

CONTROL SMC PARA SISTEMA DE PRESIÓN EN EL MODULO DE PROCESOS.

Leonardo F. Fernández Díaz, Carlos A. Cruz Pérez.

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA.

Lfernandez@unisalle.edu.co

Ccruz54@unisalle.edu.co

Resumen – Este artículo explica la metodología seguida para implementar una técnica de control avanzado en una unidad de entrenamiento de automatización dentro de la universidad de La Salle / Colombia. Esta técnica es conocida como “modos deslizantes” (SMC) y su objetivo es construir una superficie de control donde el sistema se comporte de la forma deseada, usando el teorema de Lyapunov. En este caso, se controló un sistema de presión, el cual fue identificado con un modelo de primer orden más tiempo muerto, logrando error en estado estacionario nulo a diferentes referencias y un tiempo de establecimiento rápido. Al final se realiza una comparación con un control PI en estructura SMITH para observar su eficiencia.

Lyapunov, Presión, Control, Identificación, Proceso.

Abstract - This article explains the methodology followed to implement an advanced control technique in an automation training unit within the University of La Salle / Colombia. This technique is known as “sliding modes” (SMC) and its objective is to build a control surface where the system behaves in the desired way, using Lyapunov's theorem. In this case, a pressure system was controlled, which was identified with a first order model plus dead time, achieving zero steady state error at different references and a fast settling time. At the end, a comparison is made with a PI control in SMITH structure to observe its efficiency.

Lyapunov, Pressure, Control, Identification, Process.

I. INTRODUCCIÓN.

Las técnicas de control clásicas, basadas en ubicar los polos en una posición deseada para cumplir con ciertas características de diseño, son usadas en muchos campos de investigación ya que permiten obtener buenos resultados en sistemas con perturbaciones o condiciones que alteren el comportamiento deseado del sistema. Sin embargo, dentro de la industria existen muchos procesos que, por su poca complejidad, solo es necesario diseñar un controlador por técnicas más sencillas, como lo es el lugar geométrico de las raíces e implementarlo con una estructura robusta ante las perturbaciones.

Aun así, la industria está avanzando cada vez más hacia la autonomía completa de sus procesos, por lo que, en algunos casos de mayor complejidad, las técnicas convencionales de control no son suficientes y es necesario implementar técnicas más avanzadas que permitan su programación en un PLC usando tecnología de nivel industrial.

El control SMC, está dentro de la categoría de control robusto, ya que plantea conceptos como la acción integral, superficies de deslizamiento, teorema de Lyapunov y demás aspectos que permiten tener todo un trasfondo matemático que permite obtener un controlador con mejor diseño y, desempeño en la implementación. Por ello, este artículo expone la metodología seguida para diseñar un controlador por SMC para un sistema de presión dentro de una unidad de entrenamiento, a partir de un modelo identificado de la planta de primer orden más tiempo muerto.

II. UNIDAD DE ENTRENAMIENTO.

El objetivo de la investigación es implementar un controlador de presión en la unidad de entrenamiento en Automatización proporcionada por la Universidad de la Salle. Dicha unidad cuenta con los siguientes elementos (Ver Figura 1):

- Una bomba controlada mediante un variador de frecuencia. (MB01)
- 2 tanques de almacenamiento. (TK01, TK02)
- 4 electroválvulas. (VA11, VA21, VA12, VA22)
- 1 válvula proporcional (VC01).
- Transmisor de nivel.
- Transmisor de presión (TP01)
- Transmisor de flujo (TF01).

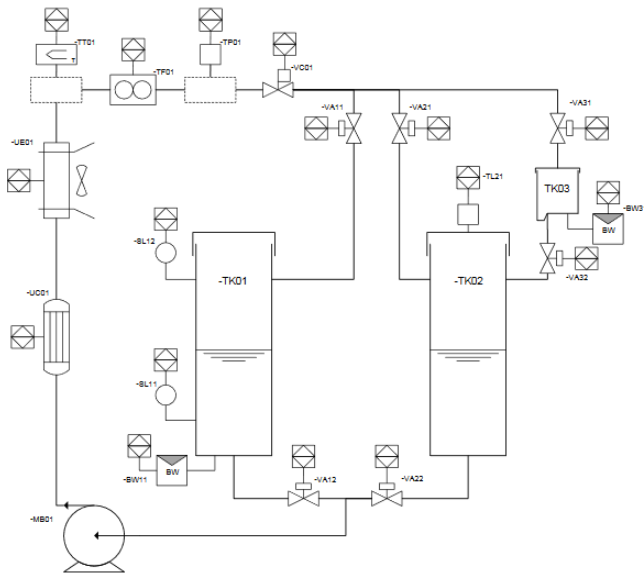


Fig 1. Unidad de entrenamiento de automatización.

Como se describió anteriormente, la unidad de entrenamiento cuenta con un transmisor de presión el cual mide el comportamiento de dicha variable y permite realizar la identificación de la planta. La apertura y cierre de las válvulas pueden modificar el comportamiento del sistema, por lo que el control debe ser robusto ante las perturbaciones de este tipo. La metodología de validación consistirá en controlar el sistema a diferentes referencias sin importar la perturbación que generen las válvulas.

III. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.

Como se puede observar en la Figura 1, el transmisor de presión se encuentra alejado del actuador (Bomba), por lo que el comportamiento de la presión es medido con un retraso de tiempo. Es decir, que la planta posee tiempo muerto que debe tenerse en cuenta al momento de obtener su función de transferencia. Así que, para identificar el proceso se excitó el variador de la bomba con un pulso desde su valor mínimo al máximo (6000 a 27000 bits) y por medio de un enlace OPC usando Kepserver (entre Matlab Simulink y Tia portal) se registraron en vectores la presión, el tiempo y la entrada del sistema. (Ver Figura 2)

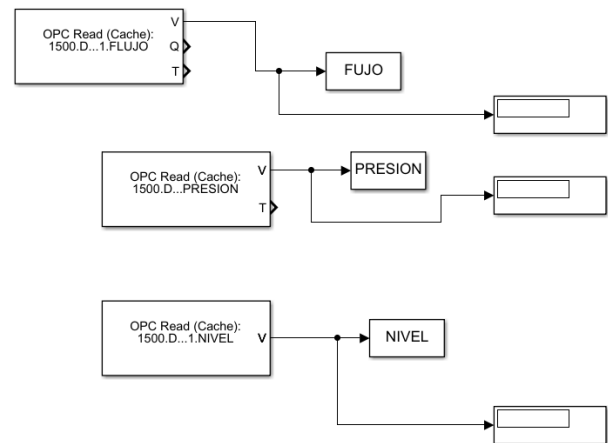


Fig 2. Esquema de conexión en simulink para leer las variables.

Teniendo en cuenta que el análisis de los datos debe ser desde el instante donde se activo el pulso, se realiza el respectivo acondicionamiento de los vectores y se analiza el comportamiento de la presión (Figura 3).

Como se observa en la Figura 3, la presión presenta un tiempo muerto antes de reaccionar y mostrar su comportamiento. Además, debido a las características físicas del transmisor y el comportamiento natural de la variable, se observa una oscilación constante después del transiente, lo que debe tenerse en cuenta para análisis posteriores.

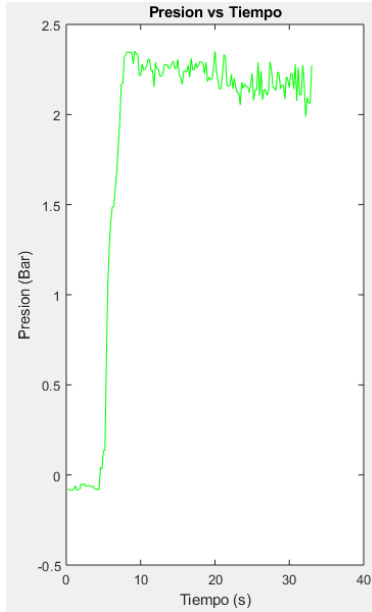


Figura 3. Comportamiento de la presión en lazo abierto.

El siguiente paso, es utilizar un modelo para identificar el sistema; en este caso es suficiente construir un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) según la metodología expuesta por (Alfaro, 2007). El modelo presenta la siguiente estructura:

$$Gp1(s) = \frac{Kp * e^{-tm*s}}{\tau * s + 1} \quad (1)$$

Donde:

Kp es la ganancia en lazo abierto.

tm es el tiempo muerto de la planta.

τ es una constante de tiempo del sistema.

Para calcular cada uno de estos parámetros, es necesario usar los datos medidos de la planta (Entrada, Salida y Tiempo) y usar las siguientes expresiones construidas experimentalmente por (Alfaro, 2007):

$$Kp = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2)$$

$$\tau = 0,9102 * (t75 - t25) \quad (3)$$

$$tm = 1,2620 * t25 - 0,2620 * t75 \quad (4)$$

Donde $t25$ y $t75$, corresponden al instante de tiempo de las amplitudes de presión que corresponden al 25% y 75% de la señal en lazo abierto. Para obtener estos valores, se usa la interpolación lineal que corresponde a la siguiente ecuación:

$$y = y0 + \frac{y1 - y0}{x1 - x0} * (x - x0) \quad (5)$$

Donde:

Y es el valor buscado que esta entre el valor mínimo y maximo.

$Y0$ es el valor inferior de amplitud.

$Y1$ es el valor superior de amplitud.

$X0$ es el tiempo que corresponde al valor inferior.

$X1$ es el tiempo que corresponde al valor superior.

Utilizando esta metodología se obtuvo la siguiente función de transferencia para el sistema:

$$Gp(s) = \frac{0,0001283 * e^{-4.98}}{1,392 * s + 1} \quad (6)$$

En la figura 4, se observa la comparación entre el sistema real y el estimado (POMTM), identificando una diferencia evidente en estado estacionario que puede ser fuente de error dentro del diseño del controlador.

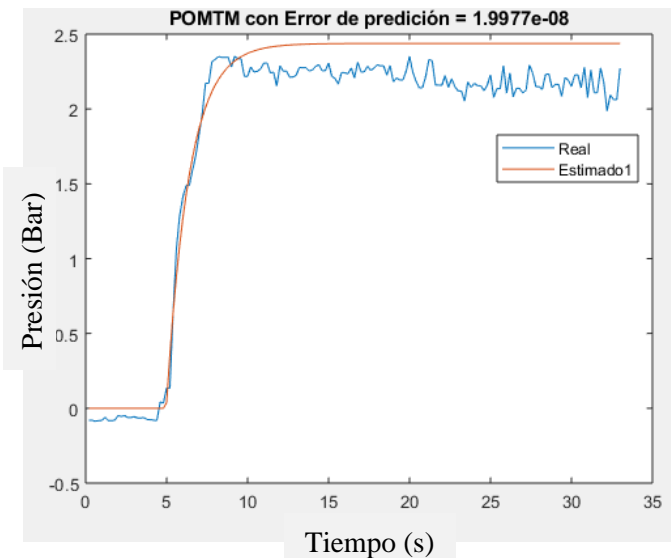


Fig 4. Comparación entre el sistema real y el estimado.

IV. DISEÑO DEL CONTROLADOR SMC.

El diseño del controlador usando la metodología de modos deslizantes (SMC), inicia con la función de transferencia del sistema y su descomposición en variables de estado, de la siguiente forma: (evalo-Castiblanco, 2017)

$$\frac{P(s)}{B(s)} = \frac{0,0001283}{1,392 * s + 1} * e^{-4,98 * s} \rightarrow \ddot{P} * \tau + \dot{P} = K * B \quad (7)$$

Donde:

P es la presión.

τ es la constante de tiempo (1,392).

K es la ganancia en lazo abierto (0,0001283)

B es la señal de control.

$$\ddot{P} = \frac{K * B - \dot{P}}{\tau}; \quad \ddot{e} = \ddot{P} - \ddot{P}_{ref}; \quad \dot{e} = \dot{P} - \dot{P}_{ref} \quad (8)$$

Las expresiones para cada estado de la presión (8) y las derivadas del error se obtienen del despeje de la ecuación (7), teniendo en cuenta que el error es la diferencia entre la referencia y la señal del error.

Ahora, reemplazando \ddot{P} en \ddot{e} se obtiene la siguiente expresión para la segunda derivada del error:

$$\ddot{e} = \frac{1}{\tau} (K * B - \dot{P}) - \ddot{P}_{ref} \quad (9)$$

La superficie de diseño se construye por definición del método, donde se tienen 3 ganancias parecidas a las de un controlador PID, por lo que realizan acciones derivativas e integrativas dependiendo de la derivada del error:

$$\dot{s} = K1 * \dot{e} + K2 * e + K3 * \ddot{e} \quad (10)$$

Reescribiendo la expresión anterior:

$$S = K1 * e + K2 * \int e + K3 * \dot{e} \quad (11)$$

A partir, de esta superficie de diseño, se obtiene la primera ley de control del sistema reemplazando la expresión (9) en (10), así:

$$0 = K1 * \dot{e} + K2 * e + K3 * \left(\left(\frac{K * B}{\tau} - \frac{\dot{P}}{T} \right) - \ddot{P}_{ref} \right) \quad (12)$$

$$0 = K1 * \dot{e} + K2 * e + \frac{K3 * K * U_{eq}}{T} - \frac{K3 * P}{T} - K3 * \ddot{P}_{ref} \quad (13)$$

$$U_{eq} = \left(-K1 * \dot{e} - K2 * e + \frac{K3 * \sigma}{T} + K3 * \ddot{P}_{ref} \right) \left(\frac{T}{K3 * K} \right) \quad (14)$$

Para obtener la segunda ley de control SMC se aplica el teorema de Lyapunov, el cual otorga la siguiente expresión:

$$B = s * \dot{s} = s \left[K1 * \dot{e} + K2 * e + K3 \left(\frac{K(U_{eq} + U_{sw})}{T} - \frac{\dot{P}}{T} - \ddot{P}_{ref} \right) \right] \quad (15)$$

Al realizar los productos internos de la expresión (15) y despejar B (señal de control Uew) se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{B} &= s[K1 * \dot{e} + K2 * e \\ &+ K3 \left(\frac{K - \frac{K1 * T * \dot{e}}{K3 * K} - \frac{K2 * T * e}{K3 * K} - \frac{K3 * T * \dot{P}}{\tau * K3 * K} - \frac{K3 * T * \ddot{P} * \ddot{P}_{ref}}{K3 * K}}{T} \right. \\ &\left. - \frac{\dot{P}}{T} - \ddot{P}_{ref} \right] \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{B} &= \left[K1 * \dot{e} + K2 * e + K3 \right. \\ &\quad \left. * \left(-\frac{k1 * \dot{e}}{K3} + \frac{K2 * T * e}{K3} + \frac{P}{T} + \ddot{P}_{ref} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{K * U_{sw}}{T} - \frac{\ddot{P}}{T} - \ddot{P}_{ref} \right) \right] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\dot{B} = s \left[K1 * \dot{e} + K2 * e - K1 * \ddot{e} - K2 * e + \frac{K3 * K * U_{sw}}{T} \right] \quad (18)$$

Entonces, la derivada de la señal de control B, debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$\ddot{B} = s * \left[\frac{K3 * K * U_{sw}}{T} \right] \leq 0 \quad (19)$$

Por lo tanto:

$$U_{sw} = -sgn(s) * \left[\frac{T}{K3 * K} \right] \quad (20)$$

V. SIMULACIÓN EN MATLAB SIMULINK.

Para comprobar el funcionamiento del controlador antes de pasar a la implementación real, se usó Matlab simulink para simular el comportamiento en lazo cerrado. Como se observa en la Figura 5, se ingresa una referencia de presión mediante un **step** que luego va a un restador para calcular el error de realimentación. Este error ingresa a la planta, a un filtro derivador (primera derivada del error) y a un integrador (integral del error), estos valores son enviados a un bloque de función donde se calcula la superficie de diseño y las señales de control que son sumadas y realimentadas nuevamente (Figura 5)

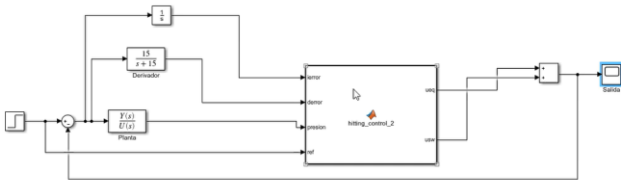


Fig 5. Esquema en Simulink del controlador SMC.

En la figura 6, se observa como el sistema logra controlarse a 2 bares de presión (referencia) en poco tiempo y sin sobre impulso, por lo que en teoría el control es rápido, de efecto suave y no presenta error en estado estacionario.



Fig 6. Simulación del sistema en lazo cerrado.

VI. IMPLEMENTACIÓN EN PLC.

Para implementar este controlador, se debe tener en cuenta que la señal de control es la suma de las expresiones (14) y (20). Entonces según la Figura 7:

Primero se obtiene la señal del error (e_0), luego se calculan las ganancias de las expresiones (14) y (20):

```
2  #e0 := (#ref - #sensor);
3
4
5
6
7
8  #Beta:=1/(#Kbb*#K*#k3);
9
10 #alpha1:=#k1-(#k3*#Kbb*#K*#k1*#Beta);
11 #alpha2:=#k2-(#k3*#Kbb*#K*#k2*#Beta);
12 #alpha3:=(-#k3*#Kbb*#T)+((#Kbb**2)*#K*(#k3**2)*#Beta*#T);
13 #alpha4:=(#Kbb*#K*#Beta*(#k3**2))-#k3;
```

Fig 7. Cálculo del error y constantes del sistema.

Luego, se construye la superficie de diseño a partir de la señal del error y las ganancias K_1 , K_2 , K_3 obtenidas por ajuste empírico, ya que la única restricción de estas ganancias es que sean mayores a cero.

Finalmente, se calculan las señales de control y se envían al variador para que exciten el sistema hasta llevarlo a la referencia deseada. (Figura 8)

```
#s:=(#k1*#e1)+(#k2*#e0)+(#k3*#e2);

#ueq:=((#k1*#e1)+(#k2*#e0)-(#k3*#Kbb*#T*#sensor)-(#ref*#k3))*#Beta;

#usw := (- TAN(#s * 100)) * #Beta;

#Motor := (#ueq + #usw);
```

Fig 8. Cálculo de la superficie de diseño y la señal de control.

Vale la pena resaltar, que la programación se realizó dentro de un bloque FB ubicado en una tarea cíclica cuyo tiempo de muestreo es de 100000 μs , para tomar las suficientes muestras y controlar la planta durante el ciclo scan.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Al implementar el código respectivo, se puso a funcionar la planta (unidad de entrenamiento de procesos). Para comprobar el funcionamiento del controlador se ingresaron diferentes valores de referencia para la presión, y se observaba la medida del sensor (salida) para comparar su comportamiento real con la simulación.

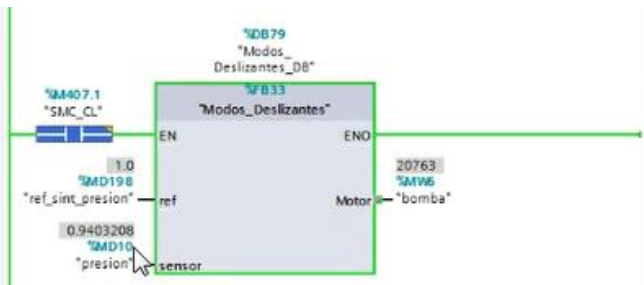


Fig 9. Prueba de control en el módulo de procesos a 1 Bar de presión.

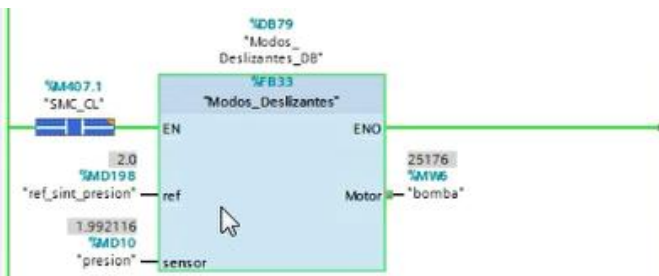


Fig 10. Prueba de control en el módulo de procesos a 2 Bar de presión.

Como se observa en las figuras 9 y 10, el sistema es controlable en diferentes referencias de presión, arrojando un error en estado estacionario muy bajo y aceptable. Además se observó que su establecimiento es rápido, pero a diferencia de la simulación, la implementación real sí presenta un sobre impulso que está dentro de los parámetros deseados, es decir, no afecta a la planta negativamente. El único inconveniente observado fue que se presenta una oscilación alrededor del punto de referencia, pero esto puede ser arreglado con algún filtro en ecuaciones de diferencias.

Cuando alguna válvula de los tanques era cerrada, se presentaba un cambio en la dinámica del sistema, lo cual afectaba al controlador, ya que ahora el rango máximo de presión era hasta 6.5 Bar.

En la implementación se observó que el controlador sigue funcionando a pesar de esta perturbación y controla hasta los 6.5 bar, pero haciendo cambios de referencia de máximo 1 bar, ya que entre más grande el cambio mayor fue el sobre impulso y se salía del rango permitido por el variador en bits.

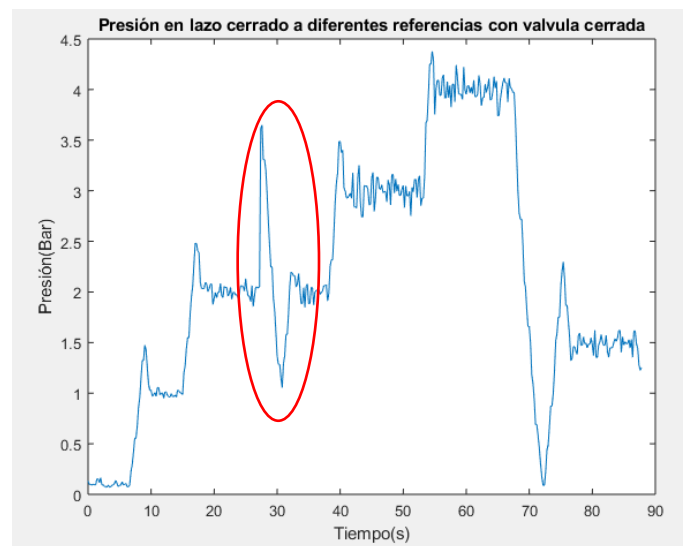


Fig 11. Comportamiento de la presión en lazo cerrado con la válvula del tanque 1 cerrada.

En la figura 11 se puede observar que el sistema controla por valores encima de 2 bares (máximo 6 bar) cuando la válvula del tanque 1 está cerrada. El área encerrada en un ovalo rojo, es la perturbación que el sistema detectó al cerrar dicha válvula, pero se observa que tiempo después el sistema vuelve a controlar.

Este impulso encerrado en el ovalo rojo, demuestra que la perturbación causa sobre impulsos que deben tenerse en cuenta para que el variador no salga del rango permitido (6000 a 27000 bits).

La figura 11 y 12 están construidas a partir de medidas reales obtenidas del módulo con el controlador implementado, usando una conexión OPC para medir la presión nuevamente.

También se implementó un controlador PI con estructura Smith aparte, para comparar con el controlador SMC. En la figura 12, se observa el resultado obtenido con el controlador Smith:

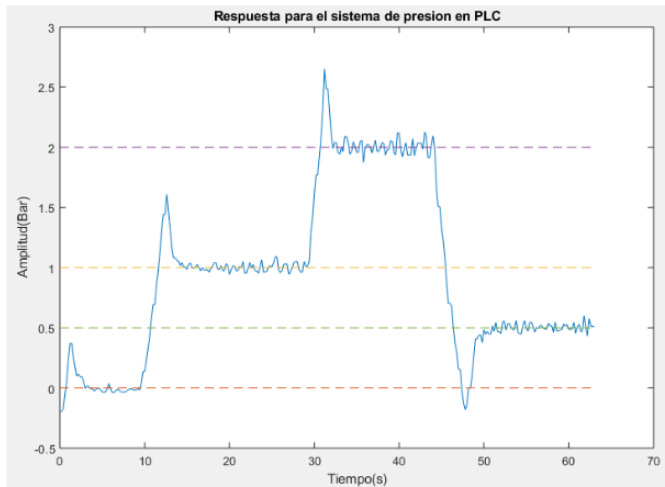


Fig 12. Presión en alza cerrado con control PI y Smith.

Al comparar la figura 12 (Smith) con la figura 11 (SMC) se nota que el controlador SMC es más rápido y permite el control a presiones mayores a 2 bares, lo cual demuestra su robustez ante perturbaciones del sistema.

VIII. CONCLUSIONES.

- A pesar de que el sistema identificado posee un error en estado estacionario en comparación con el sistema real (Figura 4). No disminuye la calidad del controlador SMC diseñado, pero si se presenta la oscilación natural del sistema alrededor del punto de referencia dentro un rango válido.
- El control SMC resulta ser robusto ante perturbaciones en el sistema como se observó en la figura 11, ya que a pesar de cerrar la válvula y detectar ese cambio, regresó a su punto de estabilidad sin problemas.
- El control SMC permite controlar a grandes presiones sin necesidad de un saturador realizando cambios de presión de 1 bar hasta 6 bar. En cambio, un controlador Smith solo

permitió hasta 2 bar ya que cuando se cerraba la válvula dejaba de funcionar y el sobre impulso se salía del rango permitido por el variador.

- La simulación en Simulink permitió saber que el controlador estaba diseñado correctamente, sin embargo, presenta diferencias con la implementación real, como lo es el sobre impulso y la oscilación natural del sistema.

REFERENCIAS

- Alfaro, V. M. (2007). *Método de identificación de modelos de orden reducido de tres puntos 123c*. Universidad de Coata Rica.
- Arevalo-Castiblanco, M. F. (2017). *Controlador LQR y SMC Aplicado a Plataformas Pendulares*. Bogotá: Revista Iberoamericana de Automática e Informática industria.