

# Identificación y diseño del controlador para un sistema de regulación de caudal de líquido.

Jorge Luis Viscarra Zambrano  
Jonathan Abraham Avilés Cedeño  
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  
lviscarr@fiec.espol.edu.ec, javiles@fiec.espol.edu.ec, camartin@fiec.espol.edu.ec

## Resumen

*En este documento se realiza un estudio de un sistema de regulación de caudal de líquido, teniendo como objetivo principal hallar el modelo matemático del proceso mediante el método de identificación de sistemas y se prueba su utilidad desarrollando un controlador para el sistema. Para esto se presenta el funcionamiento del sistema de caudal y las razones por las cuales es conveniente controlar esta variable. También se explica el diseño de la planta a ser identificada, dimensionamiento de los elementos y diseño de circuitos eléctricos de control y fuerza. Se muestra además el diseño de la señal de entrada a ser utilizada en este método. Para la identificación del sistema se utiliza el programa Matlab, mostrando en detalle todas las pruebas realizadas para llegar a obtener un modelo matemático adecuado. Y se finaliza con el diseño de un controlador para la planta en base a la función de transferencia obtenida en la identificación del sistema.*

**Palabras claves:** caudal, identificación de sistemas, modelo matemático, controlador.

## Abstract

*This document is a study of a system fluid flow control, having as a main objective find the mathematical model of the process by the method of systems identification and test its usefulness for developing a controller system. For this operation is presented flow system and the reasons why it is desirable to control this variable. It also explains the design of the plant to be identified, dimensioning of the elements and circuit design electrical control and power. It also shows the design of the input signal to be used in this method. For system identification using the Matlab program, showing in detail all the evidence made so as to obtain a mathematical model appropriate. And it ends with the design of a controller for the plant based on the transfer function obtained from system identification.*

**Key words:** flow, systems identification, mathematical model, controller.

## 1. Introducción

El enfoque del presente trabajo es demostrar la utilidad de la identificación de sistemas en el estudio de procesos industriales y en el desarrollo de controladores para los mismos, en nuestro caso más específicamente para un sistema de regulación de caudal. Para demostrar esto, nos proponemos implementar una planta en la cual se haga circular agua, siendo el flujo de agua la variable controlada. Teniendo la planta implementada buscaremos obtener su modelo matemático mediante los métodos de identificación de sistemas, y diseñar un control de caudal partiendo del modelo matemático del proceso, el cual deberá cumplir con todas las especificaciones que deseamos.

## 2. Herramientas y conocimientos disponibles.

### 2.1 Sensores, actuadores y métodos de control en sistemas de caudal.

En este proyecto utilizamos como sensor de caudal un sensor de turbina, como actuador y método de control lo hicimos mediante el control de la apertura de una válvula con actuador eléctrico.

### 2.2 Modelado de sistemas.

Para entender y controlar sistemas complejos debemos, obtener modelos matemáticos cuantitativos de ellos, por tanto es necesario analizar relaciones entre las variables. Teniendo en cuenta que tratamos con sistemas de naturaleza dinámica, las ecuaciones descriptivas son generalmente ecuaciones diferenciales. Resolviendo estas ecuaciones diferenciales obtendremos una representación matemática del comportamiento de las variables en el sistema. Para simplificar el método de solución podemos linealizar las ecuaciones y entonces aplicar el método de la transformada de Laplace.

### 2.3 Identificación de sistemas.

La identificación de sistemas es la obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio. Debemos recordar que al momento de realizar la identificación tendremos a la salida la sumatoria de la dinámica que aplica la planta a la señal de entrada, la cual puede ser aleatoria o determinística y la dinámica que aplica la planta a señales de ruido las cuales son aleatorias.

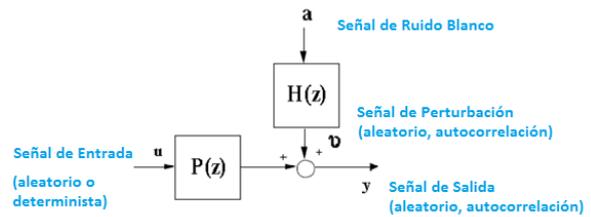


Figure 1. Diagrama de bloques general para la identificación de sistemas.

## 3. Diseño e implementación de la planta.

### 3.1 Esquema de la planta.

El sistema consiste en hacer circular agua de un tanque en la parte inferior a un tanque en la parte superior y luego de regreso al primer tanque, siendo la variable a controlar el caudal de agua de descenso. Existiendo un camino de ascenso del líquido y uno de descenso del líquido, se ha decidido colocar determinados elementos en cada uno de estos. En el camino de ascenso del agua se encuentra una válvula check utilizada para cebar la bomba hidráulica. Luego tenemos una bomba hidráulica, la cual está encargada de dar al sistema la diferencia de presión necesaria para subir el agua hasta el tanque superior. Después de esto encontramos la válvula de control cuya abertura será variable y finalmente otra válvula check. En cuanto al flujo de descenso del agua como se mencionó será en base solo a la presión debido a la fuerza gravitacional, existiendo en el camino de bajada del líquido una válvula de paso de 3/4 de pulgada, de la cual el agua baja a una bifurcación que da paso a dos flujos distintos. Uno que pasa por una válvula de 3/4 de pulgada que actúa como flujo de carga y otro flujo que es la salida de nuestra planta.

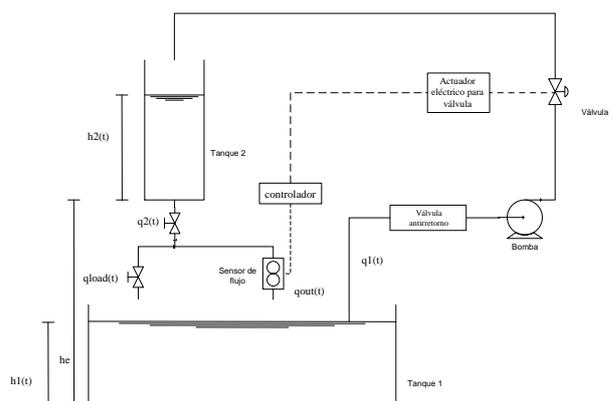


Figure 2. Esquema de la planta.

### 3.2 Circuitos eléctricos y electrónicos.

En este proyecto utilizamos tanto circuitos electrónicos para el procesamiento de señales, control y visualización de las variables deseadas; como circuitos eléctricos que nos sirven para alimentar los actuadores, sensores, bombas y elementos pasivos que necesitan de la energía eléctrica para funcionar.

#### 3.2.1 Circuitos de control del actuador eléctrico.

El actuador eléctrico que tenemos recibe dos señales de 120 Vac. Al recibir una de las señales el actuador abre la válvula y al recibir la otra el actuador cierra la válvula de 1/2 pulgada. Diseñamos un circuito electrónico que recibe una señal de 0 a 5 voltios, que representa el porcentaje de abertura deseado en la válvula. La señal llega al convertidor analógico - digital de un microcontrolador PIC16F887, el elemento más importante del circuito. En otro de los puertos analógicos del microcontrolador llega una señal de voltaje que indica la posición actual de la válvula. En el actuador eléctrico existe un indicador de la posición de la válvula, que depende de un eje que gira de 0 a 90 grados al pasar la válvula de totalmente cerrada a totalmente abierta. Acoplamos un potenciómetro de precisión que nos sirve para obtener la señal de voltaje que nos indica la posición de la válvula, la cual va a un puerto analógico del microcontrolador.

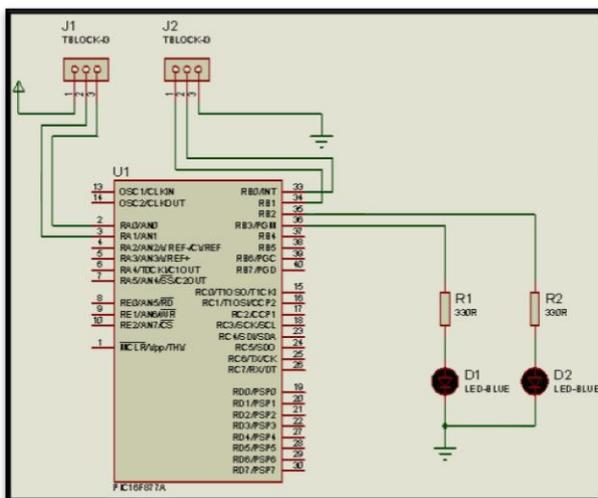


Figure 3. Microcontrolador de control de los relés (16f887).

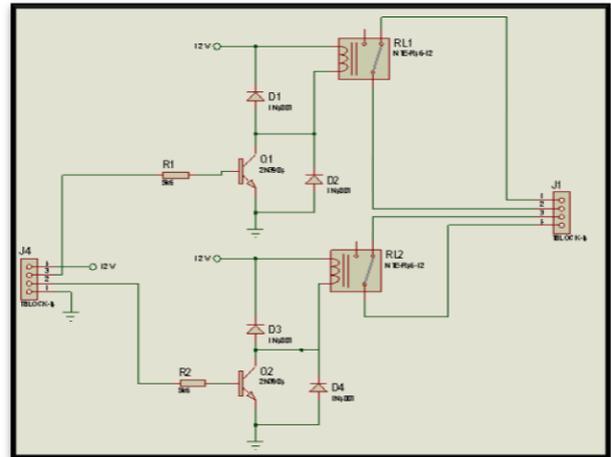


Figure 4. Placa de relés para controlar el actuador eléctrico.

#### 3.2.2 Circuitos del proceso de señal de la señal de la salida del sensor de caudal.

Del sensor obtenemos una señal de corriente de 4 a 20 [mA]. Esta corriente la hacemos pasar por una resistencia de 312.5 ohmios, que obtenemos de un potenciómetro de 1 kohm. De este modo tenemos un voltaje en esta resistencia de 1.25 a 6.25 voltios. A esta señal de voltaje le restamos los 1.25 voltios obteniendo una señal de 0 a 5 voltios que representan el flujo de agua a través del sensor que va de 2 a 40 l/min.

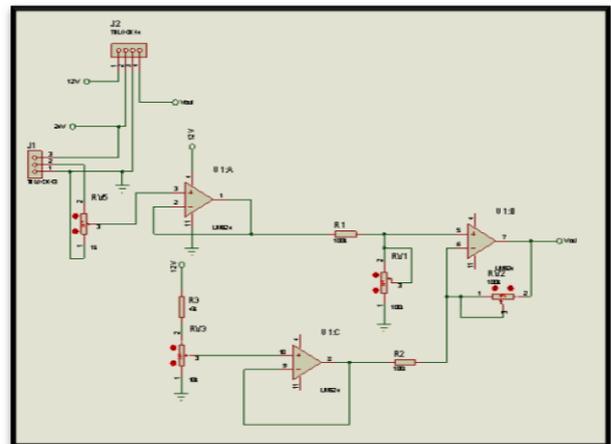


Figure 5. Circuito acondicionador de la señal del sensor.

### 3.3 Diseño de la señal de entrada para la identificación.

Hemos elegido utilizar una señal PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) para la identificación, puesto que es la señal con más parecido al ruido blanco.

La señal la hemos diseñado utilizando la interfaz gráfica InputDesignGui.

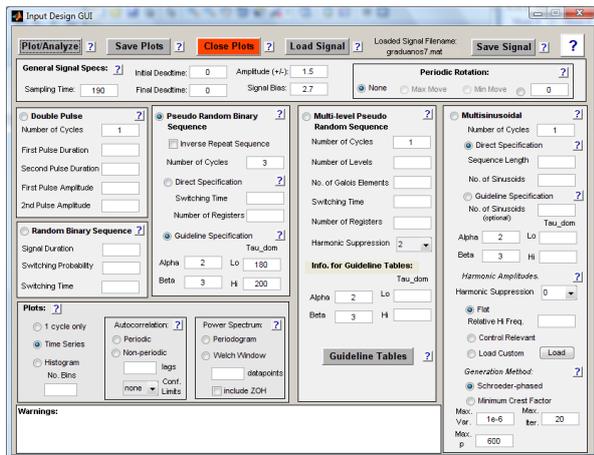


Figure 6. Input Design GUI.

Cálculo de la constante de tiempo dominante del sistema:

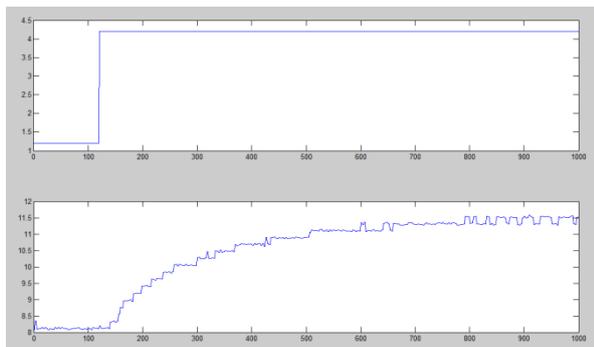


Figure 7. Prueba con entrada de paso a la planta real.

$$\tau_{\text{dominante}} = \frac{\text{retardo}}{2} + \tau_{\text{ao}} = \frac{20 \text{ seg}}{2} + 180 \text{ seg} = 190 \text{ seg}$$

Con esto podemos fijar el valor de la constante de tiempo dominante del sistema entre los valores de 180 y 200 segundos los cuales serán utilizados en el diseño de la señal de entrada:

- Tao dominante Lo: 180 segundos.
- Tao dominante Hi: 200 segundos.

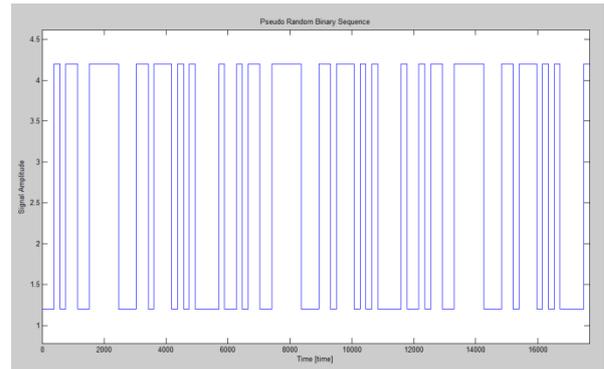


Figure 8. Señal de entrada diseñada para nuestra planta (PRBS).

#### 4. Proceso de identificación.

Para el proceso de adquisición de datos se ha desarrollado un programa en SIMULINK - MATLAB, el dispositivo (la tarjeta) de adquisición de datos es la USB-6009 de NI-Instrument.

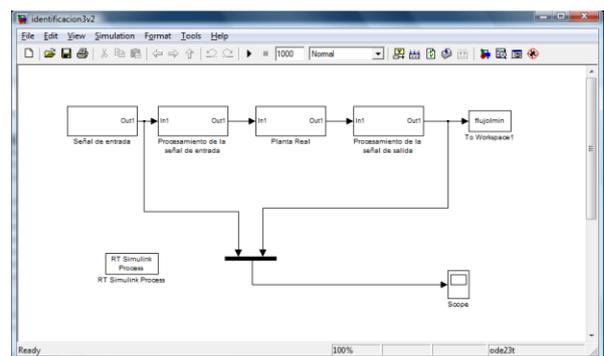


Figure 9. Programa para adquirir datos de la planta.

Con la señal de entrada previamente diseñada, se las ingresan al programa para que este controle el proceso y adquiera la información deseada para nuestro posterior estudio. Una vez escogido los datos, se hace un tratamiento de esta señal y se deja lista la señal para realizar el proceso de identificación.

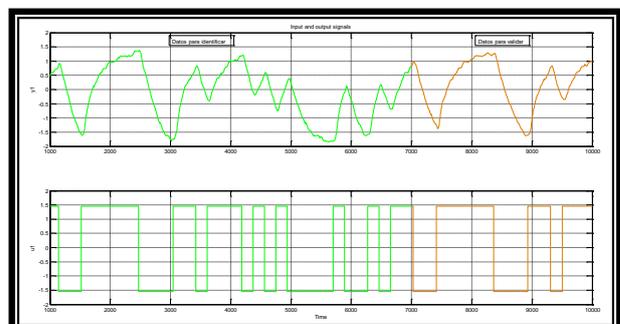


Figure 10. Datos escogidos para identificar y validar.

#### 4.1 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:

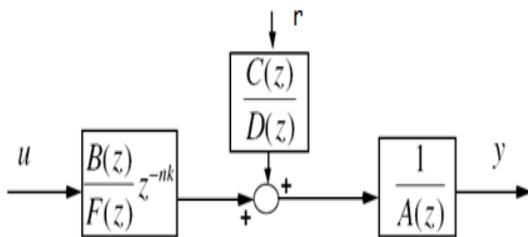


Figure 11. Diagrama de bloques de la identificación paramétrica.

#### 4.2 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).

#### 4.3 Comparación y elección del método de parametrización.

En la tabla siguiente se describen los mejores resultados obtenidos con las cuatros estructuras analizadas. De aquí se elige la respuesta que mejor represente a nuestra planta:

MODELO	APROXIMACIÓN (%)
arx431	77,34
amx3331	76,38
oe231	75,81
bj33331	72,22

Cada uno de estos modelos los analizamos individualmente en las secciones anteriores. A partir de esto podemos concluir que el modelo amx3331 es el que se ajusta a las respuestas de la planta real. Además de los criterios antes mencionados para elegir los modelos, debemos tener un criterio previo de nuestra planta a analizar y las ecuaciones que gobiernan en nuestro proceso, ya que según esto escogemos el orden de la dinámica que rige el sistema.

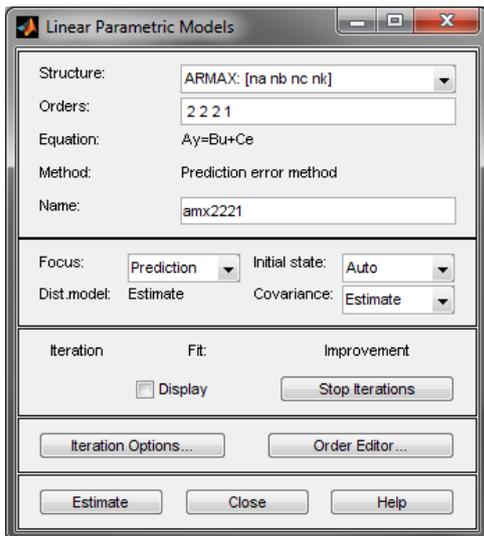


Figure 12. Linear Parametric Models (ARMAX).

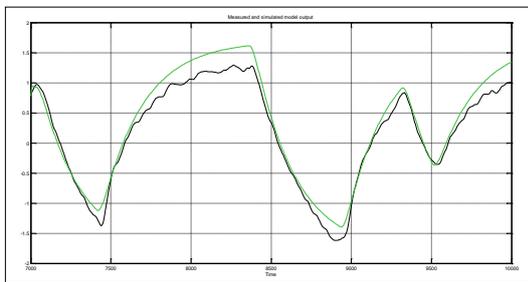


Figure 13. Comparación y simulación del modelo con los datos de validación.

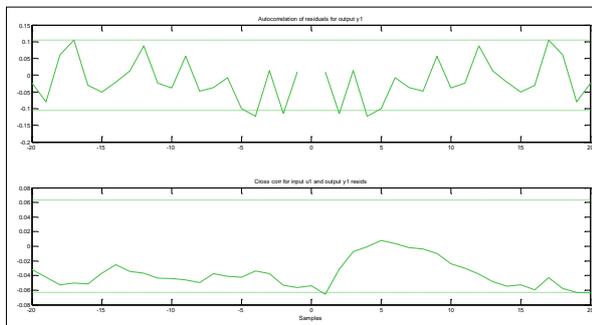


Figure 14. Análisis residual con el modelo ARMAX seleccionado.

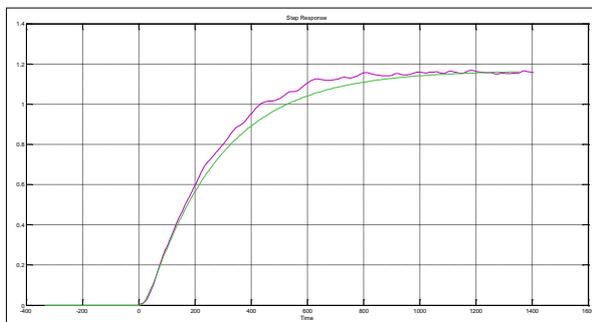


Figure 15. Respuesta del modelo ARMAX a la entrada de paso seleccionado y CRA.

#### 4.4 Función de transferencia.

Con los coeficientes del método previamente seleccionado y despreciando polos y ceros lejanos, tenemos que la función de transferencia en el plano continuo es:

$$G(s) = \frac{0.0001944762}{(s + 0.04277) * (s + 0.003894)}$$

Donde:

G: Función de transferencia de la planta de caudal.

#### 5. Diseño del controlador

En el capítulo anterior utilizamos los métodos de identificación paramétrica para encontrar la función de transferencia de nuestra planta de caudal. En este capítulo realizaremos el diseño de un controlador PID para nuestro sistema de control de caudal. Para esto, partiendo del modelo matemático obtenido, utilizaremos la herramienta SISOTOOL de MATLAB y con ella encontraremos las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador PID que cumpla con las especificaciones requeridas. Luego de esto, probaremos el controlador en la planta real con el objetivo de demostrar la utilidad de la identificación de sistemas al permitirnos obtener un modelo matemático equivalente para una planta real.

Diseñaremos un controlador PID el cual tiene la forma:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Utilizaremos la herramienta SISOTOOL en ella podemos diseñar compensadores y controladores en distintas arquitecturas seleccionables. Se lo puede hacer mediante cambio en la posición de polos y ceros, utilizando algoritmos específicos, en base a la respuesta de frecuencia, entre otros métodos.

El controlador PID es el siguiente:

$$G_c(s) = 256.3078 * \frac{(s + 0.08061) * (s + 0.006911)}{s}$$

## 5.1 Prueba del controlador en la planta simulada.

En primer lugar para probar la robustez de nuestro controlador realizaremos una simulación utilizando el modelo de la planta. En la simulación trabajaremos con tiempo de muestreo de 1 segundo para hacer una simulación similar a la realidad. Además utilizaremos un controlador PID discreto. Utilizaremos también un controlador con una salida saturada en ciertos valores extremos que asemejan la situación real que tendríamos.

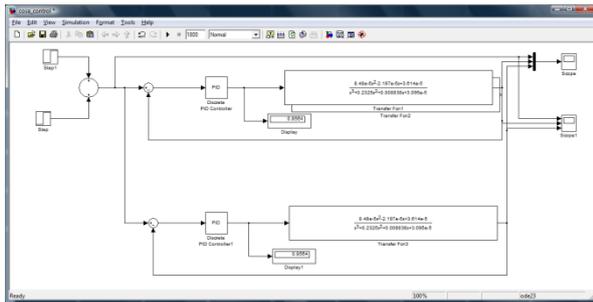


Figure 16. Simulación del controlador escogido.

En la siguiente figura mostramos la gráfica obtenida de las señales de entrada y la salida obtenida en el tiempo de la simulación utilizando nuestro controlador:

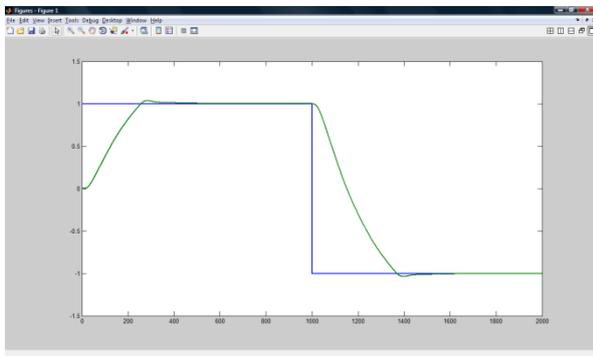


Figure 17. Grafica de la planta simulada con el controlador escogido.

## 5.1 Prueba del controlador en la planta real.

Luego de esto probamos este controlador en la planta real utilizando la tarjeta de adquisición de datos y SIMULINK de MATLAB. El archivo (.mdl) de Simulink que utilizamos fue el siguiente:

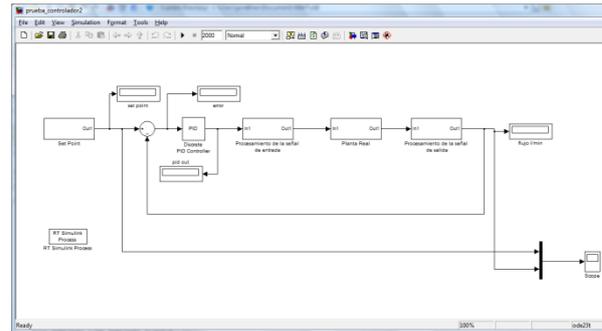


Figure 18. Programa para probar controlador en la planta real.

Los resultados obtenidos de señal de entrada, valor deseado o set point, y la señal de salida del sistema fueron los mostrados en la siguiente gráfica:

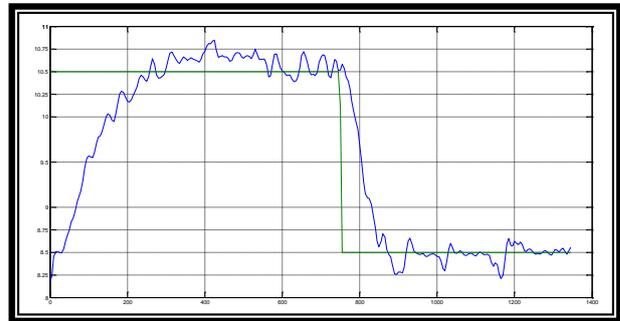


Figure 19. Planta real con controlador previamente diseñado.

## 6. Conclusiones

1. Se pudo demostrar que el método de identificación de sistemas analizado en el presente trabajo, es una técnica muy eficiente y de gran ayuda para cuando necesitamos determinar un modelo matemático de un sistema dinámico real.
2. En muchas ocasiones, cuando se posee poca información sobre un sistema o cuando el modelado mediante ecuaciones físicas es muy complejo, es cuando se nos hace indispensable recurrir a técnicas experimentales de identificación, las cuales nos ayudan a conocer la dinámica de nuestro sistema.
3. El proceso de identificación debe seguir un orden estricto, para esto debemos tener buenas bases teóricas y así poder aplicar con buen criterio y análisis los diferentes pasos que se necesitan para llevar a cabo esta técnica, sabiendo cómo y por qué se hace cada uno de estos, de esta manera podremos obtener muy buenos resultados. Los pasos para esto van en el siguiente orden: diseño del experimento, diseño de la señal de entrada, adquisición y tratamiento de las señales que necesitamos, elección del modelo adecuado y

selección de sus parámetros, y por último la validación del modelo. Si cumplimos con estos pasos satisfactoriamente podremos estar seguros de que hicimos una buena identificación de nuestro proceso.

4. Luego de realizar pruebas con distintos modelos y compararlos concluimos que el modelo que mejor se ajusta a nuestro sistema es el ARMAX3331.
5. Es muy importante validar los resultados con datos tomados de la planta real para estar seguros que nuestro proceso de identificación nos ha permitido obtener un correcto modelo matemático del sistema.
6. La identificación de sistemas nos permitió diseñar un controlador para nuestra planta utilizando las técnicas conocidas del control automático, puesto que mediante este método obtuvimos una función de transferencia para la misma.
7. La herramienta de Matlab SISOTOOL nos permite diseñar compensadores, controladores y filtros; de muy buenas prestaciones y mediante distintos algoritmos que nos ayudaron mucho en nuestro trabajo.
8. El controlador diseñado no logró llegar a un estado estable debido a retardos y falta de precisión existentes en el sensor de flujo. Utilizando un sensor de flujo de mejores prestaciones se tendría mejores resultados lo que al diseño del controlador se refiere.

## 7. Recomendaciones

1. Para que la identificación de nuestro experimento mejore deberíamos utilizar elementos (actuadores y sensores) más precisos y exactos, ya que esto hace que la información que obtenemos se asemeje mucho más a la realidad, aparte deberíamos tener un dispositivo de adquisición de datos que tenga mayor resolución y que sea más robusto para que no se vean afectados los datos por el ruido existente.
2. En el diseño de la planta experimental debemos de asegurarnos de que nuestra planta sea estacionaria, ya que este es un requisito fundamental para poder aplicar la técnica estudiada.
3. Siempre tomar datos dentro del rango de trabajo del proceso, ya que si no hacemos esto podemos tener problemas de obtener datos aberrantes que se dan en situaciones como la saturación del sistema.
4. Al evaluar los modelos paramétricos seleccionados de cada estructura no solo tomar en cuenta el porcentaje de ajuste de los modelos con respecto a la señal de validación, sino también se debe observar las graficas del análisis residual, respuesta al paso y de frecuencia, para elegir el mejor modelo.

## 8. Agradecimientos

A Dios por llenarnos de bendiciones y permitirnos concluir con esta etapa de nuestras vidas, a nuestros familiares y amigos que gracias a su apoyo y su colaboración nos han incentivado a seguir adelante en este largo camino, y a nuestro profesor, el Ing. Cesar Martín, así como a nuestros compañeros del seminario, con quienes hemos compartido experiencias y conocimientos.

## 9. Referencias

- [1] Richard Dorf y Robert Bishop “Sistemas de control moderno”, Prentice Hall, 2005.
- [2] Katsuhiko Ogata “Ingeniería de control moderna”, Prentice Hall, 2003.
- [3] Lennart Ljung, “System Identification: Theory for the User”, Prentice Hall, 1999.
- [4] Lennart Ljung & Torkled Glad, “Modeling of dynamic system”, Prentice-Hall, 1994.
- [5] Katsuhiko Ogata “Sistemas de control en tiempo discreto”, Prentice Hall, 1996.
- [6] T. Söderstrom and P. Stoica, “System Identification”, Prentice Hall, 1989.
- [7] Material de Estudio del Seminario “Introducción a la Identificación de Sistemas” Autor: Ing. César Martín.
- [8] Victor L. Streeter “Mecánica de fluidos”, McGraw-Hill, 2000.
- [9] L. A. Zadeh, “From circuit theory to system theory”, In Proc. IRE 50, pages 856–865, 1962.
- [10] Santiago Garrido, “Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO”, Universidad Carlos III, 1999.