

Capítulo 6

Resultados de simulación y experimentales

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones numéricas ejecutadas en el entorno de desarrollo de LabView y los resultados de las pruebas efectuadas implementando el código en el módulo compactRIO y utilizando el simulador de procesos PCS327.

El propósito de las simulaciones es verificar la funcionalidad del código programado y la obtención de valores iniciales adecuados para los parámetros variables de la red. Como se realizó en el Capítulo 4, la red neuronal está caracterizada por los vectores A, B, C, D, W, así como el número de neuronas, la cantidad de épocas de aprendizaje y la función wavelet seleccionada como función de activación de las neuronas.

Durante la implementación en tiempo real del algoritmo se busca hacer una evaluación cualitativa del desempeño del control y conseguir un bajo tiempo de ejecución.

En las pruebas se busca controlar una planta y sintonizar el controlador durante la operación. Ambas pruebas se llevan a cabo asumiendo que se desconoce la función de transferencia de la planta.

6.1 Simulaciones en LabVIEW

Experimento 1: Control PID Wavenet para controlar un programa (VI) que simula un proceso de primer orden.

En estas pruebas se emplea una red neuronal de 10 neuronas. Los parámetros variables en este experimento son los valores iniciales de los vectores de la wavenet, así como las velocidades de aprendizaje y las ganancias iniciales del PID. Se emplea como wavelet madre la función RASP1 (RAtional Second order Poles):

$$\psi(\tau) = \frac{\tau}{\tau^2 + 1}$$

La red wavenet puede efectuar varias épocas de aprendizaje dentro de un ciclo de control. Para determinar una cantidad razonable de épocas, el experimento se repitió varias veces, seleccionando la cantidad de épocas que ofrece un porcentaje de error de 1% después del primer escalón, lo cual lleva a un lazo de control más rápido.

Épocas	Tiempo [s]
1	0.4404
3	0.442
5	0.4431
7	0.4443
10	.4457
15	.4469
20	.447
25	.4459
30	0.4444
35	0.5011
40	0.5027

Tabla 6.1 Épocas de aprendizaje y tamaño del error.

La diferencia en tiempo no resulta significativa en este experimento debido a que el ciclo de control tiene una duración de 50 [ms]. Entre 5 y 10 iteraciones ofrecen una respuesta razonablemente suave, mientras que más de 10 introducen oscilaciones. Las pruebas que se reportan a continuación se efectuaron con 7 épocas de aprendizaje.

La tabla 6.2 contiene los valores iniciales de los parámetros variables de la red.

	Valores iniciales	Valores finales
A	[0 5 10 15 20 25 30 35 40 45]	[5.8759 5.6956 4.6653 4.8752 3.8466 3.5537 3.6975 4.3631 4.6799 4.8209]
B	[5 5 5 5 5 5 5 5 5]	[-0.8593 4.6319 8.8246 14.4029 18.4711 23.4791 30.7175 35.2248 40.0813 45.0354]
C	[0.1 0.1]	[0.4321 0.4319]
D	[0.1 0.1]	[0.3357 0.3356]
W	[0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[4.9341 1.2617 1.1629 0.2721 0.4134 -1.6550 -2.8799 -1.1802 -0.5647 -0.3094]
Kp	0.7	0.7035
Ki	0.7	0.7204
Kd	-0.2	-0.2292

Tabla 6.2. Valores iniciales y finales de la wavenet.

La señal de entrada a este sistema fueron tres escalones de 5 V con duración de 5 segundos. La Figura 6.1 muestra la respuesta del sistema a esta señal de entrada.

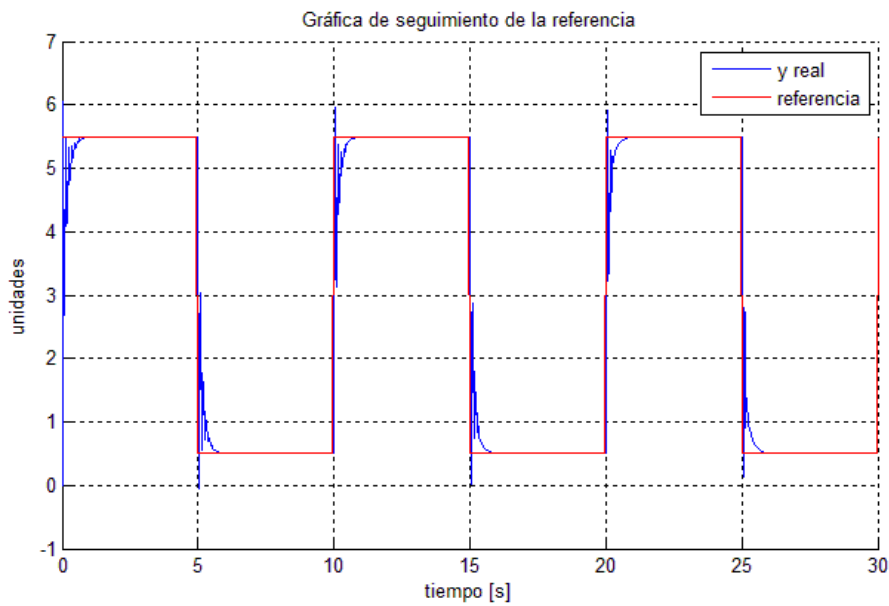


Figura 6.1. Respuesta del sistema.

A continuación se muestra la variación de los parámetros de control durante la ejecución del programa.

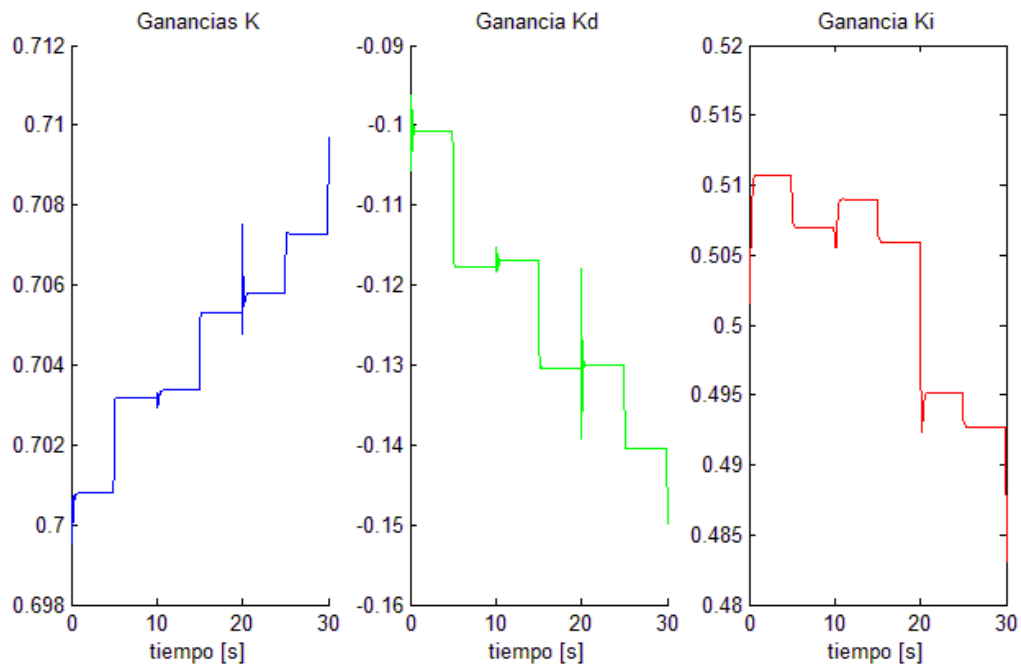


Figura 6.2. Variación de los parámetros del PID durante el tiempo de ejecución.

En este experimento, K_d se vuelve negativa

Experimento 2: En este experimento la función de entrada es una señal senoidal con un periodo de 5 s y se introduce una variación de la carga del sistema proporcional a la señal de entrada. El sistema opera durante 30 s.

Nuevamente se hace una comparación de la cantidad de épocas de aprendizaje con la disminución del tiempo en que se alcanza un error del 1%. El menor tiempo de reducción del error se obtiene utilizando cinco épocas de aprendizaje en cada ciclo de control.

Épocas	Tiempo
1	1.8858
5	1.8838
10	1.8842
20	1.8846
30	1.8846
40	1.8866

Tabla 6.3. Reducción del error.

La respuesta del sistema a esta entrada es

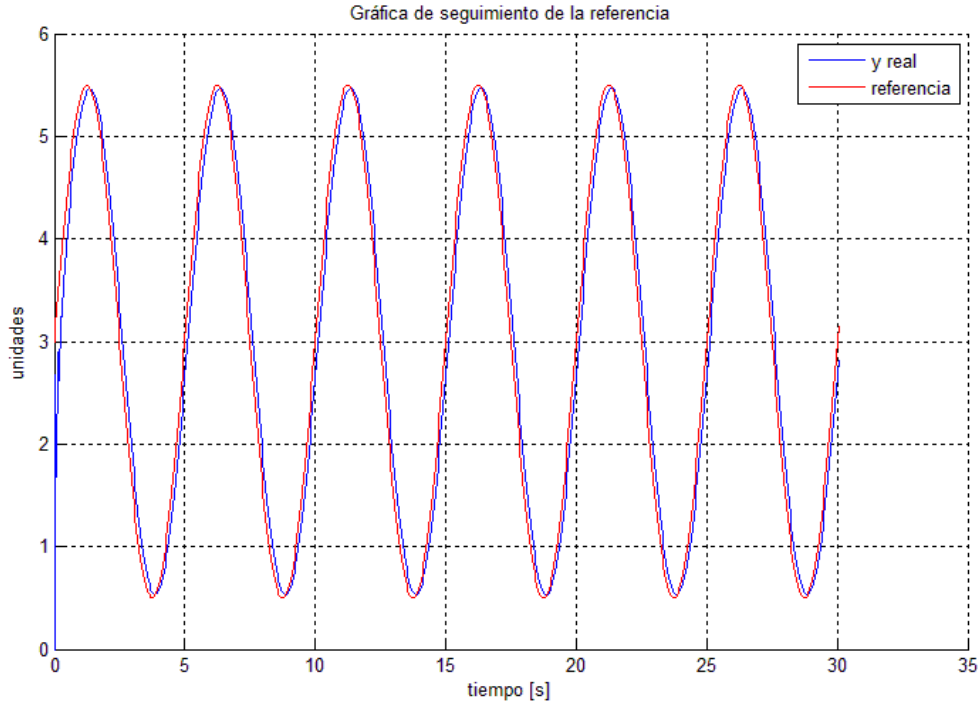


Figura 6.3 Respuesta del sistema a la señal senoidal.

La variación de los parámetros del controlador se ilustra a continuación.

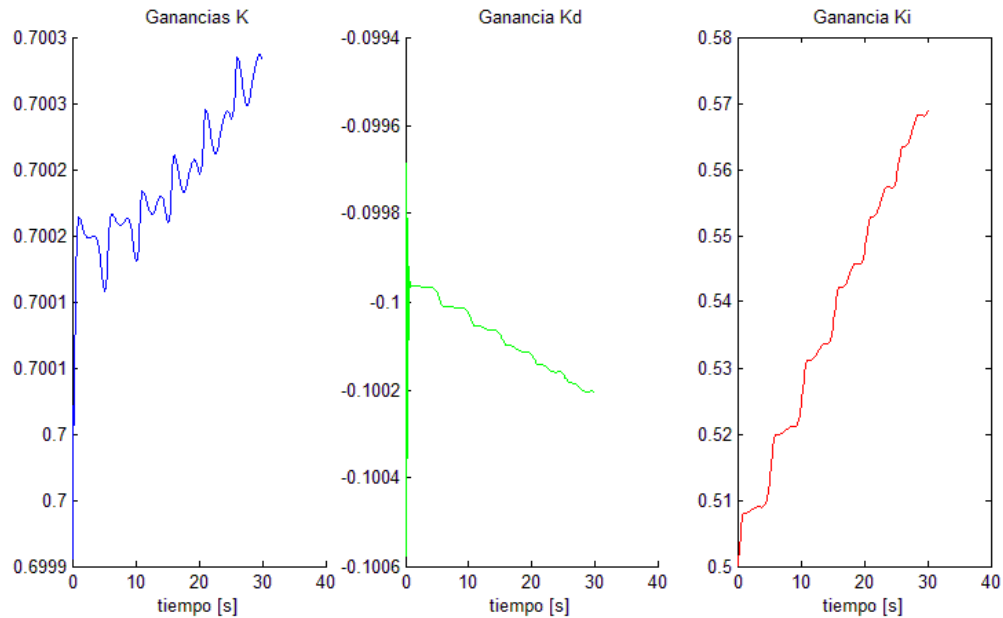


Figura 6.4 Variación de los parámetros del controlador.

6.2 Pruebas con el simulador de procesos

El simulador de procesos PCS327 es un equipo que permite simular procesos de primer, segundo y tercer orden. Estos procesos tienen constantes de tiempo ajustables de ya sea 10 ms o 1 s. También es posible agregar retrasos en el tiempo o perturbaciones a la entrada o salida del proceso. El simulador de procesos permite generar una planta compuesta por tres bloques cuya función de transferencia es $G(s) = \frac{100}{s+100}$. El equipo se muestra a continuación en la figura 6.5.

A partir de las simulaciones reportadas previamente se obtuvo un conjunto de valores aceptables para las variables de la wavenet y el PID. La implementación en compact RIO aprovecha de estos resultados, así como busca que el código pueda ejecutarse en el menor tiempo de procesamiento posible. Con este propósito, se reduce el tamaño de algunos de los vectores de la red, para reducir el tiempo de procesamiento.

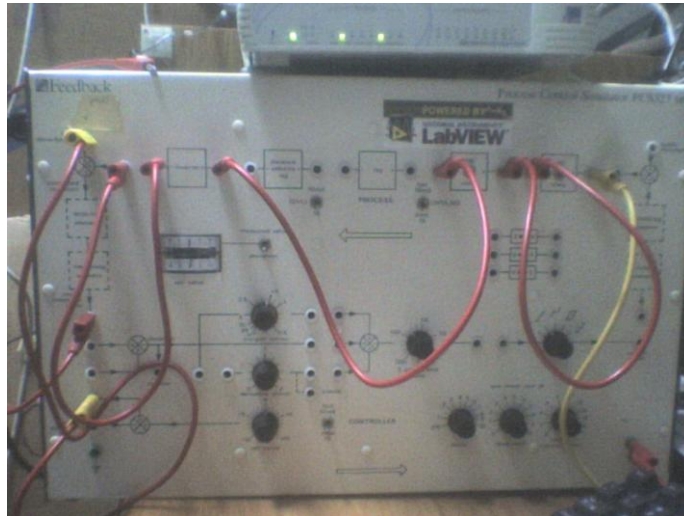


Figura 6.5. El simulador de procesos PCS327.

En estas pruebas no se leen las variables de la wavenet. La introducción de las rutinas de lectura y escritura al código del programa generan retrasos importantes en el tiempo de ejecución. Las lecturas efectuadas son de las ganancias del controlador PID y de las variables de control (variable manipulada, variable controlada, referencia y estimación de la wavenet). El mínimo tiempo que se consiguió para el ciclo de control fue de 5 ms. Las lecturas se realizan cada 30 ms.

Primer experimento: Se configura el módulo PCS327 como una planta de tercer orden con constante de tiempo de 10 ms.

Se emplea una red con siete neuronas y siete épocas de aprendizaje en cada ciclo de control.

	Valores iniciales
A	[0 5 10 15 20 25 30]
B	[5 5 5 5 5 5 5]
C	[0.1 0.1]
D	[0.1 0.1]
W	[0 0 0 0 0 0 0]
Kp	0.7
Ki	0.2
Kd	0.2

Tabla 6.4. Parámetros iniciales del PID Wavenet.

La señal de referencia son tres escalones de 5 V con duración de 1 s aplicados a los 2, 4 y 6 segundos de operación.

La figura 6.6 muestra el seguimiento de la señal de referencia, así como la señal de control y la aproximación hecha por la red wavenet.

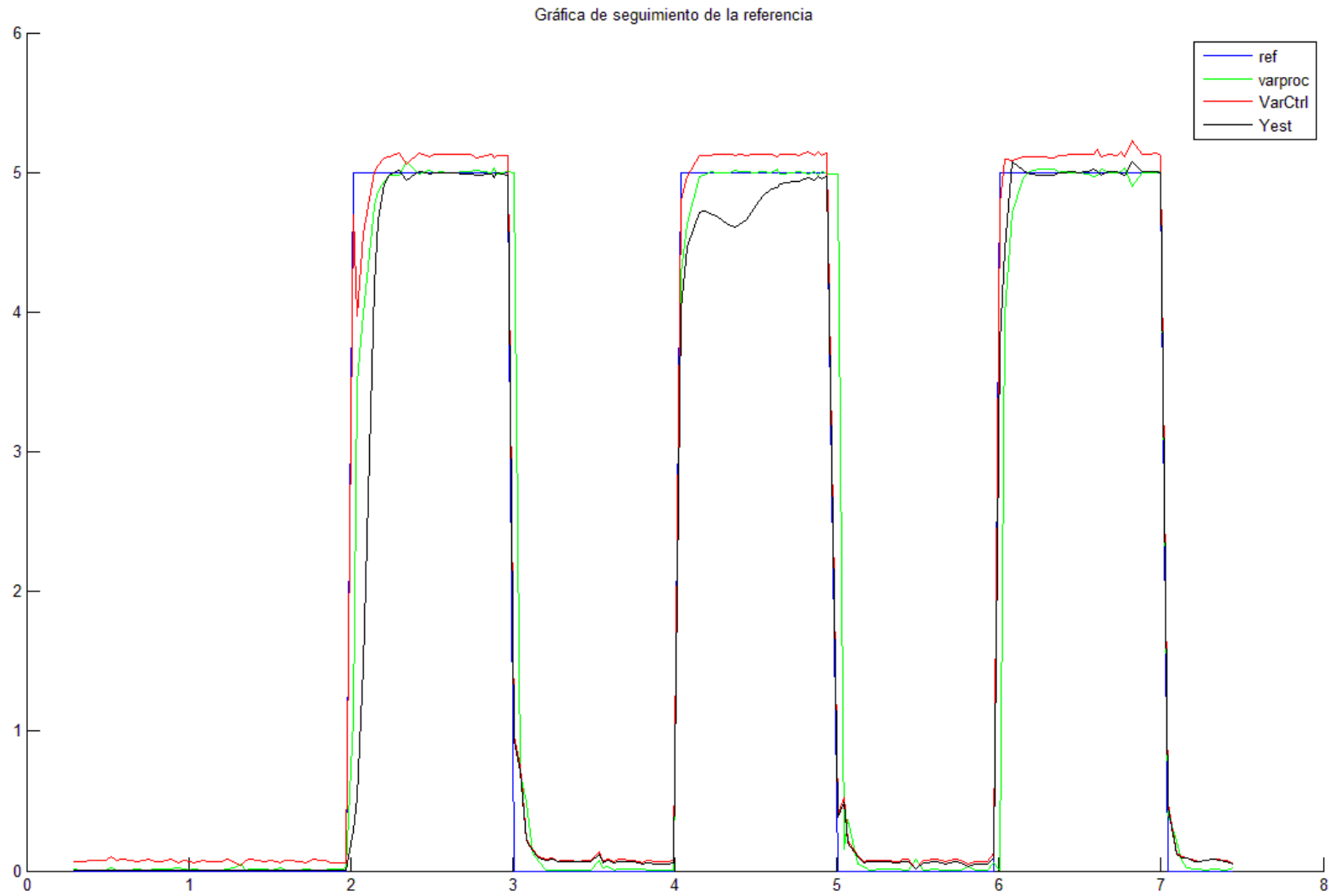


Figura 6.6. Respuesta del sistema con control PID Wavenet.

Se puede observar que existe una ligera oscilación de la variable manipulada en cada flanco de subida y de bajada.

La variación de las ganancias del controlador se muestra a continuación:

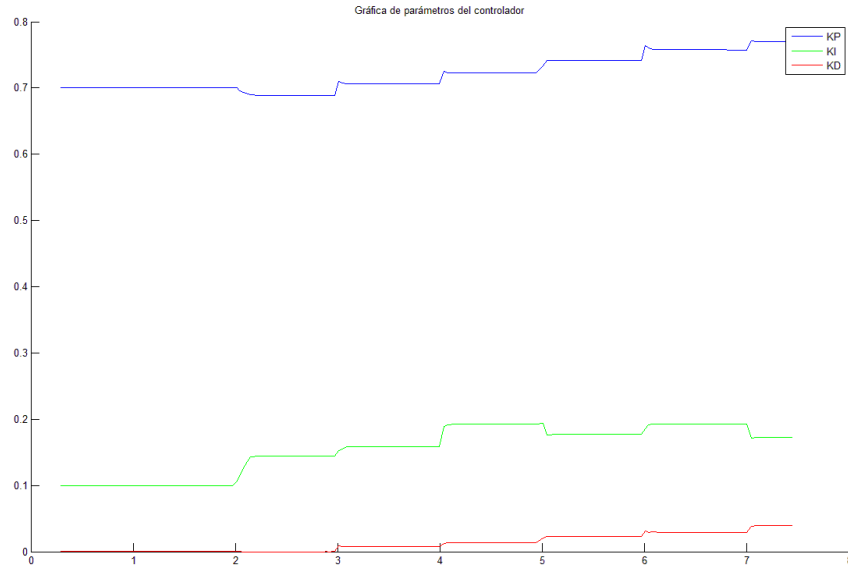


Figura 6.7. Variación de las ganancias del PID Wavenet.

Segundo experimento: Se configura el módulo PCS327 como un proceso de 2do orden con constante de tiempo de 10 ms. Se emplean las mismas condiciones iniciales que en el experimento anterior, y la misma señal de entrada. La duración de este experimento es de 16 segundos.

La figura 6.8 contiene el valor de la señal de referencia, la variable del proceso, la señal de control y la estimación de la wavenet para este experimento.

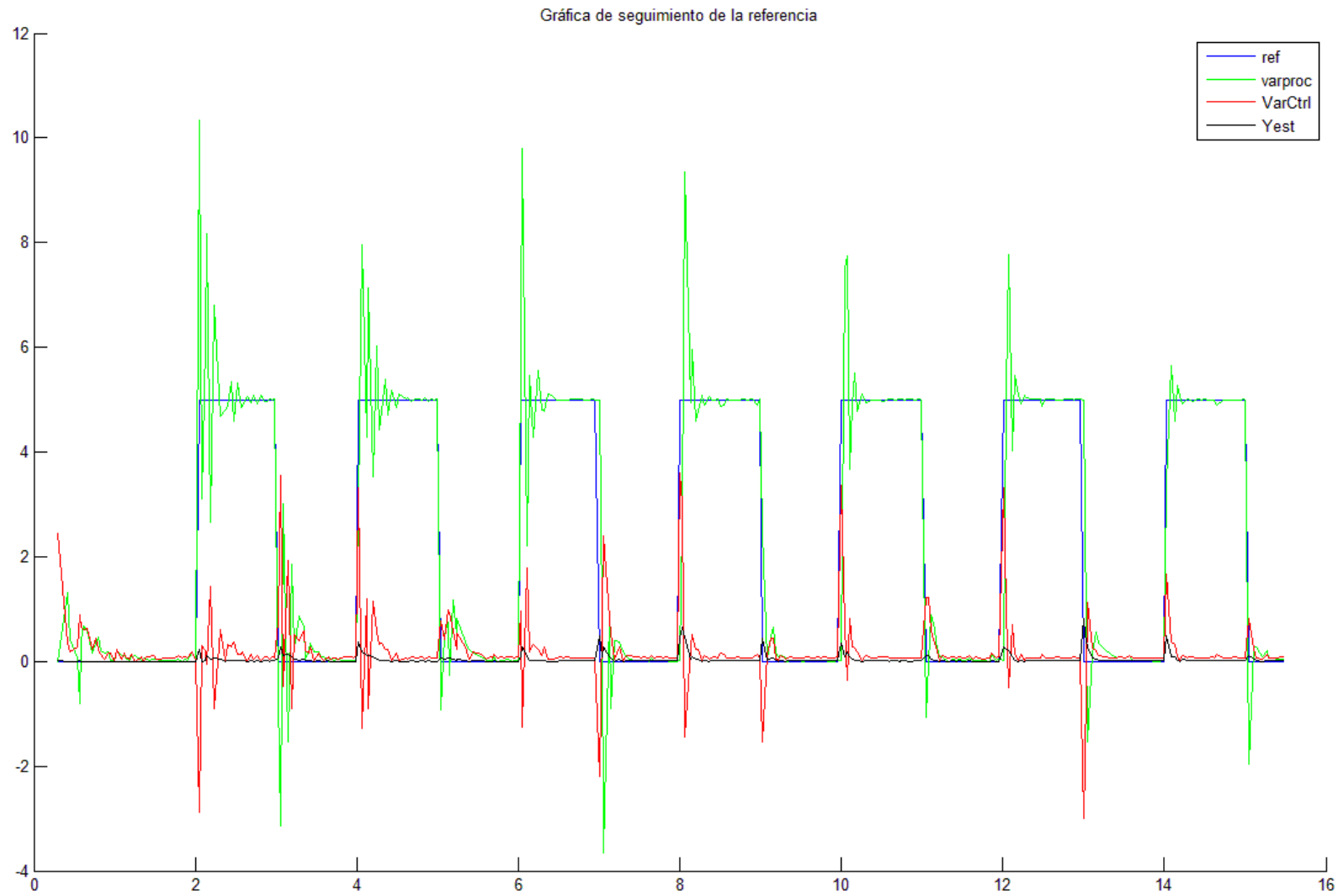


Figura 6.8. Comportamiento del sistema de segundo orden.

Se puede observar que la respuesta del sistema presenta un gran sobrepaso y un gran tiempo de asentamiento, que se reducen después de varios ciclos de control sin llegar a desaparecer completamente.

Las ganancias del controlador se ponen a continuación. Cabe notar que el tamaño de las oscilaciones disminuye a medida que K_p y K_i disminuyen y K_d aumenta ligeramente. Estos valores tienden a continuar su tendencia a disminuir. En experimentos similares con velocidades de aprendizaje mayores para K_i el sistema se inestabiliza en cuanto K_i adquiere un valor negativo.

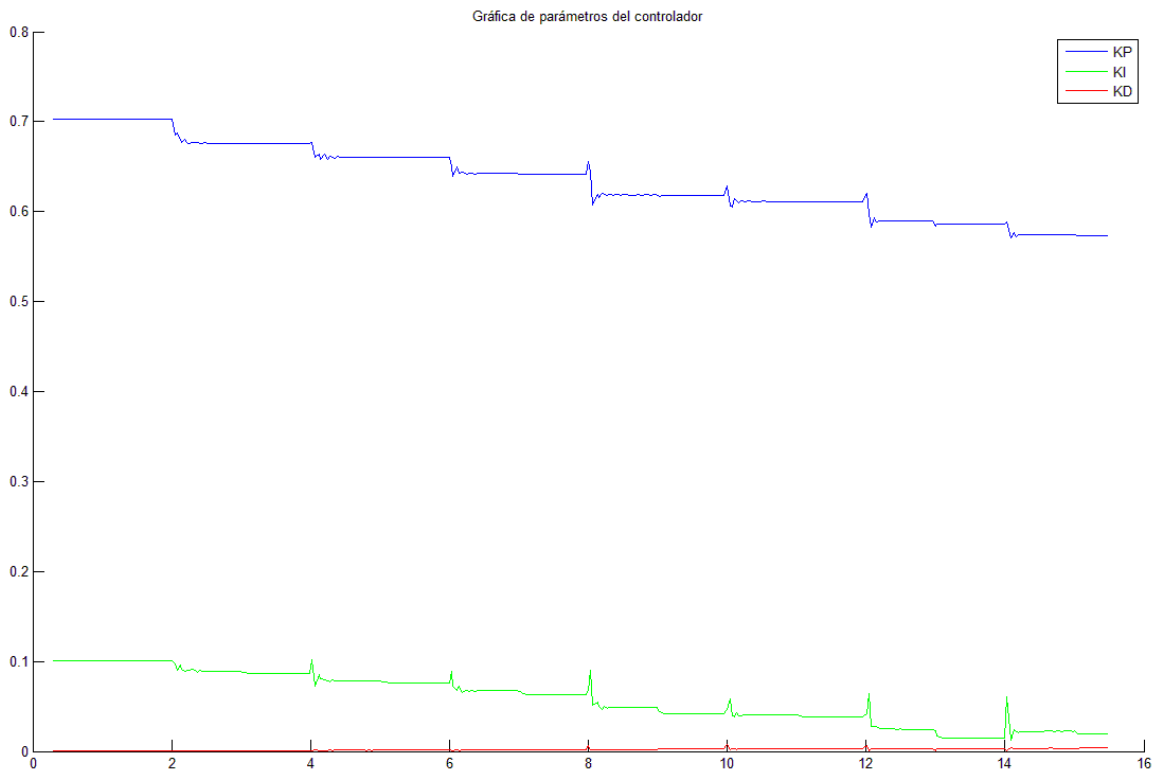


Figura 6.9. Variación de las ganancias del controlador.

Tercer experimento: En operación, se cambia el proceso de tercer orden a segundo orden, nuevamente a tercer orden y finalmente a segundo orden. Este experimento tiene como objetivo analizar el desempeño del controlador ante procesos que experimentan cambios bruscos en su función de transferencia.

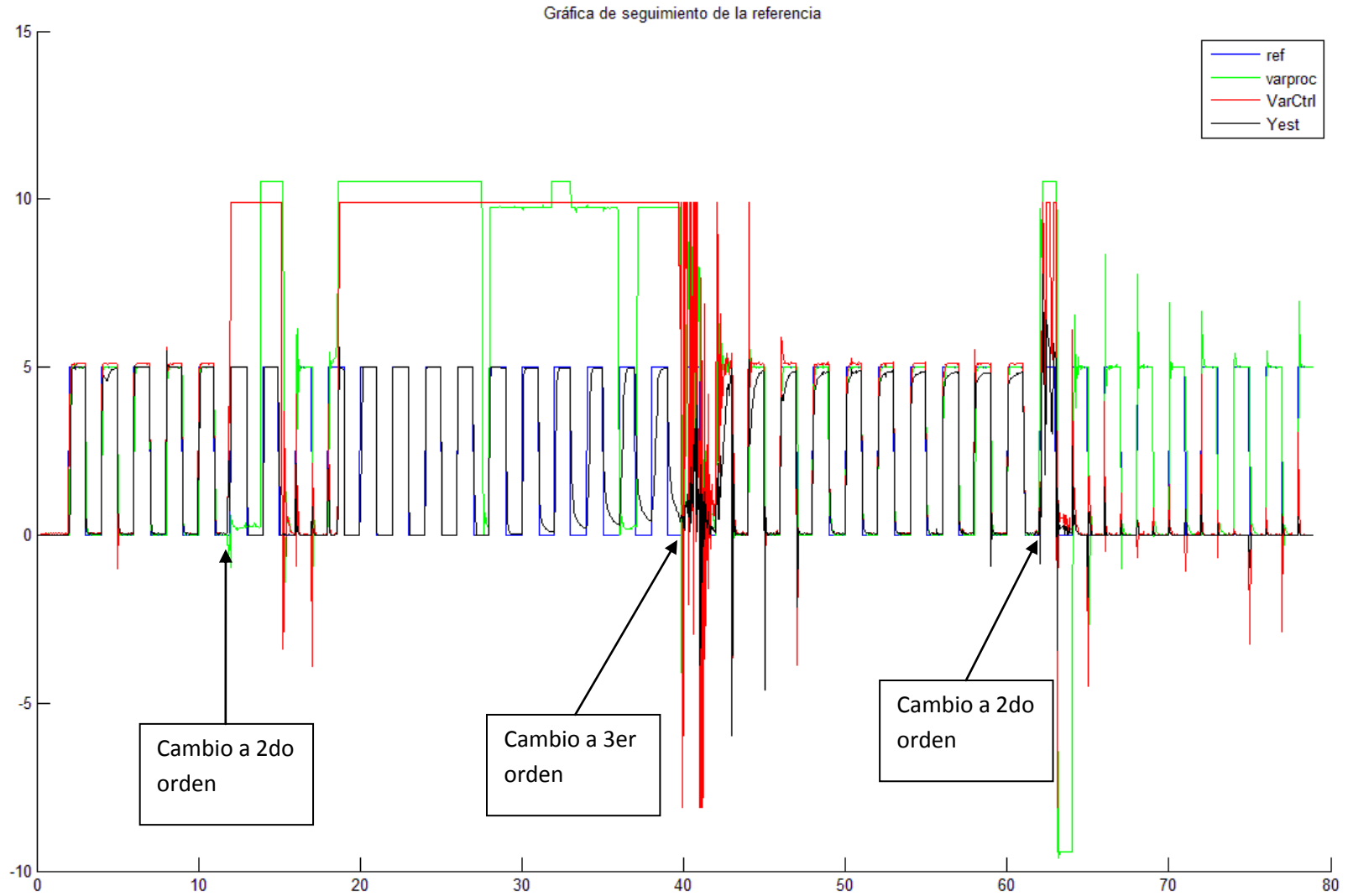


Figura 6.19. Comportamiento del sistema que cambia de orden.

El sistema muestra un comportamiento que puede considerarse adecuado cuando la planta controlada es de tercer orden. En cuanto se realiza el cambio de orden de la planta, el sistema se satura, presenta fuertes oscilaciones y se satura nuevamente. Al retornarlo a tercer orden, toma 6 [s] al sistema reducir las oscilaciones y presentar nuevamente un comportamiento suave sin sobrepasos. Al cambiar una vez más a una planta de segundo orden, el sistema ya entrenado presenta el comportamiento visto en la prueba anterior, reduciendo los sobrepasos y oscilaciones sin suprimirlas completamente. En las gráficas 6.19 y 6.20 se indican los instantes en que se realizó el cambio en la dinámica del proceso.

A continuación se muestra el cambio de las ganancias del controlador:

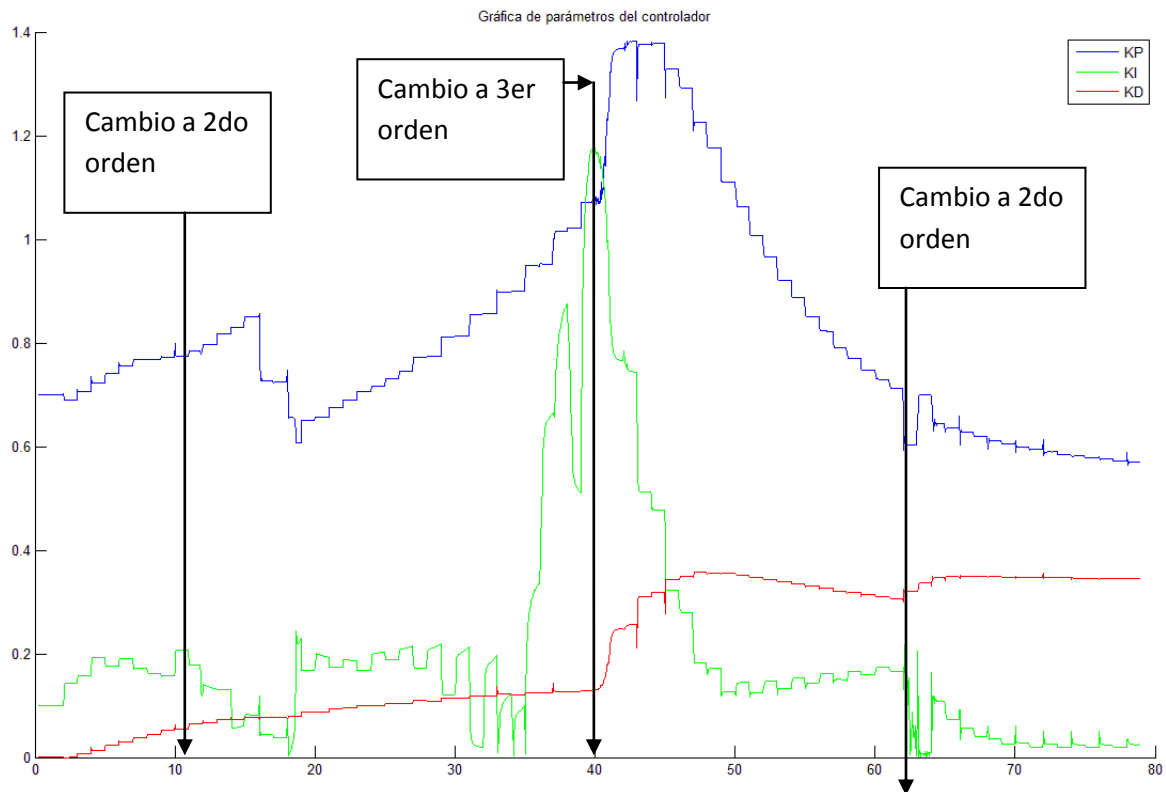


Figura 6.20. Ganancias del PID.

Cuarto experimento: El proceso se cambia de segundo a tercer orden en operación, dejando transcurrir varios escalones completos para el entrenamiento de la red wavenet.

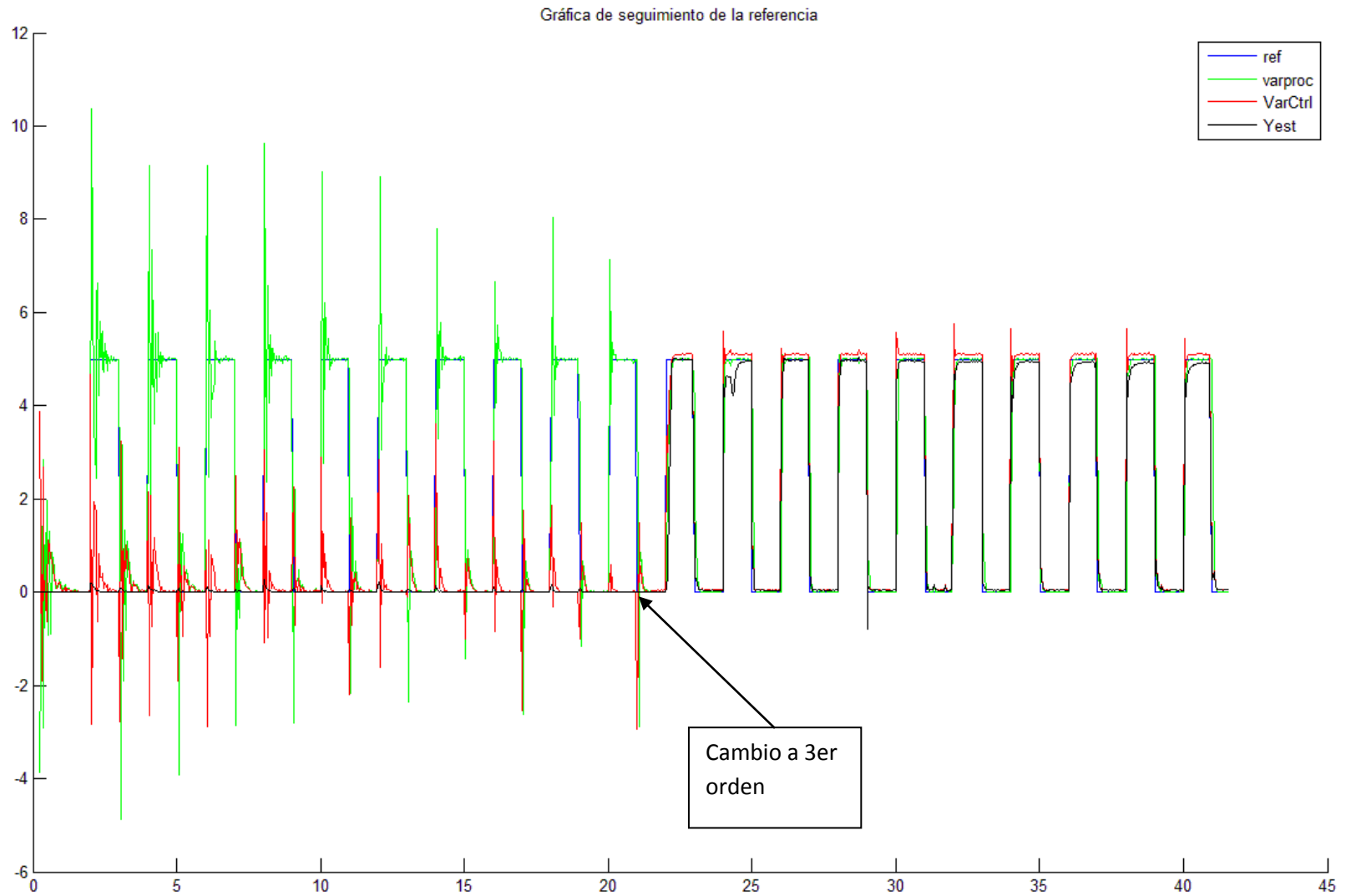


Figura 6.21. Comportamiento del sistema que cambia de segundo a tercer orden.

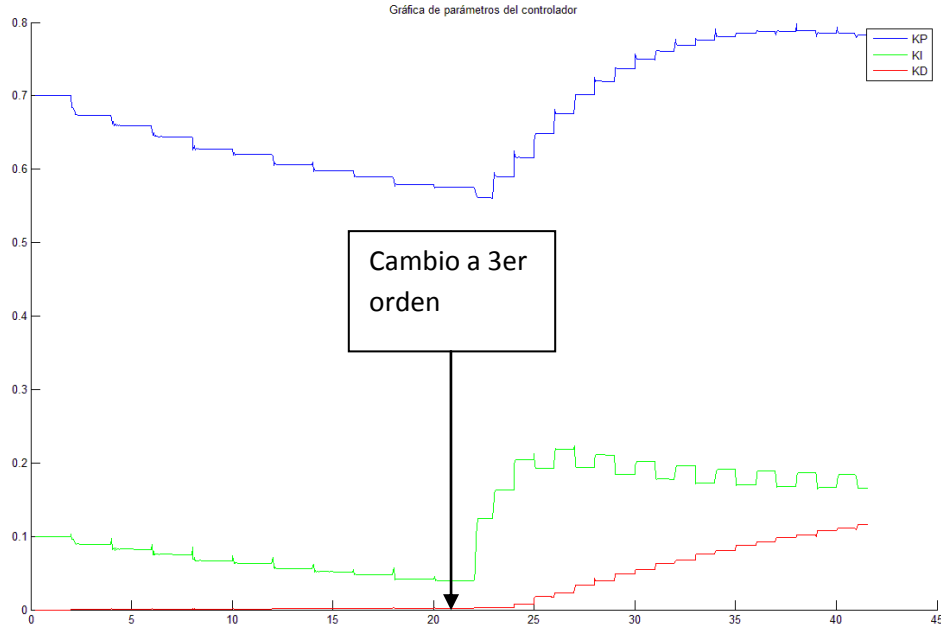


Figura 6.22. Ganancias del PID.

Los resultados obtenidos confirman lo del experimento anterior, donde las ganancias del controlador PID para el sistema de 3er orden son inestables para el sistema de segundo orden. El sistema, sin embargo, busca estabilizarse. Se observa que las ganancias del controlador se ajustan para provocar que el error se reduzca grandemente.