

Implementación de controladores por modos deslizantes empleando LabVIEW para estación de control de presión.

Martínez-Fernández, J.^a

^a Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Nuevo Laredo, 88205, Nuevo Laredo, Tamaulipas. México.

Resumen

En el presente trabajo se muestran dos implementaciones reales de controladores por modos deslizantes (CMD) basado en un modelo establecido como una planta de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), se empleará el entorno LabVIEW para la captura de los datos de sensores, así como para generar la señal de control que será enviada a una planta de control de presión LabVOLT 3501-M.

Palabras clave: Control PID, Ingeniería de control, Instrumentos virtuales para control, Control robusto, Modos deslizantes.

Implementation of sliding mode control using LabVIEW for pressure control station.

Abstract

This paper shows a real implementation of a sliding mode controller (SMCr) based on a model established as a first-order plant plus dead time (FOPDT), the LabVIEW environment will be used to capture sensor data, as well as to generate the control signal that will be sent to a LabVOLT 3501-M pressure control plant.

Keywords: PID Control, Control engineering, Virtual instruments for control, Robust control, Sliding modes.

1. Introducción

En los procesos industriales, el control de la presión en recipientes es de importancia debido a la necesidad de conocer el contenido en gas de un recipiente cerrado, como los tanques donde se almacenan gases como aire o gas para su posterior uso en un proceso posterior. La estrategia común para el control de estos procesos son los controladores PID, aunque esta estrategia es ampliamente utilizada, estudios recientes muestran que gran parte de los controladores PID utilizados en la industria no se encuentran con un desempeño óptimo debido a diversos problemas (O'Dwyer, 2012), por ello en las últimas décadas se han estudiado diversas técnicas de control con la finalidad de obtener mejores resultados.

Otro problema que encontramos en los controladores PID industriales es el problema del error de modelado (dinámicas sin modelar y disturbios sin considerar), estos problemas conllevan una degradación en la acción de control. Por lo anterior el uso de CMD tiene una gran ventaja con respecto a la alternativa clásica.

El CMD tiene la ventaja de tener mayor robustez, rechazo ante perturbaciones y ante dinámicas no modeladas, pudiendo ser utilizado para controlar sistemas lineales o no lineales (Camacho & Smith, 2000) (Kaya, 2007).

El CMD es usualmente abordado desde la perspectiva del modelado en el espacio de estados (Utkin, 1977), aunque este enfoque es muy utilizado en el ámbito académico conlleva cierta complejidad de uso en procesos industriales, en los cuales se tiene un alto grado de complejidad por lo que

conlleva una mayor dificultad para obtener ecuaciones de estado apropiadas. Debido a la gran dificultad de un modelado exacto es común encontrar la representación de los sistemas en la forma de una planta de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), de esta manera pruebas como la de la curva de reacción o las de oscilaciones sostenidas permiten obtener una expresión matemática que modele el sistema a controlar, dependiendo únicamente de 3 parámetros, el tiempo muerto t_0 , la constante de tiempo del sistema τ y la ganancia estática K_0 .

2. Conceptos básicos sobre control por modos deslizantes

El CMD es una estrategia de control derivada de las investigaciones de los controladores de estructura variable (CEV), estos fueron estudiados originalmente en la década de los 30 del siglo pasado de manos de investigadores como Kulebakin y Nikolski, estudiando el control de un motor de DC para un aeroplano y para el control de la trayectoria de un pequeño barco a control remoto (Utkin, Guldner and Shi, 1999), otros investigadores concuerdan con que el desarrollo moderno del CMD se puede ubicar en la URSS en la década de los 70, estudiado primera mente por Utkin.

Un CMD es un tipo de controlador que puede modificar su estructura de forma intencional entre un conjunto de funciones de control prediseñadas. En general podemos decir que un CMD puede tener una terna de funciones de control como

*Autor para correspondencia: ingjorgemartinezfdz@gmail.com

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

$$\Psi = \begin{cases} \alpha_1 & \text{si } s > 0 \\ \alpha_2 & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Así la estructura de la acción de control cambiara dependiendo del valor en cada momento de la variable s , denominada superficie deslizante.

La superficie deslizante es una función matemática que define el comportamiento deseado del sistema durante el periodo transitorio, por ello la superficie debe ser diseñada de tal manera que esta posea la dinámica deseada para el sistema. Por ello, el primer paso para diseñar un CMD es definir una superficie apropiada, existiendo diversas formas de esta misma, la más común de emplear es representada como:

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + C\right)^{n-1} e(t) \quad (2)$$

Donde $s(t)$, es la superficie deslizante,

C es una constante que cumple con el criterio de estabilidad de Routh,

$e(t)$ es el error de seguimiento, $e(t) = R(t) - X(t)$.

La superficie deslizante definida como en (2) se denomina modo deslizante convencional (Edwards, Fridman, Levant & Shtessel, 2010), está tiene la simplicidad de que es de orden menor que el del sistema a controlar, por lo que si el sistema es de $n=2$ la superficie deslizante tiene una estructura tipo controlador PD, provocando que al digitalizar el controlador solo sea necesario implementar una derivada.

Otra posible definición de superficie deslizante es propuesta por Slotine & Liu (1991) y desarrollada posteriormente por Camacho & Smith (2000), en esta la superficie deslizante es definida con base en la integral del error de seguimiento, como

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + C\right)^n \int e(t) dt \quad (3)$$

Al desarrollar (3) para un sistema $n=2$ la superficie deslizante define una estructura tipo PID, lo cual proporciona ciertas ventajas al ser esta estructura ampliamente conocida tanto en el ambiente académico como en el industrial.

El segundo paso para diseñar un CMD es seleccionar la ley de control que tendrá el mismo, así tomando como base a (1), podemos definir una ley de control u que tenga dos posibles estados, $u = [-1, 1]$, provocando así que solo existan estos dos valores de la ley de control y *switcheando* entre los mismos, esto lo podemos expresar utilizando la función signo, definida como

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ +1 & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

El uso de la función signo ayudará a simplificar la notación de la acción de control a la forma

$$u = K_D \text{sign}(s) \quad (5)$$

Donde K_D es una constante positiva que tiene la función de escalar la ley de control a los límites de la salida del controlador. Aunque el uso de (5) es ampliamente utilizado y fácil de desarrollar este conlleva un problema en su implementación, esto es que al *switchear* entre los dos posibles valores se genera una oscilación de alta frecuencia y magnitud finita denominado *chattering*, que aparece en la superficie deslizante y que afectan a la acción de control. La aparición del *chattering* es indeseable debido a que estas oscilaciones de alta frecuencia pueden dañar nuestro

elemento final de control, como válvulas de control o relevadores. Para evitar el *chattering* es común emplear una aproximación suavizada a la función signo, una de las opciones más utilizadas para esto es la función relé',

$$u \approx K_D \frac{s(t)}{|s(t)| + \delta} \quad (6)$$

Donde δ es una constante sintonizable definida positiva que ayuda a suavizar la función signo, en la Figura 1 se observa la comparación entre la función signo y la función suavizada.

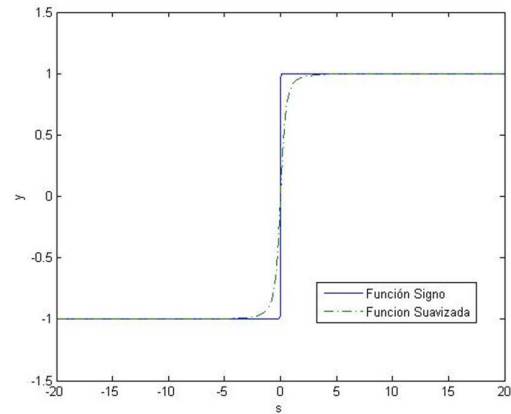


Figura 1. Comparación entre la función $\text{sign}(x)$ y la aproximación suavizada $s(t)/|s(t)| + \delta$, utilizando $\delta=1.5$ y $K_D = 1$.

2.1. Diseño con control equivalente

Otra forma de definir la acción de control es por el denominado método del control equivalente, en este la función de control se compone de dos partes una discontinua proveniente de la función signo o de la aproximación suavizada y otra parte continua que proviene del control equivalente, como sigue

$$u = u_c + u_d \quad (7)$$

La acción u_c se obtiene al aplicar la condición de que el control tiene un error de seguimiento igual a cero y por ende la superficie deslizante también es cero, así como sus derivadas, llevando a la denominada condición deslizante

$$\frac{ds(t)}{dt} = 0 \quad (8)$$

Para desarrollar el control equivalente iniciamos con el modelo FOPDT del sistema definida como

$$\frac{X(p)}{U(p)} = 0.56 \frac{e^{-p}}{13p+1} \quad (9)$$

Donde p es la variable compleja de Laplace.

En la Figura 2 se puede observar la curva de reacción obtenida y con la cual se obtuvieron los parámetros del modelo FOPDT. El problema de (9) es que el exponencial del tiempo muerto conlleva un aumento en la complejidad del controlador, por lo que a este termino se le aplica un desarrollo en series de Taylor de primer orden como

$$e^{-t_0 p} = \frac{1}{e^{t_0 p}} = \frac{1}{t_0 p + 1} \quad (10)$$

Aplicando el desarrollo de (10) en una FOPDT y anti transformando obtenemos la expresión

$$\frac{d^2X(t)}{dt^2} = \frac{K_0}{t_0\tau} u - \frac{t_0+\tau}{t_0\tau} \frac{dX(t)}{dt} - \frac{X(t)}{t_0\tau} \quad (11)$$

Si desarrollamos (3) y aplicamos la condición (8) obtenemos

$$u_{eq} = \frac{t_0\tau}{K_0} \left\{ \left(\frac{t_0+\tau}{t_0\tau} - C_1 \right) \frac{dX(t)}{dt} + \frac{X(t)}{t_0\tau} + C_0 e(t) \right\} \quad (12)$$

Si tomamos $C_1 = \frac{t_0+\tau}{t_0\tau}$, (12) se simplifica como

$$u_{eq} = \frac{t_0\tau}{K_0} \left\{ \frac{X(t)}{t_0\tau} + C_0 e(t) \right\} \quad (13)$$

Tomando entonces (13) y (6) y aplicando esto a (7)

$$u_{eq} = \frac{t_0\tau}{K_0} \left\{ \frac{X(t)}{t_0\tau} + C_0 e(t) \right\} + K_D \frac{s(t)}{|s(t)|+\delta} \quad (14)$$

Aplicando las fórmulas dadas por Camacho (2000) se obtienen los valores de la constante C_0, K_D, δ mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de sintonización para el control equivalente como propone (Camacho,2000).

Parámetros	C_0 [seg ⁻¹]	K_D [frac CO]	δ [frac $\frac{CO}{seg}$]
------------	----------------------------	-----------------	-----------------------------------



Estación de control de presión LabVOLT 3501-M

Figura 3: Imagen de la estación de control empleada en el artículo y curva de reacción obtenida.

La adquisición de los datos proveniente del sensor de presión diferencial que posee la estación se llevó a cabo por medio de una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB6002 de la empresa National Instruments, y por medio de un módulo convertidor de voltaje a corriente se transformó la señal de voltaje de la señal de control de la DAQ (tarjeta de adquisición de datos) a una señal de corriente entre los 4 y 20 mA aceptada por el convertidor de corriente a presión que alimenta la entrada de control de la válvula de control de la estación. Para el acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de presión diferencial fue igualmente necesario convertir la señal de corriente a voltaje, haciendo pasar dicha señal por una resistencia de 250Ω.

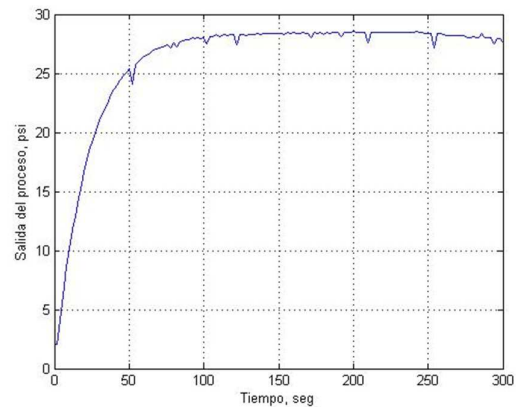
Sintonización	0.289	56.4	1.1524
Camacho			

3. Implementación en LabVIEW

Para implementar los controladores dados en (5) y (14) se utilizó el bloque Mathscript de LabVIEW, el cual permite desarrollar expresiones como en cualquier lenguaje de programación basado en texto como C o MATLAB. Para poder implementarlo en esta forma es necesario pasar los controladores a una forma discreta. Para discretizar la expresión la forma empleada es la de aproximación directa de la derivada empleando la aproximación de 3 puntos

$$\frac{dy}{dx} \approx \frac{3x(n)-4x(n-1)+x(n-2)}{2T_s} \quad (15)$$

Aplicando (15) directamente a la definición de las superficies deslizantes (2) y (3) provee una discretización de mejor resultado que aquellas que usan la aproximación de dos puntos. En la Figura 4 se muestra el Mathscript de LabVIEW implementado.



Respuesta del sistema ante una entrada escalón del 50%.

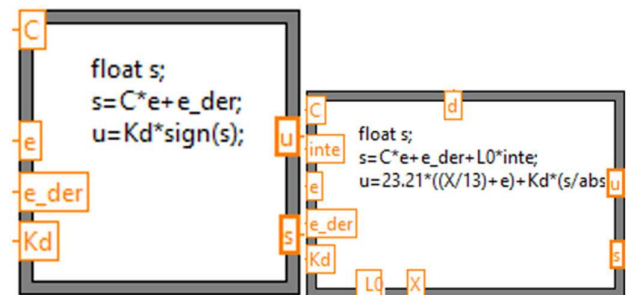


Figure 4. Superficie y ley de control como en (5) y (14).

4. Resultados

Los dos controladores presentados en (5) y (14) fueron probados realizando una serie de saltos escalón para comprobar su capacidad de seguimiento de trayectorias, dichos resultados son mostrados en la Figura 5.

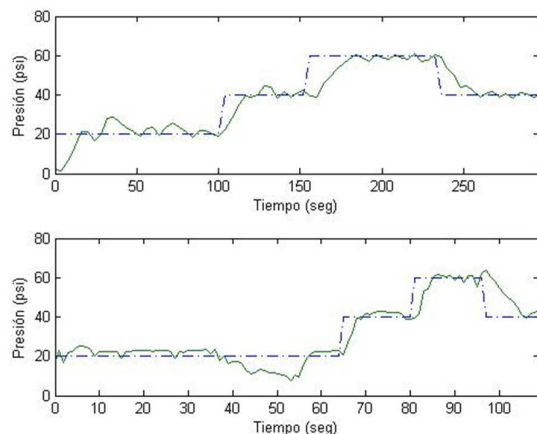


Figura 5. Salidas del proceso controladas por CMD convencional y por CMD con estructura tipo PID.

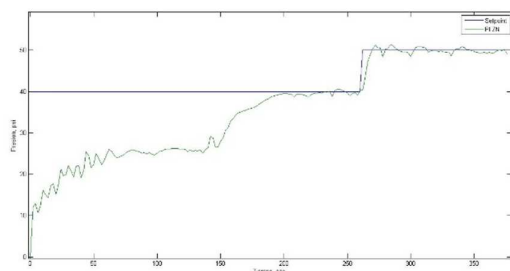


Figura 6. Controlador PID sintonizado con Ziegler-Nichols para la estación de 3501-M.

Se puede observar que en ambos controladores se logra realizar un seguimiento de los cambios dados al setpoint del proceso, aunque el seguimiento puede parecer inexacto es común encontrar este tipo de gráficas de control en procesos de presión, en los cuales la variable medida toca el setpoint pero no se mantiene exactamente en este sino que tiene crestas y valles en torno a él. En cambio, el controlador PID tuvo cierta dificultad para lograr una primera aproximación al setpoint de 40psi además se ve un punto en el que la carga del compresor no permite llegar setpoint ya que el tanque tuvo que ser recargado.

5. Conclusiones

Se puede observar un mejor desempeño en ambos CMD en los cuales el proceso de carga y descarga del compresor no mostro ningún problema, aunque de ambos CMD convencional tuvo un mejor seguimiento del setpoint, sin tener grandes sobretiros como los que se pueden observar en algunos puntos del CMD tipo PID. Podemos decir que el CMD en ambas metodologías tuvo un mejor desempeño que el control PID.

Se puede agregar que el entorno LabVIEW ofrece una base cómoda en la cual desarrollar sistemas de control fiables y con una gran precisión en la captura y generación de las señales de control del sistema, además de dar una gran flexibilidad para el almacenamiento de los datos generados.

Agradecimientos

Quisiera agradecer al Laboratorio de Ingeniería Electrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Nuevo Laredo por permitir utilizar sus instalaciones para la realización de las residencias profesionales de las cuales emana este artículo.

Un agradecimiento especial también al MC. Daniel Olivares Caballero y al Dr. Cesar Contreras Faz por sus comentarios durante la realización de este trabajo.

Referencias

- O'Dwyer, A. (2012). An Overview of Tuning Rules for the PI and PID Continuous-Time Control of Time-Delayed Single-Input, Single-Output (SISO) Processes. Vilanova, R., Visioli, A. (Eds), PID Control in the Third Millennium (pp. 3-44). Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-1-4471-2425-2
- Camacho, O., Smith, C. (2000). Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. ISA Transactions, 39, 205-218. DOI: 10.1016/S00019-0578(99)00043-9
- Kaya, I. (2007). Sliding-Mode control of stable processes. Ind. Eng. Chem. Res. 46, 571-578. DOI: 10.1021/ie0607806
- Utkin, V., (1977). Variable Structure Systems with Sliding Modes. IEEE Trans. Autom. Control 22, 212-222. DOI: 10.1109/TAC.1977.1101.446
- Utkin, V., Guldner, J. and Sji, Jingxin, (1999). Sliding mode control in electromechanical systems. London, Inglaterra. Taylor & Francis.
- Edwards, C., Fridman, L., Levant, A. and Shtessel, Y. (2010). Sliding Mode Control and Observation. New York, USA. Birkhauser.
- Slotine, J., Li, W. (1991). Applied nonlinear control. New Jersey, USA. Prentice Hall.