UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y CIRCUITOS
FUNDAMENTOS DE MECATRÓNICA EC-5811
PROFESOR: GERARDO FERNÁNDEZ

LABORATORIO N° 0

Estudiantes:
Giancarlo Torlone 20-10626
Héctor Flores 18-00173

Bloques preprogramados

Se montó el sistema de la **Figura 1** y se modificaron los parámetros.

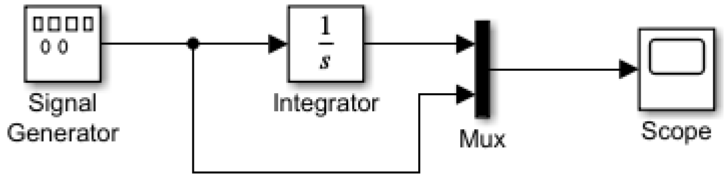

Figura 1. Sistema con integrador

La señal generada es sinusoidal con 10 V a una frecuencia de 60 Hz.

El stop time usado en la simulación fue de: 0.05s

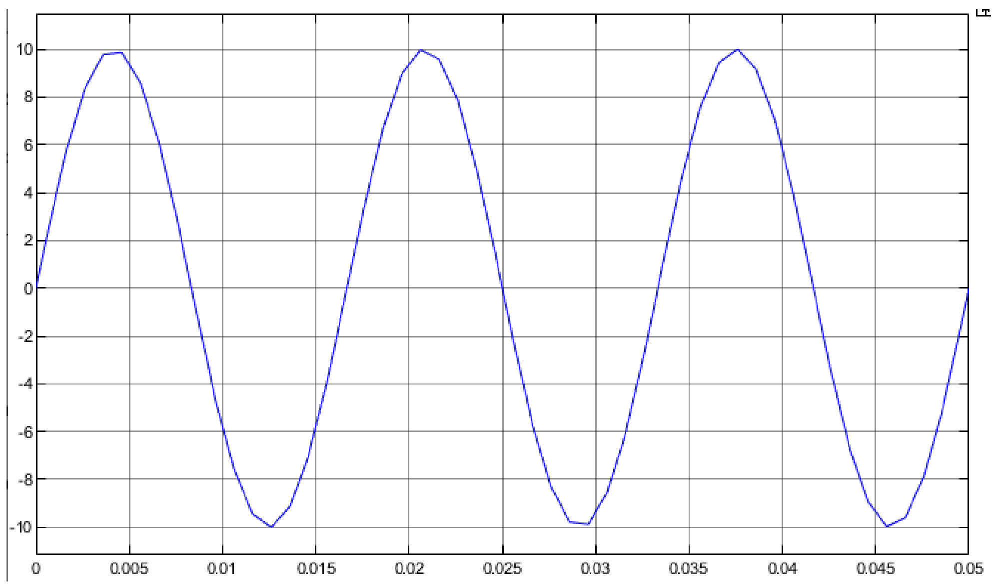

Figura 2. Señal sinusoidal de entrada al sistema

El sistema integra la señal de entrada que es un seno, y se obtiene un coseno.

Señal a la salida del integrador:

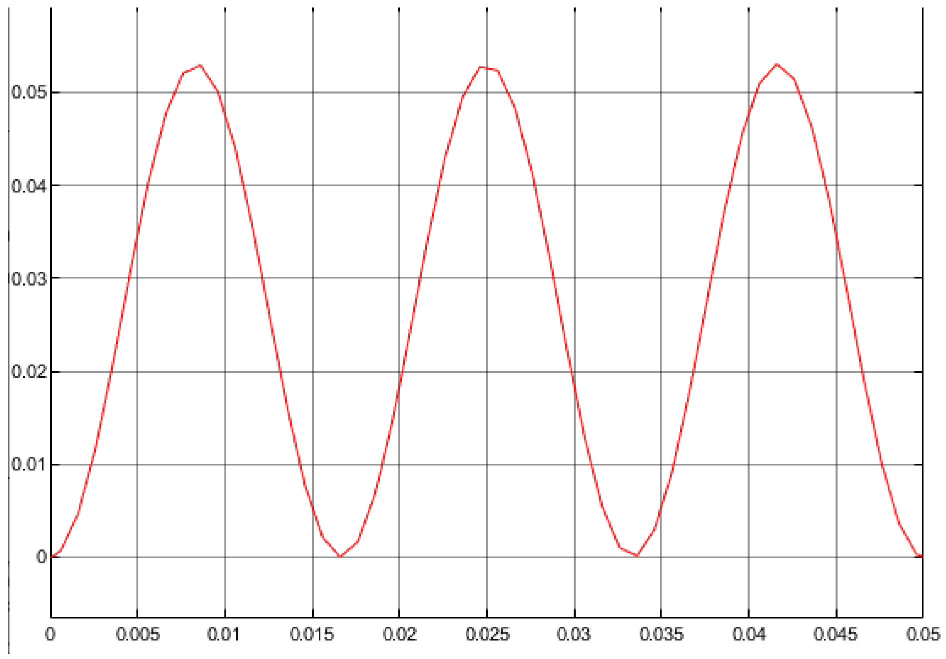

Figura 3. Señal a la salida del integrador

El integrador tiene una condición inicial igual a 0, y es lo que se muestra en la **Figura 3**.
Si variamos este parámetro, la señal se desplazará verticalmente al valor indicado, es decir, la señal tendrá un offset.

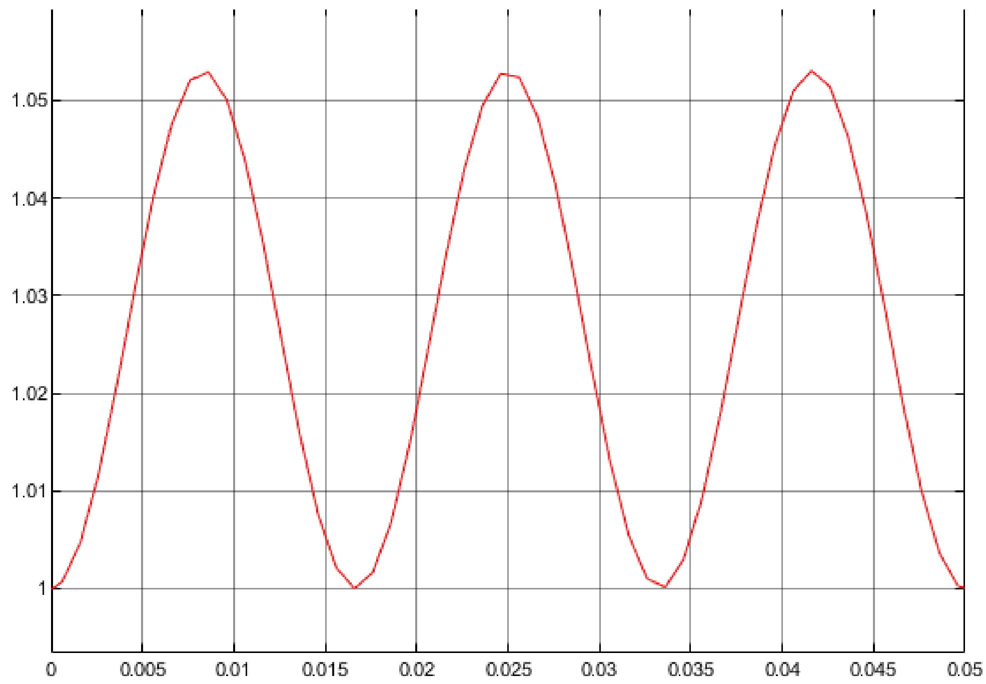

Figura 4. Señal a la salida del integrador con condición inicial igual a 1

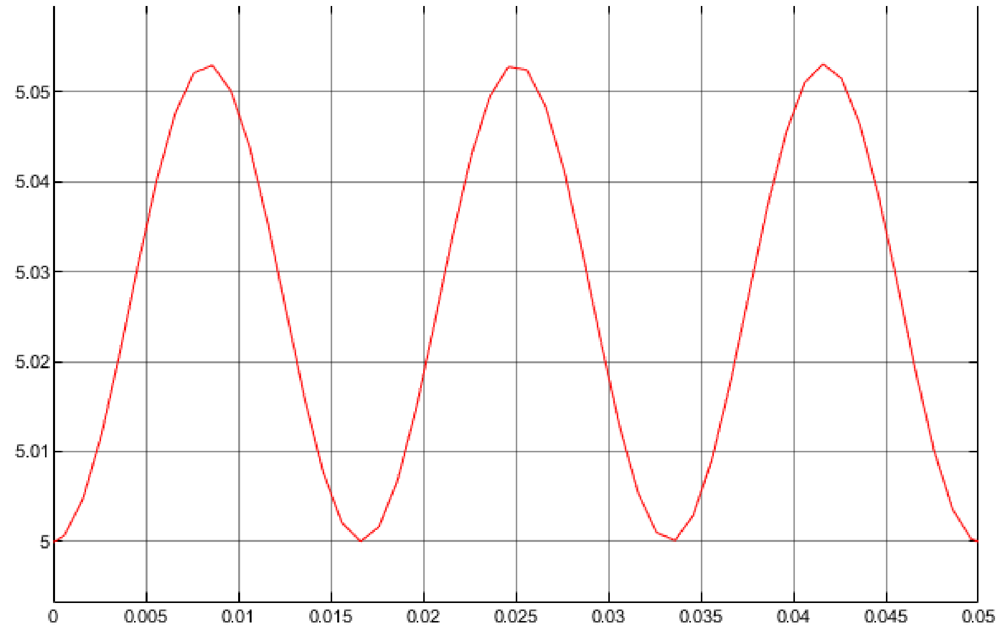

Figura 5. Señal a la salida del integrador con condición inicial igual a 5

Señal a la salida del MUX:

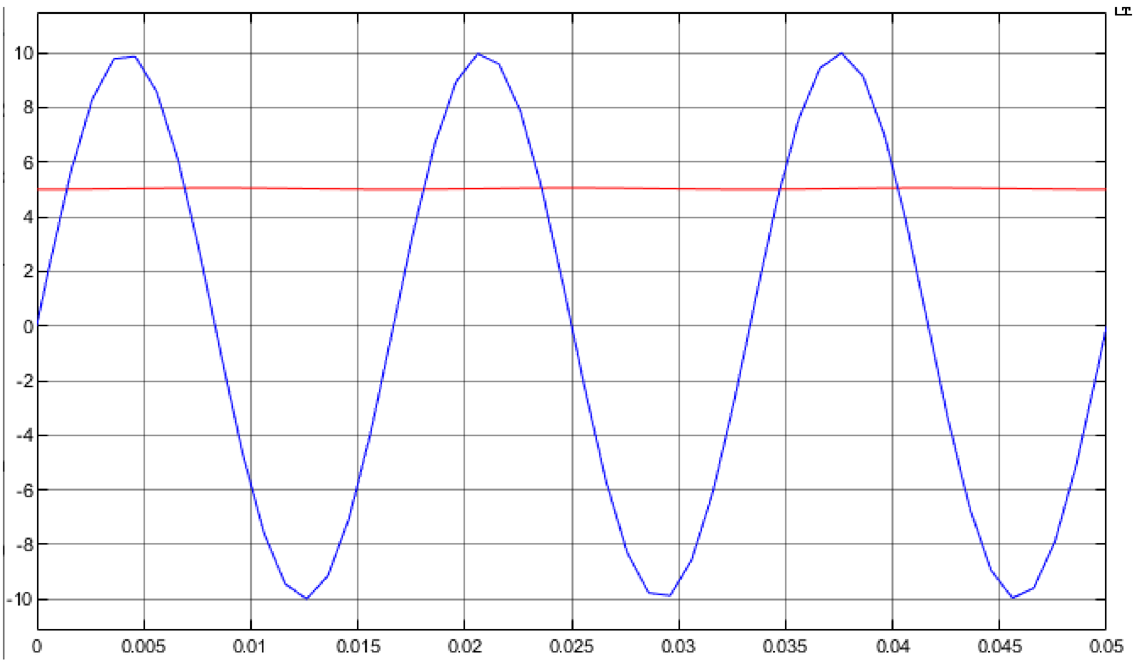

Figura 6. Señal a la salida del MUX con condición inicial igual a 5 del integrador

La señal azul corresponde al seno de entrada de la **Figura 2** y la señal roja al coseno de la **Figura 5**, el cual se visualiza de esa forma ya que, como tiene una amplitud pequeña, la escala actual del scope hace que no se pueda apreciar como en la **Figura 5**, pero se trata de la misma señal.

Posteriormente se planteó un sistema sencillo y fue montado en simulink.

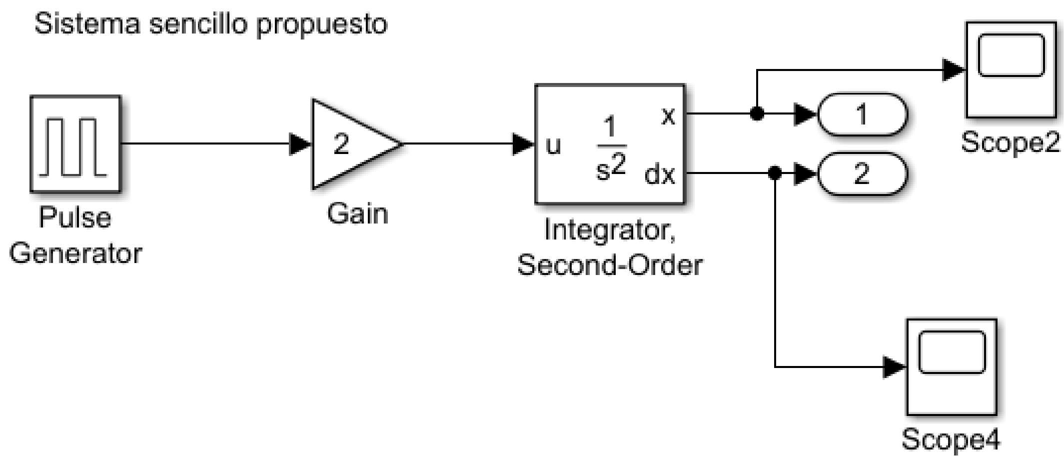

Figura 7. Sistema sencillo propuesto

Al simular este modelo, se integra un impulso breve dos veces para obtener una rampa.

El pulso tiene una amplitud de 1 y un periodo de 10s. Dicha amplitud es aumentada con el bloque de ganancia igual a 2.

El stop time usado fue de 10s.

Señal a la salida:

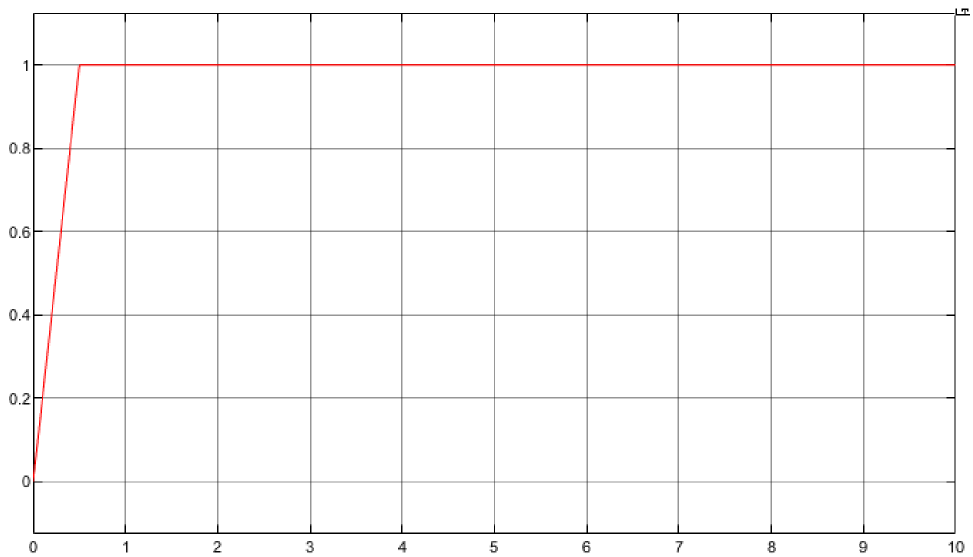

Figura 8. Señal observada por scope 4

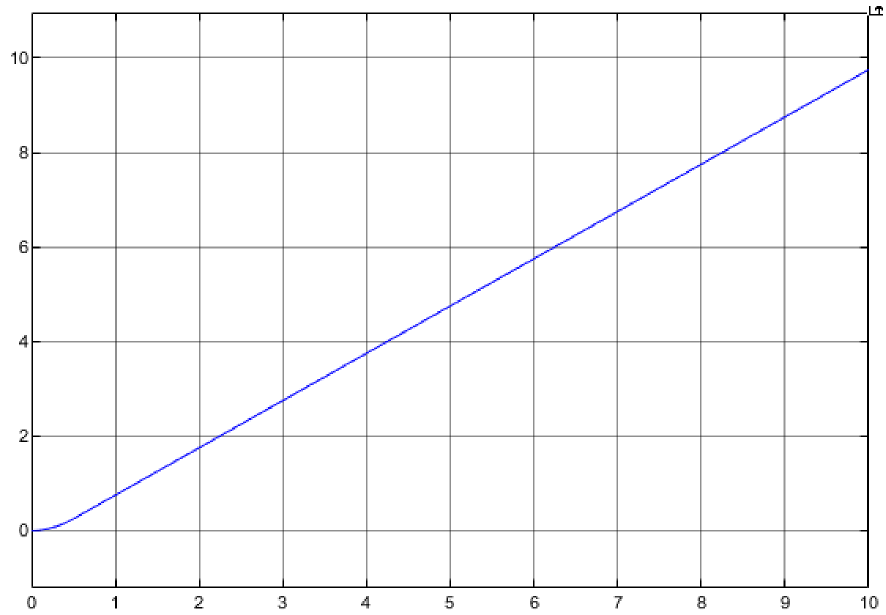

Figura 9. Señal observada por scope 2

Envío de variables al espacio de trabajo de MATLAB.

Se montó en simulink el sistema para la ecuación de Van der Pol:

$$\ddot{x} + (x^2 - 1)\dot{x} + x = 0$$

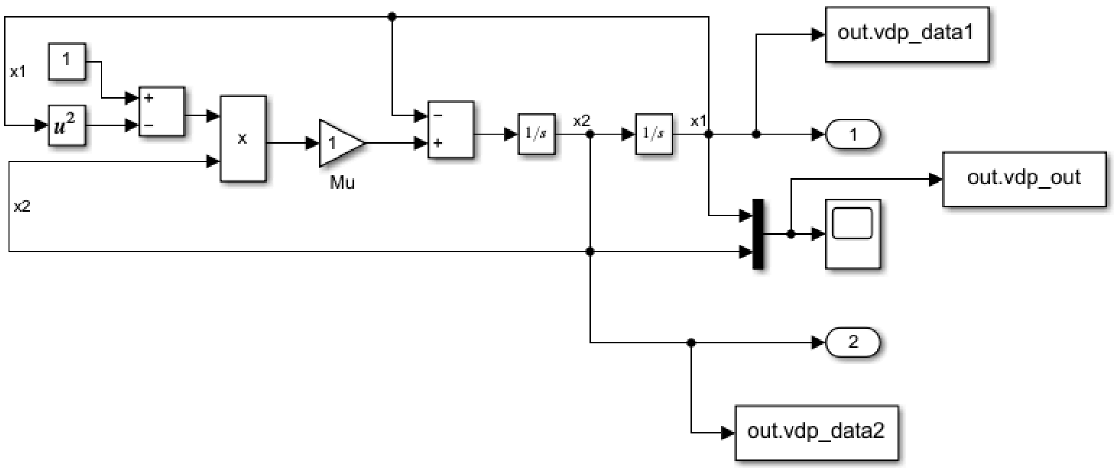

Figura 10. Sistema para la ecuación de Van der Pol

Se obtiene a la salida las siguientes señales:

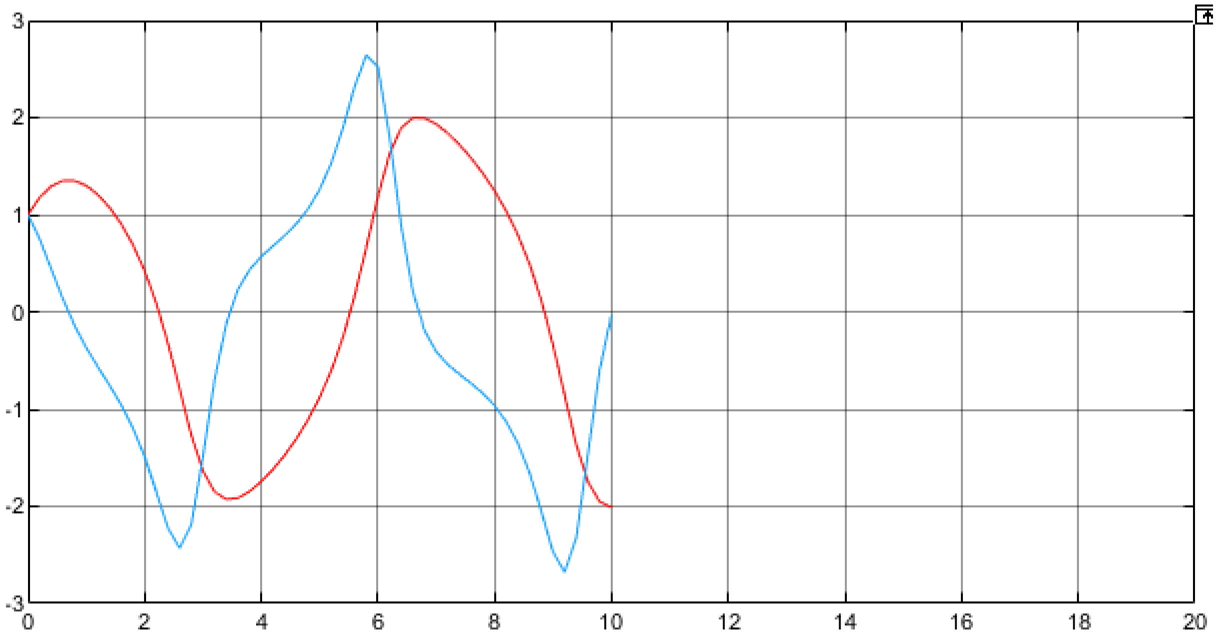

Figura 11. Señales a la salida del sistema de la ecuación de Van der Pol

Se utilizó el bloque "To Workspace" para comunicar los datos obtenidos de Simulink con Matlab.

Los datos enviados a Matlab fueron: el tiempo, los datos en el bloque **out1** llamados **vdp_data1**, los datos en el bloque **out2** llamados **vdp_data2** y los datos de la salida del sistema llamados **vdp_out** (el scope con el MUX).

Los integradores tienen valores iniciales iguales a 1.

A continuación se realiza la simulación para distintos valores del paso mínimo o "step", es decir, variando μ (Mu).

- **Datos obtenidos de simulink con μ = 0.2**

tiempo	data1	data2
0	1	1
0,2	1,178265078	0,774688025
0,4	1,307321031	0,511158816
0,6	1,381514882	0,22934624
0,8	1,399041397	-0,05292111
1	1,361172684	-0,32299029
1,2	1,271134796	-0,573858989
1,4	1,133100826	-0,802714161
1,6	0,951577313	-1,00862943
1,8	0,731265809	-1,1902076
2	0,477367936	-1,343544664
2,2	0,196244959	-1,460773666
2,4	-0,103726629	-1,529672089
2,6	-0,411393603	-1,535145202
2,8	-0,712611828	-1,463265891
3	-0,991065095	-1,307298097
3,2	-1,230276336	-1,072978128
3,4	-1,416279882	-0,779294402
3,6	-1,53984031	-0,453287085
3,8	-1,597239742	-0,121705187
4	-1,589492701	0,195642194
4,2	-1,520659167	0,48810215
4,4	-1,396127746	0,75256291
4,6	-1,221429591	0,990112964
4,8	-1,001747897	1,202609631
5	-0,742064329	1,389776494
5,2	-0,44782754	1,546883102
5,4	-0,126018436	1,663164047
5,6	0,213599758	1,721742878
5,8	0,557480419	1,702447014
6	0,888239002	1,588478193
6,2	1,186218462	1,375360341
6,4	1,432662143	1,077002934
6,6	1,613326393	0,723447185
6,8	1,72076581	0,350544539
7	1,754283317	-0,011703808
7,2	1,718012571	-0,345433923
7,4	1,618434407	-0,6445501
7,6	1,462402281	-0,910614099
7,8	1,256089255	-1,148136326
8	1,004802682	-1,3607027
8,2	0,713478601	-1,548001665
8,4	0,387706553	-1,703465667
8,6	0,035154087	-1,812745363
8,8	-0,332881082	-1,854257514
9	-0,700404093	-1,803819426
9,2	-1,047091173	-1,644246429
9,4	-1,350837247	-1,376513904
9,6	-1,592047255	-1,024607032
9,8	-1,757726419	-0,628412179
10	-1,84320322	-0,228652316

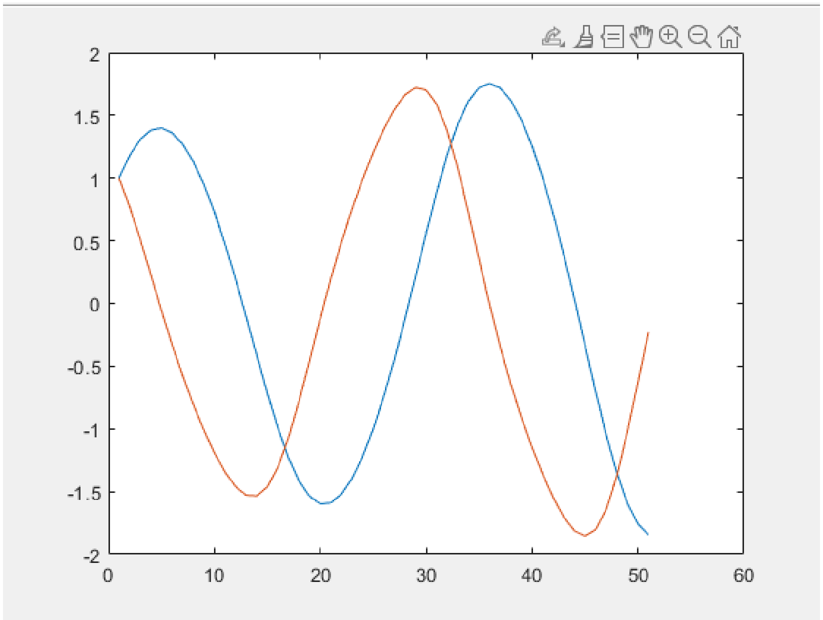

Figura 12. Gráfico de las señales a la salida del sistema con μ = 0.2

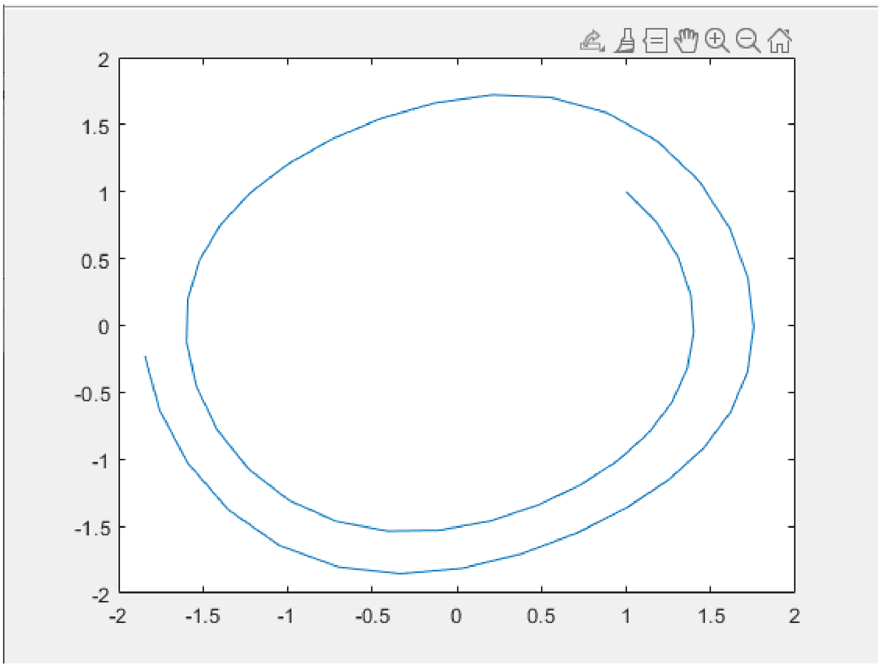

Figura 13. Gráfico de los datos data1 y data2 con μ = 0.2

- **Datos obtenidos de simulink con μ = 1**

tiempo	data1	data2
0	1	1
0,2	1,176411513	0,748565115
0,4	1,295431693	0,437413834
0,6	1,351657163	0,129392601
0,8	1,3498279	-0,140146018
1	1,298480357	-0,367036694
1,2	1,204956416	-0,564961663
1,4	1,073091583	-0,753990908
1,6	0,902500743	-0,955946645
1,8	0,688328453	-1,19367083
2	0,42117104	-1,488955972
2,2	0,088293401	-1,849310401
2,4	-0,319849174	-2,224421341
2,6	-0,790575533	-2,431015844
2,8	-1,261892344	-2,191248951
3	-1,634827836	-1,485425627
3,2	-1,850673816	-0,693626752
3,4	-1,927372737	-0,116864147
3,6	-1,912956212	0,22961684
3,8	-1,844939617	0,433960556
4	-1,743923376	0,56895778
4,2	-1,619091787	0,677332006
4,4	-1,473110371	0,783669831
4,6	-1,304626708	0,904934438
4,8	-1,109094712	1,056926348
5	-0,878582425	1,2581747
5,2	-0,601056587	1,530892088
5,4	-0,260217415	1,892558059
5,6	0,160478522	2,317402882
5,8	0,660579229	2,641792264
6	1,187240284	2,521606172
6,2	1,627367779	1,799033851
6,4	1,893983738	0,882241156
6,6	1,997207336	0,20325633
6,8	1,994648546	-0,189663078
7	1,932965493	-0,406951916
7,2	1,837370883	-0,540225274
7,4	1,71904093	-0,640230028
7,6	1,581695866	-0,733654579
7,8	1,424924594	-0,836816011
8	1,245419122	-0,963293088
8,2	1,037047362	-1,128320399
8,4	0,790234997	-1,351325904
8,6	0,491149645	-1,654559831
8,8	0,122316079	-2,047169426
9	-0,329983971	-2,467530432
9,2	-0,851123353	-2,677743933
9,4	-1,362818948	-2,32878542
9,6	-1,74693538	-1,465484877
9,8	-1,94981079	-0,60166589
10	-2,008252039	-0,033765385

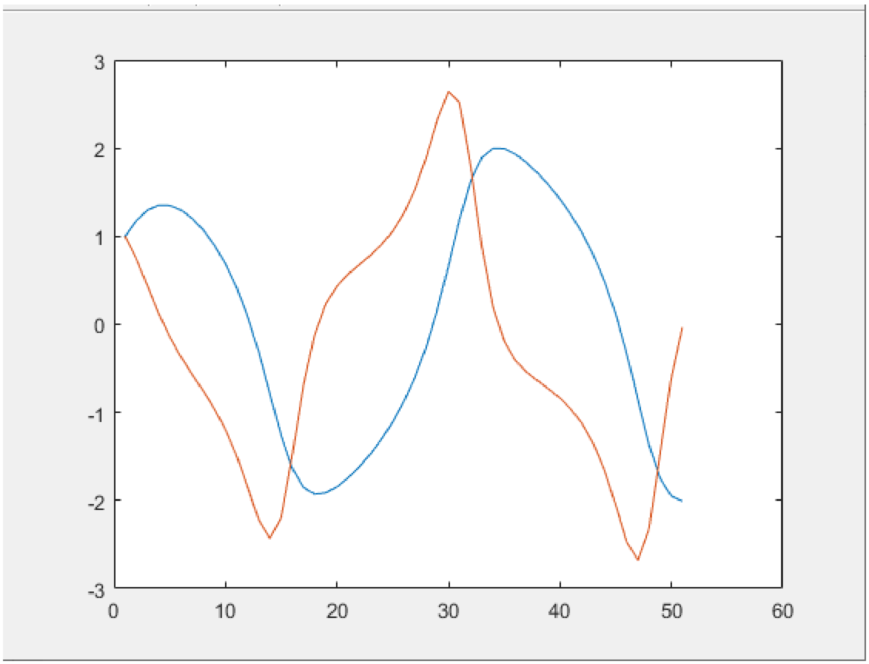

Figura 14. Gráfico de las señales a la salida del sistema con μ = 1

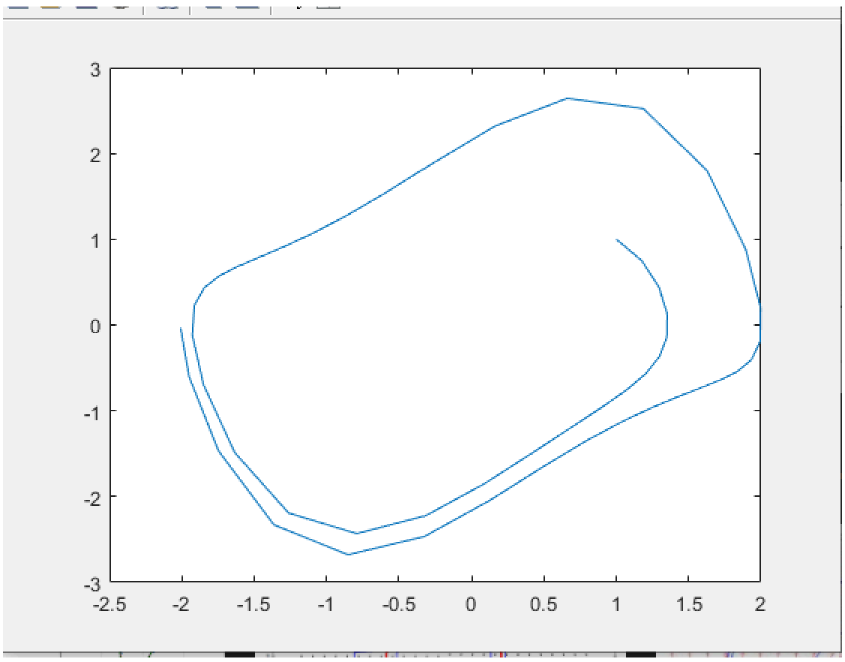

Figura 15. Gráfico de los datos data1 y data2 con μ = 1

- **Datos obtenidos de simulink con μ = 5**

tiempo	data1	data2
0	1	1
0,2	1,16780284	0,63328152
0,4	1,249494772	0,201578486
0,6	1,259201005	-0,078088884
0,8	1,226295528	-0,237622011
1	1,167257305	-0,349665983
1,2	1,086144449	-0,465887198
1,4	0,977323256	-0,637180952
1,6	0,82116148	-0,965933941
1,8	0,560210365	-1,781597152
2	-0,004853373	-4,378696796
2,11148132	-0,644853972	-7,100291866
2,22296264	-1,45776407	-6,351081008
2,31650194	-1,868723612	-2,504923171
2,392599267	-1,98439585	-0,786608386
2,47901938	-2,017267159	-0,115673618
2,55594495	-2,018284583	0,055439669
2,65336991	-2,009283594	0,114274393
2,774266436	-1,994224887	0,129913023
2,935827069	-1,972710374	0,134744948
3,135827069	-1,945345797	0,138283065
3,335827069	-1,917311241	0,141876847
3,535827069	-1,88855868	0,145641168
3,735827069	-1,859032042	0,149679883
3,935827069	-1,828664355	0,154074145
4,135827069	-1,797376339	0,158896255
4,335827069	-1,765074602	0,164224676
4,535827069	-1,731648709	0,170154481
4,735827069	-1,696966855	0,176805963
4,935827069	-1,660869842	0,184334776
5,135827069	-1,623162649	0,192946321
5,335827069	-1,583602473	0,202917501
5,535827069	-1,541881272	0,214630872
5,735827069	-1,497599548	0,228630193
5,935827069	-1,45022555	0,245714559
6,135827069	-1,399029143	0,267105656
6,335827069	-1,342969293	0,294762035
6,535827069	-1,280491194	0,332010531
6,735827069	-1,209133648	0,384922101
6,935827069	-1,124699512	0,465625977
7,135827069	-1,019296798	0,601367084
7,335827069	-0,875996358	0,863589078
7,535827069	-0,651259892	1,48200433
7,735827069	-0,203733232	3,364989163
7,87862901	0,491279252	6,618628596
7,972897828	1,184616973	7,434459035
8,067166647	1,744528725	4,011109186
8,152655696	1,956357127	1,28119996
8,238144744	2,013696206	0,261862905
8,313004111	2,021326793	-0,006800098

8,403222668	2,015521741	-0,099894713
8,513883581	2,002596154	-0,12605701
8,658670869	1,983652109	-0,133098308
8,857767209	1,95667921	-0,136743587
9,057767209	1,928929395	-0,140352352
9,257767209	1,900480099	-0,144054124
9,457767209	1,871280012	-0,147976398
9,657767209	1,841267456	-0,152217565
9,857767209	1,810368656	-0,156855238
10	1,78780755	-0,160431635

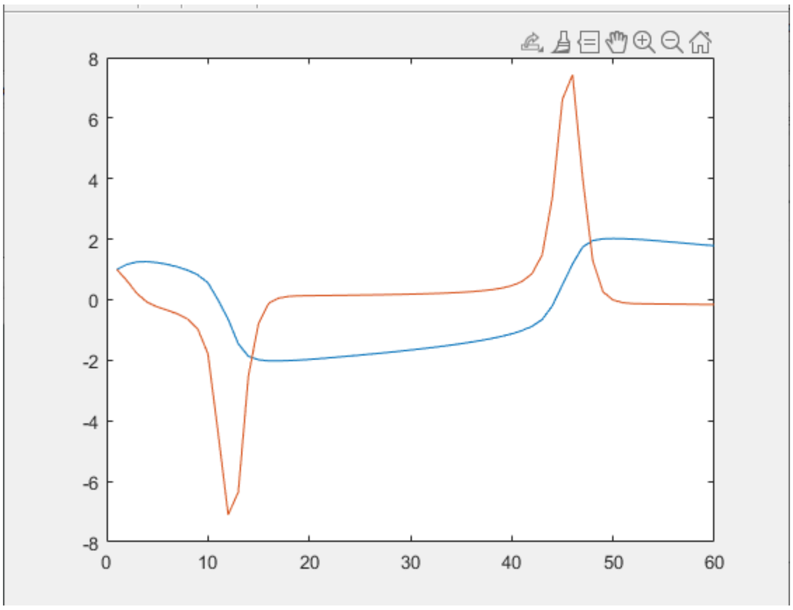

Figura 16. Gráfico de las señales a la salida del sistema con μ = 5

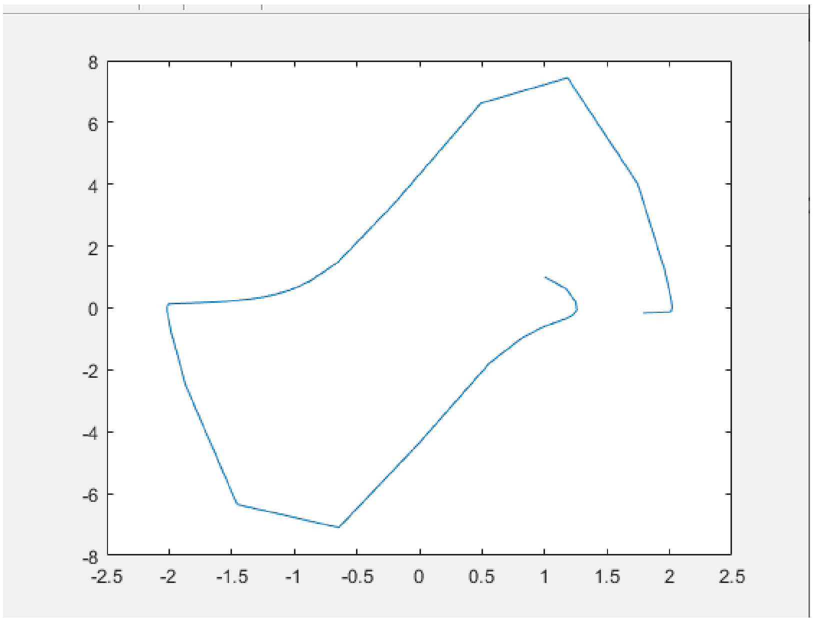

Figura 17. Gráfico de los datos data1 y data2 con μ = 5

De las simulaciones, gráficas y datos anteriores se puede concluir que, para valores pequeños de μ, el movimiento es casi sinusoidal, mientras que para valores grandes de μ es una oscilación de relajación, lo que significa que tiende a parecerse a una serie de funciones escalonadas, saltando entre valores positivos y negativos dos veces por ciclo.

Péndulo Invertido

Se realizó en simulink la simulación de un péndulo invertido dada sus ecuaciones del sistema realimentado.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$u = -Kx + K_I \xi$$

$$\dot{\xi} = e = r - y$$

Donde r es la referencia del sistema realimentado y las matrices del sistema son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 20.601 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.4905 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

La matriz de variables de estado viene definida por las variables:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ d \\ \dot{d} \end{bmatrix}$$

Donde las variables θ y d son el ángulo del péndulo respecto a la vertical, y el desplazamiento del carrito, respectivamente. La matriz de control K viene dada por:

$$K = \begin{bmatrix} 157.6336 & 35.3733 & 56.0652 & 36.7466 \end{bmatrix}$$

Y K_I =-50.9684

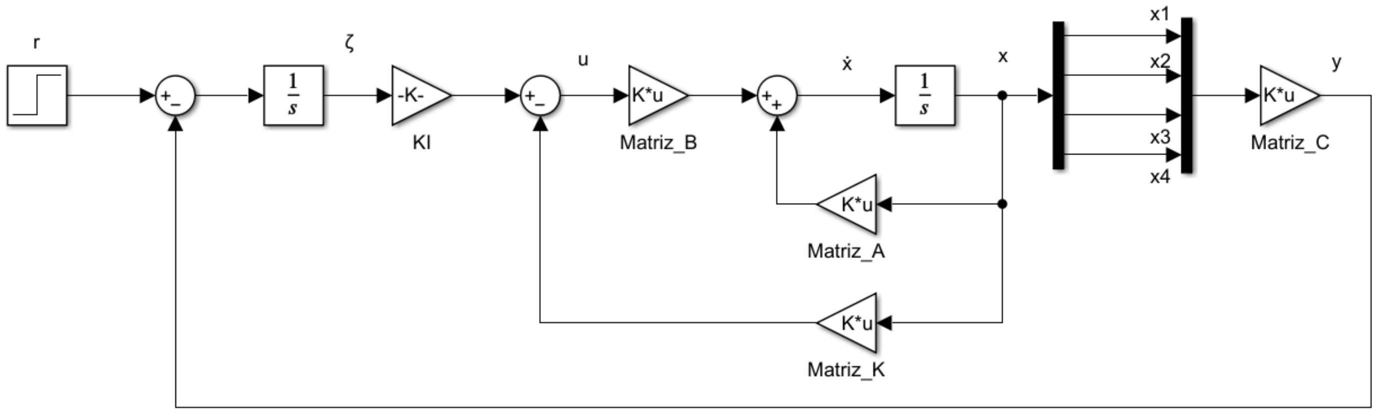

Figura 18. Sistema para el péndulo invertido

Las variables de estado del sistema son:

$$x_1 = \theta$$
$$x_2 = \dot{\theta}$$
$$x_3 = x$$
$$x_4 = \dot{x}$$

Donde x1 es el ángulo del péndulo, x2 la velocidad angular, x3 la posición del carro (que es la salida *y*) y x4 la velocidad del carro.

r es la señal de entrada de referencia, la cual es una función escalón definida con valor inicial y valor final igual a 1, lo que indica un impulso constante desde el inicio. Esta señal es para "mover" el carro.

Se define como salida la posición del carro.

La Matriz C fue definida como: C = [0 0 1 0]

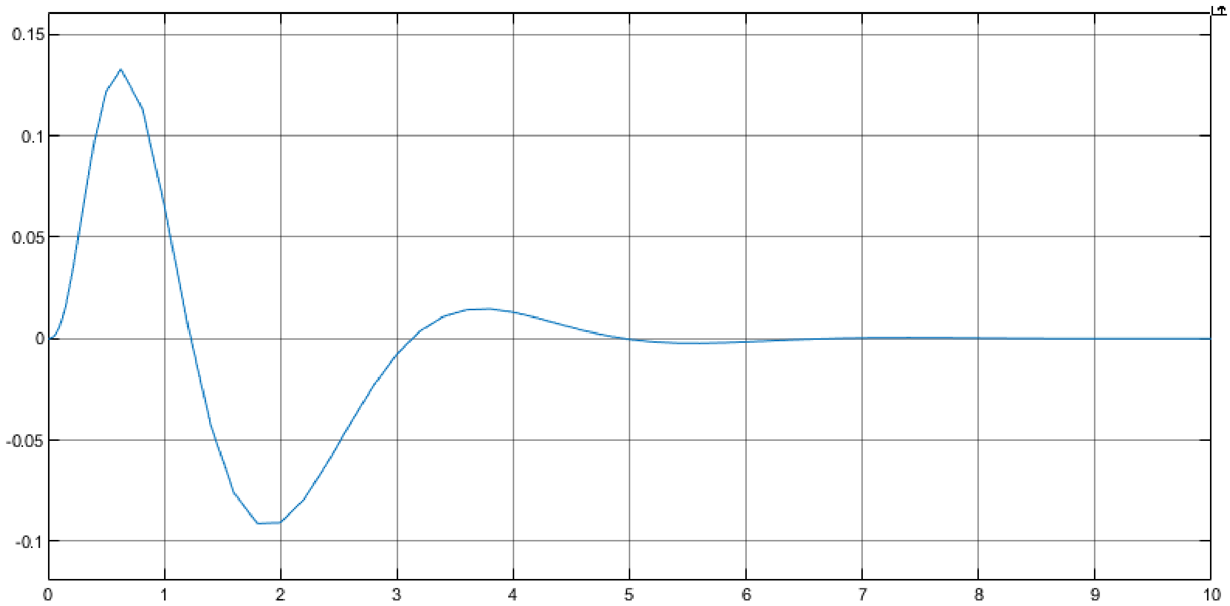

Figura 19. Gráfica del ángulo del péndulo (x1)

Las oscilaciones iniciales son el resultado de que el controlador intenta corregir la posición inestable del péndulo. Al comenzar a estabilizarse en cero, aproximadamente a los 5 segundos, indica que el péndulo ha alcanzado la posición vertical deseada.

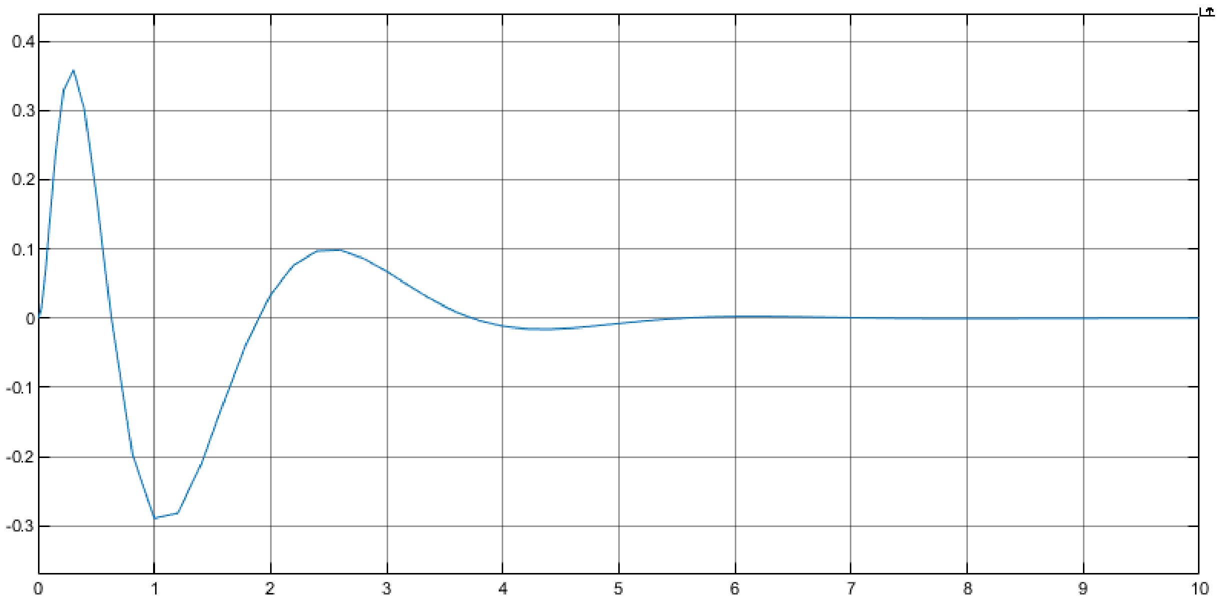

Figura 20. Gráfica de la velocidad angular del péndulo (x2)

Esto muestra cómo el péndulo está tratando de equilibrarse y cómo el controlador realiza ajustes continuamente para reducir las oscilaciones hasta que la velocidad angular se reduce a cero, significando que el péndulo ya no está girando.

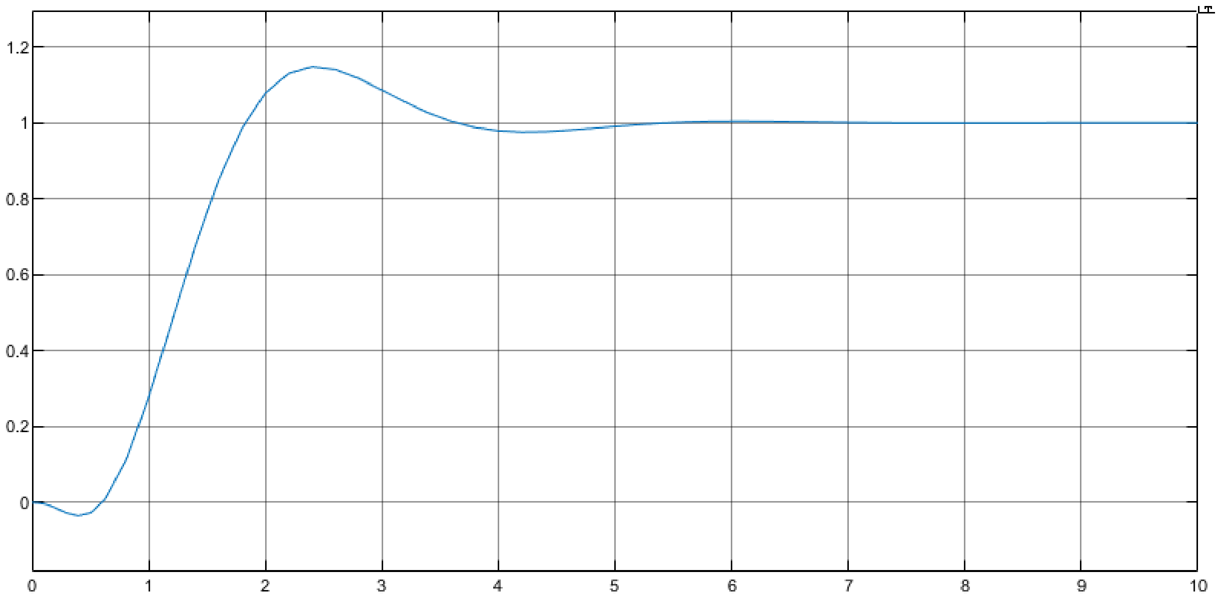

Figura 21. Gráfica de la posición del carro (x3 = salida *y*)

Se observa que el carro se mueve para generar la fuerza necesaria para mantener el péndulo en posición vertical. Una vez que el péndulo está estabilizado, alrededor de los 5 segundos, el carro se queda en la nueva posición sin necesidad de moverse más.

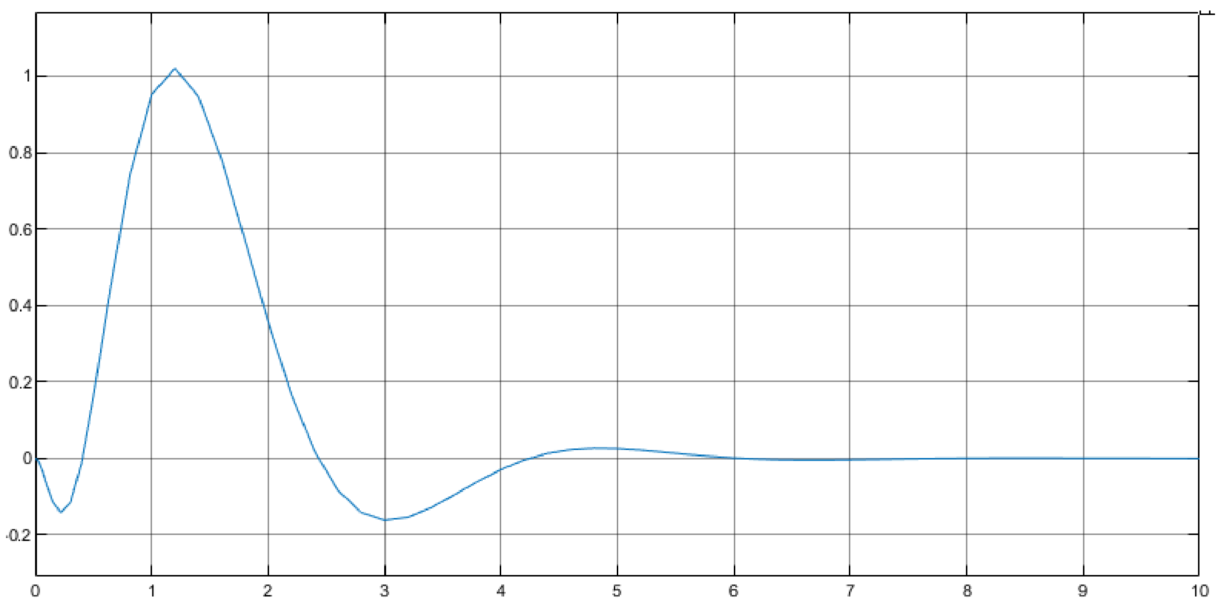

Figura 22. Gráfica de la velocidad del carro (x4)

Las oscilaciones iniciales de la velocidad muestran las correcciones rápidas que el controlador realiza para equilibrar el péndulo. A medida que el péndulo se estabiliza, la necesidad de corregir disminuye, y la velocidad del carro se reduce hasta que se estabiliza en cero, indicando que el carro ya no necesita moverse.

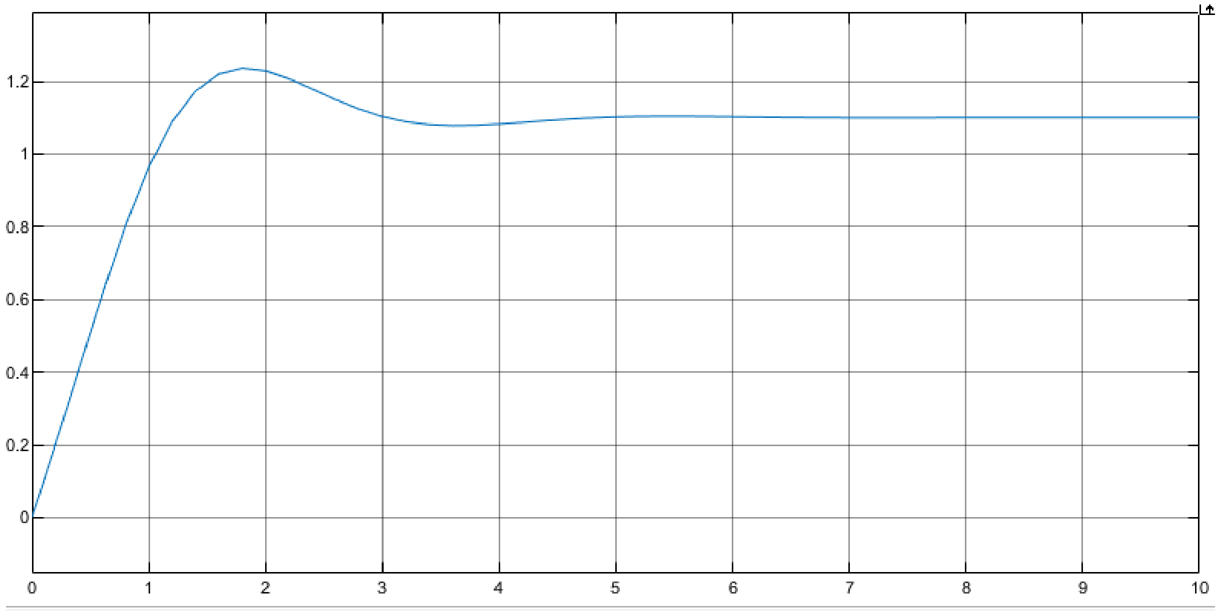

Figura 23. Gráfica de ζ

Funciones de transferencia

Para finalizar se montó en simulink un sistema de segundo orden con la función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}$$

Dicho sistema fue controlado con un PID haciendo que I=0, D=0 y variando el valor de P, disminuyendo primero su valor y luego aumentando su valor.

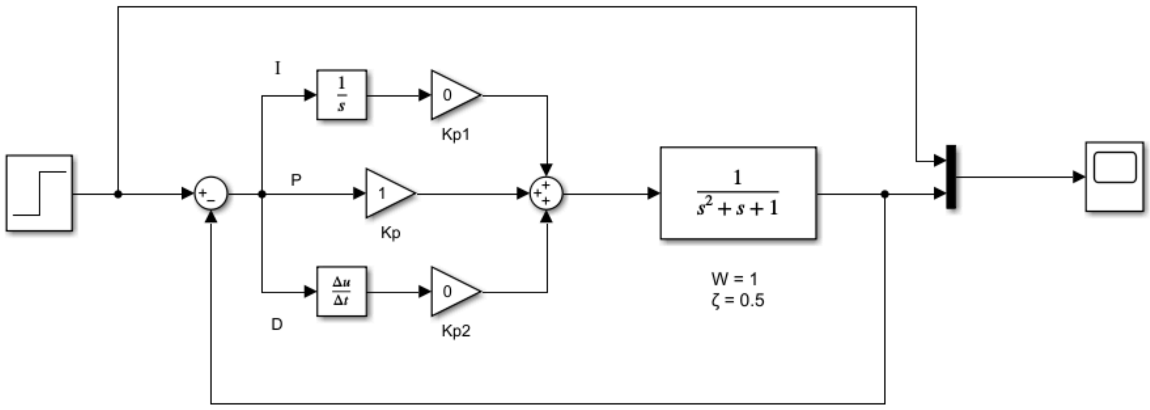

Figura 24. Sistema de segundo orden con PID, donde I=0, D=0 y P se varía

Para la frecuencia natural w se seleccionó: w = 1

Para el coeficiente de amortiguamiento ζ = 0.5

Dado que 0 < ζ < 1 significa que la respuesta del sistema será: Subamortiguado

La señal roja que se observa en las siguientes gráficas es el escalón o "step" de la entrada y la azul es la señal que se obtiene a la salida del sistema, es decir, la respuesta del sistema al escalón.

- **P = 1**

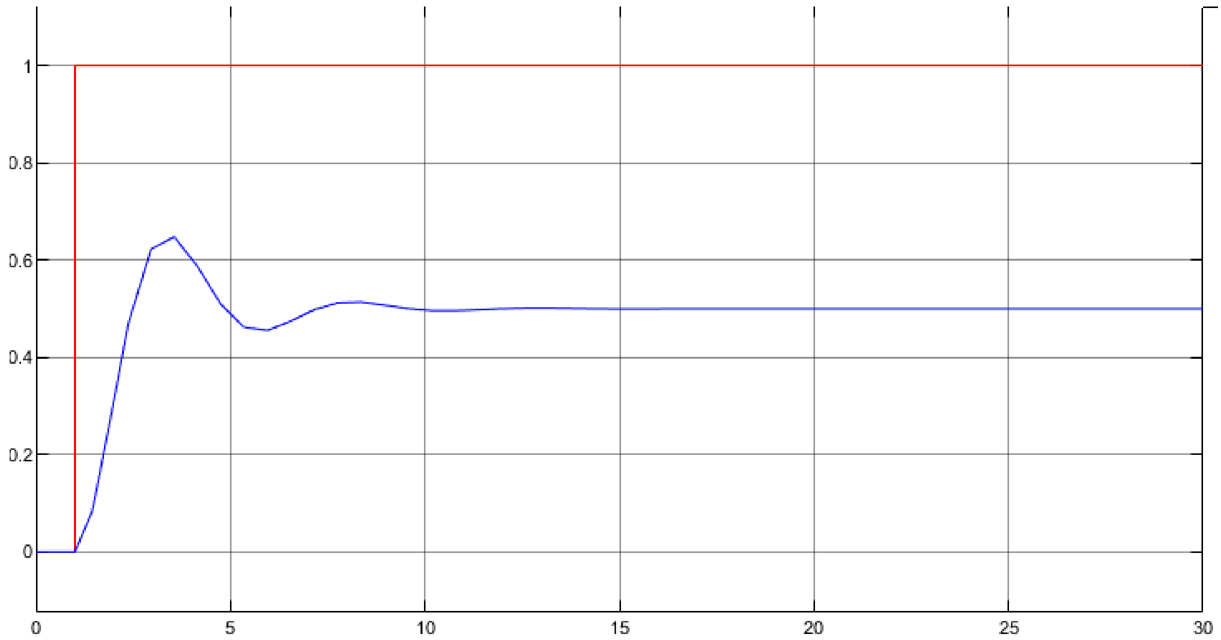

Figura 25. Sistema de segundo orden con P = 1

- **P = 3**

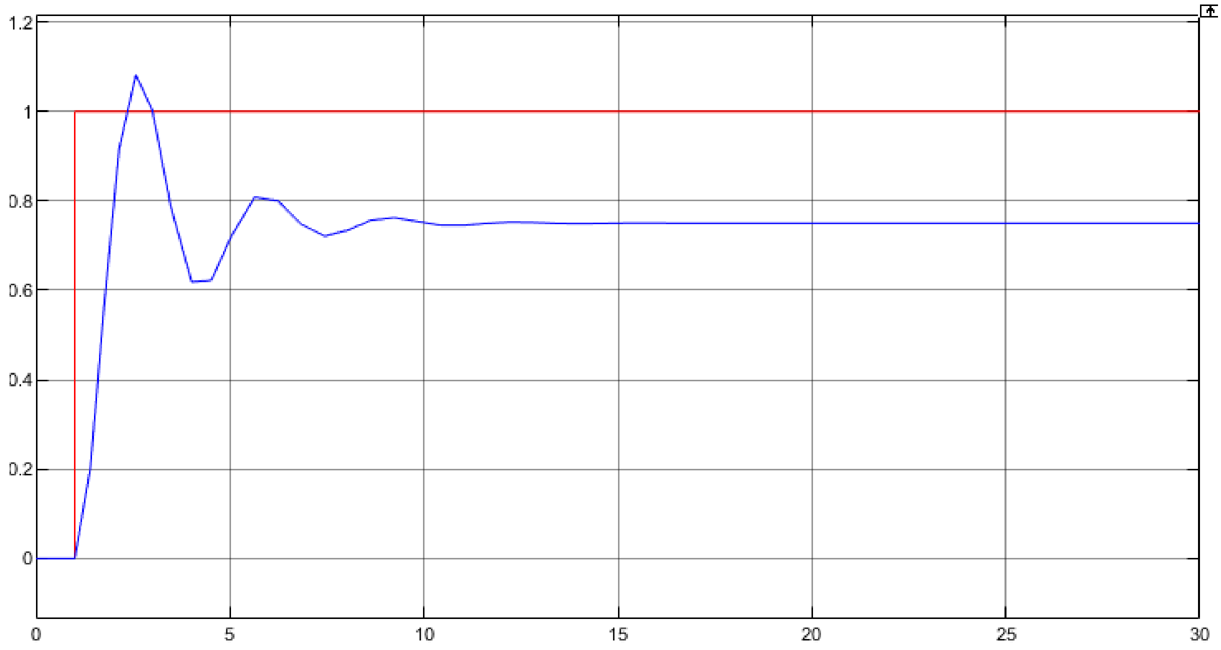

Figura 26. Sistema de segundo orden con P = 3

- **P = 5**

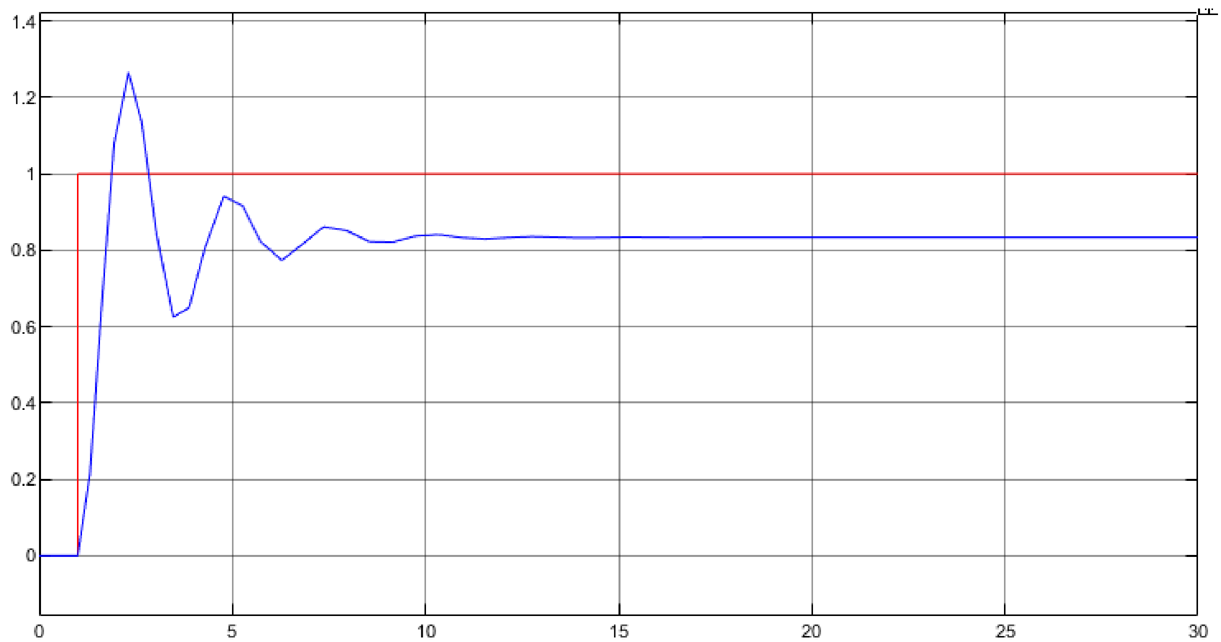

Figura 27. Sistema de segundo orden con P = 5

- **P = 10**

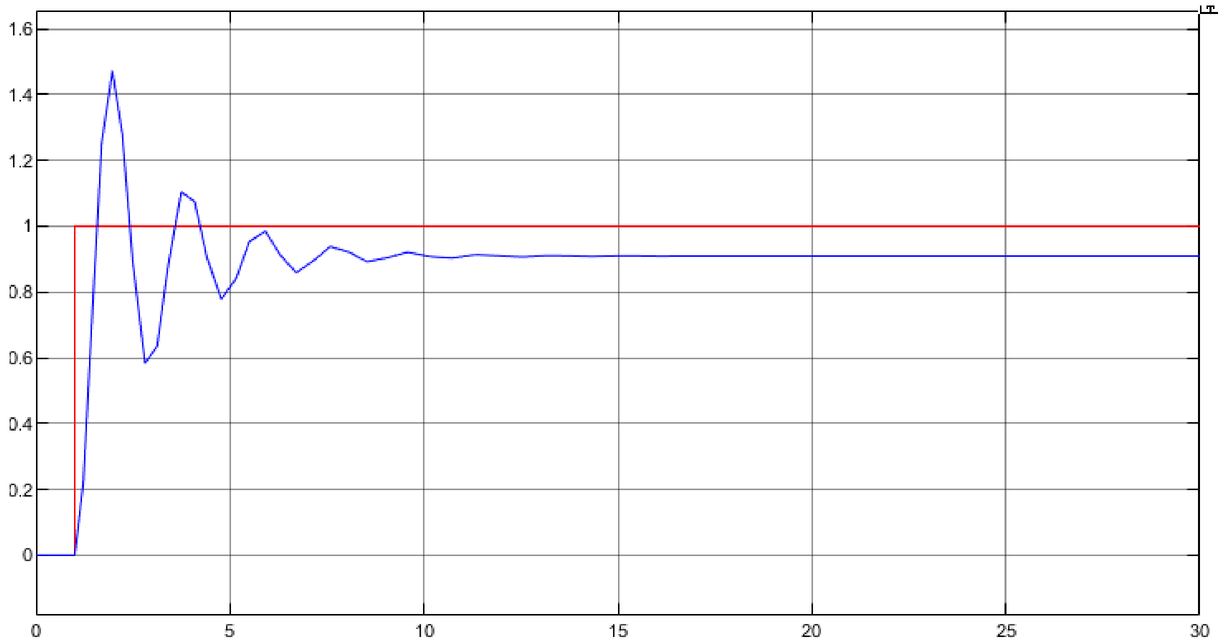

Figura 28. Sistema de segundo orden con P = 10

- **P = 20**

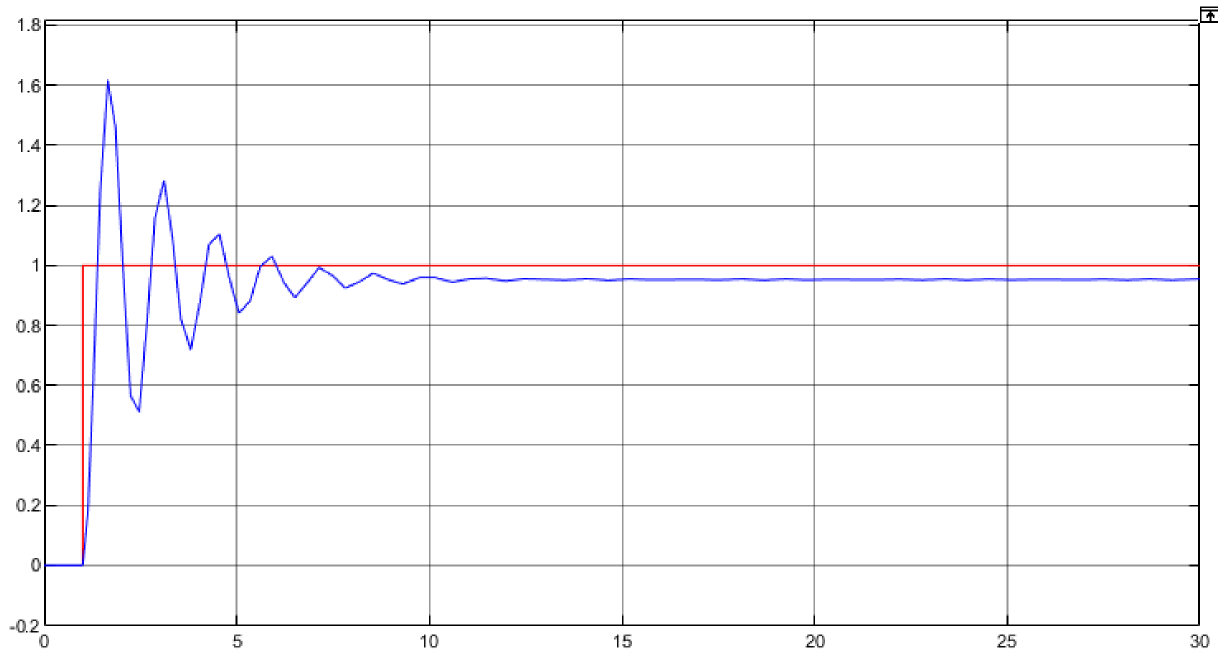

Figura 29. Sistema de segundo orden con P = 20

- **P = 50**

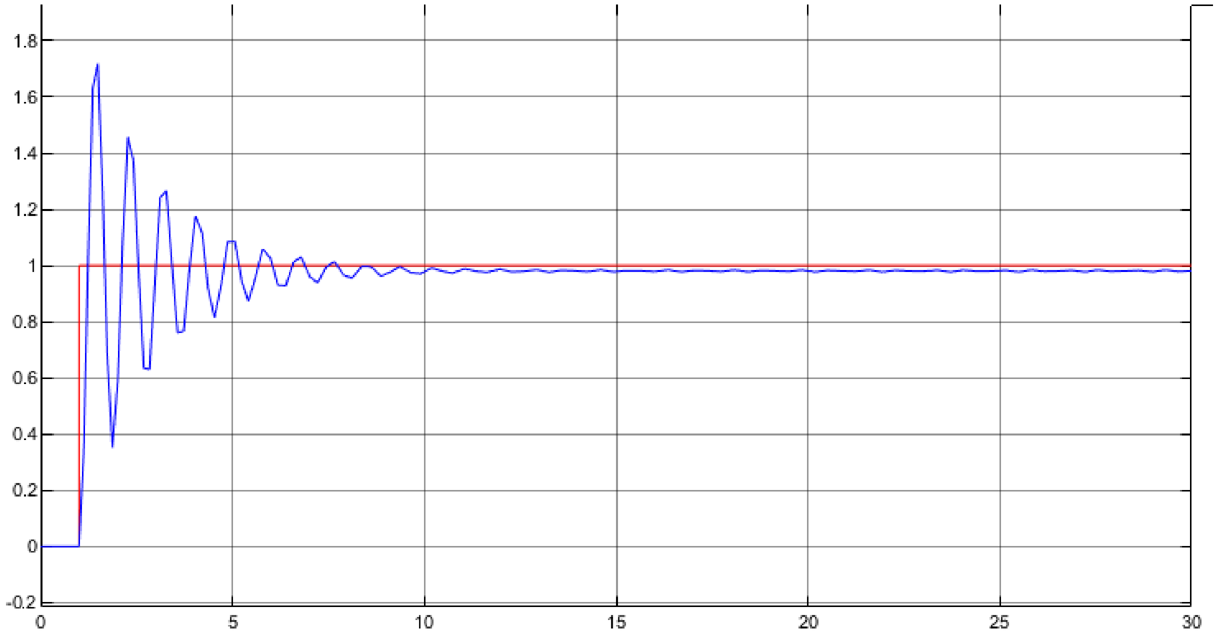

Figura 30. Sistema de segundo orden con P = 50

De las gráficas anteriores se observa que al variar el valor de P, con I = 0 y D = 0, las oscilaciones cambian tanto en magnitud como en cantidad, por lo tanto, el componente proporcional P del controlador PID afecta directamente las oscilaciones.

Cuando se aumenta el valor de P:

- Las oscilaciones tienden a tener mayor amplitud.
- La cantidad de oscilaciones puede aumentar antes de que el sistema se estabilice.

Cuando se disminuye el valor de P:

- Las oscilaciones tienden a tener menor amplitud.
- El sistema puede tardar más en reaccionar y ser menos oscilatorio.

El componente proporcional proporciona una fuerza de corrección proporcional al error, y aumentar su valor puede llevar a una respuesta más agresiva, mientras que reducirlo puede hacer que el sistema sea más lento en corregir errores. Pero si es demasiado alto, el sistema puede volverse inestable y oscilar más.

En este sistema subamortiguado con control PID, un valor alto de P (proporcional) típicamente induce mayores oscilaciones debido a la respuesta más agresiva del controlador. Esto ocurre porque el controlador intenta corregir el error más rápidamente, lo cual puede resultar en sobrecompensación y, por lo tanto, en oscilaciones más pronunciadas y frecuentes.

Sin embargo, en las gráficas se observa que el sistema comienza a estabilizarse alrededor de los 10 s, independientemente de si P es alto o bajo. Este tiempo se mantiene relativamente constante, lo cual sugiere que el sistema eventualmente encuentra un equilibrio, aunque con diferentes características de oscilación.