

Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de nivel de líquido en un tanque

Willy José Jama Barzola, Kleber Cristhian Cordero Correa y César Martin M.

Faculta 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

wjama@fiec.espol.edu.ec, cristhiancordero@gmail.com, camartin@fiec.espol.edu.ec

Resumen

Este trabajo tiene como principal objetivo identificar y diseñar el controlador para un sistema regulador de nivel de líquido en un tanque, para lo cual es necesario disponer de un modelo matemático preciso del proceso a controlar, que nos permita conocer el comportamiento del mismo. Esto se conseguirá mediante la utilización de metodologías y protocolos, llamados identificación de sistemas.

Este modelo permite que el diseñador utilice las herramientas necesarias para ajustar los parámetros que requiere un controlador y obtener una buena respuesta en el tiempo cumpliendo con los datos reales del diseño.

Se realizara la validación del proceso simulado controlado con el proceso real, estas se harán mediante las perturbaciones que se causaba ya sea en la salida del flujo o flujo de salida (considerada como desperdicio de agua o demanda de agua a una fabrica) o en la variación del set point (considerado como si el operador hiciera un cambio de nivel deseado). Demostrando así la validez, utilidad y conveniencia de la técnica de identificación de sistemas, aplicada a un proceso real.

Palabras Claves: nivel, flujo, validación, identificación, regulador, sistemas, simulación, modelo, controlador, paramétrico.

Abstract

This work has as main objective to identify and design the controller for a constant level of liquid in a tank, which is necessary to have a precise mathematical model of the process to be controlled, allowing us to understand the behavior of the same. This is achieved through the use of methodologies and protocols, called system identification. This model allows the designer to use the tools necessary toad just the parameters that requires a driver and get a good response in time to meet with actual design data.

Validation is performed controlled simulated process with the actual process, these will be made by causing disturbances to either the outflow (considered as waste water or water demand to a factory) or variation of set point (considered as if the operator make a desired change in level). Demonstrating the validity, usefulness and appropriateness of the technique of system identification applied to a real process.

Keywords: level, flow, validation, identification, regulator, systems, simulation, model, controller, parametric.

1. Introducción

Al pasar el tiempo han ido cambiando los procesos productivos, debido fundamentalmente a la evolución de las tecnologías de información y la automatización de los procesos industriales, que han permitido el desarrollo de controladores, que eliminen costos y desperdicios en el proceso de fabricación, liberando así al operario de su actuación física directa con la planta y al mismo tiempo le ha permitido la labor única de supervisión y vigilancia del proceso. Esto únicamente se puede conseguir con un conocimiento exhaustivo del comportamiento dinámico del proceso, lo que permitirá comprender el comportamiento del sistema, incluyendo sus partes críticas.

El control o regulador de un sistema de nivel de líquido en un tanque, es un problema muy común o básico en los procesos industriales. Estos procesos requieren sistemas que permitan bombear el líquido a un tanque; y a su vez controlar y regular el nivel de éste.

Como toda fábrica necesita de un suministro de agua, es decir una cisterna de agua que se mantenga siempre en un nivel específico según demanda su producción, este trabajo investigativo se basa exclusivamente en la identificación de sistemas en la cual se modela el proceso real de la cisterna de una fábrica en un modelo matemático y después diseñar un controlador óptimo y eficiente que regule el nivel de agua en la cisterna.

2. Descripción del proceso

El proceso a identificar es una cisterna de agua que una fábrica utiliza constantemente; el principal problema es conocer sus variables de entrada y de salida además si tiene válvulas, sensores y si cuenta con un controlador PID, para esto se realizara un levantamiento de información.

3. Estructura y dimensiones de la planta

La cisterna tiene forma de un paralelepípedo recto rectangular u ortoedro construida de hormigón y sus dimensiones son:

$$\text{Ancho} = 11m.$$

$$\text{Largo} = 23m.$$

$$\text{Altura} = 4m.$$

Con estos datos podemos obtener indirectamente su capacidad o volumen máximo.

$$V_{max} = 11 \times 23 \times 4 = 1012 \text{ m}^3.$$

Pero como el volumen al que tiene que permanecer siempre la cisterna dado por el operario es $V_{Set\ point} = 779 \text{ m}^3$, entonces podemos obtener la altura requerida a la cual se debe mantener el nivel.

$$h = \frac{779}{11 \times 23} \approx 3m$$

3.1. Elementos de la Planta

La cisterna consta de los siguientes elementos: líquido, bomba, válvula, sensor de nivel, el controlador.

3.1.1 Líquido. El agua que llega a la cisterna es enviada por la empresa de la ciudad a una presión promedio de **70 PSI** y el caudal con el que llega es de **300 m³/hora**.

3.1.2. Bombas. Este proceso utiliza dos bombas que se operan manualmente, se mantienen en una presión promedio de **70 PSI** y un caudal de **227.27 m³** por hora ó **1000** galones por minutos cada una. Sin embargo para este proceso se considera como valores constante.

3.1.3. Válvula. Este proceso consta de dos válvulas, la primera es una válvula de regulación que se encuentra en la entrada de la cisterna, marca Honeywell, es motorizada que varía su porcentaje de apertura con relación al voltaje que se le aplica.

3.1.4. Característica Entre el Flujo, la Presión y su Coeficiente. Otra característica es la posición de la válvula entre el porcentaje de apertura y el voltaje.

$\%Apert = K_1 * Vi(t) = Vp(t)$, donde $K_1 = 10$
Una característica importante es el tiempo que demora en responder el elemento, es decir su respuesta en el tiempo.

$$t = 1s$$

La segunda válvula, al igual que la otra también es de regulación *manual - auto*, de la misma marca que la anterior y se encuentra antes de las bombas, en la planta el conjunto válvula-bomba es considerado una perturbación.

3.1.5. Sensor de Nivel. La planta en mención usa un sensor de nivel marca Honeywell, ST 3000 Smart Transmitters. Este trabaja como diferencial de presión, indicador de presión y presión absoluta, y transmite señales de 0 a 10 Voltios, 0 a 20 mA y de 4 a 20 mA.

Su función de transferencia viene dada por:

$$V_{out}(t) = K_5 * h(t), \quad \text{donde } K_5 = 1$$

El tiempo que demora en responder el elemento es:

$$t = 1ms.$$

3.1.6. Controlador. El proceso se encuentra controlado con un PI.

Los parámetros que tiene este control son:

$$Kp = 1$$

$$Ti = 15$$

$$Td = 0$$

3.2. Modelo de la Planta a Considerar para la Identificación

En la figura 1 se muestra el bosquejo de la planta a identificar, donde se observa la válvula del flujo de entrada (a controlar) y la válvula del flujo de salida, la cual se considera como una perturbación en el sistema.

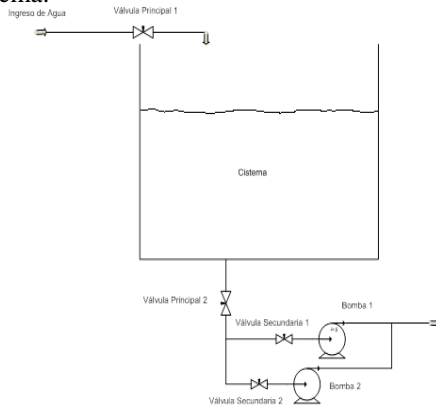


Figura 1.- Bosquejo de la Planta

4. El Proceso de Identificación

Se enfoca en la modelación de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales.

4.1. Etapas de la Identificación

- Obtención de Datos de Entrada - Salida.
- Tratamiento Previo de los Datos Registrados.
- Elección de la Estructura del Modelo.
- Obtención de los Parámetros del Modelo.
- Validación del Modelo.

El proceso de identificación se considera un proceso iterativo, que dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse desde el punto correspondiente.

5. Modelación, Recopilación y Análisis de Todo el Proceso

Como el flujo es turbulento, la velocidad del flujo en estado estable se obtiene mediante:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (1)$$

En donde:

Q = Velocidad de flujo del líquido en estado estable, m^3/s .

K = Coeficiente de la válvula, $m^{2.5}/s$.

H = Altura en estado estable, m .

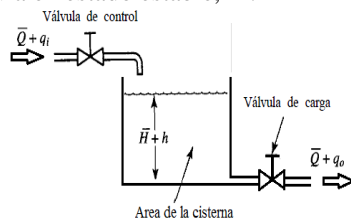


Figura 2.- Sistema de nivel de líquido

Considerando el sistema de nivel que aparece en la figura 2.

Las variables se definen del modo siguiente:

Q = Velocidad de flujo en estado estable (antes de que haya ocurrido cualquier cambio), m^3/s .

q_i = Desviación pequeña de la velocidad de entrada de su valor en estado estable, m^3/s .

q_o = Desviación pequeña de la velocidad de salida de su valor en estado estable, m^3/s .

H = Altura en estado estable (antes de que haya ocurrido un cambio), m .

h = Desviación pequeña de la altura a partir de su valor en estado estable, m .

Dado que el flujo de entrada menos el flujo de salida durante el pequeño intervalo de tiempo dt es igual a la cantidad adicional almacenada en el tanque, observamos que:

$$A dh(t) = (q_i(t) - q_o(t)) dt \quad (2)$$

$$H(s) = \frac{Q_i(s) - Q_o(s)}{AS}$$

El flujo de salida tiene la siguiente expresión de acuerdo con la ecuación (1).

$$Q_o(s) = K\sqrt{H(s)} \quad (3)$$

Entonces reemplazando la ecuación (10) en la (8) se tiene:

$$H(s) = (Q_i(s) - K\sqrt{H(s)}) \frac{1}{AS} \quad (4)$$

Se puede observar en la ecuación (4) la no linealidad que existe en la variable $H(s)$, esto se da por el grado de exponente diferente entre ellas, el fin es de despejar $H(s)$ para obtener una función de transferencia entre la altura y el flujo de entrada ($G(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)}$), más adelante se verá cómo solucionar esta expresión no lineal y que método se utilizará.

6. Proceso Modelado

En la figura 3 se expresa el proceso completo, donde está la planta, el actuador, el sensor, el controlador y el set point.

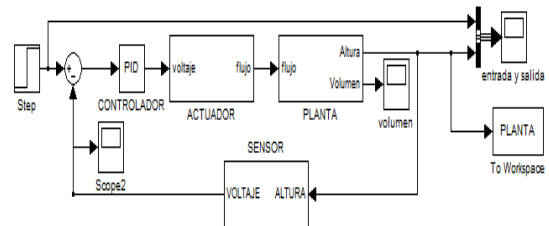


Figura 3.- Proceso modelado mediante bloques funcionales

En la figura 4 se observa el osciloscopio "entrada y salida" que muestra la señal del set point y la variable controlada del nivel de agua.

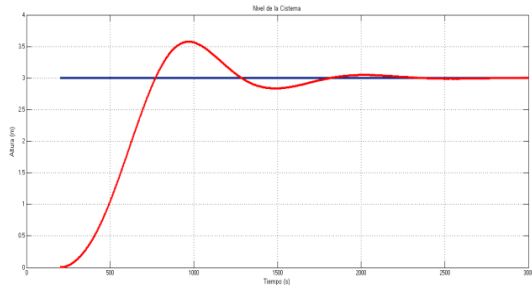


Figura 4.- Respuesta del proceso controlado a una entrada paso

7. Validación Entre el Proceso Real y el Modelado

Para poder validar el proceso modelado, se ha puesto en una sola grafica las dos curvas tanto la real como la modelada en la figura 5, se encuentran los datos con los que se le ha calculado el error entre ellas y el porcentaje de precisión, esto nos muestra que tan preciso es el modelo matemático con respecto a la realidad.

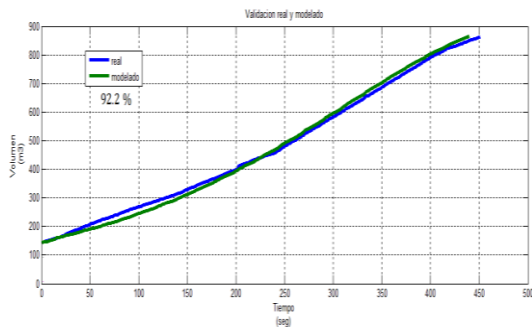


Figura 5.- Validación del proceso modelado con el real

8. Obtención de la Dinámica General del Sistema

La figura 6 muestra la respuesta del proceso en lazo abierto con respecto al escalón, en donde se procederá a obtener los datos necesarios y útiles.

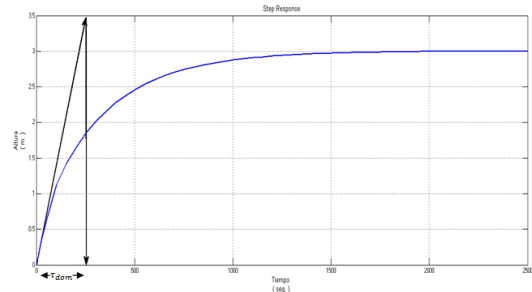


Figura 6.- Respuesta del proceso en lazo abierto
Valor del paso = 3.

El 63 % de este es 1.89

Entonces la constante de tiempo = 270 seg

$$\tau_{dom} = 270 \text{ seg}$$

9. Parámetros para el Diseño de la Señal Multiseno

Para diseñar una señal multisinusoidal se debe de considerar algunos parámetros como:

$T =$ El tiempo de muestreo

$N_s =$ Duración del ciclo:

$$N_s \geq \frac{2\pi \beta_s \tau_{dom}}{T} \quad (8)$$

$n_s =$ El número de señales sinusoidales:

$$n_s \leq N_s/2 ; n_s \geq \frac{N_s T a_s}{2\pi \tau_{dom}} \quad (9)$$

$a_i =$ Potencia relativa: $\sum_{i=1}^{n_s} a_i = 1$ (10)

$\omega_i =$ de las frecuencias que hay en el tiempo completo:

$$\omega_i = \frac{C}{N_s T} \quad (11)$$

$\Phi_i =$ Desfase de la señal del coseno:

$$\Phi_i = 2\pi \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i = 1 \quad (12)$$

$\lambda =$ Factor de escalamiento

$a_s =$ Especifica el tiempo de estabilización

$\beta_s =$ Cuanta información está presente a baja frecuencia

10. Selección de la Señal Multiseno

En la figura 7 se muestra las iteraciones que se realizó para seleccionar la mejor señal de entrada.

Iteraciones	τ_{dom}	N_s	n_s	$T_{muestreo}$	N_c Ciclos	Amplitud	F.C.	σ^2	Comentario
1	4.5	200	20	1	1	0.005	1.612	0.000002	buena aprox. Muchas frecuencias en bajas
2	4.5	160	20	0.53	1	0.005	1.614	0.000002	baja aprox. Muchas frecuencias en bajas
3	4.5	160	25	0.53	1	0.005	1.764	0.000002	baja aprox. Muchas frecuencias en bajas
4	4.5	160	15	0.53	1	0.005	1.838	0.000001	baja aprox. Muchas frecuencias en bajas
5	4.5	160	7	0.53	1	0.005	1.729	0.000002	demasiadas frec. En bajas, mala aprox.
6	4.5	160	7	0.53	1	0.01	1.729	0.000008	demasiadas frec. En bajas, mala aprox.
7	4.5	160	15	0.53	1	0.01	1.838	0.000005	demasiadas frec. En bajas, mala aprox.
8	4.5	160	20	0.53	1	0.01	1.614	0.000007	frec. se mantiene altas y bajas, aprox. Mala
9	4.5	160	20	1	1	0.01	1.614	0.000007	demasiadas frec. En bajas y mala aprox.
10	4.5	300	20	1	1	1	1.613	0.000006	demasiadas frec. En bajas y mala aprox.
11	4.5	300	20	1	1	1	1.906	0.258769	mejor aprox. Mantiene frec. altas y bajas, alto F.C.
12	4.5	300	20	1	1	1	1.612	0.064001	mejor aprox. mantiene frec. En altas y bajas
13	4.5	300	20	1	1	0.005	1.612	0.000002	demasiadas frec. En bajas

Figura 7.- Muestra los diferentes datos que se escogieron para diseñar la multiseno

11. Identificación y Validación de los Modelos

La figura 8 y 9 muestra como la señal de entrada es puesta a la entrada del proceso.

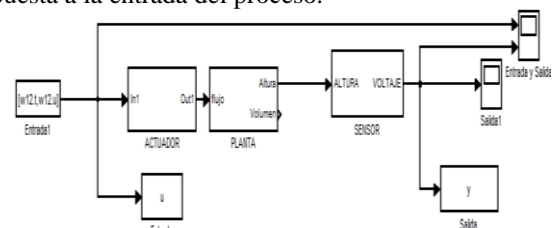


Figura 8.- Señal multiseno enviada a nuestro proceso

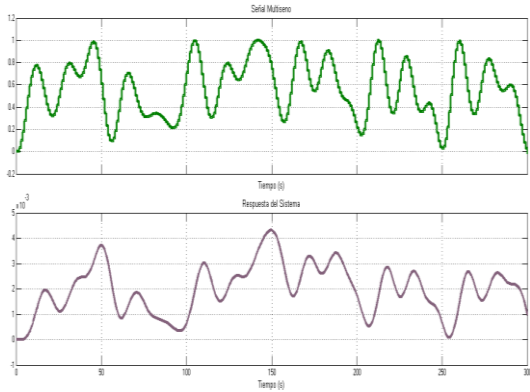


Figura 9.- Respuesta del sistema con respecto a la multiseno

La tabla 1 muestra los diferentes modelos seleccionados por su mejor aproximación al modelo real.

Tabla 1.- Analisis entre modelos estimados con buena aproximacion con el modelo real

Estructuras Paramétricas	Estructura Escogida	Aproximaciones	Comentarios
ARX: [na nb nk]	arx532	89.82%	Buena estimación con el modelo real pero se excede un poco los límites de confianza en la autocorrelación.
ARMAX : [na nb nk]	amx2121	89.23%	Buena estimación con el modelo real pero excede un mínimo en los límites de autocorrelación.
OE: [nb nf nk]	Oe131	91.58%	Muy buena estimación con el modelo real.
BJ: [nb nc nd nf nk]	Bj21111	90.56%	Muy buena estimación con el modelo real.

12. Respuesta en Diagrama de Bode del Proceso Simulado en Lazo Abierto

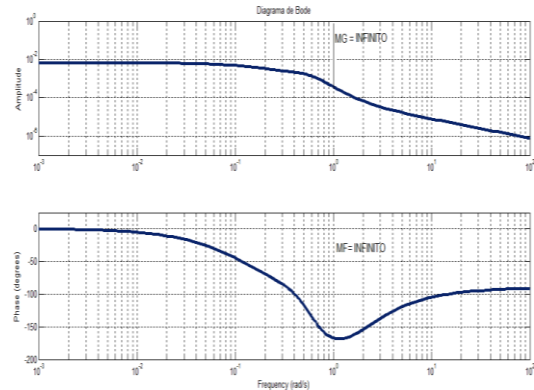


Figura 10.- Gráfica en bode del proceso simulado

La figura 10 muestra la grafica en bode del proceso simulado, de la cual se puede obtener el margen de ganancia y el margen de fase.

Los márgenes de ganancia y fase se indican a continuación:

- Margen de ganancia
 $= \infty \rightarrow \omega_{\pi} \text{ frecuencia a la cual } \phi|_{w\pi} = \pm 180$
- Margen de fase
 $= \infty \rightarrow \omega_1 \text{ frecuencia a la cual } |G| = 1$

La Interpretación que se puede dar a estos márgenes, es que el sistema se mantiene estable, además lo que se podría es mantener el sistema siempre estable y eso se consigue cuando la frecuencia donde la magnitud es 0 db o 1 debe ser siempre menor a la frecuencia donde la fase cruza por 180 grados, se podría poner un compensador para lograr esto.

$$\omega_1 < \omega_{\pi}$$

13. Análisis del Proceso Simulado en Lazo Cerrado

En la figura 11 se muestra el proceso simulado en lazo cerrado, y en la figura 12 se observa la respuesta a un escalón unitario.

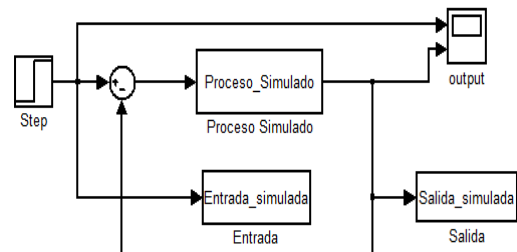


Figura 11.- Proceso simulado en lazo cerrado

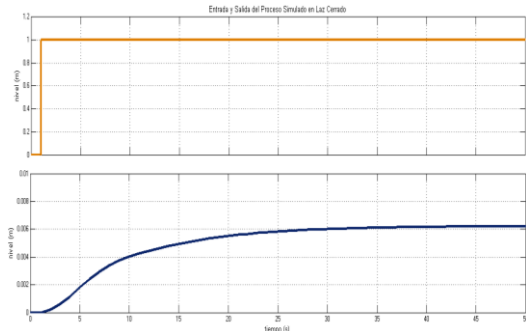


Figura 12.- Respuesta a una entrada escalón en lazo cerrado del proceso simulado

Nótese que en la figura 12 se muestran las dos señales tanto la entrada paso como la salida del proceso entonces se puede entender que un proceso puede responder como su entrada pero no llega al valor final, lo que se tiene que corregir es el error de estado estacionario, ya que la difiere mucho de la entrada en magnitud, por lo que es necesario incluir un controlador que mejore la respuesta del sistema. En base a los datos obtenidos se procederá a diseñar el controlador.

14. Diseño del Controlador PI

Para comenzar se tiene que abrir el Command Window de Matlab y el modelo estimado, que fue el OE131, se debe obtener la función de transferencia en tiempos discretos del modelo estimado y pasarlas a continuos, luego llamar al Sisotool, que es un software que brinda Matlab para que el usuario realice controladores, filtros e interacciones y coloque los requisitos que demanda un modelo simulado.

Se logra cumplir con el requisito del proceso modelado y se obtiene el siguiente controlador PI.

Se realiza una exportación de datos en *Sisotool* llevando el controlador al *workspace* de Matlab y se lo guarda para hacer las respectivas pruebas con la función de transferencia simulada.

Por tanto la función de transferencia es:

$$\frac{5.7161(s + 0.2879)}{s}$$

Donde se puede obtener fácilmente los parámetros K_p y T_i :

$$K_p = 5.7161$$

$$T_i = 3.4734$$

15. Proceso Simulado con Realimentación

La figura 13 muestra el proceso simulado con realimentación.

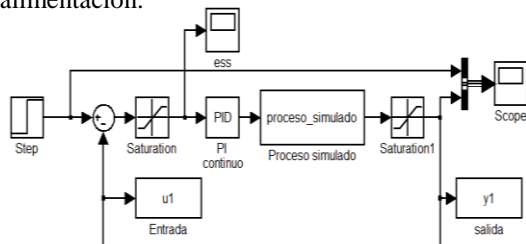


Figura 13.- Proceso simulado con realimentación

La figura 14 se muestra la respuesta del proceso realimentado con una entrada escalón.

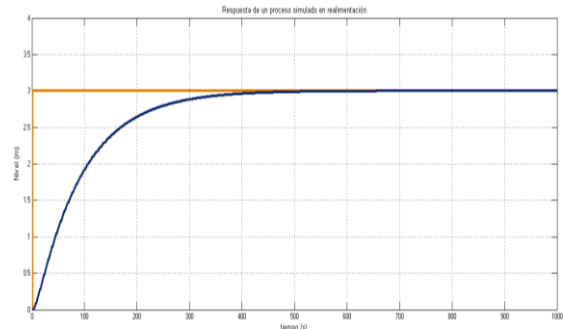


Figura 14.- Respuesta de un proceso simulado con realimentación

16. Análisis de los Resultados

Aquí se validará cada resultado para terminar de cumplir el objetivo propuesto.

A continuación se detalla las validaciones que se realizaron con respecto a los datos reales:

16.1. Validación del Proceso Identificado y Simulado en Lazo Cerrado con Controlador

Para la respectiva validación de los resultados se presentarán dos factores que pueden intervenir en un proceso real: la perturbación en el sistema y el cambio del valor del set point.

16.1.1. Sistema Perturbado. El proceso modelado mantiene una constante k que viene de la ecuación del flujo de salida $Q_0 = k\sqrt{H}$.

Donde k se ha mantenido constante durante todo el proceso de la identificación, en este caso se validará el proceso variando el valor de k , con el fin de simular una perturbación.

La variación de k se la realiza por medio de una función que brinda *MatlabSimulink* llamada "RepeatingSequenceStair", y se muestra en la figura 15.

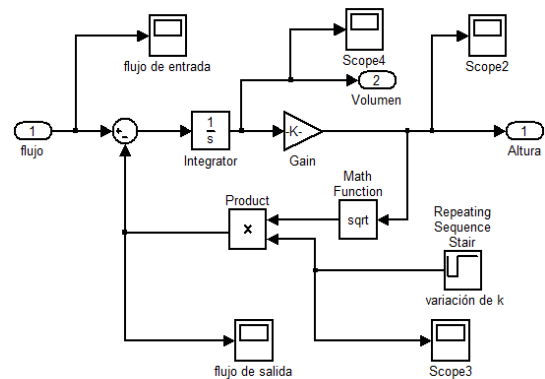


Figura 15.- Bloques que representan al sistema variando la constante k

El factores directamente proporcional al flujo de salida, es decir que si se aumenta k el flujo de salida aumenta, eso provocará que el proceso reaccione de una manera lenta, disminuya el nivel y lentamente vuelva a su nivel normal, si k disminuye el flujo de salida disminuye, eso hará que el proceso reaccione de una manera rápida, aumente el nivel y rápidamente vuelva a su nivel normal, esto se puede apreciar en la figura 16.

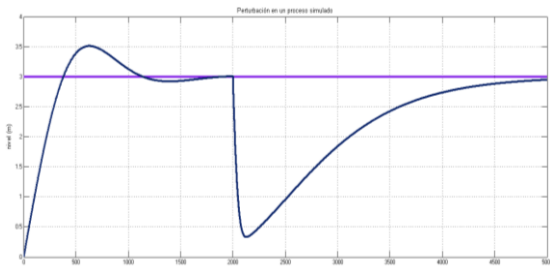


Figura 16.- Perturbación en un proceso simulado

Para entender la dinámica que muestra el proceso simulado ante una perturbación se explicara con detalle cómo reacciona el flujo de entrada cuando varía el flujo de salida, la figura 17 muestra las graficas del flujo de entrada y el flujo de salida respectivamente.

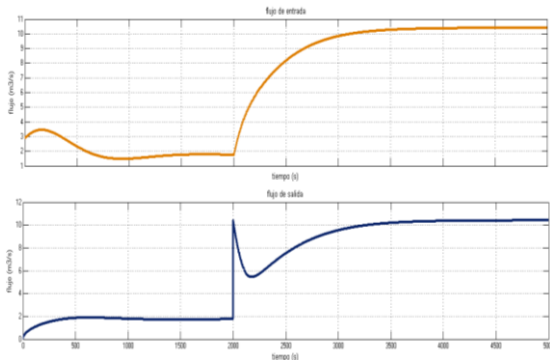


Figura 17.- Flujo de entrada y flujo de salida de un proceso controlado con perturbación

El flujo de entrada (naranja) tiene un valor inicial el cual varía según la variación del flujo de salida (azul). Se observa que el flujo de salida inicialmente es de $2 \frac{m^3}{s}$ lo cual se considera una perturbación al sistema y esto hace que el flujo de entrada que inicialmente estaba en $3.5 \frac{m^3}{s}$ varíe, es decir que el flujo de entrada busca el valor de la perturbación para mantener el nivel de la cisterna y trata de ser un valor igual a la perturbación, después de 2000 segundos se observa otra perturbación la cual tiene un valor de $10 \frac{m^3}{s}$ y muy lentamente el flujo de entrada compensa este valor variando y llegando aproximadamente al mismo valor de la perturbación.

16.1.2. Variación del Set Point (Robustez del Controlador). En la figura 18 se muestra el proceso simulado controlado ante una variación en su entrada. La entrada al sistema va a variar, para lo cual se quita la entrada escalón y se coloca el bloque “RepeatingSequenceStair” en el sistema.

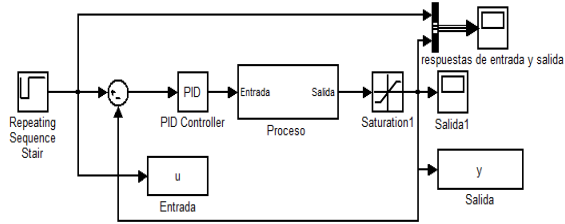


Figura 18.- Bloques que representan al sistema con una variación del set point

Esta vez para verificar el trabajo del controlador y validación del proceso, se varía el set point. El valor del set point primero será fijado en 1 metro y después de 2000 segundos cambiará a 3 metros, manteniéndose en este último valor. La figura 19 muestra como el sistema responde ante dicho cambio en su entrada; es decir el sistema siempre se encuentra controlado ante cualquier valor de set point, siempre y cuando éste cumpla con los requisitos que exige el sistema.

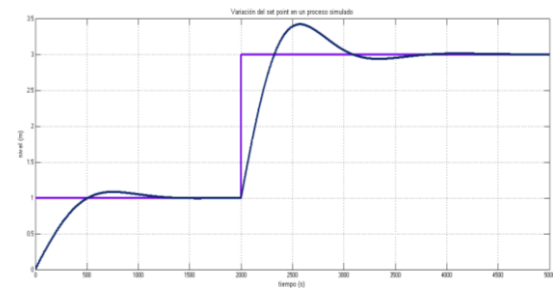


Figura 19.- Respuesta del sistema ante una variación del set point

17. Beneficios de Identificar en Lazo Abierto

Se asume que la entrada y la perturbación son secuencias independientes sin correlación cruzada.

Los requerimientos sobre estructura del modelo se pueden ajustar debido a que algunas estructuras no interpretan la función del error, esto aclara que se puede obtener una función consistente del proceso más no del modelo del ruido (error).

Se garantiza que si hay un buen ajuste a los datos, se implica un buen modelo. Un “ajuste perfecto” a datos correlacionados en lazo cerrado, puede resultar un modelo erróneo.

La calidad de los datos (y la correspondiente calidad de la estimación del modelo) es menos crítico que en la operación en lazo cerrado.

18. Funciones de Transferencia de Todo el Sistema Identificado.

En la figura 20 se muestra todo el proceso detallado en tiempo continuo y cada bloque con función de transferencia en la frecuencia o en la transformada Laplace (se especifica luego).

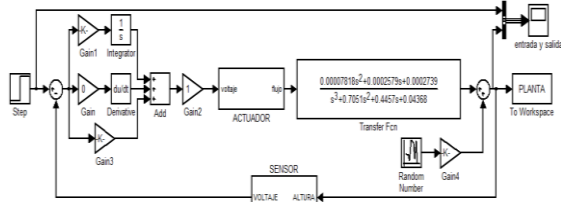


Figura 20.- Proceso total simulado en tiempo continuo

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. Función de transferencia del controlador

$$G_c(s) = \frac{5.7161(s + 0.2879)}{s}$$

2. Función de transferencia del actuador o válvula

$$G_v(s) = 0.190850013$$

3. Función de transferencia de la planta

$$G_p(s) = \frac{0.00007818s^2 + 0.0002579s + 0.0002739}{s^3 + 0.7051s^2 + 0.4457s + 0.04368}$$

4. Función de transferencia del sensor

$$G_s(s) = 1$$

El error no es considerado porque no hay función para el error aunque para expresar el proceso total se colocó una función de error pequeña que no altera la respuesta del sistema identificado.

La figura 21 presenta la respuesta a la entrada paso al proceso total simulado en forma discreta, se observa el efecto del muestreo o discreteada, es un poco desestabilizante con respecto al continuo, haciendo que su tiempo de estabilización sea más largo.

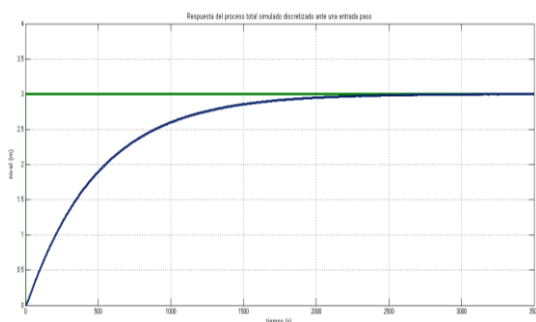


Figura 21.- Respuesta a una entrada paso del proceso total simulado (discreteada)

19. Conclusiones

1. Se utilizó las técnicas para modelación y simulación de un sistema dinámico mediante MATLAB utilizando la herramienta "ident"

aplicando los fundamentos teóricos visto sobre identificación.

2. Se obtuvo muy buenas aproximaciones cuando se hizo la identificación dando como mejor porcentaje la estructura modelada OE131 con un 91.58% aunque hay que recalcar las muy buenas aproximaciones en las demás estructuras como BJ21111 90.56%, ARX532 89.82%, ARMAX2121 89.23%, validándose que tan aproximado se encuentra el modelo OE131 con el proceso simulado en el diagrama de bloques.
3. Se diseñó un controlador óptimo basado en la identificación y utilizando en Matlab la herramienta sisotool, para poder bosquejar el proceso y obtener datos contundentes que permita escoger el PID apropiado para el sistema modelado.

20. Recomendaciones

1. Tratar de realizar la identificación en lazo abierto ya que se puede obtener más datos que cuando está en lazo cerrado, además es más importante en lazo abierto al momento de hacer una buena estimación de una estructura paramétrica, aunque en algunas no considere el modelo de ruido el cual no es necesario.
2. Se debe tener un poco de conocimiento sobre el programa Matlab; ya que este cuenta con muchas herramientas de desarrollo, con las que el usuario puede relacionarse y así mostrar los resultados de una manera más técnica.

21. Referencia

- Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2003.
- 2. Katsuhiko Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto, Pearson Educación, 1996.
- Material de Estudio del Seminario "Introducción a la Identificación de Sistemas" Autor: Ing. César Martín.
- R. C. Dorf, "Modern Control Systems". 8va. Edición, Ed. Adisson-Weley 1988
- B. Shahian, M. Hassul, "Control System design Using Matlab". Ed. Prentice-Hall, 1993.