

CONTROL LADRC PARA FLUJO EN MÓDULO DE PROCESOS

LADRC CONTROL FOR FLOW IN PROCESS MODULE

Ing. Juan Ortega Cristancho *, **Ing. Leonardo Fernández Díaz ***, **Ing. Daniel Zabala Benavides ***, **Ing. José Tumialán Borja ***

* **Universidad de La Salle**, Facultad de Ingeniería de Automatización.
Cra. 2 No 10-70 bloque C piso 7, Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia.
Tel: +(57) 317 3637490
E-mail: {jortega27, lfernandez74, dzabala13, jtumialan}@unisalle.edu.co.

Resumen: Este documento presenta el diseño e implementación de un controlador activo para el rechazo de perturbaciones (LADRC) en un proceso de bombeo hidráulico que posee tiempo muerto con el fin de controlar el caudal del proceso y rechazar las perturbaciones externas. Para ello, se estableció una regla de sintonización basada en el LADRC y se evaluó su efectividad usando un módulo de procesos industrial el cual posee: sensor de caudal, sensor de presión, sensor de temperatura, PLC S7-1500 y una HMI, además, se realizó comparaciones de respuesta ante perturbaciones con controladores industriales tales como: con los sintonizadores industriales: PI-SIMC y PI-AMIGO, demostrando así que este controlador y la regla de sintonización establecida reaccionan de forma eficiente antes las perturbaciones en un sistema de primer orden más tiempo muerto.

Palabras clave: Primer orden, Tiempo muerto, LADRC, perturbaciones, robustez.

Abstract: This paper presents the design and implementation of an active disturbance rejection controller (LADRC) in a hydraulic pumping process that has dead time to control the process flow and reject external disturbances. For this purpose, a tuning rule based on the LADRC was established and its effectiveness was evaluated using an industrial process module which has flow sensor, pressure sensor, temperature sensor, PLC S7-1500 and an HMI, in addition Comparisons of response to disturbances were made with industrial controllers such as: PI-SIMC and PI-AMIGO, thus demonstrating that this controller and the established tuning rule react efficiently before disturbances in a first order system plus dead time.

Keywords: First order, Dead time, LADRC, disturbances, robustness.

1. INTRODUCCIÓN

La industria posee necesidad de diseñar e implementar técnicas de control que le permitan optimizar sus procesos y mejorar la calidad de los productos (Moreno, 2004). Sin embargo, la complejidad en el diseño de controladores va de la mano con el proceso y aumenta cuando se encuentra expuesto a perturbaciones externas o cuando no se logra modelar correctamente el sistema. Por ello, se han desarrollado técnicas de sintonización que facilitan el control de estos procesos sin la necesidad

de conocer por completo la dinámica del sistema y, además que presentan un rápido rechazo de las perturbaciones, convirtiéndolas en técnicas de control robustas, como es el caso del controlador activo para el rechazo de perturbaciones: LADRC (B. Zhang, 2019).

El controlador LADRC trata la dinámica desconocida del sistema y las perturbaciones externas como una perturbación generalizada. De esta forma, mediante un observador de estado extendido (ESO), logra estimar esta perturbación

generalizada que posteriormente es rechazada mediante un controlador por realimentación de estados (Han, 2009). Sin embargo, implementar esta técnica de control puede resultar en una tarea difícil, ya que se deben estimar correctamente los parámetros a ajustar y sus valores. Por ello, se linealizó este modelo y se estableció una regla de sintonización para plantas de primer orden más tiempo muerto, la cual consiste en la integración del error cuadrático del tiempo (ITSE), permitiendo que los parámetros de ajuste solo dependan del ancho de banda del controlador y el ancho de banda del observador lineal (LESO), obteniendo de esta forma un controlador robusto ante el rechazo de perturbaciones fácil de implementar (Gao, 2003).

El objetivo de esta investigación fue diseñar e implementar un controlador basado en la regla de sintonización LADRC, para el control de caudal y evaluar: su viabilidad durante la implementación en un controlador industrial (PLC), su robustez ante el rechazo de perturbaciones en un proceso que posee tiempo muerto y su capacidad de control para un proceso de bombeo hidráulico. Además, los resultados obtenidos se compararon con técnicas de sintonización comunes en la industria actual, como lo son: PI-SIMC y PI-AMIGO, demostrando de esta forma que el LADRC reacciona de forma más rápida en las acciones de control.

2. TRABAJO RELACIONADO

D. Zhu, demuestra la eficacia de la técnica de control LADRC para un sistema de armas sobrepuestas en un tanque de guerra, donde no se tiene conocimiento total del modelo matemático. Como resultado al comparar el control LADRC con técnicas clásicas, demuestra que el control LADRC aporta una mayor precisión y mayor robustez. (D. Zhu, 2011)

H. Laghrifat, aplica el control LADRC a un sistema de conversión de energía eólica por generadores de inducción, con el fin de variar la velocidad. Los resultados de las simulaciones comprueban un excelente desempeño en términos de estabilidad, seguimiento y rechazo de las perturbaciones en comparación con un controlador PI. (H. Laghrifat, 2018)

Otro estudio sobre estos controladores fue realizado por *Y. Liu*, donde el sistema de análisis es un reactor de agua a presión de una planta nuclear, cabe señalar la complejidad debido a su no linealidad. Para minimizar la dificultad se combinan las ventajas de la linealización de retroalimentación parcial (PFL) y el control LADRC, demostrando a través de las

simulaciones su superioridad sobre los controladores que solo usan LADRC presentando una mayor capacidad de seguimiento y rechazo de perturbaciones. (Y. Liu, 2018)

El estudio realizado por *Y. Wang*, realiza la unión entre el tradicional predictor de Smith y el controlador LADRC para contrarrestar los sistemas que presentan tiempo muerto. Esta unión se somete a una serie de simulaciones en diversos sistemas aplicando perturbaciones externas, obteniendo como resultado una mayor estabilidad dinámica cuando se conocen con mayor exactitud los parámetros de la planta. (Y. Wang, 2018)

B. Zhang, propuso una regla de sintonización para el control LADRC basado en la integral del error cuadrático (ITSE). Esta técnica fue comparada en simulación con otros controladores clásicos tales como el PID donde se observa la superioridad del LADRC en el momento de rechazar las perturbaciones. (B. Zhang, 2019)

A diferencia de los demás trabajos usados como referencia, esta investigación se destaca por evaluar la robustez del controlador LADRC ante el rechazo de perturbaciones en un proceso real de flujo o control de caudal. Logrando su implementación dentro de un PLC S7-1500 y obteniendo resultados favorables (acordes con las simulaciones) ante la comparación con técnicas de sintonización industriales como lo son: SIMC y AMIGO. Una de las ventajas de utilizar un controlador industrial, es que permite protocolos de comunicación como el OPC, para obtener las señales del sistema de forma sencilla con programas como Matlab. Incluyendo que se logró comprobar su efectividad en un proceso de primer orden más tiempo muerto.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Módulo de procesos industrial

Para analizar el comportamiento de los controladores: LADRC, PI SIMC y PI AMIGO, estos fueron implementados en un PLC S7-1500 el cual controla un proceso de bombeo hidráulico dentro de un módulo industrial construido a medida por la Universidad de La Salle con fines educativos.

Este módulo consta de 3 tanques, donde el primero posee un sensor de peso para calcular su volumen y sensores digitales (alta y baja) para evitar su desbordamiento, el segundo tanque posee un sensor de ultrasonido para medir el nivel y el tercero un sensor de peso para dosificación. La circulación del fluido es controlada por un variador de frecuencia y

una bomba, la cual impulsa el fluido a través de un sistema de calentamiento (resistencia) y un sistema de enfriamiento (radiador), los cuales poseen un sensor de temperatura (PT 100) y se retorna el líquido hacia los tanques.

El objetivo es controlar el caudal del sistema y evaluar la reacción del controlador ante las perturbaciones que serán ocasionadas por una válvula proporcional, la cual generara un estrangulamiento del fluido, es decir, una caída.

3.2 Identificación de la planta

La respuesta del flujo en el tiempo (caudal) presenta tiempo muerto (atraso en la recepción de la señal por el sensor), por tal motivo se utilizó el método de identificación de tres puntos 123c, con el fin de obtener la función de transferencia del sistema, es decir, estimar los parámetros que componen al modelo de primer orden más tiempo muerto (Alfaro, 2007).

Este modelo se encuentra expresado por la Ecuación (1):

$$G_p(s) = K \frac{\exp(-\tau s)}{(Ts) + 1} \quad (1)$$

Donde en la Ecuación (1):

- K: Ganancia en lazo abierto.
- τ : Tiempo muerto en lazo abierto.
- T: Constante de tiempo del sistema.

Para la obtención los parámetros de la Ecuación (1), primero, fue necesario excitar el sistema con una señal de entrada (al 80% de su máximo valor) y obtener la señal de la planta en lazo abierto. Posteriormente, usando la señal de salida se estiman sus valores al 25% y 75%, para ser usados en las siguientes expresiones:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta u} \quad (2)$$

$$\tau = 0,9102(t_{75} - t_{25}) \quad (3)$$

$$T = (1,2620t_{25}) - (0,2620t_{75}) \quad (4)$$

Donde en las ecuaciones (2), (3) y (4):

- ΔY : Delta de amplitud de la señal de salida.
- Δu : Delta de amplitud de la señal de entrada.
- t_{75} : Tiempo para el 75% de amplitud en la señal de salida.
- t_{25} : Tiempo para el 25% de amplitud en la señal de salida.

Con la señal de salida en lazo abierto, la señal de entrada y las ecuaciones (2), (3) y (4), se logran establecer los parámetros: K, τ y T para el modelo de primer orden mas tiempo muerto presentado en

la Ecuación (1), obteniendo así una función de transferencia estimada para la planta.

3.3 Marco teórico del LADRC

El controlador activo para el rechazo de perturbaciones: LADRC, trata las perturbaciones externas y la dinámica desconocida del sistema como una perturbación generalizada. Su objetivo es estimar esta perturbación mediante un observador de estados y rechazarla por medio de un controlador por realimentación. (B. Zhang, 2019)

El LADRC es representado mediante la Ecuación (5):

$$\dot{y} = bu + f(y, u, d) \quad (5)$$

Donde:

- b: Es la ganancia de alta frecuencia del sistema.
- f: Es la función que describe la perturbación generalizada del sistema.
- y: Salida del sistema.
- u: entrada del sistema.
- d: perturbación.

El controlador LADRC es de segundo orden, ya que tiene un compromiso entre simplicidad y robustez (Han, 2009). El controlador estima en tiempo real la perturbación generalizada del sistema a través del observador (LESO) y posteriormente es rechazada mediante el ajuste las ganancias: k_1 , k_2 y b, del controlador (B. Zhang, 2019).

El observador de estados puede ser diseñado por el método de Luenberger, obteniendo la siguiente forma (Nise, 2015):

$$\dot{\hat{z}} = (A - L_0)\hat{z} + Bu + L_0y \quad (6)$$

Donde para la Ecuación (6):

- \hat{z} : Estados estimados por el observador.
- A: La matriz de estados.
- C: La matriz de salida del sistema.
- L_0 : Vector de ganancias del observador.
- B: Matriz de entrada del sistema.
- y: Salida.

El observador de la Ecuación (6), posee una característica importante para el LADRC, ya que establece que si: $(A - L_0)$ son asintóticamente estables entonces los estados estimados serán: $\hat{z}_1 = y$, $\hat{z}_2 = \dot{y}$, $\hat{z}_3 = f$, es decir, que el tercer estado será la estimación de la perturbación generalizada (Massaccesi, 2014).

Para rechazar esta perturbación generalizada estimada, se puede usar una ley de control de

realimentación de estados (Nise, 2015), como la presentada en la Ecuación (7):

$$u = K_0(\hat{r} - \hat{z}) \quad (7)$$

Donde para la Ecuación (7):

- K_0 : Vector de ganancias del controlador $[k_1, k_2 \text{ y } 1]/b$.
- \hat{r} : señal de referencia y sus derivadas.

En la Ecuación (6) y (7), los únicos parámetros desconocidos son: L_0 , K_0 y b , es por ello, que serán tomados como los parámetros de ajuste del controlador LADRC. Sin embargo, estimarlos de forma directa se convierte en un procedimiento no lineal, así que para facilitar el proceso se linealizan ambas expresiones ubicando los polos del controlador y el observador en la misma ubicación que sus respectivos anchos de banda (Gao, 2003). De este modo las ganancias internas de los vectores (L_0 , K_0) quedarán descritos por las siguientes ecuaciones (8), (9):

$$k_1 = \omega_c^2, k_2 = 2\omega_c \quad (8)$$

$$\beta_1=3\omega_0, \beta_2=3\omega_0^2, \beta_3=\omega_0^3 \quad (9)$$

Donde para las ecuaciones (8) y (9):

- k_1, k_2 : Ganancias del vector K_0 .
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Ganancias del vector L_0 .
- ω_0 : Ancho de banda del observador.
- ω_c : Ancho de banda del controlador.

Por lo tanto, los nuevos parámetros a estimar y que son desconocidos son: ω_0 , ω_c y b . Ahora, usando las Ecuaciones (5), (6) y (7) se puede establecer la función de transferencia del controlador, relacionando la señal de control con la salida y obteniendo así la Ecuación (10):

$$K_c(s) = K_0(sl - A + BK_0 + L_0C)^{-1}L_0 \quad (10)$$

$$= \frac{(3\omega_c^2\omega_0 + 6\omega_c\omega_0^2 + \omega_0^3)s^2 + (3\omega_c^2\omega_0^2 + 2\omega_c\omega_0^3)s + \omega_c^2\omega_0^3}{b(s^3 + (2\omega_c + 3\omega_0)s^2 + (\omega_c^2 + 6\omega_c\omega_0 + 3\omega_0^2)s)}$$

Como se observa en la Ecuación (10), la función de transferencia del controlador queda expresada únicamente en términos de los anchos de banda: ω_0 , ω_c y la ganancia de alta frecuencia: b . Por lo que, al estimar estos valores, únicamente se debe discretizar la función y expresarla en ecuaciones de diferencias para poder ser implementada dentro de un controlador industrial (PLC).

4. SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES

4.1 Regla de sintonización para el LADRC de segundo orden:

Por lo general, un valor mayor de ω_0 , ω_c darán lugar a un mejor rendimiento ante el rechazo de las perturbaciones, pero con una acción de control más agresiva. (L. Dong, 2015). Además, b también puede ser aumentado en proporción con los anchos de banda, no obstante cambiar estos parámetros indiscriminadamente puede llevar a la creación de controladores con niveles de robustez distintos y que en ocasiones no se rechace correctamente la perturbación, ocasionando que el sistema oscile (B. Zhang, 2019).

Por ello, se propone una regla de sintonización la cual establece una expresión para cada parámetro y cuya construcción se realiza a partir de la evaluación de diferentes valores para: ω_0 , ω_c y b , que son estables y que se encuentran dentro de una recta. De esta forma, se puede usar la ecuación de la recta para describir el comportamiento de estos 3 parámetros. Sin embargo, es necesario que estas expresiones queden en términos del modelo de primer orden más tiempo muerto de la planta (Ecuación (1)) con el fin de que exista una relación entre el controlador y la planta (B. Zhang, 2019). De esta manera se construyen las Ecuaciones (11), (12) y (13):

$$b = \lambda \frac{k}{T} \left(\frac{5,779}{\tau} + \frac{6,041}{T} \right) \quad (11)$$

$$\omega_c = \frac{3,841}{\tau} + \frac{0,297}{T} \quad (12)$$

$$\omega_0 = \frac{1,172}{\tau} + \frac{3,742}{T} \quad (13)$$

Donde para las Ecuaciones (11), (12) y (13):

- λ : Parámetro de ajuste que normalmente se establece en 1, sin embargo, entre más pequeño sea, mejor será el rendimiento ante el rechazo de las perturbaciones, pero más débil será su nivel de robustez.

Como se observa en las Ecuaciones (11), (12) y (13), todas las expresiones están escritas en términos de los parámetros que componen el modelo de la planta, es decir: k , T y τ . Así que para implementar esta técnica de control solo es necesario realizar la identificación de la planta en lazo abierto usando los métodos expuestos por: (Alfaro, 2007).

4.2 Sintonización por el método de Skogstad (SIMC)

Este método de sintonización está basado en el modelo de un controlador PID clásico. Sin embargo, en este caso se desea implementar la técnica a un proceso de flujo cuya complejidad no es muy elevada, por ello, se usará un controlador PI sintonizado por el método SIMC.

El controlador PI está expresado por la siguiente Ecuación (14): (Nise, 2015)

$$K_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \right) \quad (14)$$

Donde para la Ecuación 14:

- K_p : Ganancia proporcional.
- T_i : Ganancia integral.

Así que para estimar estos dos parámetros de la Ecuación (14), Skogestad redujo el modelo de media regla obteniendo las Ecuaciones (15) y (16): (Skogestad S, 2012)

$$K_p = \frac{1}{k} \frac{T}{L_c + \tau} \quad (15)$$

$$T_i = \min\{T, 4(L_c + \tau)\} \quad (16)$$

Donde para las Ecuaciones (15) y (16):

- L_c : es la constante de tiempo deseada para lazo cerrado y se considera igual a τ .

Por lo tanto, para construir el controlador PI por el método SIMC, solo es necesario conocer el modelo de primer orden más tiempo muerto de la planta (ecuación (1)), es decir, los parámetros: k , T y τ .

4.3 Sintonización por el método AMIGO

Se sintonizó e implementó el controlador PI usando el método AMIGO. En este caso, las expresiones de sintonización se construyeron a partir de un proceso empírico, probando diferentes valores de ajuste en lotes de procesos industriales (AstromK J, 2004), obteniendo así las ecuaciones (17) y (18) para la ganancia proporcional e integral respectivamente:

$$K_p = \frac{1}{k} \left(0,2 + 0,45 \frac{T}{\tau} \right) \quad (17)$$

$$T_i = \frac{0,4\tau + 0,8T}{\tau + 0,1T} \quad (18)$$

Como se observa, en las Ecuaciones (17) y (18), las ganancias del controlador PI (Ecuación (14)) dependen nuevamente de los parámetros: k , T y τ , los cuales son sencillos de determinar.

5. RESULTADOS

A través del método de identificación se obtuvo la función de transferencia de primer orden más tiempo muerto que está representado por la Ecuación (19).

$$G_p(s) = 0,02957 \frac{\exp(-4,39s)}{(5,186s) + 1} \quad (19)$$

Con los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto Ecuación (19), se obtuvo los controladores: LADRC, PI SIMC y PI AMIGO utilizando sus respectivas reglas de sintonización. En la Tabla 1, se presentan los parámetros de cada controlador utilizando las Ecuaciones (11), (12), (13), (15), (16), (17) y (18):

Tabla 1. Parámetros de ajuste para los controladores implementados.

Parámetros del Controlador.	CONTROLADORES			
	LADRC $\lambda = 1$	PI-SIMC	PI-AMIGO	LADRC $\lambda = 0,8$
b (K_p)	0,0141	19,975	24,7411	0,0113
ω_c (T_i)	0,9322	5,1860	5,2810	0,9322
ω_0 (T_d)	0,9885	0	0	0,9885

En la Tabla 1, se presenta dos controladores LADRC, uno con $\lambda=1$ y otro con $\lambda=0,8$ con la finalidad de analizar el efecto que tiene este parámetro de ajuste en la ganancia de alta frecuencia: b , la cual es exclusiva de esta regla de sintonización. Con respecto a los controladores: PI AMIGO y PI SIMC, se observa que sus ganancias integrales son muy similares mientras que la proporcional del PI AMIGO es un tanto mayor con respecto a la del PI SIMC.

5.1 Simulación y análisis de resultados utilizando Matlab

Con resultados de la Tabla 1 y las Ecuaciones (10) y (14), se obtuvo las funciones de transferencia de cada controlador que son presentados en las ecuaciones (20), (21), (22) y (23):

5.1.1 Función de transferencia del LADRC con $\lambda=0,8$

$$\frac{9,009s^2 + 4,349s + 0,8395}{0,01132s^3 + 0,05467s^2 + 0,132s} \quad (20)$$

5.1.2 Función de transferencia del LADRC con $\lambda=1$

$$\frac{9,009s^2 + 4,349s + 0,8395}{0,01415s^3 + 0,06833s^2 + 0,132s} \quad (21)$$

5.1.3 Función de transferencia del PI SIMC

$$\frac{103,6s + 19,97}{5,186s} \quad (22)$$

5.1.4 Función de transferencia del PI AMIGO

$$\frac{130,7s + 24,74}{5,281s} \quad (23)$$

En la Fig. 1, se observa la señal de salida de la planta en lazo cerrado ante una señal de referencia de magnitud igual a $110 \text{ cm}^3/\text{s}$, donde cada controlador ofrece un comportamiento con características diferentes a los demás.

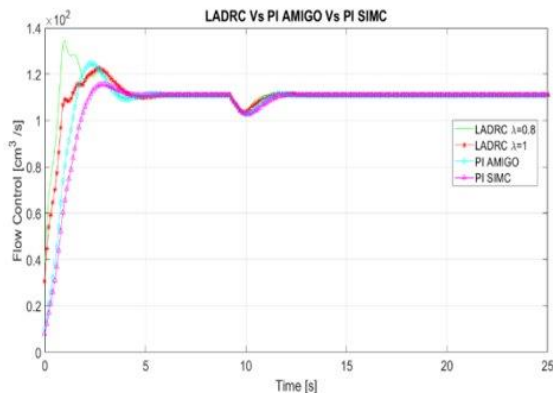


Fig. 1. Simulación de los controladores en tiempo continuo.

En la Tabla 2, se presentan las características o parámetros de análisis de la respuesta de cada uno de los controladores simulados.

Tabla 2. Parámetros de análisis del comportamiento de los controladores simulados.

Parámetro de control	CONTROLADORES			
	LADRC $\lambda=1$	PI SIMC	PI AMIGO	LADRC $\lambda=0,8$
Tiempo pico [s]	1,2	1,5	1,4	1,1
Valor pico [cm^3/s]	120,69	115,69	116,25	123,47
Tiempo de subida [s]	0,4535	0,6632	0,5632	0,3744
Tiempo de establecimiento [s]	3,87	4,27	4,1735	3,77
Error en estado estacionario [%]	0,0207	0,0132	0,0412	0,0018

En la Tabla 2, se observa que el método LADRC con $\lambda = 0,8$, posee menor tiempo de establecimiento y menor error en estado estacionario en comparación con los demás, es decir, que es el más rápido. Sin embargo, posee el pico o sobre impulso más alto, lo cual puede generar inconvenientes en ciertos procesos. En cambio, el LADRC con $\lambda = 1$ presenta

un valor pico más pequeño y es el siguiente en ser el más rápido.

Los controladores PI SIMC y PI AMIGO, presentan un poco más de error en estado estacionario (aunque sigue siendo bastante bajo) y son más lentos en comparación con los LADRC (0,45 s de diferencia aproximadamente), pero sus valores pico alcanzados son menores. Sin embargo, para analizar la velocidad de respuesta de cada controlador simulado se generó una perturbación (Caída de flujo) en el segundo 9,2. Los resultados se presentan en la Fig. 2:

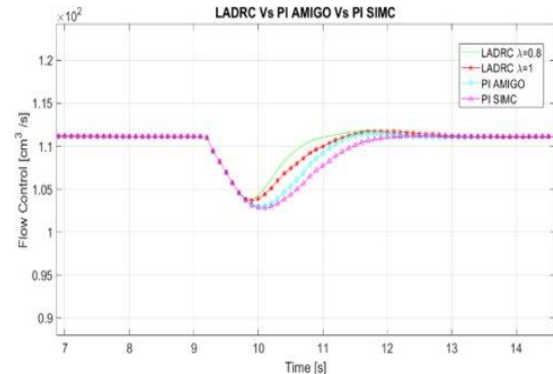


Fig. 2. Reacción de los controladores simulados ante una perturbación.

En la Fig. 2, el LADRC con $\lambda = 0,8$ es quien reacciona más rápido para corregir el efecto de la perturbación, regresando satisfactoriamente a su punto de referencia. Después le sigue el LADRC con $\lambda = 1$ y los demás.

5.2 Implementación en el prototipo experimental

Para validar el funcionamiento de las estrategias de control en el módulo de procesos, se discretizó las Ecuaciones (20), (21), (22) y (23), utilizando el método Tustin con el tiempo de muestreo: $T=0,01$, que dependió del tiempo de establecimiento en lazo abierto: t_s como criterio (Óscar Reinoso García, 2017).

Para la implementación de los controladores en el PLC, se obtuvo la ecuación en diferencias de cada controlado y la siguiente lógica de programación:

- Calcular el error (e) del sistema usando la Ecuación (29): (Nise, 2015)
$$e = ref - y \quad (29)$$
Donde para la ecuación (29), “ref” es la referencia del sistema y “y” la respuesta del sistema.
- Evaluar la salida de control a través de la ecuación en diferencias.

- Enviar la señal de control al actuador del sistema, que en este caso es el variador que controla la bomba.
- Finalmente, realizar el movimiento de los estados pasados tanto del error (e) como de la entrada (u), por ejemplo: $e_3 = e_2$ y $u_4 = u_3$.

Con los pasos explicados anteriormente, se implementó cada una de las técnicas de control usando el lenguaje de texto estructurado (ST) dentro de un bloque función en un PLC S7-1500 con el software: TIA portal v15.

Se utilizó el mismo punto de referencia que la simulación ($110 \text{ cm}^3/\text{s}$), con la finalidad de comparar los resultados de la simulación y en el prototipo funcional.

En la Fig. 3 se observa la respuesta de los controladores en el tiempo, incluyendo las dos perturbaciones forzadas a través de un dispositivo de estrangulación.

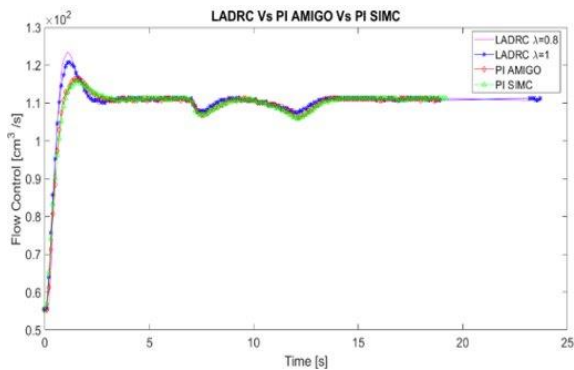


Fig. 3. Comportamiento de los controladores en la planta real.

De los resultados de la Fig. 3, se obtuvieron los parámetros de análisis en estado estacionario de la respuesta de cada uno de los controladores y son presentados en la Tabla 3:

Tabla 3. Características de las curvas de comportamiento reales.

Parámetro de control	CONTROLADORES			
	LADRC $\lambda=1$	PI SIMC	PI AMIGO	LADRC $\lambda=0.8$
Tiempo pico [s]	2,7	2,9	2,3	1
Valor pico [cm^3/s]	121,26	116,21	118,56	123,83
Tiempo de subida [s]	0,804	1,578	1,208	0,623
Tiempo de establecimiento [s]	3,87	4,25	3,97	3,61
Error en estado	0,0128	0,0278	0,0236	0,0208

Parámetro de control	CONTROLADORES			
	LADRC $\lambda=1$	PI SIMC	PI AMIGO	LADRC $\lambda=0.8$
estacionario [%]				

De la Tabla 3. Se puede analizar que nuevamente el controlador LADRC con $\lambda = 0,8$ es el más rápido, seguido por el LADRC con $\lambda = 1$, aunque ambos presentan un sobre impulso inicial bastante elevado y equivalente al 12% aproximadamente, mientras que el PI AMIGO y PI SIMC presentan una reacción más lenta, pero con la ventaja de tener un sobre impulso menor al 8%.

Para el análisis de respuesta ante una perturbación generada por una válvula proporcional la cual realiza estrangulamiento y la caída del fluido. Estas perturbaciones fueron generadas a los 7 y 12 segundos. Para este análisis se presenta la perturbación a los 7 segundos, Fig. 4, en el cual se realiza un acercamiento para analizar más en detalle.

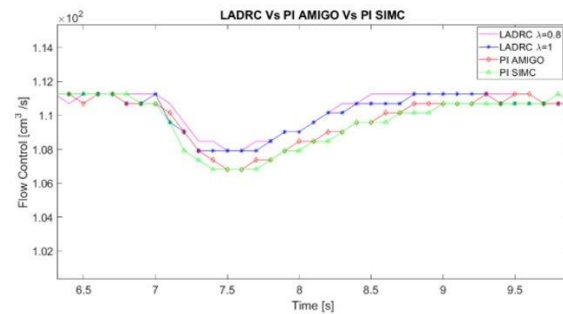


Fig. 4. Reacción de los controladores ante una perturbación real.

En la Fig. 4, se observa que nuevamente el LADRC con $\lambda = 0,8$ reacciona más rápido para rechazar el efecto de la perturbación, aunque lo sigue muy de cerca el controlador LADRC con $\lambda = 1$. Mientras que los demás siguen respondiendo de forma lenta ante el efecto de la perturbación.

6. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en esta investigación, tanto en el entorno de simulación como en el prototipo funcional, se concluye que en ambos entornos el controlador LADRC es el que presenta una rápida reacción ante el rechazo de perturbaciones, aumentando la velocidad de reacción con valores de λ más pequeños, pero con la desventaja de presentar un sobre impulso inicial más elevado. Además, este tratamiento simple de LADRC reduce el número de parámetros de sintonía a solo tres y lo hace fácil de mantener, por lo que

puede ser ampliamente aplicado y promovido en la industria.

Por lo tanto, se logró implementar cada técnica de sintonización en el módulo de procesos de la universidad de La Salle, obteniendo resultados satisfactorios para el control de flujo, comprobando la viabilidad de la implementación del LADRC en estas aplicaciones.

Las respuestas de estos controladores son diferentes, ya que el LADRC utiliza su propia función de transferencia para el controlador, la cual está orientada al rechazo de perturbaciones específicamente, además posee un parámetro adicional de ajuste: λ . Los controladores: PI SIMC y PI AMIGO lograron controlar el proceso de flujo con un error en estado estacionario bastante bajo, sin embargo, su reacción ante el rechazo de perturbación es bastante lenta, por lo que no son aptos para esta función.

REFERENCIAS

- Alfaro, V. (2007). Método de identificación de modelos de orden reducido de tres puntos 123c. *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica*.
- Astrom K J, H. T. (2004). Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. *J Process Control*, 635-50.
- B. Zhang, W. T. (2019). Tuning of linear active disturbance rejection controller with robustness specification. *ISA Trans. vol.85*, pp 237-246.
- D. Zhu, X. Q. (2011). Disturbance Compensation for Gun Control System of Tank Based on LADRC. *IEEE*.
- Gao, Z. (2003). Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning. *Proc. of American control conference*, (págs. p. 4989–96). Denver, Colorado.
- H. Laghrifat, A. M. (2018). Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC) of a Variable Speed Wind Energy Conversion System using aDFI-Generator. *IEEE*.
- Han, J. (2009). From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Trans Ind Electron*.
- K. Shao, W. H. (2019). LADRC based TEC Temperature Control System. *IEEE*.
- L. Dong, Y. Z. (2015). A Robust decentralized load frequency controller for interconnected power systems. *ISA Trans*, 51-53.
- Massaccesi, D. (2014). *Técnicas de control automático, un estudio comparativo*. Buenos Aires: Edición independiente.
- Moreno, R. P. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industria*. RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones.
- Nise, N. S. (2015). *Control Systems Engineering, Seventh Edition*. California: WILEY.
- Óscar Reinoso García, A. P. (2017). *Prácticas de Sistemas de Control - Continuos y Discretos*. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Skogestad S, G. C. (2012). The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning. *Springer London*, pp. 75-147.
- Y. Liu, J. L. (2018). Linear active disturbance rejection control for pressurized water reactor power. *Ann. Nucl. Energy. vol.111*, pp 22-30.
- Y. Wang, Z. C. (2018). LADRC-Smith Controller Design and Parameters Analysis for First-Order Inertial Systems with Large Time-Delay. *IEEE 7ma Data Driven Control and Learning Systems*.