

Identificación y Diseño del Controlador para una Planta de Regulación de Presión

Carlos David Rodríguez Gallegos
Luis Alberto Rojas Flores
Msc. César Antonio Martín Moreno
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
cardarod@fiec.espol.edu.ec, arojas@fiec.espol.edu.ec, camartin@fiec.espol.edu.ec

Resumen

En procesos industriales la variable presión es muchas veces fundamental para asegurar el correcto funcionamiento de los mismos, pues ya sea que se esté controlando la presión de algún fluido como líquido, sólido o gaseoso, existe una cantidad de nivel máximo de operación y de seguridad, la cual hay que tomar en cuenta. El no tener un buen sistema de control en plantas de este tipo puede ser peligroso, no solo para el producto con el que se esté trabajando sino también para el equipo y el personal que se encuentre cercano a esta área. Las presiones excesivas o descontroladas son las que pueden provocar este tipo de consecuencias, razón por la cual para este trabajo se usa una técnica conocida como la “identificación de sistemas” en una Planta Reguladora de Presión, obteniendo así su función de transferencia, para posteriormente diseñar un adecuado control para la presión de la misma.

Palabras claves: procesos industriales, control, presión, seguridad, identificación de sistemas.

Abstract

In industrial processes the variable pressure is often essential to ensure the proper functioning of them, because whether you are controlling the pressure of a fluid such as liquid, solid or gaseous, there is a quantity of maximum level of operation and safety, which must be taken into account. Not having a good control system in plants of this type can be dangerous, not only for the product in which you are working on but also for the equipment and the personnel who work close to this area. Excessive or uncontrolled pressures are those who can cause those consequences, that is why in this project a technique known as the “systems identification” in a Pressure Regulating Plant is used, finding its transfer function, to then design an appropriate control for the pressure of this one.

Key words: industrial processes, control, pressure, safety, systems identification.

1. Introducción

Este trabajo consiste en la identificación de un sistema de regulación presión, el cual se realiza bajo lineamientos específicos junto con un análisis exhaustivo para alcanzar una representación igual o muy aproximada de la función de transferencia del proceso real.

El objetivo de este proyecto es poder identificar los parámetros de una planta de presión para posteriormente diseñarle un respectivo controlador. Este diseño se lo hará teniendo en cuenta los conceptos de control automático, generando así un controlador sencillo y adecuado para el manejo del sistema.

Es importante tener claro el funcionamiento de cualquier proceso para así realizar el control que se requiera de una manera más precisa. Para esto es necesaria la identificación de la planta, la cual nos permitirá observar cómo respondería la misma a diferentes tipos de entradas y saber matemáticamente cuáles son sus características.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Presión de fluidos en estado sólido

La presión se puede describir como la relación que hay entre una fuerza con respecto al área de contacto donde es aplicada (la fuerza debe ser perpendicular al área); en los estudios de cuerpos sólidos la presión viene dada por la fórmula:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

P: Presión generada.

F: Fuerza aplicada sobre la superficie.

A: Área de contacto.

2.2 Presión de fluidos en estado líquido

Es la presión debida al peso del propio fluido, pues depende de la densidad del mismo, la profundidad y la gravedad sobre la cual se está ejerciendo dicha presión, con lo que tenemos que la misma es:

$$P = \rho gh \quad (2)$$

Donde:

P: Presión Hidrostática.

ρ : Densidad del fluido.

g: Gravedad.

h: Profundidad a la que se está calculando la presión.

2.3 Relación de presión con el volumen y la temperatura en los cuerpos gaseosos

Si bien es cierto que la presión es un factor que afecta al cuerpo sobre el que se está dando, el mismo podrá presentar cambios en su estructura, entendiéndose estos como la temperatura y el volumen.

Estas relaciones se obtienen a través de la "Ecuación general de los gases", descubierta por Gay-Lussac:

$$PV = nR \cdot Temp \quad (3)$$

Donde:

P: Presión ejercida sobre el gas.

V: Volumen del gas.

n: Número de moles del gas.

R: Constante universal de los gases.

$$R = 0.08205746 \frac{atml}{molK}$$

Temp: Temperatura del gas.

Por lo que concluimos que al trabajar con cuerpos gaseosos, cambios en la presión pueden ocasionar también cambios en el volumen y en la temperatura del mismo.

3. Equipos utilizados

Las pruebas se realizaron a través de la Planta de Regulación de Presión, RT450.03, la cual cuenta con los siguientes instrumentos:

- Unidad de mantenimiento.
- Depósitos de presión.
- Válvula electro-neumática.
- Sensor de presión.
- Controlador lógico programable (PLC).
- Disyuntor electrónico.
- Fuente de voltaje de 24 Vdc.
- Compresor de aire.



Figura 1. Planta de regulación de presión.

4. Programas utilizados

Para poder llevar a cabo nuestros experimentos nos valdremos de diversos programas cuyo objetivo principal es el de lograr la comunicación de la planta además de tomar y analizar los datos de la misma, entre estos tenemos

- **MatLab:** (Matrix Laboratory) es un programa que representa sistemas a través de matrices, muy usado especialmente en las universidades con el cual se pueden analizar datos, tener representaciones matemáticas y gráficas de las mismas, además que se puede comunicar con otros programas y tarjetas de comunicación de datos.
- **LabView:** Usa el lenguaje G. (Graphic) puesto que la programación a través del mismo se da mediante bloques, lo cual lo convierte en un programa amigable para el usuario; también puede comunicarse con otros programas y tarjetas de comunicación de datos.
- **Moeller:** Configurador del PLC, en el cual se puede establecer su topología, las señales de entrada y salida, además de la forma de comunicación.

5. Diseño de la señal de entrada

5.1 Consideraciones para diseñar una señal de entrada

La señal de entrada con la cual vamos a identificar la planta debe tener características básicas:

- **No forzar a los actuadores:** Todo actuador tiene un rango de trabajo que hay que respetar pues de lo contrario se puede dañar, por lo que la señal de entrada debe adecuarse al mismo.
- **Que sea tan corta como sea posible:** Las plantas están en constante operación por lo que la señal que usaremos para experimentar debe ser lo suficientemente corta como para que la industria no pierda mucho tiempo para seguir con la producción pero lo suficientemente larga para poder tomar una señal que permita obtener un modelo aproximado de la planta.

- **De ser posible no alterar las variables del proceso que se están controlando:** Es decir trabajar con una mínima desviación del punto de ajuste y de la varianza, a fin de no forzar mucho a la planta.

5.2 Respuesta de la planta ante una señal escalón

Para poder diseñar una buena señal de entrada, debemos conocer ciertos parámetros de la planta, una forma de hacer esto es analizando su respuesta ante la señal escalón, como se muestra a continuación:

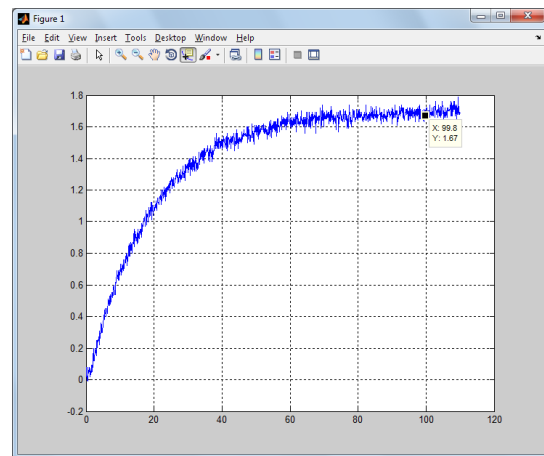


Figura 2. Respuesta ante una señal escalón.

De la cual obtenemos las siguientes constantes del sistema:

Tao= 20 segundos

Ganancia última= 1.67

Tiempo de estabilización= 92 segundos

5.3 Señal de entrada escogida

Después de una serie de pruebas la señal de entrada que mejor se adapta a la forma de respuesta de la planta es la “Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria (PRBS)”, la cual es una señal de dos niveles determinística que tiene un algoritmo para la generación del mismo, se diseñó con los siguientes parámetros:

- **Tiempo de Muestreo(0.1 segundos):** Tiempo en el cual se va a ir tomando los valores de la señal.
- **Numero de ciclos (2):** Total de ciclos de la señal.
- **Alfa (2):** factor representativo de la velocidad de respuesta de lazo cerrado con respecto a la de lazo abierto.
- **Beta (3):** factor representativo del tiempo de estabilización del proceso.
- **T_{dom}^{Lo} (18 segundos):** Constante de tiempo mínima estimada.

- T_{dom}^{Hi} (20 segundos): Constante de tiempo máxima estimada.

5.4 Respuesta al escalón de la señal escogida

Lo que se espera es que simulando el comportamiento al escalón de la planta por medio de la información obtenida a través de la señal de entrada escogida, sea similar a la respuesta al escalón de la planta real, la cual queda como sigue: Ganancia última= 1.67, T_{ao} = 22 seg., Tiempo de estabilización= 94 seg., comprobando su similitud con el comportamiento de la planta real (ver sección 5.2)

5.5 Análisis no paramétrico de la señal escogida

El objetivo del mismo consiste en ver si hay una relación entre la señal de entrada con respecto a la señal de salida, que es lo que se espera, realizando previamente un pre-blanqueo para facilitar el análisis, de esta tenemos:

Auto-correlación de la entrada:

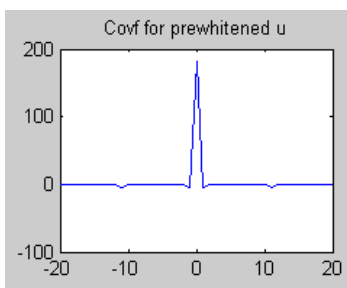


Figura 3. Auto-correlación de la entrada.

Como podemos apreciar, pese al pre-blanqueo, la señal no tiene totalmente los parámetros del ruido blanco, ya que sí posee cierta relación con valores anteriores, aproximadamente hasta un período atrás “ $k=1$ ”; pero se aproxima a la misma pues para los otros periodos son independientes sus comportamientos; únicamente hay una gran relación si se compara la señal en un tiempo con la misma señal en el mismo tiempo “ $k=0$ ” (por lógica debíamos obtener este resultado).

Auto-correlación de la salida:

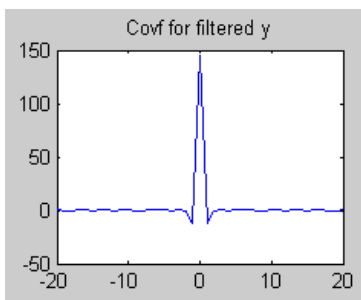


Figura 4. Auto-correlación de la salida.

La señal de salida es parecida a la de entrada, esto se debe a que la misma no posee mucha dependencia con respecto a sus valores anteriores, pero pese a que este no fue pre-blanqueada, el pre-blanqueamiento de la señal de entrada lo afecta, mostrando este resultado.

Correlación cruzada

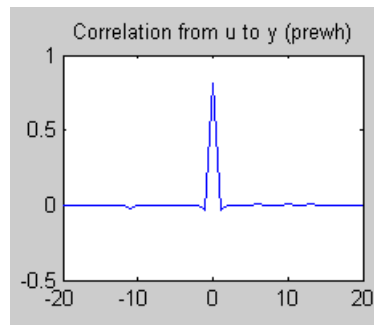


Figura 5. Correlación cruzada.

En este gráfico se puede ver la relación que hay entre la salida y la entrada para los diversos períodos, pese a que no hay una gran influencia de los valores anteriores de la entrada con respecto al valor actual de la salida, su valor actual sí lo afecta; por lo que satisfactoriamente podemos concluir que sí hay un relación entre ambas señales, dándonos confianza para realizar los análisis posteriores.

6. Obtención de la función de transferencia

El modelamiento de la misma se hace a través del análisis paramétrico, el cual puede representar al sistema de la siguiente forma:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}r(t) \quad (4)$$

Donde:

$y(t)$: salida de la planta.

$u(t-nk)$: valor de entrada de la planta cada “ n ” períodos anteriores.

$r(t)$: ruido presente.

$A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ y $F(z)$ son polinomios cuyos valores dependerán de la identificación de la planta; la misma que se puede representar como sigue:

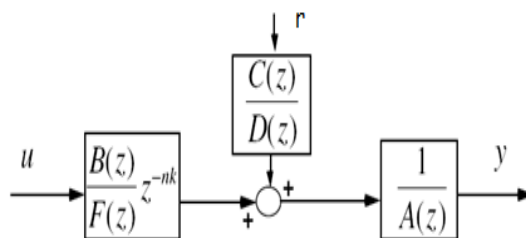


Figura 6. Diagrama de bloques de la identificación paramétrica.

6.1 Consideraciones para seleccionar la parametrización adecuada

- **Modelo de Salida:** Se compara el comportamiento de la señal real con respecto al de la parametrización, esperando que ambos sean muy parecidos.
- **Análisis residual:** Residual es la diferencia entre el valor observado y el valor estimado, por lo que se lo conoce también como error de predicción; lo que se obtiene del mismo es un análisis residual del sistema, en nuestro caso, la auto correlación residual de la salida (para saber si los errores son independientes) y la correlación cruzada residual entre la salida y la entrada; de la misma tenemos también el intervalo de confianza.
- **Intervalo de confianza:** Todo modelo de estimación tiene un grado de incertidumbre, la cual está marcada por las líneas segmentadas; con lo cual la región que está dentro de la misma es la verdadera respuesta del sistema (con un 99% de confianza), mientras que la región restante da una respuesta dudosa; razón por la cual por más aproximada que sea la respuesta de una señal parametrizada, si esta sale de los rangos de confianza no podrá ser tomada en cuenta, ya que no podremos confiar de su idoneidad.
- **Modelo no viable:** Indicará que no se puede hallar una función de transferencia, se dará cuando una vez hallado el modelo discreto, los coeficientes del numerador son mayores a los del denominador, lo cual expresado matemáticamente indica que somos capaces de obtener valores futuros y al ser esto imposible se genera un mensaje de error en MatLab.
- **Parsimonia:** Se basa en hallar una representación sencilla del modelo que tenga una buena aproximación al comportamiento de la planta real.
- **Respuesta al escalón:** Como se hizo en la sección 5.4, nos valdremos de la respuesta de la señal escalón como último recurso para comprobar que nuestra función de transferencia es una buena aproximación de la planta (Tiempo de estabilización=92 segundos, ganancia última=1.67, Tao=20 segundos).

6.2 Método de parametrización escogido

De las varias formas de parametrizar el modelo más conveniente resultó ser el Box-Jenkins, el cual parametriza a la planta y al mismo tiempo al ruido de forma separada, la cual se representa de la siguiente manera:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z)}r(t) \quad (5)$$

El cual tuvo los siguientes coeficientes en el plano discreto:

- $B(z) = -0.002706 z^{-1} + 0.003426 z^{-2}$
- $C(z) = 1 - 1.875 z^{-1} + 0.8811 z^{-2}$
- $D(z) = 1 - 2.105 z^{-1} + 1.228 z^{-2} - 0.1228 z^{-3}$
- $F(z) = 1 - 1.883 z^{-1} + 0.8833 z^{-2}$

La razón por la cual este fue escogido se debe a su respuesta ante las consideraciones previamente establecidas, de las cuales:

- **Modelo de Salida:** Al comparar la respuesta del mismo con el de la planta real, nos encontramos con un porcentaje de similitud del 78.88%, con lo cual tenemos una buena aproximación del comportamiento de la planta.

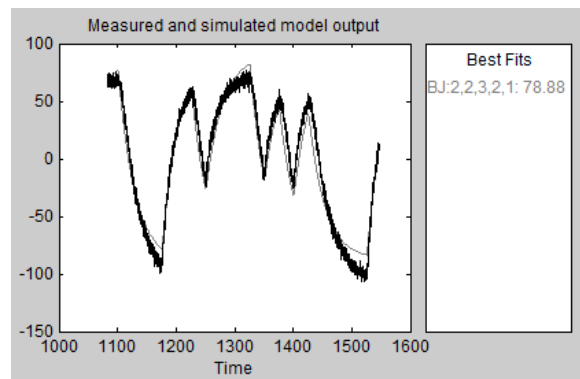


Figura 7. Modelo de salida.

- **Análisis residual e intervalo de confianza:** Como se puede ver en la figura 8 la señal está dentro del rango de confianza, por lo que podemos considerar que la misma es confiable.

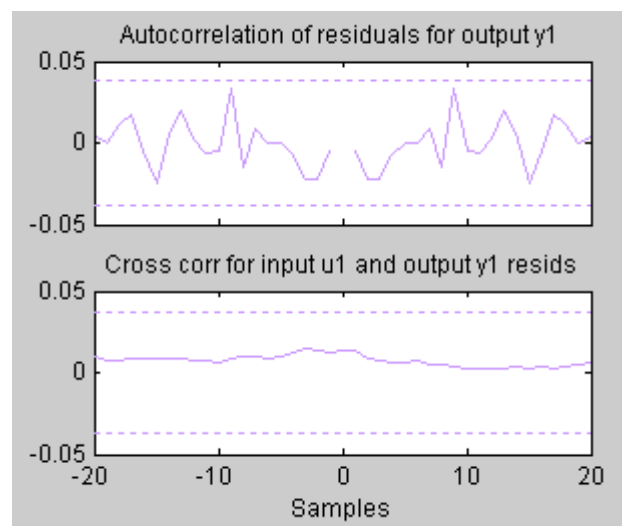


Figura 8. Análisis residual.

- **Modelo no viable:** Como podemos apreciar, el orden del denominador es mayor o igual al del numerador por lo que el modelo sí es viable.

- **Parsimonia:** Se buscó una representación sencilla pero acertada de la planta, obteniendo una función de transferencia de 2 polos y 1 cero (ver sección 6.3), con lo cual se cumple con la parsimonia.
- **Respuesta al escalón:** De este obtenemos los siguientes valores: Ganancia última= 1.76, T_{ao} = 28 segundos, Tiempo de estabilización= 110 segundos, los cuales al ser cercanos a los de la planta real (ver sección 5.2), nos dan la seguridad de que este método describe convincentemente a la planta de presión.

6.3 Función de transferencia

Con los coeficientes del método previamente seleccionado tenemos que la función de transferencia en el plano continuo es:

$$G = \frac{-0.032682 (s - 2.34)}{(s + 1.205)(s + 0.03556)}$$

Donde:

G: Función de transferencia de la planta de presión.

6.4 Análisis de la función de transferencia

Como se observa en la función de transferencia modelada, nuestro proceso consta de dos polos reales, los cuales describen la dinámica del proceso. Esta dinámica se refiere al tiempo en que la planta se estabiliza ante un cambio en su entrada y si es sobre-amortiguada o sub-amortiguada. En esta planta existe un polo dominante el cual se encargara de definir el tiempo que demora la planta en estabilizarse. En este caso el cero no afecta mucho a la dinámica del sistema, ya que su localización está bien alejada con respecto a su polo dominante. Normalmente un cero adelanta el tiempo de estabilización y si está localizado en la parte positiva del lugar geométrico de las raíces causa un efecto contrario.

7. Diseño del controlador

7.1 Criterios

Primero es necesario que el error de estado estacionario sea cero, pues nos interesa que la planta actúe en el punto de referencia que se le especifique. Así mismo no deseamos que tenga un sobre nivel porcentual elevado, por lo que para este caso podría ser no más del 15%, los cual también permitirá tratar de encontrar un tiempo adecuado de estabilización.

Se escogió un tiempo de estabilización 50 segundos ya que la planta en lazo abierto es de aproximadamente 110 segundos, con lo cual sería un reto lograr disminuir a más del 50%.

7.2 Obtención del controlador

Este controlador fue diseñado con la ayuda de una herramienta de Matlab que es "Sisotool", el cual trabaja con el lugar geométrico de las raíces, con el cual se obtiene un controlador "C" y un filtro "F" de la forma:

$$C = \frac{1.9346 (S + 0.156)}{S} F = \frac{0.15565}{S + 0.156}$$

Basándose en el siguiente modelo donde G es el proceso y H equivale a 1:

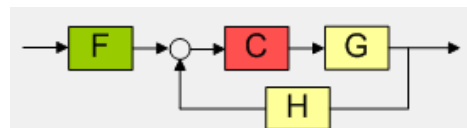


Figura 9. Modelo del controlador.

Nota: El filtro fue necesario para cumplir con la condición del sobre nivel porcentual (ver sección 7.1).

8. Resultados obtenidos

8.1 Resultados simulados

Al obtener el comportamiento simulado de la planta con el controlador y filtro previamente diseñado, tenemos el siguiente comportamiento de la salida con respecto a la entrada:

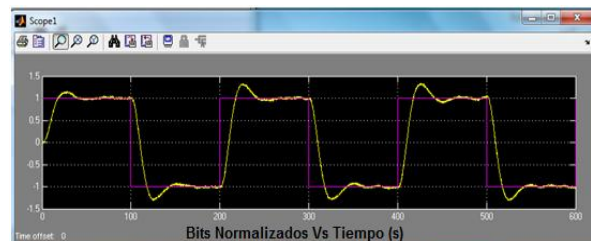


Figura 10. Señal de entrada y salida simulada.

Del cual como se puede apreciar cumple con las condiciones detalladas en la sección 7.1

8.2 Resultados reales

La prueba final consiste en observar el comportamiento de la planta de presión bajo el efecto del controlador y del filtro, esperando tenga el mismo comportamiento que su equivalente simulado (ver sección 8.1):

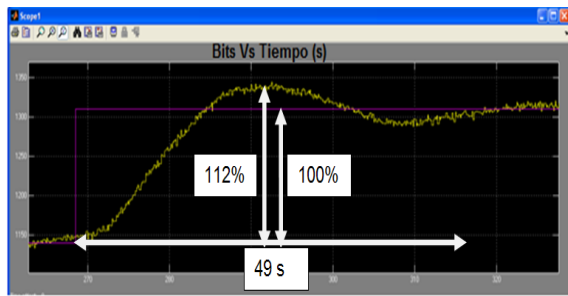


Figura 11. Señal de entrada y salida real.

Del cual como se puede apreciar, tiene una respuesta muy parecida a la simulado, comprobando así el correcto diseño del controlador.

9. Conclusiones

1. Con la identificación no paramétrica podemos comprobar que existe una relación entre la señal de entrada y de salida, lo cual nos permite continuar con los siguientes procesos eliminando las posibilidades de hacer una mala identificación.
2. Basándonos en las características de los modelos paramétricos se puede escoger cuál de estos es el más apropiado para nuestra planta ya que los mismos caracterizan de manera única al proceso.
3. La mejor parametrización de la planta de regulación de presión fue la Box-Jenkins, ya que esta parametrizaba tanto a la señal de entrada como al ruido por separado.
4. Como la planta de presión poseía dos tanques de almacenamiento, se intuía que la función de transferencia encontrada sería de segundo orden, comprobando esto posteriormente.
5. El controlador hallado mediante el método de Sisotool de Matlab, fue apropiado para realizar el control en la planta con las especificaciones dadas, ya que como se observó en los resultados reales, la planta de regulación de presión respondió como se esperaba, por lo que se concluye que bastó un PI para obtener un buen control de este proceso permitiendo así un error estacionario de cero.

10. Recomendaciones

1. Es importante tener en claro todos los conocimientos teóricos con respecto a la identificación de sistemas para dar una explicación apropiada de los procedimientos y resultados de la misma.
2. Se recomienda tratar de obtener la mayor cantidad de datos de la planta como la constante de tiempo, ganancia, tiempos muertos, entre otros. El obtener correctamente estos valores servirán para procedimientos posteriores como por ejemplo, obtener una correcta frecuencia de muestreo.
3. Es preferible elegir una señal que describa bien a la planta bajo un modelo sencillo a otra que la

describa un poco mejor pero con un modelo mucho más complejo.

11. Agradecimientos

A Dios por habernos dado la vida y la voluntad para esforzarnos tanto y a nuestras familias y amigos que supieron estar en el momento adecuado dando palabras de aliento.

12. Referencias

- [1] Serway A., Beichner J., Física para Ciencias e Ingenierías, McGraw-Hill 5ta. Ed., 2002.
- [2] Ogata, K., Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Prentice Hall 2da. Ed., 1998.
- [3] Ogata, K., Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- [4] Ljung, L., System Identification: Theory for the User, Prentice Hall, 1987.
- [5] Ljung, L. y Glad T., Modeling of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1994.
- [6] Hakvoort R.G., System Identification for Robust Process Control, Prentice Hall, 1991.