



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



## Diseño del Controlador para un Control de Flujo y Volumen en una Bomba de Combustible

Vicente Macas <sup>(1)</sup>, Freddy Maquilón <sup>(2)</sup>, Cesar Martin <sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación <sup>(1) (2) (3)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) <sup>(1) (2) (3)</sup>  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
vichealexander@hotmail.com <sup>(1)</sup>, freddymakyyo@hotmail.com <sup>(2)</sup>, cmartin@espol.edu.ec <sup>(3)</sup>

### Resumen

*En el presente proyecto se realiza la identificación y diseño del controlador para un sistema de control de flujo y volumen en una bomba dispensadora de combustible. Para poder realizar un excelente control se debe tener un amplio conocimiento de la dinámica del sistema a controlar, es por esto que se recurre a la teoría de identificación de sistemas la cual nos permite crear un modelo de cualquier proceso real a partir de mediciones y experimentaciones. Una vez obtenida la función de transferencia del sistema se diseña dos controladores, uno para controlar el flujo y otro para el volumen con el objetivo de aplicarlos en la planta o sistema real.*

**Palabras Claves:** *identificación de sistemas, modelo matemático, controlador.*

### Abstract

*In this project is carried out the identification and controller design for a system of control flow and volume in a fuel dispensing pump. In order to do a good control we must have a complete knowledge of the dynamics of the system to be controlled, for this reason we resort to the theory of system identification which lets us create a model of any real process through measurements and experiments. Once obtained the transfer function of the system, two controllers are designed, one for controlling the flow and another for controlling the volume for the purpose of applying to the plant or real system.*

**Keywords:** *system identification, mathematical modeling, controller.*

## 1. Introducción

Históricamente se utilizaba el control automático únicamente para remplazar tareas humanas, hoy en día es usado adicionalmente para aumento y constancia en la calidad, mejor rendimiento, menor desperdicio de productos, menor contaminación, menor consumo de energía y reducción de los costos operativos.

El trabajo consiste en controlar un sistema o una planta para que esta tenga una respuesta óptima y pueda tener las características antes mencionadas, pero para obtener o diseñar un buen controlador debemos tener un conocimiento muy elevado de nuestro sistema, esto no es muy fácil en algunos sistemas que matemáticamente son muy complejos, es por eso que recurrimos a la identificación de sistemas.

Con la teoría de identificación y sus métodos estadísticos podemos crear modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de valores medidos.

Un control preciso de flujo y volumen de combustible hoy en día es muy importante tanto para las empresas que distribuyen el preciado líquido como para los consumidores. Ya que su precio es muy elevado se quiere que en un abastecimiento vehicular no se sobrepase del valor requerido por el usuario, ni en cantidades muy pequeñas ya que se realiza cientos por no decir miles de abastecimientos diarios lo que implicaría una pérdida considerable para la empresa, pero tampoco se debe llegar a un valor menor ya que un proceso de control gubernamental la empresa podría ser multada considerablemente. Es por esto que se requiere el análisis y desarrollo de un controlador de precisión que cumpla óptimas características, para esto se debe realizar una buena identificación del sistema.

El proceso empieza con el diseño de una señal de entrada que nos permita captar correctamente el comportamiento del sistema sin exceder sus limitaciones, luego con esta se logra obtener un juego de señales entrada-salida para poder analizar mediante métodos paramétricos de estimación y al final escoger el modelo que tenga el comportamiento más sencillo y parecido al proceso real.

El objetivo principal es encontrar los polos, los ceros y posible retardo que contenga nuestro sistema, para que con la ayuda de ellos y el espacio de trabajo sisotool de Matlab poder diseñar un controlador que haga que nuestra planta tenga un funcionamiento eficaz en la industria.

Los objetivos específicos de nuestro trabajo son obtener la correcta señal de entrada para tener una aceptable identificación, escoger el apropiado modelo entre muchas opciones y diseñar un controlador de flujo y otro de volumen para el dispensador.

Cabe recalcar que nuestra “planta real” es simulada, ya que no contamos con la disposición de las instalaciones para realizar la obtención de datos en lazo abierto, pero si realizaremos la validación del modelo con datos reales.

## 2. Proyecto Propuesto

Nuestro proceso a identificar principalmente consiste en el control de flujo y volumen en una gasolinera.

Para el abastecimiento en una gasolinera se necesitan principalmente:

- Un automóvil o cliente.
- Combustible elegido por el usuario.
- Dispensador de Combustible
- Operario

Estos 4 elementos son indispensables en el abastecimiento, pero el que nos llama la atención y debemos analizar es el dispensador de combustible ya que con el hacemos llegar el producto a su destino (vehículo), hacemos que absorba el combustible de los tanques de almacenamiento y principalmente que el producto llegue en la cantidad exacta que el usuario solicite y cancelo. Pero, ¿Cómo hace el dispensador esto?, pues bien el dispensador tiene sensores y actuadores que hacen este trabajo, el sensor tiene la capacidad de saber cuál es el flujo de combustible en cada instante, lo que hace es acumular el flujo a través del tiempo lo que se convierte en volumen, el actuador hace que exista o no flujo en el dispensador. Aquí entra el controlador que hace de intermediario entre estos dos ya que recibe información del sensor y envía órdenes al actuador.

Aquí entra nuestro estudio y análisis ya que estos sensores, actuadores y magnitudes físicas como el flujo y volumen poseen dinámica individual que juntos crean una sola que es nuestro sistema a identificar. Una vez identificada nuestra planta (sensores, actuadores y magnitudes físicas) podremos diseñar un buen controlador para que el abastecimiento del vehículo sea óptimo y preciso.

## 3. Obtención del Modelo Base y Diseño de la señal de Entrada

A continuación se describe de manera general el modelo base de la planta, su validación y el diseño de la señal de entrada de la misma.

### 3.1. Proceso de modelamiento.

Para modelar nuestro sistema se debe fijar las variables las cuales son:

- ✓ Válvula solenoide,
- ✓ Sensor de flujo
- ✓ Bomba de combustible
- ✓ Por último el bloque integrador en el cual se pasa de caudal a volumen.

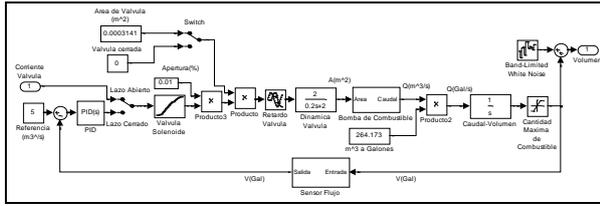


Figura 1. Modelo matemático de nuestro sistema

### 3.1.1 Válvula Solenoide

El trabajo que realiza es que recibe una señal de corriente determinada y dependiendo de esta señal (a través de una tabla de porcentaje de área de la válvula versus corriente) pasara más flujo o menos flujo a través del dispensador.

La válvula solenoide proporcional la vamos a dividir en tres bloques:

El primer bloque tenemos una gráfica en la que representamos la apertura de la válvula en porcentaje dependiendo de la corriente.

En el segundo bloque tenemos el producto del porcentaje de apertura de la válvula por el área de la válvula en el cual obtendremos la apertura de la válvula exacta que requiere el sistema.

En el tercer bloque tenemos el retardo de la válvula y dinámica de la válvula.

### 3.1.2 Sensor Flujo

Para simular la función del sensor, tenemos diferentes bloques esto es debido a la forma en que trabaja el sensor de flujo. El primer bloque tenemos el retardo de flujo que recibe la señal de volumen de la gasolina y este bloque representara el tiempo de retardo que tiene el sensor en enviar la información al controlador. En el segundo bloque Figura 2 tenemos la dinámica que tiene el sensor, que nos representa un retardo de 25ms y un tiempo de estabilización de 75 ms.

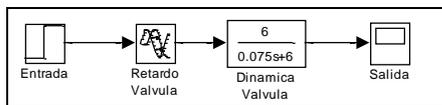


Figura 2. Bloque de simulación de sensor flujo.

### 3.1.3 Bomba de Combustible

En el bloque de la bomba para poder simular lo que hacemos es obtener los datos técnicos de la bomba, ya que necesitamos el caudal que la bomba tiene. Para poder determinar que la bomba envía siempre un caudal constante, recurrimos a estudios de mecánica de fluidos, donde pudimos determinar que antes de escoger la bomba se deben determinar todos los aspectos físicos que debe recorrer el

líquido (gasolina) para llegar a la parte final del dispensador. Luego de realizar los respectivos cálculos se obtiene la bomba que necesitamos con el caudal correspondiente.

Nos basamos de esta teoría y con apoyo de los datos técnicos de la bomba en nuestro bloque de simulink ubicamos la velocidad con que la bomba transporta el fluido. El caudal de la bomba es de 24 L/min.

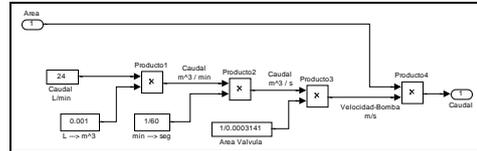


Figura 3. Bloque de la velocidad de transporte de líquido de la bomba

### 3.1.4 Bloque Integrador

En este bloque procedemos convertir el caudal que nos da la válvula en volumen para poder obtener este bloque realizamos los siguientes cálculos. En la figura 4 se muestra el bloque integrador.

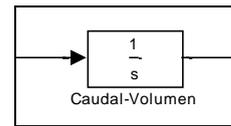


Figura 4. Bloque integrador de nuestro sistema.

## 3.2. Validación del Modelo

Para poder confirmar que el modelo matemático que hemos propuesto es acertado debemos comprobar que la respuesta del mismo sea al menos el 89% aproximado a la planta real.

En la figura 5 se muestra la respuesta de nuestra planta simulada y los datos reales, que son los que los obtuvimos experimentalmente.

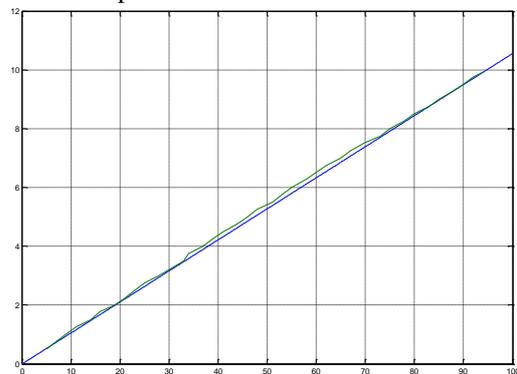


Figura 5. Comparación de datos simulados con datos reales.

El método que hemos cogido para calcular el error es el de error cuadrático medio, ya que este nos elimina los signos negativos que se obtengan al hacer la diferencia entre los valores simulados y real.

$$\text{Error Cuadrático} = \sqrt{\frac{0.67906 + 2.68680 + \dots + 0.15621}{68}}$$

El Error Cuadrático es: 7.627%

Por lo tanto la Aproximación de nuestra simulación con los datos reales es de:

Aproximación = 100% - 7.627% = 92.373%.

### 3.3 Diseño de la señal de entrada

Se debe construir una señal que sea amigable con nuestra planta para esto disponemos de las siguientes señales de entrada:

- Pulso Doble
- Señal Aleatoria Binaria (RBS).
- Señal Pseudo Aleatoria Binaria (PRBS).
- Señal Multisinusoidales.

Debido al rango de valores de entrada de nuestro actuador (4 a 20mA) nos proponemos a utilizar una señal Multiseno (Schroeder-Phased) para no forzar a este con valores de máximo y mínimo, si no de una manera suavizada en ese rango como lo hace una forma de onda sinusoidal.

#### 3.3.1 Señal Multiseno Escogida

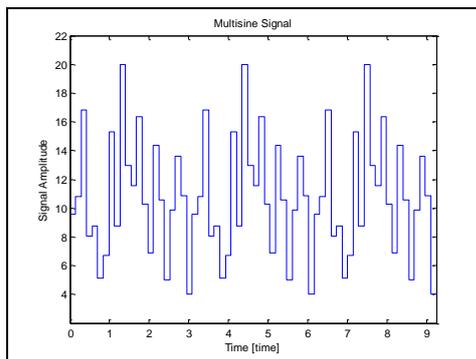


Figura 6. Señal Multiseno escogida

## 4. Implementación de la Identificación

Vamos a realizar la identificación paramétrica, aquí encontraremos modelos descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema como son entrada, salida y perturbaciones.

Existen aproximadamente 32 formulaciones diferentes para modelos de error de predicción, los usados comúnmente son cinco los cuales mencionamos a continuación:

- ARX
- ARMAX
- FIR

- Box-Jenkins
- Output Error

En nuestro análisis de cada uno de los modelos mencionados han sido seleccionados dos que son los que presentan las mejores características de nuestra planta.

### 4.1 Análisis de los Modelos Seleccionados

Con todos los métodos analizados se presenta en la tabla 1, los modelos escogidos con las mejores características.

Modelo	Aproximación %
Amx4445	85.49%
BJ42233	85.50%

Tabla 1 Modelos con mejores características.

### 4.2 Selección de Modelo de la planta

En la tabla 2 mostramos con un ✓, si el modelo es favorable a la prueba realizada, y con una X si que no lo es.

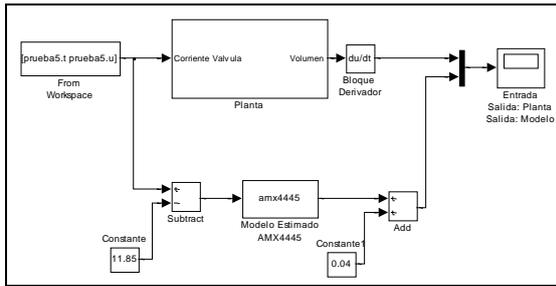
Modelo	% Similitud	Análisis de Residuos	Respuesta al Escalón	Respuesta de Frecuencia	Análisis de Polos y Ceros
AMX4445	✓	✓	✓	No información	✓
BJ42233	✓	✓	X	No información	✓

Tabla 2 Características de los modelos escogidos

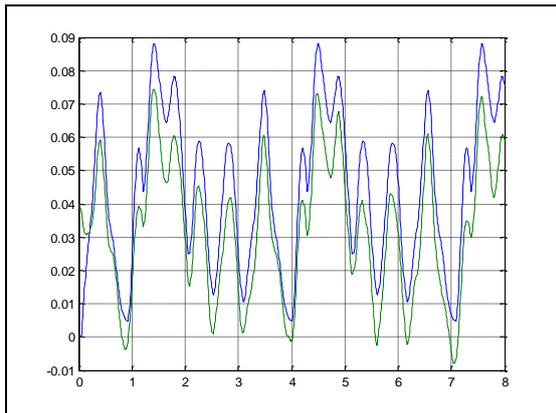
Según todo el análisis que se muestra en la tabla 2, el modelo que tiene las mejores características para representar a la planta es el AMX4445.

### 4.3 Simulación del modelo

Observando la simulación del modelo comparada con la respuesta de la planta que se observa en la figura 6, podemos confirmar que el modelo AMX4445, es óptimo para nuestra planta, ya que como observamos en la figura 7, la señal de salida del modelo, tiene similitud en la forma que tiene la salida de la planta, observamos una pequeña diferencia, pero esto se debe a que en la planta real se consideran todos los factores, incluyendo el ruido, y el modelo es un estimado de la misma, sin embargo la diferencia no es considerable, por lo que el modelo es el óptimo para representar nuestra planta.



**Figura 7.** Bloque de simulación de la planta y modelo obtenido



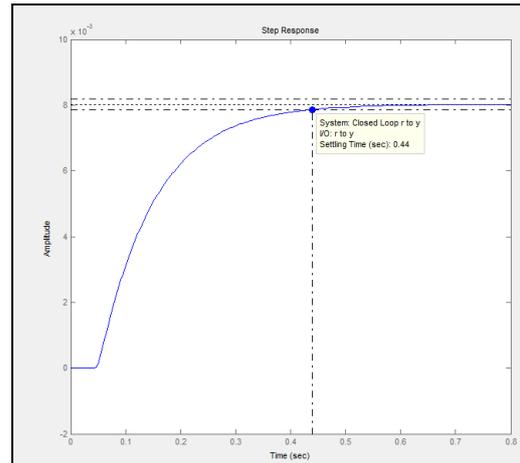
**Figura 8.** Respuesta de la planta (azul), respuesta del modelo (verde)

## 5. Diseño del Controlador

Se diseñara dos controladores para nuestra planta, el primer control será para el flujo y nuestro segundo control será para el volumen que es nuestro principal control.

### 5.1 Controlador Proporcional Integral (PI) de Flujo

Como se observa en la respuesta a la entrada paso en la figura 9, necesitamos un controlador que nos permita tener un error de estado estacionario cero, para esto necesitaremos un polo en el origen o integrador, entonces se podría ir definiendo un controlador PI, ya que la constante de proporcionalidad nos ayuda a determinar el tiempo de estabilización, el cual debemos reducir a la mitad.



**Figura 9.** Respuesta al escalón del modelo escogido

Ahora con la ayuda de la opción Automated Tuning de la ventana de sisotool. Esta opción nos permite obtener diferentes modelos de controladores.

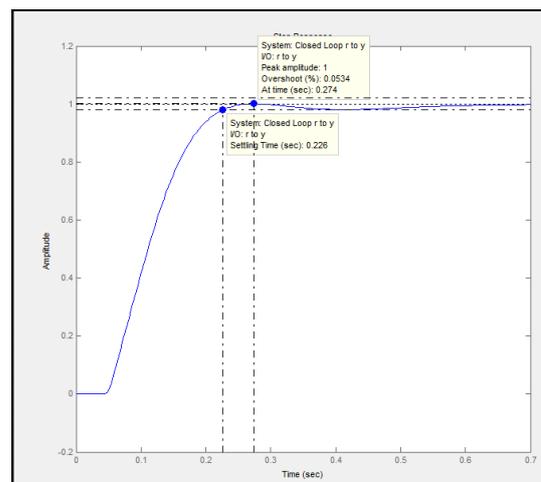
Observemos que tipo de controlador nos devuelve esta opción y es:

$$1057 \frac{(1 + 0.17s)}{s}$$

Pero este controlador aun no se ajusta a nuestros requerimientos, por lo cual haremos los ajustes necesarios como movimiento de polos y ceros en el lugar geométrico de las raíces hasta encontrar el controlador indicado:

$$916.85 \frac{(1 + 0.12s)}{s}$$

El cual nos da las siguientes características:



**Figura 10.** Respuesta al paso con requerimientos satisfechos

Como podemos observar en la grafica tenemos un tiempo de estabilización de 0.226 segundos, se ha

reducido a la mitad, con un error de estado estacionario cero y sin cambiar el sobre-nivel porcentual que en este caso es 0.05% muy cercano a cero e insignificante.

El controlador nos dio las siguientes constantes:

- Constante de Proporcionalidad (P): 110.022
- Constante Integral (I): 916.85

### 5.1.1 Pruebas con el modelo real y el modelo estimado.

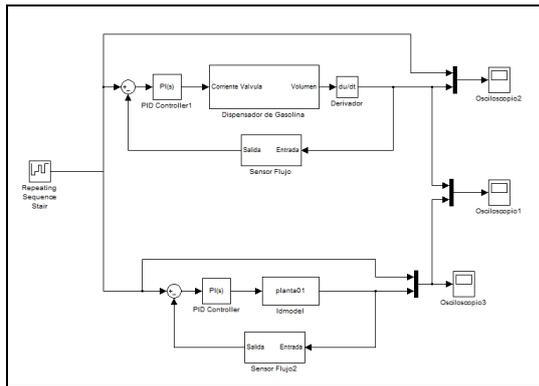


Figura 11. Pruebas de controlador en planta real y modelo

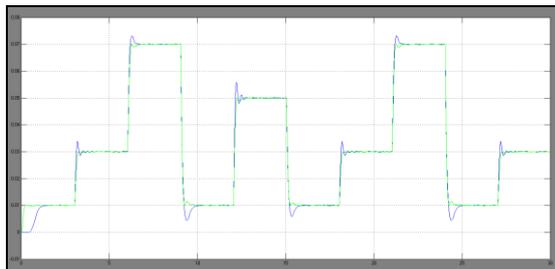


Figura 12. Osciloscopio3: Comparación entre modelo estimado y "planta real"

Podemos concluir que nuestra estimación del modelo fue satisfactoria como lo muestra la figura 11, y gracias a ella se pudo diseñar un buen controlador para el flujo o caudal de nuestro dispensador.

### 5.2 Controlador Proporcional (P) de Volumen

Como podemos observar en la Figura 13 se tiene un tiempo grande de estabilización, con lo cual uno de nuestros objetivos sería reducirlo considerablemente. También podemos notar que el error de estado estacionario es cero por lo tanto descartaríamos una ganancia integrativa en el controlador, entonces nos estaríamos inclinando por un controlador proporcional.

Entonces nos proponemos un tiempo de estabilización menor a 1 segundo.

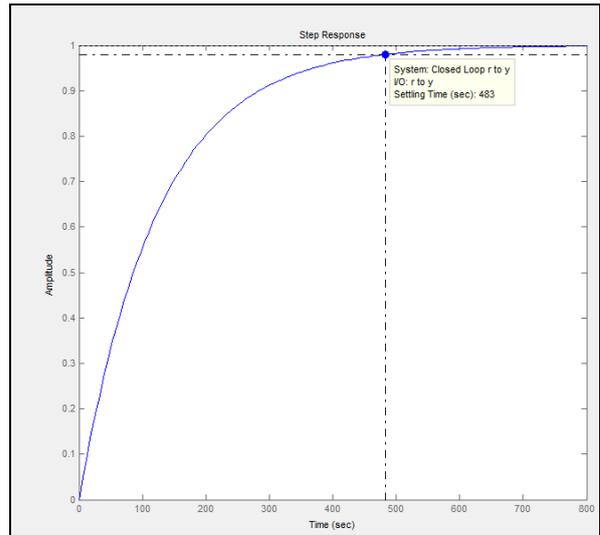


Figura 13. Respuestas al escalón de la planta

Con lo cual tendríamos:

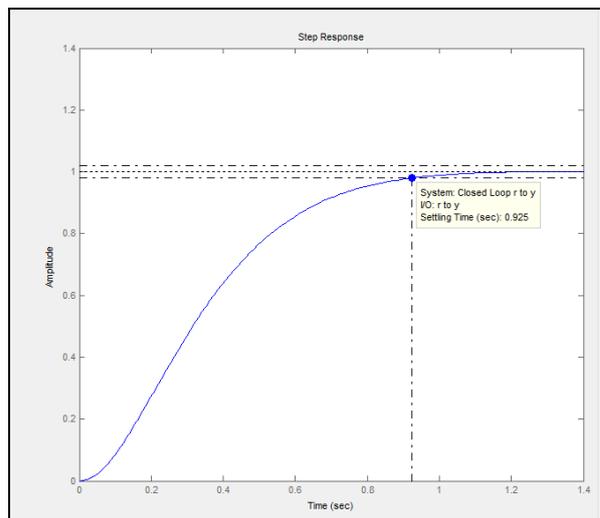


Figura 14. Respuestas al paso con tiempo de estabilización mejorado <1seg

En la Figura 5.15 ponemos notar como el tiempo de estabilización se mejoro, este es de 0.925 segundos ahora. Y el controlador proporcional que se utilizo fue el siguiente:

- Constante P: 346

### 5.2.1. Pruebas con el modelo real y el modelo estimado.

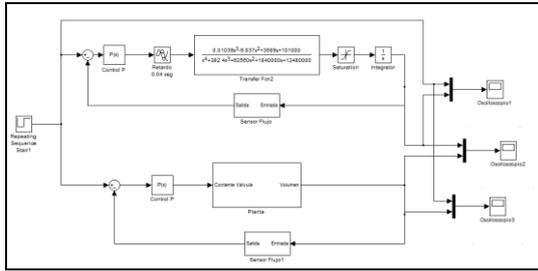


Figura 15. Diagrama de respuesta de controlador proporcional

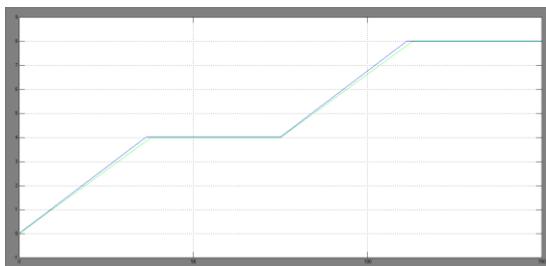


Figura 16. Respuesta de la planta real y modelo estimado con controlador

Como se puede observar claramente en la figura 16, el controlador proporcional diseñado en el espacio de trabajo sisotool responde muy bien con la "planta real" llegando a un error de estado estacionario cero y con un sobre-nivel porcentual de cero. Se debe mencionar que el tiempo de estabilización depende directamente del flujo y el rango de trabajo de la válvula del sistema.

### Conclusiones

- La identificación de sistemas es una rama de estudio que tiene como principal objetivo la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones realizadas en determinado proceso, para esto se sigue una metodología que consta de una serie de etapas, criterios y decisiones teniendo como fin que el modelo resultante sea representativo del sistema identificado.
- Se realizó un modelo simulado de la planta ya que no se contaba con la disposición de instalaciones y equipos, la razón es que en una estación de servicio una paralización de operaciones y ventas por motivo de pruebas significaría una gran pérdida para la misma.
- La bomba del sistema de alimentación del tanque de almacenamiento hacia el dispensador tuvo un estudio aparte donde se logró determinar que la altura del fluido que contenía el tanque no influía en el caudal de salida como inicialmente se pensó, por este motivo el caudal de la bomba se asumió constante.
- Se realizó un análisis de Pre-Diseño de la señal de entrada donde se logró comprobar mediante el análisis de correlación que el sistema tenía un factor integrativo, esto se dio ya que la autocorrelación de la salida nos dio valores constantes a través de los periodos.
- Se aplicó a la salida de nuestro modelo un bloque derivativo con esto se logró cambiar el comportamiento de la señal de salida, de no-estacionario a estacionario.
- Los datos de la simulación del modelo se los comparo con los datos de las pruebas realizadas en la planta real obteniendo un 92.37% de aproximación, con lo cual se pudo concluir que el modelo simulado representa de excelente manera al proceso real.
- Se estableció el diseño de la señal de entrada multiseno con el fin de no forzar al actuador (en este caso la válvula) a llegar valores máximos y mínimos de operación, si no de una manera suavizada como lo hace la forma de onda sinusoidal.
- La señal de entrada "prueba5" fue escogida ya que realizando el análisis cra del sistema entrada-salida la cross-correlación nos resulto de muy buena magnitud, estableciendo que entre estas dos señales si existe planta, además la grafica de respuesta al impulso nos demostró que existe un retardo entre estas dos señales, de la misma manera la respuesta al escalón estimada mediante el ident, nos dio un tao muy cercano al tao dominante de la planta, por ultimo en el análisis espectral se determino como esta señal de entrada nos daba una respuesta de frecuencia con un aceptable ancho de banda.
- El modelo amx4445 fue la mejor estimación ya que nos dio un 85.48% de aproximación con el modelo real, se ubico dentro de los intervalos de confianza en el análisis de residuos, su respuesta al escalón fue la más cercana a la realizada en el análisis de correlación, de igual manera lo hizo su respuesta de frecuencia en comparación con el análisis residual.
- Se puede decir que nuestro proceso de identificación fue exitoso ya que el controlador

diseñado a través de nuestro modelo estimado dio una respuesta aceptable al aplicarlo a nuestro “sistema real”.

## Recomendaciones

- Se debe tener un alto nivel de conocimiento en Matlab y sus respectivos espacios de trabajo como lo son simulink, sisotool e ident ya que el proceso de tratamiento de datos, diseño de señal de entrada, identificación y validación de modelos de este trabajo se realizan en su totalidad en este software.
- Las pruebas para la validación del modelo simulado se deben realizar sin el controlador del dispensador con el objetivo de obtener los datos en lazo abierto.
- Sería importante realizar todos los estudios necesarios tales como factibilidad, sostenibilidad e impacto ambiental para determinar si el tema planteado es aplicable, o si es necesario realizar alguna modificación con la finalidad de satisfacer las demandas de energía en el sector donde el sistema va a ser instalado, si es rentable y finalmente si es amigable con el entorno.
- Para que el modelo simulado represente de la mejor manera a la planta real se debe agregar no linealidades propias de la planta, bloques de saturación que representen límites de operación, zonas muertas entre otros.
- Al momento de elegir un modelo es de gran importancia aplicar el criterio de parsimonia el cual nos dice que una señal que no tiene muchos coeficientes y logra representar bien al sistema es mejor que otra que la represente aun mejor pero con más coeficientes.

## Referencias

- [1] Ogata, K., Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Prentice Hall 2da. Ed., 1998.
- [2] Ogata, K., Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- [3] Juan Saldarriaga, Hidráulica de Tuberías, Alfaomega Bogota, D.C., 2007.
- [4] Ing. Manuel Viejo Zubicaray, Bombas Teoría Diseño y Aplicaciones, Limusa, S.A. Grupo Noriega Editores, 2000
- [5] Juan Pablo Carvallo, Rene Vargas, Válvulas Solenoide, Departamento de ingeniería Electrónica,

Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110-V, Valparaíso, Chile, 2003

- [6] Gamble, J. B. and Vaughan, N. D. The Modelling and Simulation of a Proportional Solenoid Valve. Transactions Of The ASME, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control- 1996.