

# Pressure control in a pipeline prototype for fault detection

R. Carrera \* C. Verde \*

\* Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (e-mail: rcarrera@unam.mx verde@unam.mx).

---

**Abstract:** In the application of the theory of fault detection and isolation (FDI), there is a particular area that is the detection of leaks in pipelines that carry some type of liquid. An important premise in most of these detection methods is that the flow pressure at the pipeline inlet is considered to be constant, but this premise is not fulfilled when there is a hydraulic pump at the pipeline inlet. In this paper, a solution is presented to keep the pressure constant at the entrance of a prototype pipeline built specifically for the detection of pipeline failures. It is proposed to close a control loop to regulate the pressure, this with a proportional-integral controller (PI); The handicap in this proposal is that there is a discrete element in the loop, a frequency inverter. The steps of the controller design and its implementation in the pipeline are described. The final result shows excellent performance in pressure regulation.

*Keywords:* Pipeline, pressure control, PI control, Ziegler-Nichols, Fault Detection and Isolation

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas de ductos que transportan agua no tienen regulación en la presión de entrada, ya que provienen de tanques de almacenamiento o de sistemas de bombas sin regulación de la presión. Esta forma de operar en lazo abierto en un ducto tiene la desventaja que perturbaciones o fugas en los ductos provoquen variaciones considerables en la presión de entrada al ducto.

El análisis clásico del comportamiento del agua en ductos principales considera fuentes inagotables del líquido y que la presión a la entrada del ducto es constante sin importar el gasto demandado (Chaudhry, 2014). En algunos laboratorios, para emular una fuente inagotable del fluido a una presión constante, lo que hacen es construir un depósito a una altura considerable y bombean el líquido en el depósito hasta rebosarlo para mantener la altura de la columna de agua constante, el líquido derramado es recuperado en una cisterna, de donde es bombeado nuevamente al depósito superior. En la base del depósito se conecta una tubería que lleva el líquido a nivel del piso, esta es la fuente de gasto a presión constante. Pero en ambos casos se tiene la limitante que para un diámetro fijo de la tubería sólo se tiene un gasto máximo que no puede ser rebasado.

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) cuenta con un laboratorio construido *ex professo* para la realización de pruebas y validación de métodos de identificación y localización de

fugas en ductos. La instalación es una tubería de hierro galvanizado de 162 m de longitud con un diámetro de 3 pulgadas que cuenta con un depósito de agua, bombas hidráulicas, ver Figura 1, válvulas de extracción en puntos intermedios, descarga a presión atmosférica en el mismo depósito, y un sistema de adquisición de datos para monitorear sensores y enviar comandos a los diferentes dispositivos con que cuenta la instalación. La operación del sistema se realiza a través de un variador de velocidad conectado a la bomba, que es comandado por un sistema SCADA (System Control And Data Acquisition) en lazo abierto.

Esta instalación ha permitido validar diversas contribuciones del grupo Detección y Aislamiento de Fallas (Verde, 2023). Para la realización de experimentos se establece una frecuencia de operación que fija una presión de entrada. Se ha observado que cuando se abre una o varias válvulas de extracción, para simular fugas, la presión en la entrada se ve afectada por las perturbaciones, lo que altera las condiciones de operación asumidas en los sistemas de diagnóstico que se desea validar. Para mantener constante la presión de entrada ante la presencia de perturbaciones es que se diseñó un control PI con ese objetivo. Este documento detalla el proceso de diseño de un controlador sencillo para esta instalación, con el objetivo de que futuros ingenieros tengan elementos para enfrentar un problema real de esta naturaleza. Si bien existe una gran cantidad de métodos para sintonizar un PID, ver Aström and Hägglund (1995), el énfasis aquí es mostrar el paso a paso de la solución del problema del



Fig. 1. Instalación hidráulica, vista parcial con la bomba hidráulica en primer plano

diseño de un controlador, no obtener un método nuevo, por lo que se optó por el método clásico de Ziegler-Nichols.

La composición de este trabajo es de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe la planta prototipo, sensores y equipo utilizado para su funcionamiento. En la Sección 3 se plantea el problema que se quiere resolver y la propuesta de solución. Para poder obtener el controlador se requiere de un modelo sencillo de la planta, éste se obtiene en la Sección 4. Los pasos para diseñar el controlador propuesto se encuentran en la Sección 5. En la Sección 6 se prueba el controlador diseñado, tanto en simulación como su algoritmo discreto ya en la planta real. Las pruebas del desempeño del controlador se muestran en la Sección 7, y los resultados finales se encuentran en la Sección 8.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN HIDRÁULICA

La instalación (Carrera and Verde, 2022) consiste de un depósito de agua de  $10 m^3$ , indicado con (a) en la Figura 2, al cual se tienen conectadas dos bombas hidráulicas (b) que operan de forma independiente, las salidas de las bombas están conectadas a un cabezal y éste a la tubería (c). La tubería desfoga en el depósito de agua. El tramo útil de tubería se encuentra entre los puntos (g) y (h), donde también se encuentran los instrumentos de medición (e), estos son medidores de gasto y presión. V1 a V6 (f) son válvulas que sirven para simular fugas.

El funcionamiento del sistema SCADA consiste de un programa en la computadora personal (PC) que envía comandos de referencia de frecuencia (0-60 Hz) vía un

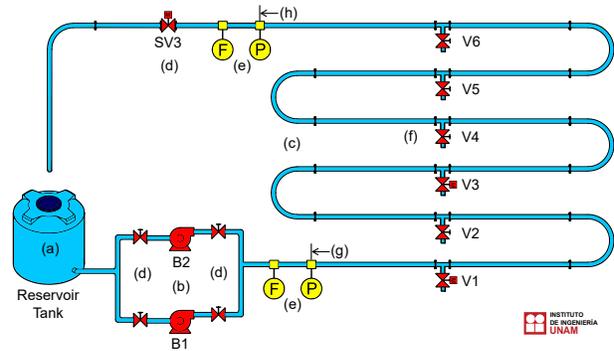


Fig. 2. Esquema de la tubería prototipo. Cortesía Verde (2023)

variador de frecuencia conectado al motor de la bomba hidráulica. En la Figura 3 se muestra un diagrama funcional del sistema. En la PC se tiene un programa codificado en LabVIEW que, por orden del operador, envía un comando de frecuencia (denotado  $F_u$  en la figura) al sistema de adquisición de datos (DAQ), quien a su vez lo convierte en una señal eléctrica de corriente  $I_u$  (4-20 mA) y lo transmite al inversor. El inversor genera una fuente de voltaje de 220 V trifásico ( $3\phi$ ) con la frecuencia comandada, regulando con ello el funcionamiento del motor de la bomba hidráulica (BOMBA). De esta manera, variando la frecuencia de la bomba se varía la presión  $H_e$ , en el punto (g) a la entrada de la tubería de la tubería, ver Figura 2.



Fig. 3. Esquema PC-Bomba hidráulica

Para la operación de este sistema, el inversor o variador de frecuencia y el sistema de adquisición de datos (DAQ) son fundamentales, la Figura 4 muestra una fotografía de los gabinetes con el conjunto DAQ-INVERSOR.

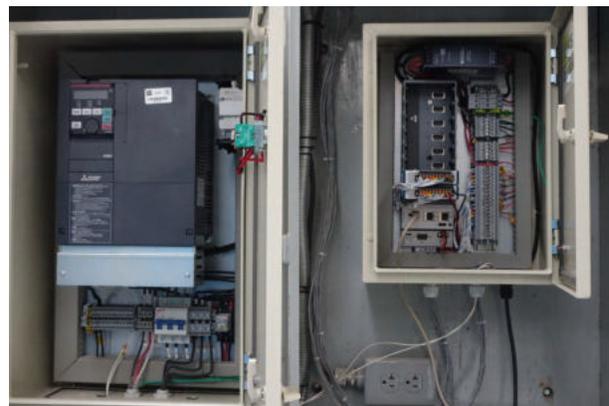


Fig. 4. Variador de frecuencia, izquierda, y sistema DAQ, derecha. Cortesía Verde (2023)

A continuación se da un listado del equipo utilizado en la instalación.

**Sensores de flujo:** Promass 83F de Endress+Hauser, sensor basado en el efecto de Coriolis.

**Sensores de presión:** Cerabar PMP71 de Endress + Hauser, sensor piezoresistivo.

**Inversor:** Variador de frecuencia F800 de Mitsubishi.

**Bomba centrífuga:** Siemens 10 HP.

**Sistema de adquisición de datos:** cRIO9067, NI9265 y NI9203 de National Instruments.

**Servoválvulas:** Georg Fischer modelo 133, y Remote Control modelo RCE 15.

**Computadora personal:** TOUGHBOOK CF-53 Panasonic, con procesador de 64 bits, reloj de 2.5 GHz, HD de 446 GB y 4 GB RAM

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y SOLUCIÓN

La presión constante en la entrada de la tubería es una premisa para el planteamiento de algunas soluciones enfocadas en la localización de una fuga, v. gr. Diao et al. (2019) y Colombo et al. (2009). En la instalación, la bomba hidráulica que suministra el flujo de agua tiene la capacidad suficiente para suministrar todo gasto demandado por la instalación, pero tiene el inconveniente de no mantener la presión constante a la entrada del ducto. En la Figura 5 se muestra como varía la presión de entrada ( $H_e$ ), mateniendo la frecuencia de la bomba a 60 Hz, cuando la servoválvula SV1 (V1 en la Figura 2) es abierta y cerrada (100% significa completamente abierta); la línea horizontal muestra el valor medio de la presión previo a la abertura de la válvula y sirve de referencia para estas variaciones de presión.

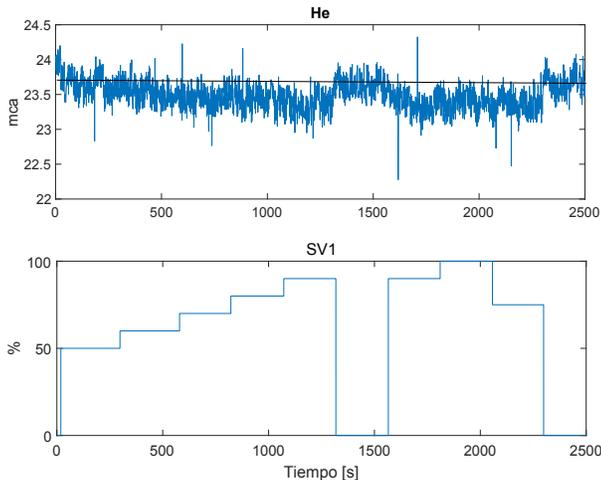


Fig. 5. Comportamiento de la presión de entrada ( $H_e$ ) con la bomba funcionando @55 Hz versus la abertura de la servo válvula SV1

Para resolver el problema de mantener la presión constante en la entrada, ya que se cuenta con un sensor que mide esa presión y también se puede regular desde la computadora la operación de la bomba, se propone cerrar el lazo con un controlador PI.

### 4. CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA DE LA PLANTA

Para poder cerrar el lazo es necesario caracterizar la planta que está formado por el conjunto DAQ-INVERSOR-BOMBA mostrado en la Figura 3. La entrada es un comando de frecuencia,  $F_u$ , y la salida es la presión  $H_e$ . Para el objetivo de regular la presión se propone un rango de variación de la frecuencia<sup>1</sup> de 50 a 60 Hz, como resultado, el rango de presión medido va de los 17.5 a 23.5 mca<sup>2</sup>. En la Figura 6 se muestran los puntos medidos y una recta ajustada a esos puntos; la recta ajustada esos puntos es

$$H_e = 15.07 + 0.6466F_u \quad (1)$$

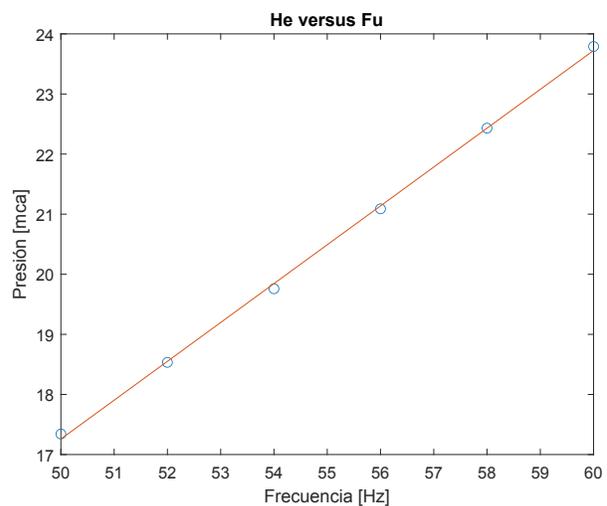


Fig. 6. Presión en mca a la entrada del ducto versus frecuencia del variador en el intervalo de trabajo del sistema. Los círculos son los valores medidos y la línea continua es la recta ajustada

### 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR PI

Para la sintonía de un control PI con el método de Ziegler-Nichols se requiere de la curva de reacción o respuesta escalón de la planta (Franklin et al., 1994). Para ello se elige un punto de operación de 55 Hz, esto para que la bomba tenga un rango de variación de  $\pm 5$  Hz para regular la presión demandada por el lazo de control, es decir, a priori se establece un rango de presión de referencia de 18 a 23 mca. En la Figura 7 se presenta la respuesta escalón unitario. Ajustando una recta de máxima pendiente tangente a la curva se obtiene un tiempo muerto  $L = 2.2$  s y una pendiente  $R = 0.0773$ . Con esos parámetros y la propuesta de Ziegler-Nichols

<sup>1</sup> Por construcción, las bombas hidráulicas deben operar en frecuencias cercanas a la frecuencia nominal que es de 60 Hz, por eso se considera aceptable que el límite inferior sea 50 Hz.

<sup>2</sup> metros de columna de agua (mca), término de uso común en el área de hidráulica, donde  $1 \text{ mca} = 0.1 \text{ kg/cm}^2$

para un controlador PI usando la curva de reacción,  $k_p = 0.9/RL$  y  $T_i = L/0.3$  se obtiene una ganancia proporcional  $k_p = 5.29$  y un tiempo integral  $T_i = 7.33$ .

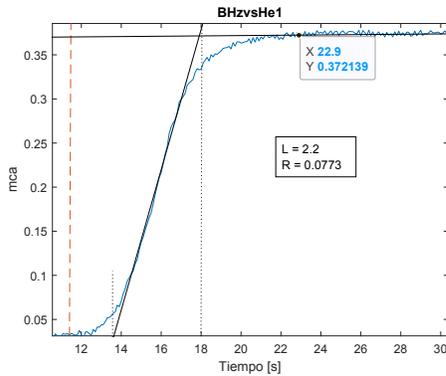


Fig. 7. Respuesta a un escalón unitario de frecuencia

El controlador PI es de la forma

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (2)$$

donde  $u(t)$  es el comando de control  $e(t)$  es la señal de error.

## 6. CONTROL EN LAZO CERRADO

Como el objetivo es regular la presión de entrada en el ducto, en este punto no es posible cerrar el lazo con el controlador PI y la planta, ya que nuestra señal de error tendría unidades de presión y por ende el comando también. Esto lleva a que es necesario introducir un bloque previo a la planta que convierta el comando de presión  $H_u$  en uno de frecuencia  $F_u$ , y la ganancia de este bloque es la inversa de la ecuación (1). En la Figura 8 se muestra el diagrama de bloques propuesto para el lazo cerrado, donde el bloque H/F representa la conversión del comando de presión a comando de frecuencia, tomando como base el comportamiento mostrado en la Figura 6. El bloque F/I es un módulo de corriente en el DAQ que convierte un valor de frecuencia en corriente<sup>3</sup>.

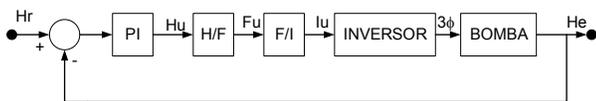


Fig. 8. Diagrama de bloques del control en lazo cerrado

Antes de probar el controlador en la planta real se hicieron simulaciones en Matlab para ver el desempeño del controlador. En la Figura 9 se muestra el diagrama en Simulink con la realización del controlador, ecuación (2)

Finalmente se construye todo el modelo en Simulink del lazo cerrado de la Figura 8, este se muestra en la Figura 10. El bloque PI contiene el diagrama de la Figura 9.

<sup>3</sup> La frecuencia es un número que va de 0 a 60 Hz, a 0 Hz corresponde una corriente de 4 mA y a 60 Hz una corriente de 20 mA.

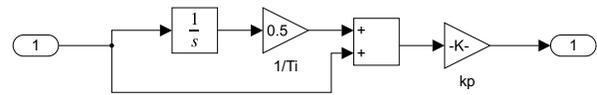


Fig. 9. Realización del control PI en Simulink de Matlab

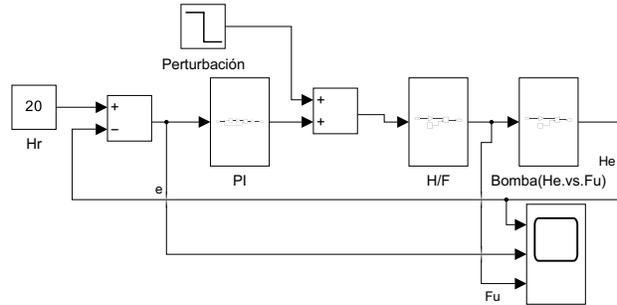


Fig. 10. Programa Simulink que simula el control de presión

Si bien se puede tener un modelo dinámico de la planta a partir de la respuesta escalón de la Figura 7, en este punto importa el comportamiento en estado permanente, por lo que se emplea el modelo estático de la ecuación (1) en el bloque Bomba; como el comando proveniente del controlador es un comando de presión es necesario convertirlo a un comando de frecuencia, que es la entrada al bloque Bomba, el bloque invGp es el modelo inverso de la misma ecuación.

La simulación consiste en un escalón de 20 mca como referencia y un escalón de perturbación de -5 mca a los 15 s, en la Figura 11 se muestra la presión regulada He, el error y el comando de frecuencia a la bomba, que es una captura de pantalla del osciloscopio de Simulink.

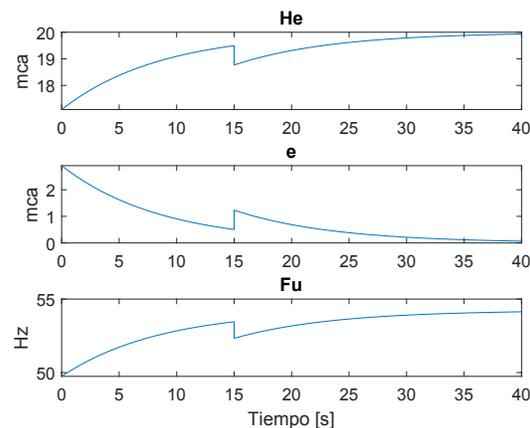


Fig. 11. Respuesta escalón en lazo cerrado con perturbación

Se observa que el tiempo de asentamiento es de más de 30 s, que es considerablemente grande, por lo que después de varios intentos por prueba y error, el tiempo de integración se cambió a  $T_i = 2$  s. La respuesta

correspondiente, mismas condiciones, se muestra en la Figura 12. Esta respuesta es la que se consideró aceptable.

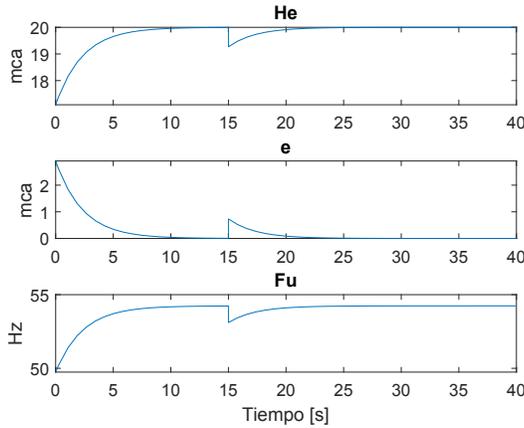


Fig. 12. Respuesta escalón en lazo cerrado con  $T_i = 2$

### 6.1 IN SITU: PI DISCRETO EN LABVIEW

Las simulaciones anteriores en Matlab se realizaron para tener una idea de lo que sería la respuesta real del sistema, pero en el prototipo el software que se usa para el SCADA es LabVIEW, por lo que se requiere el modelo discreto del algoritmo de control para ser realizado con esa herramienta. De la ecuación (2) se obtiene la función de transferencia del control PI, ecuación (3).

$$D(s) = k_p + \frac{k_p}{T_i s} \quad (3)$$

El algoritmo en LabVIEW debe ser una ecuación de recurrencia discreta, por lo que a partir de (3) se obtiene un equivalente discreto usando la regla rectangular hacia atrás como se muestra en (4),

$$D(z) = k_p + \frac{k_p}{T_i} \frac{1}{z} \frac{1}{z-1} = k_p \left[ \frac{(T/T_i + 1) - z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right] = \frac{U(z)}{E(z)} \quad (4)$$

de ella se obtiene la ecuación de recurrencia mostrada en (5), que será finalmente programada en LabVIEW.

$$u(k) = u(k-1) + k_p \left[ \left(1 + \frac{T}{T_i}\right) e(k) - e(k-1) \right] \quad (5)$$

$u(t)$  es el comando de presión y  $e(t)$  es el error de presión (Hr-He, Hr la presión de referencia).

En la Figura 13 se muestra el algoritmo de control (5) realizado con el lenguaje de programación orientado a objetos LabVIEW.  $u(k)$  es el comando de control de presión que es convertido a un comando de frecuencia  $Fu(k)$ , bloque H/F en la Figura 8.

## 7. PRUEBAS DEL CONTROL

La primera prueba a que fue sometido el sistema de control fue al seguimiento de una referencia de presión

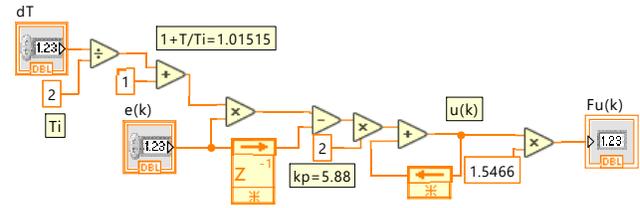


Fig. 13. Codificación del algoritmo de control PI, ecuación (5), en LabVIEW, seguido de su transformación a comando de frecuencia

escalonada con valores [20, 18, 22, 20] mca (metros de columna de agua). La Figura 14 muestra el resultado de la prueba, la línea discontinua es la referencia y la continua es la respuesta. Se observa que el transitorio en cada escalón tiene el tiempo de respuesta y sobrepaso esperados, la media de la respuesta coincide con el escalón de referencia. El régimen nominal de funcionamiento es una presión de referencia de 20 mca.

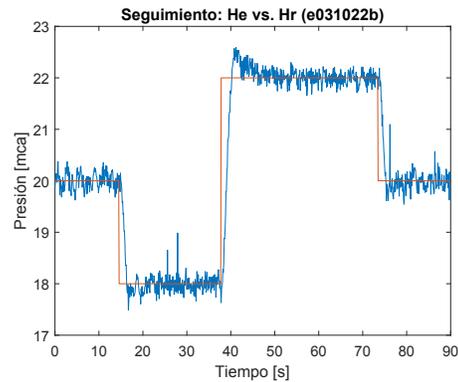


Fig. 14. Prueba de seguimiento a una referencia escalonada de presión

La segunda prueba fue de rechazo a perturbaciones, en este caso las perturbaciones fueron aperturas de servo válvulas para provocar flujos de fuga. La maniobra fue la siguiente: aproximadamente a los 60 s se abrió la servo válvula SV1 al 100 %, a los 120 s se abrió la servo válvula SV2 también al 100 %, luego se cerraron completamente la SV1 a los 180 s y la SV2 a los 240 s.

Con fines de comparación, se muestra a continuación las respuestas en lazo abierto y lazo cerrado en condiciones similares de operación. La Figura 15 muestra la respuesta en lazo abierto. A los 80 s se abre la SV1 y se observa como desciende la presión, a los 120 s se abre la SV2 y la presión desciende más, a los 180 s se cierra SV1 y a los 240 s se cierra SV2, la presión tiende a regresar al valor que tenía antes de abrir las válvulas.

En la Figura 16 se observan las gráficas del comportamiento en lazo cerrado de la presión de entrada (gráfica superior, la línea horizontal es la presión de referencia), apertura y cierre de las servo válvulas (SV1 y SV2). En este caso se observa que la presión de entrada He se

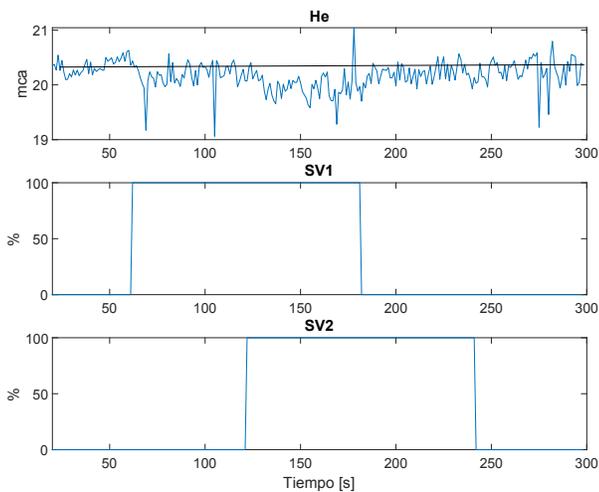


Fig. 15. Comportamiento de la presión de entrada (He) con la bomba funcionando @55 Hz versus la abertura de las servo válvulas SV1 y SV2

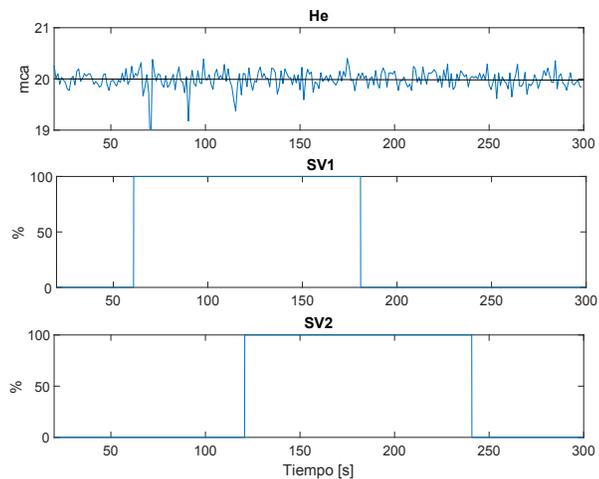


Fig. 16. Evolución de la variable de presión @20 mca ante perturbaciones producidas por la abertura y cierre de las servo válvulas SV1 y SV2

mantiene alrededor de la presión de referencia  $H_r$ , no se observan transitorios cuando se abren y cierran las válvulas. El ruido es inherente a la instalación hidráulica.

## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cuando se decidió cerrar el lazo para controlar la presión de entrada en la tubería, se pensó en la opción más simple, un controlador proporcional integral (PI) y su sintonía con el método de Ziegler-Nichols; esto porque ya habíamos observado que la respuesta escalón del conjunto INVERSOR-BOMBA tiene las características de la curva de reacción propia de este método. Pero esa respuesta escalón es resultado de la programación que

tiene el inversor<sup>4</sup>, no es la respuesta propia de una planta analógica, así que no se tenía la certeza de que el método funcionara. Por eso se hicieron simulaciones de la respuesta para observar a priori como sería esa respuesta; de entrada el tiempo de levantamiento era muy lento, por eso se modificó el tiempo de integración  $T_i$ . Al llevar el controlador diseñado a la planta real la respuesta fue satisfactoria.

La prueba de seguimiento, Figura 14, muestra un comportamiento esperado en el tiempo de levantamiento que es de aproximadamente 2 segundos, no así el sobrepaso que no presenta la razón de decaimiento del 25% propia del método Ziegler-Nichols, pero es bastante aceptable si se considera que la operación de la planta es en estado estacionario.

Por otro lado, el rechazo a perturbaciones (abertura de las válvulas de fuga) ha mostrado un desempeño excelente, como se muestra en la Figura 16, al ser comparado con la operación tradicional en lazo abierto donde sólo se establecía una frecuencia de operación fija, Figura 15. Cuando se da la apertura o cierre de las válvulas no se observa un cambio significativo en la presión.

Se demuestra así que en cualquier ducto principal se puede implementar un control PI para mejorar la regulación de la presión sin necesidad de equipo adicional, siempre y cuando se use una bomba hidráulica manipulada por un variador de frecuencia.

## REFERENCES

- Aström, K. and Hägglund, T. (1995). *PID Controllers, 2nd Edition*. Instrument Society of America.
- Carrera, R. and Verde, C. (2022). *Prototipo para detección de fugas en tuberías: Manual de uso*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, D.F.
- Chaudhry, M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Springer, third edition.
- Colombo, A., Lee, P., and Karney, B. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research*, 2, 212–227.
- Diao, X., Shen, G., Jiang, J., and Mebarki, A. (2019). Leak detection and location in liquid pipelines by analyzing the first transient pressure wave with unsteady friction. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 60, 303–310.
- Franklin, G., Powell, J., and Emami-Naeini, A. (1994). *Feedback control of dynamic systems*. Addison Wesley, Menlo Park.
- Verde, C. (ed.) (2023). *Fault Diagnosis and Tolerant Control: Applications*. Instituto de Ingeniería, UNAM. URL <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073073592e.2023>.

<sup>4</sup> La respuesta programada en el inversor o variador de frecuencia a un escalón de comando de frecuencia es una rampa de velocidad angular tipo "s" cuya aceleración inicia con una rampa de pendiente positiva, luego es constante y termina con una rampa con pendiente negativa hasta alcanzar el motor la velocidad final demandada.