

Implementación de un controlador de mínima varianza en un péndulo simple

Minimum Variance Controller's Implementation in a Simple Pendulum

Fecha de recepción: 10 de septiembre de 2012
Fecha de aprobación: 28 de noviembre de 2012

Leidy Tatiana López Herrera*
Julián Camilo Villa Duque*

Resumen

Presenta un controlador de mínima varianza MVR1 para regular la posición angular de un péndulo simple, proceso que se describe por un modelo ARMAX, ya que sobre el sistema actúan diferentes perturbaciones estocásticas. Este controlador busca minimizar el efecto de las perturbaciones sobre la respuesta del sistema, y para esto calcula los valores de la entrada y salida de la planta desde el instante actual hasta un instante k . Se evalúa el desempeño de este controlador respecto a un controlador por realimentación de estados con integrador, utilizando criterios de la integral del error y métricas de respuesta temporal.

Palabras clave: Controlador MVR, ARMAX, Posición angular, Péndulo simple, Perturbación estocástica.

Abstract

It presents a Minimum Variance Controller's implementation, MVR1, to regulate a simple pendulum's angular position, process described by an ARMAX model, since this system has different stochastic disturbances. This controller seeks to minimize the noise effect on the system response, by calculating the plant input and output values, from the starting time until an instant k . It evaluates this driver performance against a state feedback controller with integrator, using the error and response time metrics' integral criteria.

Keywords: MVR Controller, ARMAX, Angular Position, Simple Pendulum, Stochastic Disturbances.

* Estudiantes de Ingeniería en Instrumentación y Control, Grupo de Investigación en Instrumentación, Control Automático y Robótica ICARO, Facultad de Ingenierías, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín – Colombia {tatin1530, juliancamilovilladuque}@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La finalidad de un sistema de control es obtener, mediante la manipulación de las variables de control, el dominio de las variables de salida, de modo que se alcance el valor de consigna o Set Point. Las entradas del sistema se dividen entre las variables de control, que son aquellas que se pueden manipular, y las perturbaciones, que son señales cuyo comportamiento es no determinístico.

El control de los sistemas dinámicos en presencia de incertidumbres surge cuando hay grandes variaciones debido a fallos en el sistema o debido a la presencia de perturbaciones externas. En estos casos, el controlador debe determinar la situación específica que existe en cualquier instante y tomar la acción de control apropiada [1].

Los esquemas de control autoajustables (adaptivos) se han desarrollado para sistemas con parámetros desconocidos [2]. Entre los controles adaptivos se encuentra el controlador de mínima varianza, que tiene como finalidad disminuir el efecto de las perturbaciones sobre la salida. Este controlador utiliza como criterio de diseño la minimización de un índice de coste, que reduce la varianza de la salida, pero no elimina totalmente las perturbaciones estocásticas que afectan el sistema [1-7].

Yamamoto, Inoue y Shah [2] proponen un controlador de mínima varianza generalizada (GMVC), autosintonizado con estructura de PID; en este, los parámetros PID son calculados realizando una relación entre el GMVC y el PID. Los resultados experimentales muestran mayor eficacia del esquema GMVC.

Paz *et al* [3] revisan la estabilidad y el desempeño de un GMVC y lo comparan con un controlador de mínima varianza generalizada con asignación de polos dinámicos cuando son sometidos a perturbaciones de manera simulada y sobre una planta real. Como resultado de dicha modificación a la arquitectura original del GMVC se observaron mejoras en el rendimiento dinámico del controlador.

Barzamini, Shafiee y Dadlani [4] implementaron un sistema de congestión novedosa basado en la gestión de cola activa (AQM) y en las redes TCP/AQM, conocidas como redes adaptivas de mínima varianza generalizada, que son propuestas como estrategia para la variación dinámica. AGMV es una combinación de la estimación de parámetros en tiempo real y controladores de mínima varianza generalizada (GMVC). Los resultados de la simulación indicaron que, en cualquier caso, AGMV es capaz de mantener la longitud de la cola alrededor del punto deseado. Además, el controlador propuesto ha demostrado un rendimiento superior con respecto al controlador PI.

Alipouri y Poshtan [5] proponen un modelo de vector ARX (VARX), que es usado para modelación de sistemas simultáneos, e implementan un controlador de mínima varianza (MVR) para solucionar problemas como los escasos métodos para identificar sistemas MIMO y la poca robustez del MVR. El desempeño de este controlador fue comprobado en un proceso no lineal de cuatro tanques, y fue comparado con un MVR diseñado por redes neuronales. A pesar de la simplicidad del diseño del GMVC para el modelo VARX con incertidumbre, los resultados muestran que el método propuesto es exacto e implementable.

En la literatura se presentan diversas estrategias que han sido aplicadas para solucionar el problema de control de un péndulo simple, las cuales van desde controladores lineales clásicos hasta controladores adaptativos basados en modelos no lineales de diferentes tipos.

En este artículo se expone la implementación de un controlador de mínima varianza para regular la posición de un péndulo simple. Se realiza una identificación previa del modelo matemático de la planta, tomando como referencia una base de datos obtenida de las respuestas del sistema ante diferentes estímulos de entrada de tipo escalón. Las funciones de transferencia son aproximadas a modelos de primer orden con retardo (POR), por medio de una identificación paramétrica implementada en el

software MATLAB®. Los algoritmos de control se implementan en el sistema de péndulo simple, y el desempeño de este controlador se mide utilizando criterios de la integral del error, y métricas de respuesta temporal.

II. PLANTA DE EXPERIMENTACIÓN – PÉNDULO SIMPLE

El hardware que se observa en la Fig. 1 está conformado por un subsistema mecánico que consiste en una barra que gira sobre un eje situado en su centro, y que tiene en uno de sus extremos una hélice que gira por medio de un motor que opera a máximo 5 voltios DC. Como se observa en la Fig. 2, este mecanismo impulsa el sistema con la finalidad de mantenerlo en la posición angular (pitch φ_a) determinada por el usuario; dicha posición se obtiene por medio de un acelerómetro (MMA73611).

La tarjeta de adquisición de datos DAQ-PTAD-S01 Basic transmite al computador las lecturas análogas correspondientes a las componentes de la aceleración con respecto a cada uno de los ejes coordenados por medio de señales análogas; las especificaciones de este dispositivo se encuentran en [6].

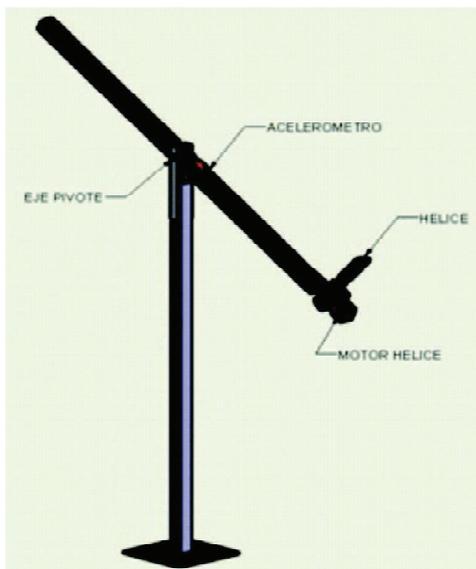


Figura 1. Planta péndulo simple

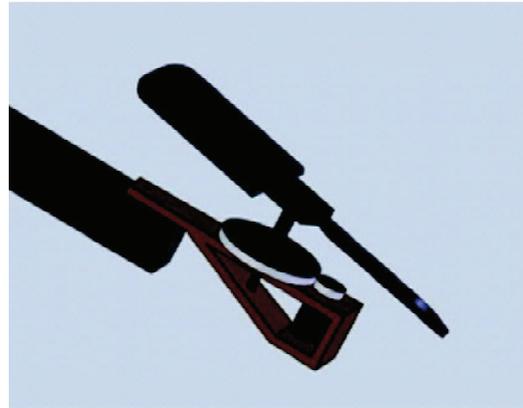


Figura 2. Mecanismo hélice-motor DC

Posterior a la adquisición de dichas señales analógicas se calcula cada uno de los ángulos, aplicando la fórmula trigonométrica que se describe en (1). Donde g_x es la aceleración g en el eje x ; g_y es la aceleración g en eje y , y g_z es la aceleración g en eje z .

$$\varphi_a = \tan^{-1} \left(\frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \right) \quad (1)$$

Para obtener las aceleraciones g es necesario convertir los voltajes provenientes de cada salida del acelerómetro en aceleración g ; para ello es necesario realizar una regresión lineal de primer orden.

Con tres puntos obtenidos de la hoja de datos del sensor, como se observa en la Tabla 1, se realiza una regresión lineal de primer orden en (2), donde g se refiere a cada aceleración, y a se refiere a las señales análogas provenientes de cada salida analógica del sensor en x , y o z .

$$g_{xyz} = 1.25 * a_{xyz} - 2.0625 \quad (2)$$

Tabla 1. Voltaje vs. aceleración g

Voltaje [V]	Aceleración g
0.85	-1
1.65	0
2.45	1

Posterior al cálculo de las aceleraciones g , se aplica un filtro de promedios móviles que elimina frecuencias altas e interferencias, para determinar la aceleración estática con respecto a cada uno de los ejes coordenados.

En el cálculo del ángulo pitch ϕ_a es necesario tener en cuenta las aceleraciones g_z y g_x y el cuadrante en el que está ubicado el ángulo. La Tabla 2 muestra las condiciones que cumplen g_z y g_x para cada cuadrante, y según estas se indica la compensación que se debe hacer en pitch ϕ_a para medir correctamente el ángulo entre 0° a 360° .

Tabla 2. Cuadrantes según valores de g_z y g_y

g_z	g_x	Cuadrante	Ángulo [°]
>0	>0	I	Pitch
<0	>0	II	$180^\circ - \text{Pitch}$
<0	<0	III	$180^\circ - \text{Pitch}$
>0	<0	IV	$\text{Pitch} + 360^\circ$

El sistema se estabiliza en el ángulo especificado por el usuario aun ante la presencia de perturbaciones; esto se logra gobernando la velocidad del elemento final de control que, para este caso, es el motor de DC, por medio de un subsistema electrónico constituido por una tarjeta de acondicionamiento de señal, de la cual observamos el circuito en la Fig. 3, que ante la variación de una señal analógica proveniente de la tarjeta de adquisición de datos varía el voltaje de alimentación del motor de DC.

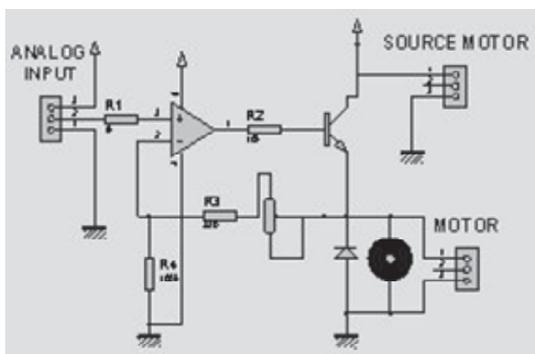


Figura 3. Circuito de acondicionamiento de señal

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de bloques que representa gráficamente el funcionamiento interno y la relación que tiene cada uno de los elementos del sistema.

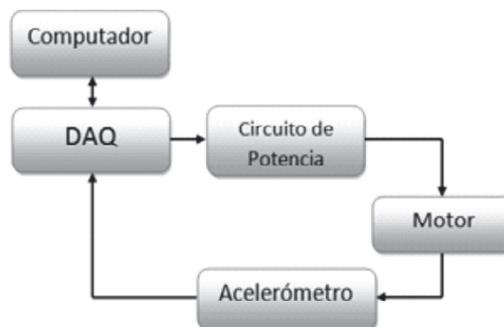


Figura 4. Diagrama de bloques

El computador adquiere las señales provenientes del acelerómetro por medio de la DAQ, y con este dato ejecuta el algoritmo para determinar la inclinación del eje pivote; luego se realiza una comparación del estado de la variable con el valor deseado o Set-Point para ejecutar el algoritmo de identificación en línea que determina los parámetros del sistema en cada instante, y posteriormente ejecutar el algoritmo de control que envía, por medio de la DAQ, la señal de control para el motor por medio del circuito de potencia; esta variación de velocidad modifica la inclinación del eje pivote y se repite la secuencia de operación del sistema nuevamente.

III. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

A. Identificación fuera de línea

Se genera una base de datos creada a partir de las respuestas del sistema ante los distintos estímulos de tipo escalón que se aplican a la entrada, con la finalidad de obtener el modelo matemático del sistema. En la Fig. 5 se puede observar la base de datos obtenida de la planta experimental.

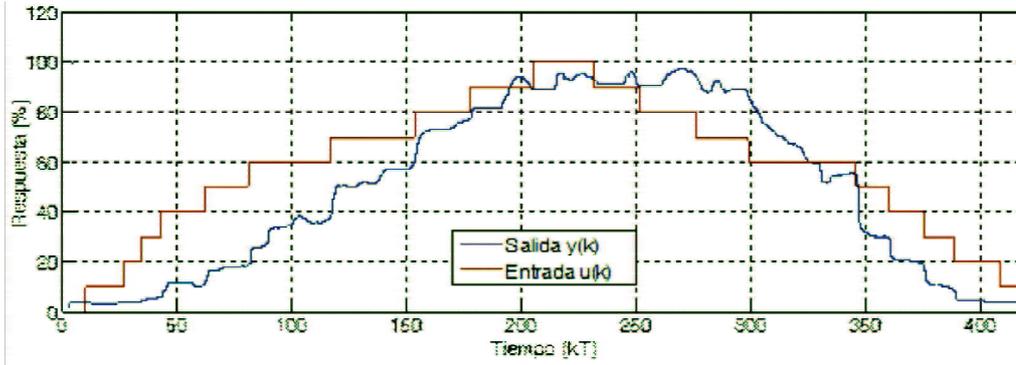


Figura 5. Base de datos

La base de datos registrada contiene el estímulo realizado (u) t y la respuesta correspondiente del sistema (y) t para cada instante de tiempo t .

Se realizó una identificación inicial del sistema seleccionando el escalón del 60%; el proceso se aproximó a un sistema de primer orden con retardo y se discretizó con un periodo de muestreo de 0.403 s.

Los modelos continuo y discreto obtenidos se dan en (3) y (4), respectivamente. La discretización del sistema se realizó con un periodo de muestreo de 0.403 s. El periodo de muestreo se obtuvo tomando como base el criterio de la constante de tiempo equivalente [11].

$$G(s) = \frac{0.7429e^{-0.00944s}}{1.025s + 1} \quad (3)$$

$$HGp(z) = \frac{0.2368z + 0.004638}{z - 0.675} z^{-1} \quad (4)$$

Tomando este sistema inicial se diseñó un controlador proporcional integral PI, por medio del ajuste de Ziegler y Nichols, propuesto para sistemas de primer orden con retardo, con la finalidad de proporcionar al inicio estabilidad al sistema. El controlador PI digital se describe en (5).

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0z - q_1}{z - 1} \quad (5)$$

Donde:

$$q_0 = k_c \left[1 + \left(\frac{T}{2T_i} \right) \right] \quad (6)$$

$$q_1 = -k_c \left[1 - \left(\frac{T}{2T_i} \right) \right] \quad (7)$$

$$k_c = \frac{0.9 \tau}{K\theta} \quad (8)$$

$$T_i = 3.33\theta \quad (9)$$

El controlador obtenido se describe en (10).

$$D(z) = \frac{10.1876z - 1.5905}{z - 1} \quad (10)$$

B. Identificación en línea

Este controlador PI se ejecuta en las primeras 80 iteraciones del sistema, mientras el algoritmo RELS converge y se calcula de manera óptima la ley de control.

El algoritmo de identificación en línea se encarga de determinar los parámetros del sistema que para el diseño del controlador de mínima varianza es de la forma ARMAX, descrito (11).

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} * u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} * v(k) \quad (11)$$

Cada uno de los polinomios es descrito en (12), (13) y (14).

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m} \quad (12)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \quad (13)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_m z^{-m} \quad (14)$$

Siendo $y(k)$ la salida del sistema, $u(k)$ la señal de control y $v(k)$ una señal aleatoria independiente, que para este caso serían las perturbaciones del sistema [9-10].

Para la identificación en línea del modelo ARMAX se utiliza un algoritmo recursivo de identificación de mínimos cuadrados extendido RELS, que busca determinar los coeficientes de los polinomios $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ y $C(z^{-1})$; estos parámetros por determinar son los hallados en el vector de parámetros estimados $\hat{\theta}(k)$ en (15), el cual tiene un valor en cada instante k , calculado por medio de la suma del vector de parámetros en el instante anterior $\hat{\theta}(k-1)$ y la multiplicación del vector de factor de corrección $L(k)$ y el error de estimación, como se ve en (16).

$$\hat{\theta}(k) = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \\ c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L(k) \cdot e(k) \quad (16)$$

Donde:

$$e(k) = y_{real} - y_{estimado} \quad (17)$$

La estimación de la salida se calcula teniendo en cuenta los parámetros estimados y el valor de las entradas, las salidas y el error en cada instante de tiempo, basándose en (18).

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} * u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} * e(k) \quad (18)$$

Entonces:

$$y(k) * A(z^{-1}) = B(z^{-1}) * z^{-d} * u(k) + C(z^{-1}) * e(k) \quad (19)$$

Al despejar $y(k)$ para determinar la salida estimada del sistema en el instante k queda la expresión que se ve en (20).

$$y(k) = -y(k-1) * a_1 \dots - y(k-m) * a_m + u(k-d-1) * b_1 \dots + u(k-d-m) * b_m + e(k-1) * c_1 \dots + e(k-m) * c_m \quad (20)$$

Escrito de forma matricial queda la expresión (21).

$$y_{estimado} = \hat{\theta}(k-1) \pi(k)^T \quad (21)$$

$$\pi(k) = \begin{bmatrix} -y(k-1) \\ -y(k-2) \\ \vdots \\ -y(k-m) \\ u(k-d-1) \\ u(k-d-2) \\ \vdots \\ u(k-d-m) \\ e(k-1) \\ e(k-2) \\ \vdots \\ e(k-m) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$L(k) = \frac{1}{\lambda} [P(k) \pi(k) \pi(k)^T + \lambda]^{-1} P(k-1) \pi(k) \quad (23)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [I + \pi(k) \pi(k)^T]^{-1} P(k-1) \quad (24)$$

Los valores de la matriz de ganancia $P(k)$ que determina la longitud de peso de la actualización de los parámetros estimados $\hat{\theta}(k)$ está determinada en el instante inicial, como se muestra en (25).

$$P(0) = I \cdot \alpha \quad (25)$$

Donde α es un factor con rango definido por: $1000 \leq \alpha \leq 10000$, valor que determina la energía inicial del algoritmo. El valor de la matriz de ganancia tiende a ser positiva decreciente a medida que transcurren las iteraciones [6]

IV. ESTRATEGIA DE CONTROL

A. Controlador de mínima varianza

El control adaptivo permite determinar los parámetros del sistema en cada instante de tiempo, y, acorde con estos, diseñar los parámetros del controlador; esto hace que esta estrategia control sea conveniente para este tipo de sistema, que es altamente susceptible a perturbaciones estocásticas, como lo son las corrientes de aire o inclusive las vibraciones de la estructura misma, las cuales hacen que sus parámetros varíen continuamente en el tiempo.

El controlador de mínima varianza es denominado regulador autoadaptable, debido a que su estructura separa las tareas de control y de identificación. En los primeros instantes de muestreo se suponen los parámetros conocidos, y luego son reemplazados por los parámetros estimados; esto es lo que se conoce como principio de equivalencia cierta [1].

Como el modelo del sistema está descrito como un modelo ARMAX, es necesario una estimación paramétrica en línea; para este caso se utilizó el algoritmo recursivo de mínimos cuadrados extendido (RELS) [9], un algoritmo de adaptación que lleva a

cabo la tarea de diseñar el controlador y, por último, un controlador con parámetros ajustables.

El controlador de mínima varianza tiene como objetivo minimizar el efecto de las perturbaciones sobre la salida; para esto se calcula la señal de control $u(k)$ en función de los valores disponibles de $y(k)$ y $u(k)$, es decir, $u(k-1), u(k-2), \dots, y(k), y(k-1), \dots$, buscando minimizar la función de coste que se presenta en (26), obteniendo la ley de control que se observa en (27).

$$J = E\{[y(k+d) - w(k+d)]^2 + ru(k)^2\} \quad (26)$$

$$u(k) = D_f * [C(z^{-1})w(k+d+1) - G(z^{-1})y(k)] \quad (27)$$

Donde D_f es un filtro digital que se expresa en (28).

$$D_f = \frac{1}{z * F(z^{-1})B(z^{-1}) + r * C(z^{-1})} \quad (28)$$

Los polinomios $F(z^{-1})$ y $G(z^{-1})$ contienen las perturbaciones que ocurren en instantes anteriores y posteriores a k . Estos polinomios aparecen en la ley de control después de reemplazar $C(z^{-1})$ por la identidad que se muestra en (29), y luego de minimizar la función de coste que se observa en (26).

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-(d+1)}G(z^{-1}) \quad (29)$$

En la Fig. 6 se observa el diagrama de bloques del sistema de control de mínima varianza con la ley de control dada en (27).

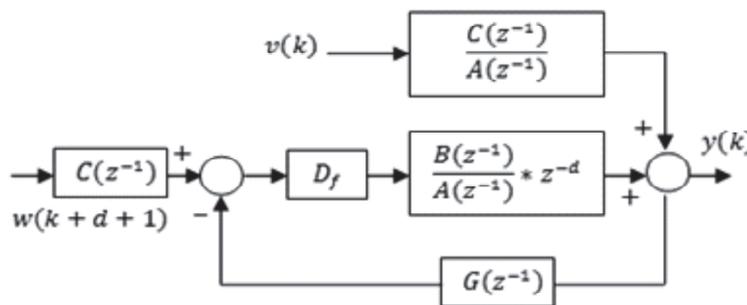


Figura 6. Control de mínima varianza MVR1

V. RESULTADOS

En la Fig. 7 se muestra la respuesta del controlador de mínima varianza MVR1 implementado en el sistema de péndulo simple, ante estímulos de referencia $r(t)$ del 50%, 60% y 70%.

En el cambio de consigna del 30% al 50% se observa el sobreimpulso más elevado de la respuesta del sistema; esto se debe a que en este punto inicia el algoritmo de control adaptativo de mínima varianza, y en este punto no ha convergido, es decir, aún no se calculan de manera óptima los parámetros del sistema.

En los dos cambios de consigna siguientes se observa que la respuesta dinámica del sistema es mucho

mejor con respecto a la respuesta del sistema ante el valor de referencia del 50 %, debido a que los parámetros estimados por el regulador tienen mayor correspondencia con los reales a medida que transcurre el tiempo.

En la Tabla 3 se observan los valores aproximados de las métricas de respuesta temporal para cada uno de los valores de referencia $r(t)$ indicados anteriormente.

En la Tabla 4 están registradas las métricas de desempeño con base en los criterios del error, Integral del Valor Absoluto del Error (IAE), Integral Cuadrática del Error (ICE), Integral del Valor Absoluto del Error Temporizada (IAET) e Integral del error cuadrático Temporizado (ITCE).

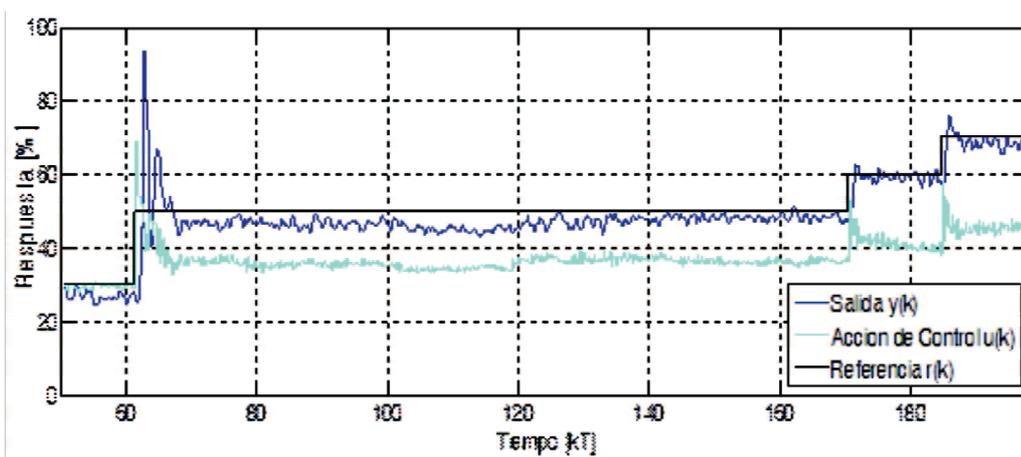


Figura 7. Salida de la planta ante el controlador de mínima varianza MVR1

Tabla 3. Desempeño del Controlador, Tiempo de establecimiento, Error en estado estacionario y Sobreimpulso Máximo

$r(t)$ [%]	t_s [s]	$e(t)$ [%]	m_p [%]
50	3.63	1.83	43.56
60	0.78	1.31	2.39
70	0.95	2.98	5.65

Tabla 4. Métricas de desempeño para el controlador de mínima varianza

$r(t)$ [%]	IAE	ICE	IAET	ITCE
50	40654	317720	1681200	6314800
60	2565.4	15309	11392	25058
70	3429.3	18672	18745	52364

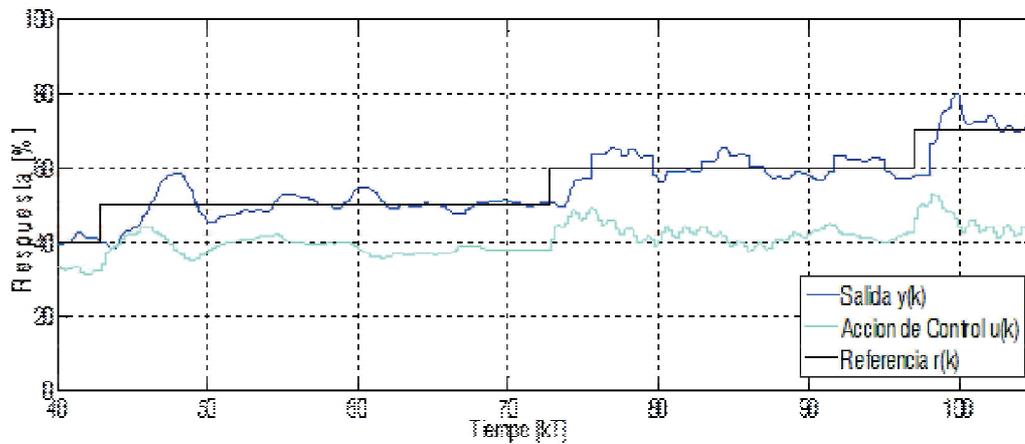


Figura 8. Salida de la planta ante el controlador por realimentación de estados con integrador

En la Fig. 8 se muestra la respuesta del controlador por realimentación de estados con integrador ante estímulos de referencia $r(t)$ del 50%, 60% y 70%.

Se puede observar cómo la repuesta del sistema presenta error oscilatorio entre los diferentes valores de referencia $r(k)$ o Set Point, siendo las de mayor amplitud las presentes en la referencia del 60%.

En la Tabla 5 se observan los valores aproximados de las métricas de respuesta temporal para cada uno de los valores de referencia $r(t)$ indicados anteriormente.

En la Tabla 6 están registradas las métricas de desempeño con base en los criterios del error, Integral del Valor Absoluto del Error (IAE), Integral Cuadrática del Error (ICE), Integral del Valor Absoluto del Error Temporizada (IAET) e Integral del error cuadrático Temporizado (ITCE).

Tabla 5. Desempeño del Controlador, Tiempo de establecimiento, Error en estado estacionario y Sobreimpulso Máximo

$r(t)$ [%]	t_s [s]	$e(t)$ [%]	m_p [%]
50	4.59	1.90	4.16
60	9.07	6.23	5.12
70	2.32	1.32	9.63

Tabla 6. Métricas de desempeño para el controlador por realimentación de estados con integrador

$r(t)$ [%]	IAE	ICE	IAET	ITCE
50	7865.5	44713	65083	21490
60	7343	32876	70907	208930
70	3284.2	26173	7565.8	36960

VI. CONCLUSIONES

El control adaptivo de mínima varianza tiene, en el inicio del algoritmo, error en el cálculo de los parámetros del controlador, sin embargo, con el transcurso del tiempo el cálculo de dichos parámetros es más exacto debido a que la determinación de los parámetros estimados son más cercanos a los reales del sistema; con base en estos se calculan los parámetros del controlador.

Como el sistema es no lineal, requiere un controlador de parámetros variables, ya que el modelo matemático del sistema varía debido a que es altamente susceptible a perturbaciones estocásticas. Un algoritmo de control adaptivo, como el de mínima varianza MVR1, le permite al sistema reducir la varianza de la salida, aunque no elimine totalmente las perturbaciones estocásticas que lo afectan.

El sistema de control de mínima varianza mostró mejores resultados de desempeño en cuanto a las métricas de respuesta temporal, comparado con el controlador por realimentación de estados con integrador, debido a que presenta menor tiempo de estabilización, 3.54 segundos en promedio; 1.11% menor error en estado estacionario, y 3.355% menor sobreimpulso.

El controlador de mínima varianza MVR1 presenta un mejor índice de desempeño en los criterios del error con respecto al controlador por realimentación de estado con integrador. El control MVR presenta mejor desempeño; en promedio, para la integral del error (IAE) es 9385,33 menor, para integral cuadrática del error ICE es 82646,33 menor, para la integral del error en el tiempo (IAET) es 522593,73 menor y para la integral del error cuadrático en el tiempo (ITCE) es menor 2041614, en comparación con el controlador por realimentación de estados con integrador.

REFERENCIAS

- [1] K. S. Narendra & C. Xiang, *Adaptive Control of Discrete-Time Systems Using Multiple Models*. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, págs. 1669-1686, 2000.
- [2] T. Yamamoto, A. Inoue & S. L. Shah, «Generalized Minimum Variance Self-Tuning». *International Conference on Control Applications*, págs. 125-130. Hawaii, USA: IEEE, 1999.
- [3] M. A. Paz, E. Quintero-Mármol, R. Fernández del Busto, E. Olguín, O. J. Santos, P. Ponce & S. Garibo, «Improving Stability and Performance in a Generalized Minimum Variance». *2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering and XI Conference on Electrical Engineering* (págs. 370-373). México City, México: IEEE, 2005.
- [4] R. Barzamini, M. Shafiee & A. Dadlani, «Adaptive generalized minimum variance congestion controller for dynamic TCP/AQM networks». *Computer Communications*, págs. 170-178, 2012.
- [5] Y. Alipouri & J. Poshtan, *Designing a robust minimum variance controller using discrete slide mode controller approach*. ISA Transactions, 2012.
- [6] P-TAD S01 BASIC. Manual Técnico. Juan Camilo Gómez Cadavid. 2012.
- [7] Q. Yongyin & C. Yang Liyuan, «Self-Tuning Zero Phase Error Tracking Control of». *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, pág. 1865, 2010.
- [8] T. Sato, «Design of a Generalized Minimum Variance Control in Sampled-Data Control Systems». *ICIC International*, 3295, 2009.
- [9] J. C.-M. Yiu & S. Wang, Multiple ARMAX modeling scheme for forecasting air conditioning system performance. *Energy Conversion and Management*, 2278, 2007.
- [10] X. Bin & C. Jie, «A Two-stage ARMAX Identification Approach Based on Bias-eliminated Least Squares and Parameter Relationship between MA Process and Its Inverse». *Acta Automática Sinica*, 491, 2012.
- [11] L. E. García Jaimes, *Control digital*. Medellín, 2010.