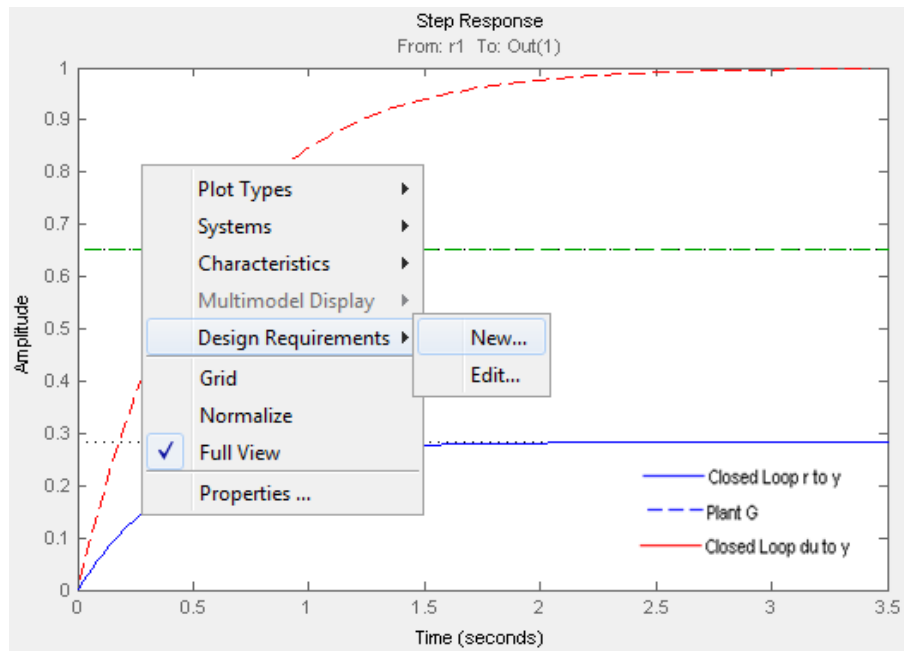


Figura 109. Esquema Agregar Requerimientos de Diseño.

- En la ventana emergente configure los requerimientos de diseño como se muestra en la Figura 110 y haga click en *Ok*. Estos requerimientos siguen la premisa de crear una respuesta de estado dinámico estable.

Figura 110. Requerimientos de Diseño utilizados.

Estos parámetros obedecen a los requerimientos de sintonización y permiten por medio de la ayuda gráfica facilitar el trabajo de sintonización, así los parámetros establecidos son un tiempo de subida menor a 1 Segundo, un tiempo de establecimiento menor a 2 segundos, y un porcentaje de sobre paso del 3%, así como asegurar una ganancia cercana al 90% del valor final deseado en este caso 1 esto para minimizar las pérdidas del sistema.

- Una vez se han introducido los requerimientos de diseño y comportamiento deseados, para el sistema, haga click sobre *show Analysis Plots* recuadro color morado Figura 106. Se obtiene la Figura 111.

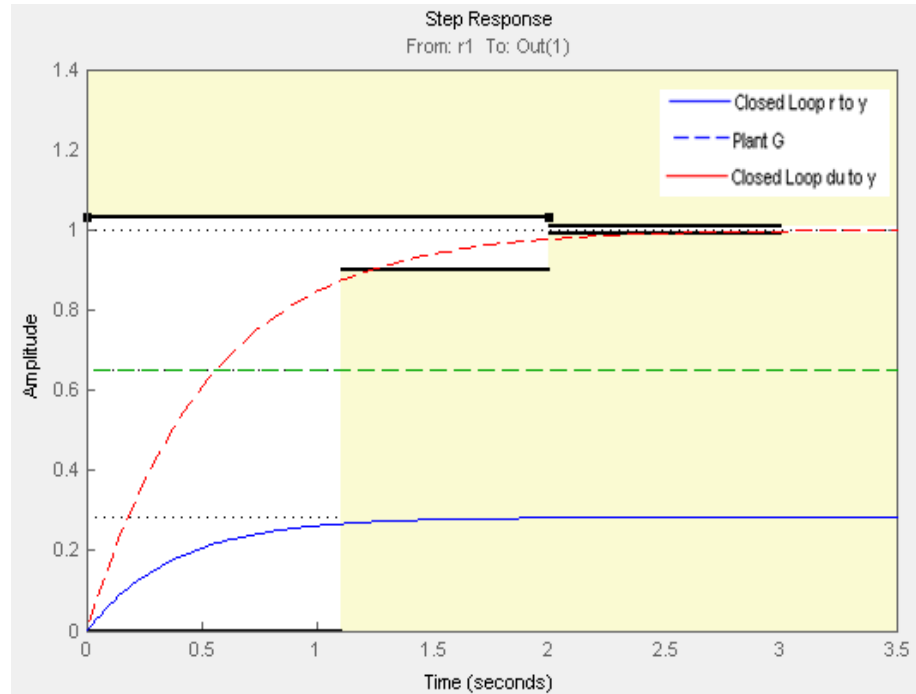


Figura 111. Respuestas del sistema a compensar con los requerimientos de comportamiento del lazo cerrado para Velocidad y Posición.

Observe cómo en la Figura 111, se monitorea, en todo momento el comportamiento del sistema a los cambios que se efectúen sobre los valores del controlador. La sintonización consiste en que la respuesta de la planta con el compensador se comporte de tal forma que la curva de color azul se localice dentro de las zonas blancas, estas zonas delimitan la curva para que tenga el comportamiento deseado para un sistema controlado de forma exitosa, esta zona delimita los requerimientos de diseño implementados en la Figura 110. Esta gráfica siempre está disponible durante la sintonización en el grupo de ventanas de Matlab.

Para sintonización automática hacer lo siguiente:

- Inicie la sintonización eligiendo en la pestaña, Compensator Editor, sintonizar C1, dando click sobre el menú desplegable. y elija C1 recuadro color rojo Figura 112.

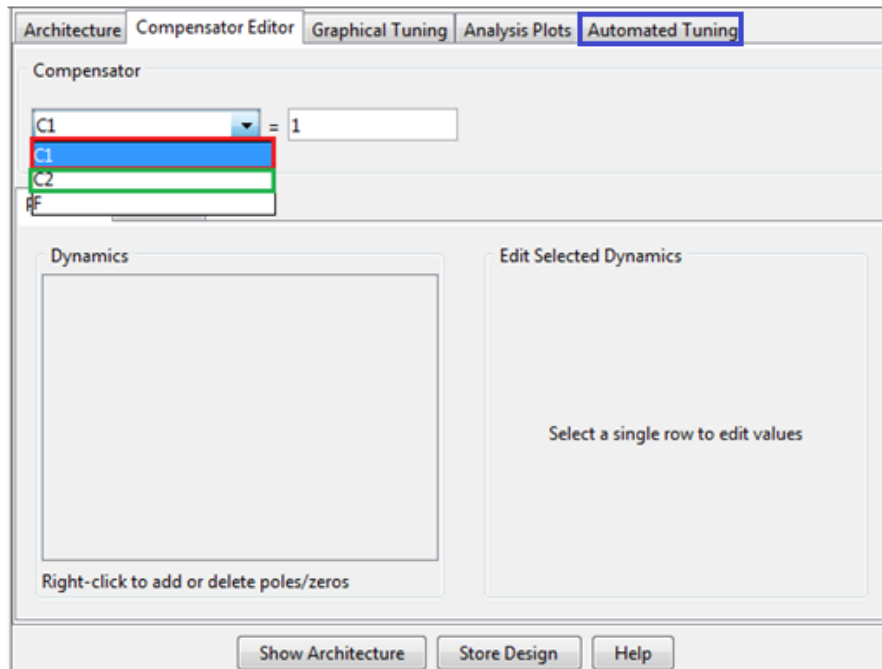


Figura 112. Elección controlador a sintonizar Velocidad o Posición.

- Escoja la pestaña Automated Tuning recuadro azul Figura 112. Se despliega la pestaña de la Figura 113.

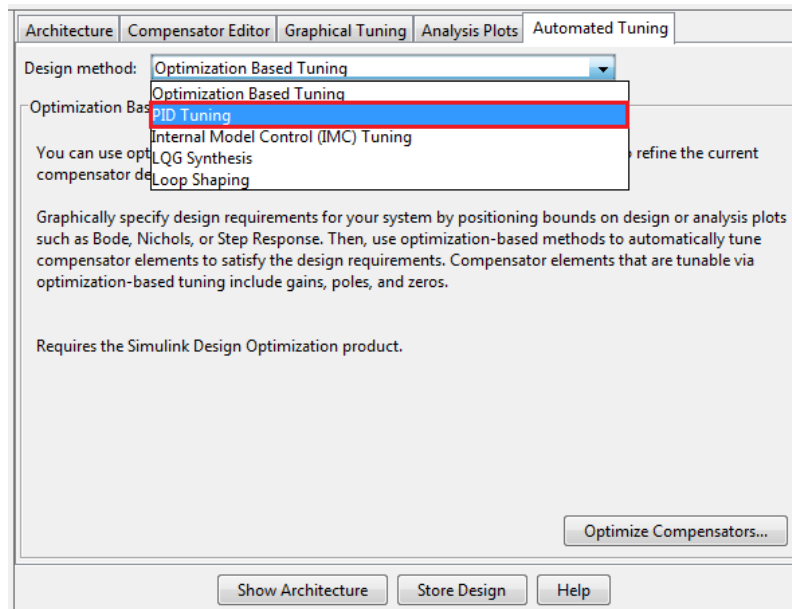


Figura 113. Esquema elección sintonización PID automática.

- Escoja la opción PID Tuning recuadro rojo Figura 113, obteniendo la pestaña de la figura 114.

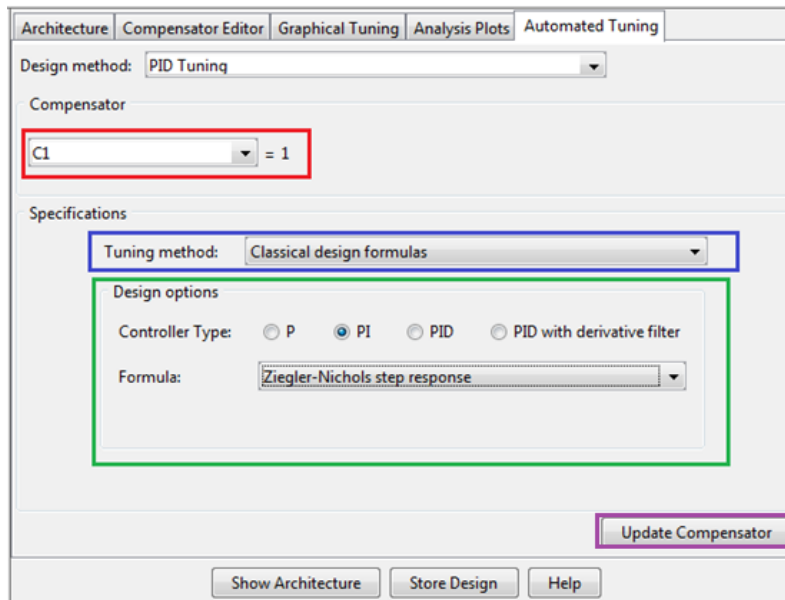


Figura 114. Esquema general pestaña Automated Tuning sintonización automática.

- Escoja en el recuadro rojo de la figura 114 la opción C1.
- Escoja en el recuadro Azul de la Figura 114 la opción Classical design formulas, para una sintonización con las formulas clásicas.
- Elija en el recuadro verde un controlador PI como tipo de controlador, y respuesta de Ziegler y Nichols al escalón como fórmula clásica.
- Para sintonizar sólo basta después de elegir los parámetros de sintonización, dar click en Update Compesator recuadro morado Figura 114. Primero se hace para el controlador C1 de Posición obteniendo como resultado la Figura 115, y las curvas de la Figura 116.

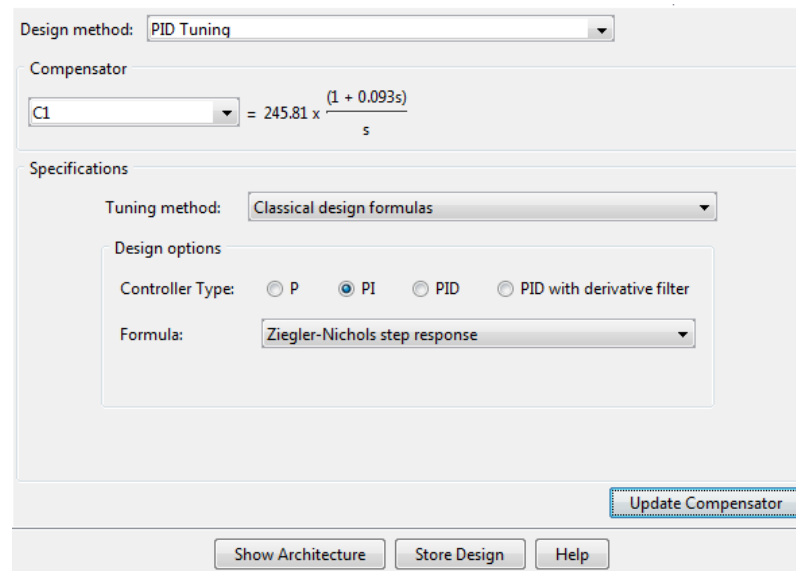


Figura 115. Resultados Numéricos sintonización PID automática.

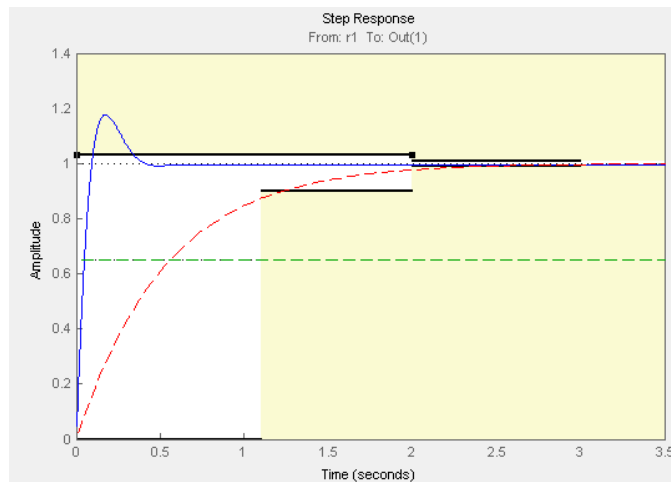


Figura 116. Curvas Resultados Sintonización automática

Una vez se ha sintonizado el Controlador C1 de Posición se procede a sintonizar el controlador C2 de Velocidad:

- Escoja en el recuadro rojo de la figura 117 la opción C2.
- Escoja en el recuadro Azul de la Figura 117 la opción Classical design fórmulas, para una sintonización con las fórmulas clásicas.
- Elija en el recuadro verde figura 117, un controlador PI como tipo de controlador, y respuesta de Ziegler y Nichols al escalón como fórmula clásica.
- Para sintonizar sólo basta después de elegir los parámetros de sintonización, dar click en Update Compesator recuadro morado Figura 117.

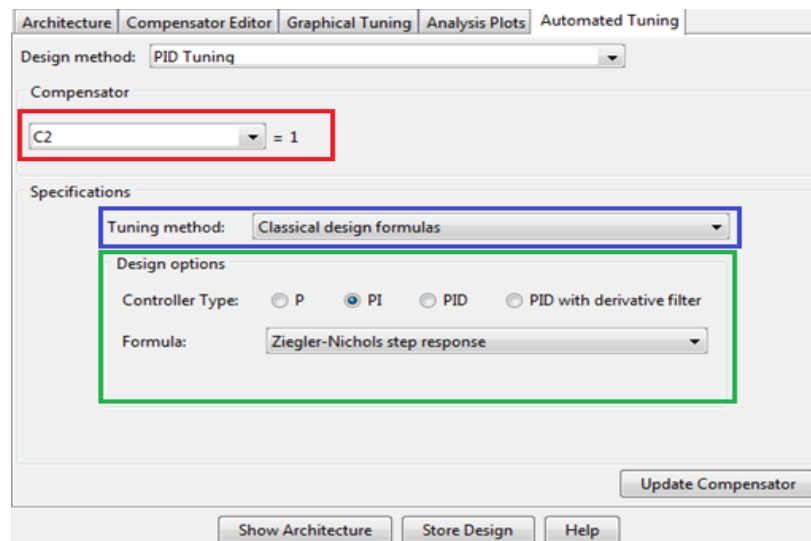


Figura 117. Parámetros usados sintonización automática controlador C2.

- Se obtiene el resultado de la Figura 118, y las curvas de la Figura 119.

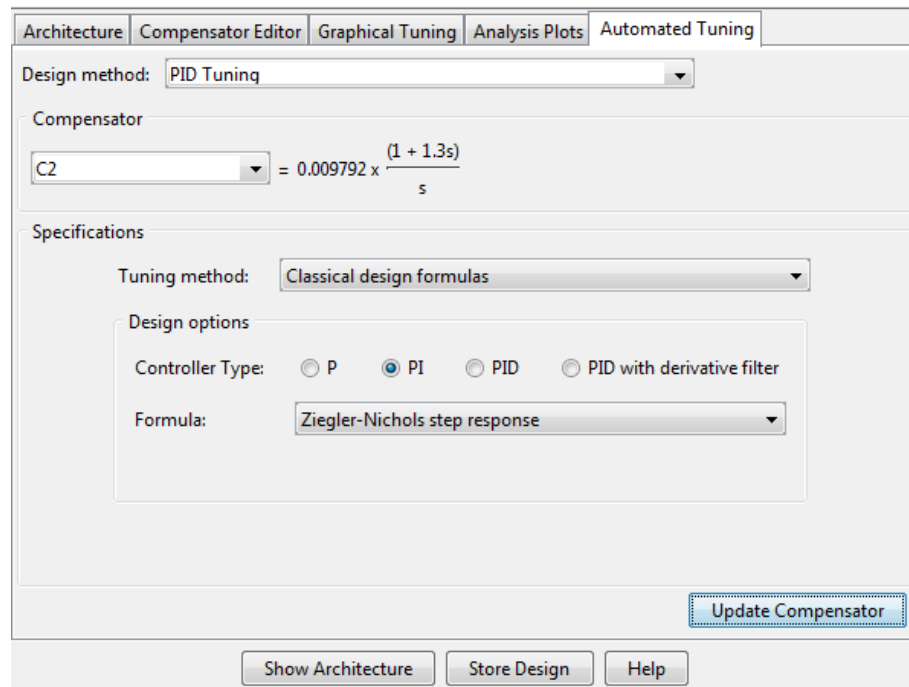


Figura 118. Resultados finales matemáticos Sintonización automática.

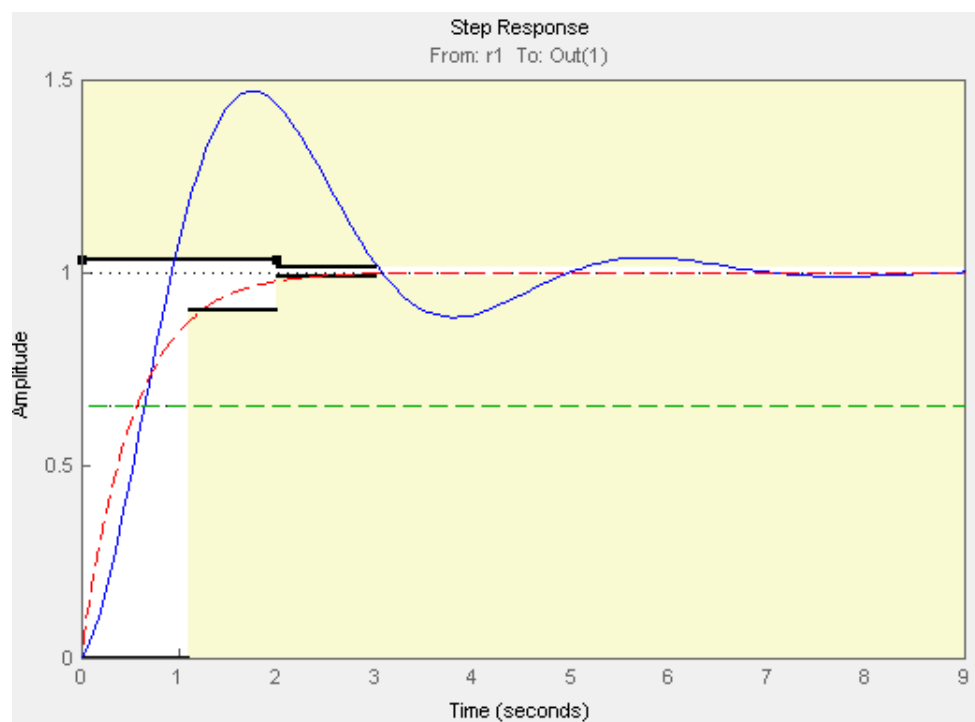


Figura 119. Curvas finales Sintonización automática.

6.1.1. Resultados y Constantes obtenidas en Sisotool.

- La herramienta Sisotool entrega como resultado de sintonización la expresión:

$$c1 = \frac{245.81 * (1 + 0.093s)}{s} \quad (22)$$

$$c2 = \frac{0.009792 * (1 + 1.3s)}{s} \quad (23)$$

Las cuales deben ser igualadas a la función de transferencia que se determinó en la ecuación (5).

- Igualar las ecuaciones (5) y (22) para encontrar C1.

$$\frac{245.81 * (1 + 0.093s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{S} + KdS$$

$$(245.81 * (1 + 0.093s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$

$$245.81 + 22.86s = KpS + Ki + KdS^2$$

$$Kp = 22.86$$

$$Ki = 245.81$$

$$Kd = 0$$

- Igualar las ecuaciones (5) y (23) para encontrar C2.

$$\frac{0.009792 * (1 + 1.3s)}{s} = Kp + \frac{Ki}{S} + KdS$$

$$(0.009792 * (1 + 1.3s)) \frac{1}{s} = \frac{1}{s} (KpS + Ki + KdS^2)$$

$$0.009792 + 0.01272s = KpS + Ki + KdS^2$$

$$Kpv = 0.01272$$

$$Kiv = 0.009792$$

$$Kdv = 0$$

7. Desarrollo Del Controlador De Par Para Un Motor DC De Imán Permanente.

El control de par se realiza partiendo del modelo matemático de un motor DC de imán

Así se sabe que:

$$I(s) = E(s) * \frac{K_t}{L_a * s + R_a} \quad (24)$$

Dónde:

K_t = Constante de Torque.

L_a = Inductancia de Armadura.

R_a = Resistencia de Armadura.

$E(s)$ = Fuerza electromotriz. FEM

$$G_{par}(s) = I(s) * K_t \quad (25)$$

De las ecuaciones (24) y (25) obtenidas de la guía para la parametrización de un motor DC de imán permanente se puede observar la dependencia del par de un motor únicamente de la corriente aplicada ya que los demás parámetros del motor no se pueden modificar al ser dependientes de la estructura y composición del motor.

De lo anterior se puede establecer que es necesario la implementación de una fuente de alimentación para el motor de corriente regulada, ya que como se muestra en las ecuaciones (13) y (16) el par es directamente proporcional a la corriente aplicada al motor. En este caso se limita la corriente aplicada al motor en el rango de 0mA a 300mA que es el rango de tolerancia de corriente del motor.

Este control se realiza controlando remotamente por saltos de corriente la fuente de alimentación, al limitar la corriente aplicada al motor se garantiza que este no supere los valores de par establecidos mediante experimentación en el anexo 2. En la Figura 112, se muestra el control que se desea implementar.

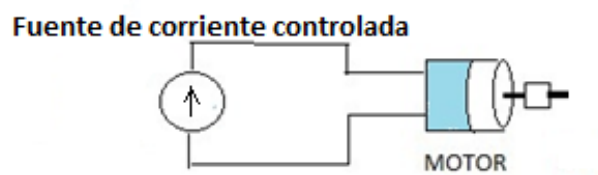


Figura 121. Motor DC de imán permanente con fuente de corriente controlada.

8. Bibliografía.

- [1] “Sistemas de Control Automático”. Escuela de electrónica Universidad Don Bosco, San Salvador - Nicaragua. Sistemas de control automático, 2013. Disponible en: <http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2013/i/guia-5>.
- [2] Mazzone - Virginia, “Controles PID”. Control automático 1, Universidad nacional de Quilmes, Buenos Aires - Argentina: 2002, Disponible en: <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID>.
- [3] Alamo Cantarero Teodoro, “Diseño del Controlador PID”. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Sevilla - España, Disponible en: http://www.esi2.us.es/~alamo/Archivos/Certificaciones/Sec_9_Otras_Publicaciones/Docente/AlamoPIDTotal.
- [4] Cesca Mario – Ingaramo Patricia - Centro de Ingeniería Roberto Herrera, FACET – UNT, “MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID”, Tucuman – Argentina, Disponible en: http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_4/Tp4a.
- [5] C Kuo Benjamin, "Automatic Control Systems – 5th Edition", Prentice–Hall, (1987).
- [6] Manrique Machado Sebastián, Mora Orozco Iván, Arenas Crespo Oswaldo “Modelado, universidad pontificia bolivariana, Medellín, Colombia, “Diseño e Implementación del Control Analógico de Velocidad para un Motor de CD “, 2013. Disponible en: [Http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_Ingeniar_2013_Modelado_Diseno_e_Implementacion_del_Control_Analogico_de_Velocidad_para_un_Motor_de_CD_1250.pdf](Http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_Ingeniar_2013_Modelado_Diseno_e_Implementacion_del_Control_Analogico_de_Velocidad_para_un_Motor_de_CD_1250.pdf)