

CONTROL DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO BASADO EN EVENTOS

Sergio Velásquez¹ Lacides Pinto² Luis Rosales³

¹ Centro de Investigación de las Redes Neuronales Artificiales y la Robótica CIRNAR UNEXPO, Ciudad Guayana, Bolívar 8050 Venezuela. ² Universidad de la Guajira, Colombia, ³ UNEXPO, Ciudad Guayana, Bolívar Venezuela
sergiovelasquezg@gmail.com

Recibido (10/03/16), aceptado (29/03/17)

Resumen: La teoría de control PID en su vertiente discreta, está basada en una administración periódica de los muestreos, es considerada un área robusta dentro del paradigma del control automático. Sin embargo, la planificación por eventos deriva inevitablemente, en muestreos asíncronos en mayor parte en problemas adicionales que necesitan ser caracterizados y estudiados. En este escenario, aspectos como la sintonía de los controladores y las condiciones para la estabilidad global o la ausencia de ciclos límite siguen siendo temas que todavía están lejos de ser resueltos. En este artículo se presenta un nuevo esquema de muestreo y control con base en eventos para sistemas de primer orden que poseen retardos. El esquema propuesto se basa en el Predictor de Smith para la compensación de los retardos, y en el algoritmo de muestreo SSOD (Symmetric Send On-Delta) para la realización de los eventos. Basados en este esquema, se desarrolla el análisis de estabilidad con una interpretación intuitiva y eficaz.

Palabras Clave: Sistemas de primer orden, Sistemas por eventos, Control PID, Sintonía.

CONTROL OF FIRST ORDER SYSTEM WITH EVALUATION BASED ON EVENTS

Abstract: The PID control theory in its discrete aspect, is based on a periodic administration of the samples, is considered a robust area within the paradigm of the automatic control. However, event planning inevitably results in asynchronous sampling mostly of additional problems that need to be characterized and studied. In this scenario, aspects such as the tuning of controllers and the conditions for global stability or the absence of limit cycles are still issues that are still far from being solved. This paper presents a new sampling and control scheme based on events for first order systems that have delays. The proposed scheme is based on the Smith Predictor for delay compensation, and on the SSOD (Symmetric Send On-Delta) sampling algorithm for generating the events. Based on this scheme, stability analysis is developed with an intuitive and efficient interpretation.

Key words: Systems of first order, Systems by events, PID control, Tuning.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro del paradigma del control automático, las estrategias basadas en eventos se presentan como una solución futura para flexibilizar los requisitos del control de procesos. La creciente escala y descentralización de los procesos actuales, así como el carácter heterogéneo de las comunicaciones, está motivando nuevas demandas tecnológicas. Especialmente durante la última década, las aplicaciones apoyadas en sistemas de control en red, del inglés, Networked Control Systems (NCS), han centrado el interés de numerosos investigadores. Estas aplicaciones se caracterizan por un intercambio masivo de información entre dispositivos distribuidos

que, en muchos casos [1], están alimentados por baterías [2]. En estas arquitecturas, las limitaciones de energía y de ancho de banda son evidentes y por tanto, la reducción de la carga de tráfico es un aspecto clave. Un incremento innecesario del tráfico, no solo aumenta la utilización del CPU y el número de comunicaciones, y consecuentemente el consumo global, sino que a su vez, eleva las probabilidades de pérdida de datos y de experimentar retardos estocásticos, dificultando el desarrollo de la estrategia de control [3]. Los enfoques basados en eventos se orientan hacia la compensación estas desventajas, proporcionando mecanismos para el uso de los recursos del sistema y los canales de información [4]. Gran parte del éxito de los controladores PID con muestreo periódico (basados

en tiempo) radican en el hecho de que son capaces de proporcionar un rendimiento satisfactorio en muchos procesos con un diseño relativamente sencillo [5], lo que viene propiciado por el gran número de reglas de sintonía disponibles [6]. En los enfoques basados en eventos, los muestreos y las acciones de control son tareas asíncronas o esporádicas que dependen de las condiciones de evento y, por lo tanto, el análisis del sistema de control y el estudio de la sintonía plantea más desafíos que el Control con muestreo periódico (enfoques planificados en tiempo) [3]. Adicionalmente, las condiciones de evento pueden ser definidas en [7] e incluirse en cualquiera de los agentes que intervienen en el lazo de control obteniendo diferentes dinámicas y arquitecturas [8]. En este contexto, el algoritmo de muestreo más comúnmente empleado es Send-On-Delta (SOD) (también conocido como muestreo por cruce de nivel [2] o muestreo de banda muerta [7]) y el controlador más analizado es el algoritmo PID [9]. En un esquema de muestreo SOD, la variable medida es muestreada y enviada al controlador cuando esta supera un umbral predefinido (delta) que es su condición de evento [10].

Los enfoques basados en eventos con control PID han sido tratados por numerosos investigadores durante los últimos años. En algunos trabajos se considera un esquema en el que el algoritmo de control es tratado como un PID con periodo de muestreo variable que desarrolla una acción de control cada vez que una nueva muestra está disponible [11]. En estos casos, las estrategias de muestreo por eventos con SOD se aplican sobre la salida del sistema [12] o sobre la señal de error de control [13]. En otros casos similares, la señal de salida del controlador no solo reacciona ante nuevas muestras sino que evoluciona entre ellas con un periodo de muestreo regular [14]. En el presente artículo se ha centrado en esta situación, siendo el error de control muestreado por eventos. En otros enfoques, el estado del sistema y el error se miden continuamente y el controlador PID genera las acciones de control por eventos, disponiendo condiciones de evento independientes para las acciones proporcional, integral y derivativa, y siendo el error de control la señal que se mide para evaluarlas [15]. En cualquier caso, los muestreos y las acciones de control dependen de la evolución de las señales, lo que afecta a la calidad de control, pudiendo aparecer fenómenos como los ciclos límite [16]. Por esta razón, aspectos como la sintonía del controlador y las condiciones para la estabilidad global del sistema y para la ausencia de ciclos límite son temas que todavía están lejos de ser completamente resueltos [17]. La sintonía del controlador no ha sido debidamente analizada todavía.

En [3] se ha abordado la obtención de condiciones sobre el controlador PI que eviten los ciclos límites. Las condiciones obtenidas evitan la aparición de este fenómeno pero, a su vez, plantean una restricción sobre la sintonía que afecta al rendimiento global del sistema. Se propone un nuevo esquema basado en eventos con control PI para procesos de primer orden con retardo, First-Order-Plus-Time-Delay (FOPTD), que previene la aparición de ciclos límite como consecuencia del retardo del proceso con independencia de los parámetros de sintonía. La arquitectura propuesta para el lazo resulta esencial para el diseño de una metodología de sintonía de fácil uso y con una interpretación intuitiva y eficaz.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección II se presenta el desarrollo de la investigación: Arquitectura de control Sistemas NCS, y la Estabilidad y ausencia de ciclos límite. En la sección III se presentan los resultados de los experimentos usando el software y discusión en relación al experimento, en la sección IV se presentan las conclusiones y en la sección V las Referencias Bibliográficas

II. DESARROLLO

A. Arquitectura de control

La arquitectura del esquema de control basado en eventos se compone de tres unidades básicas; la unidad del sensor, la del controlador y actuador, y la unidad de predicción (Figura 1)

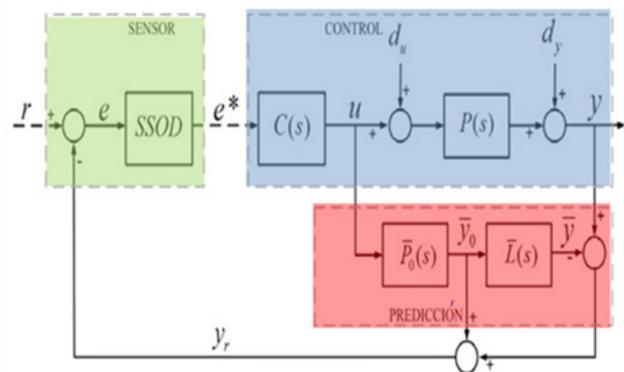


Fig. 1 Esquema del sistema de control basado en eventos

En este artículo se ha considerado el algoritmo de muestreo por eventos SSOD que fue introducido en [13]. Según este algoritmo, si se llama $e(t)$ al error instantáneo y $e^*(t)$ a la muestra del error enviada al controlador, la relación entre ambas señales se define como un múltiplo entero de un umbral predefinido Δ , es decir, $e^*(t) = j\Delta$ tal que $j \in \mathbb{Z}$ y siendo j el estado del bloque SSOD. La Figura 2 muestra la relación entre $e(t)$

y $e^*(t)$. La gestión por eventos desarrolla el bloque SSOD y puede considerarse como una generalización del relé con histéresis donde, el error muestreado cambia al valor de cuantización superior cuando la señal $e(t)$ se incrementa por encima de Δ o al inferior, cuando se decrementa por debajo. La ventaja fundamental de la técnica SSOD frente a la técnica estándar SOD es que la primera siempre considera el valor del nivel de cuantización del error cero ($e^*(t)=0$) [18], mientras que en la segunda puede asumirse un error inicial, lo que dificulta en algunos casos, alcanzar el error cero. Así pues, esta característica de la técnica SSOD ayuda a prevenir la aparición de ciclos límite como consecuencia de una baja cuantización del error.

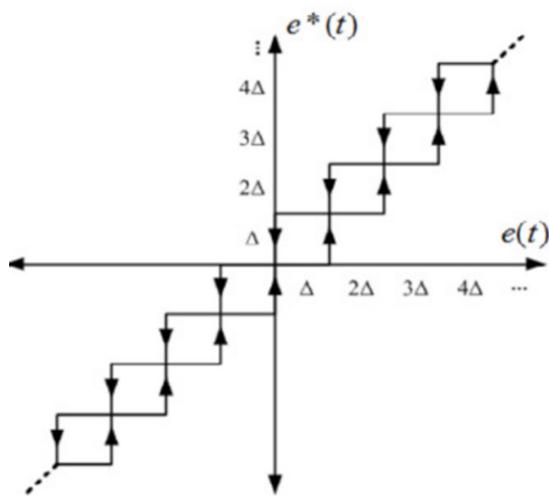


Fig. 2 Relación de cuantización del bloque SSOD

1) La unidad de predicción

La unidad de predicción se construye a partir de la estructura del Predictor de Smith [18]. Tal como muestra la Figura 1, el Predictor incluye un modelo sin retardo del proceso \bar{P}_0 , y un modelo del retardo del proceso $\bar{L}(s)$:

$$\bar{P}_0(s) = \frac{\bar{K}}{\bar{\tau}s + 1} \quad \bar{L}(s) = e^{-Ls} \quad (1)$$

donde \bar{K} , $\bar{\tau}$ y \bar{L} representan los parámetros identificados de K , τ y L , respectivamente. El esquema del Predictor de Smith puede interpretarse como una extensión de los controladores PID que permite predecir el comportamiento de proceso y tenerlo en cuenta para calcular las acciones de control [19]. El efecto de la predicción se puede apreciar analizando el lazo de realimentación en la Figura 1, donde en ausencia de errores de modelado en \bar{P}_0 y $\bar{L}(s)$, se cumple $\bar{P}(s) = \bar{P}(s) = \bar{P}_0(s) \cdot \bar{P}(s)$ y la señal de realimentación

se corresponde directamente con la salida del bloque P_0 (proceso sin retardo) [20]. El Predictor de Smith es fundamental para cancelar el error en estado estacionario y prevenir la aparición de ciclos límite, lo cual, proporciona robustez al esquema. Si el retardo no fuera compensado, la "umbralización" por eventos no haría sino contribuir al alejamiento de la referencia que ya produce el retardo. En este sentido, aunque la consideración de una estrategia de tipo PID, únicamente sin el predictor [21], podría ser más robusta, si la unidad de predicción fuera omitida del lazo, sería imposible alcanzar una referencia dada sin error e_{ss} estacionario [22]. Esta es una de las razones por la que se destaca la importancia de este nuevo enfoque basado en eventos para sistemas con retardo. Otro aspecto remarcable es que el esquema propuesto es extensible con ventajas similares a procesos de orden y complejidad superior a la del proceso considerado en este artículo.

2) La unidad de control y actuador

La tercera unidad es el bloque de control y actuador. En este artículo se ha definido y analizado el rendimiento de un controlador con topología adaptativa que trabaja con muestreo periódico (basado en el tiempo). El controlador, que se ha denominado PI-P, se construye mediante la combinación de dos estrategias independientes bien conocidas; un controlador PI y un P (Figura 3).

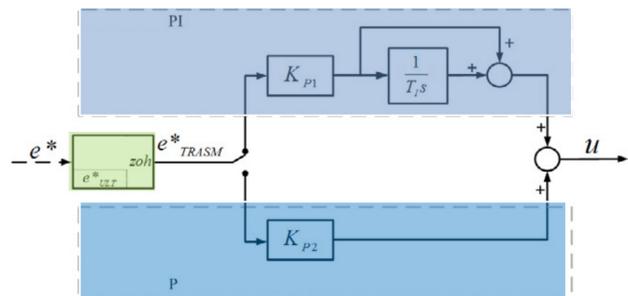


Fig. 3 Esquema del controlador PI-P y del bloque zoh.

Uno de los desafíos del control basado en eventos es el seguimiento de referencias en condiciones de baja cuantización de las señales [23]. Este aspecto puede originar comportamientos oscilatorios alrededor de la referencia, principalmente cuando el controlador presenta acción integral, la ausencia de acción integral en la zona cercana a la referencia puede mejorar la convergencia de la respuesta, previniendo los ciclos límite. Sin embargo, la ausencia de acción integral en el controlador limita la capacidad de rechazo de perturbaciones obteniéndose mejores resultados con un controlador PI. Por esta razón, uno de los aspectos

destacados, es la conveniencia del diseño de estrategias de control adaptativa en los enfoques basados en eventos. Así, la topología del controlador diseñado cambia en función de la evolución de las muestras del error, habilitándose una estrategia u otra, de manera que el controlador global se beneficie de las ventajas de ambos [24]. Cada parte del controlador tiene sus propios objetivos y actúa de manera independiente; la componente PI está diseñada para el rechazo de perturbaciones y el seguimiento de referencias, y la componente P para la aproximación a la referencia sin ciclos límite. El comportamiento de un ciclo de control sería el siguiente; ante un cambio de referencia, cuando la salida del proceso está lejos de la referencia y el error de control es elevado, actúa el control PI, procurando las tareas de seguimiento y rechazo de perturbaciones, y cuando el error se reduce lo suficiente y las posibles perturbaciones están rechazadas, el controlador es conmutado a la parte P, el cual tiene una ganancia ajustada para llevar la salida del proceso asintóticamente a la referencia. El bloque Lógica (véase Figura 3) está diseñado para la conmutación de los controladores mediante una estrategia de ganancia planificada. El proceso considerado se describe por la siguiente función de transferencia:

$$P(s) = \frac{\bar{K}}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (2)$$

donde K es la ganancia del proceso, τ es la constante de tiempo, y L el retardo del proceso. Definiendo la función de transferencia del controlador PI en su forma paralela como:

$$C_{PI}(s) = K_{PI} \left(1 + \frac{1}{sT_1} \right) \quad (3)$$

y la del controlador P como la ganancia:

$$C_P(s) = K_{P2} \quad (4)$$

El criterio tomado para realizar la conmutación de los controladores es el de aplicar la componente P cuando la muestra del error satisface la condición $|e^*(t)| = \Delta$ y además la derivada de $e^*(t)$ es menor que cero, y en cualquier otro caso, habilitar el controlador PI. Para saber la tendencia de las muestras del error, el último valor del error recibido en el bloque Lógica (guardado en memoria), e_{ULT}^* , es comparado con la muestra del error actual e^* .

B. Estabilidad y ausencia de ciclos límite.

En este artículo se ha relacionado la cuestión de la estabilidad con los ciclos límites. Se ha considerado

que la estabilidad del sistema queda caracterizada por la ausencia de ciclos límites y la presencia de un punto de equilibrio en

torno a la referencia, de manera que el error instantáneo permanece en un intervalo en torno a la referencia $e(t) \in (-\Delta, \Delta)$. de este modo se puede garantizar la estabilidad del esquema propuesto bajo condiciones de perturbación por la satisfacción de dos condiciones; primero, mediante la demostración de la existencia del punto de equilibrio y segundo, el alcance de este punto [23].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Metodología de sintonía

El aporte esencial de este artículo ha sido el diseño de una metodología de sintonía para el controlador basado en eventos propuestos. Las principales ventajas de este enfoque son que facilita la predicción del comportamiento de la respuesta y por extensión, su tiempo de asentamiento, así como la reducción y predicción del número de eventos generados. Además, permite considerar de una manera sencilla las restricciones del actuador en el desarrollo de la sintonía del controlador. Esta metodología está directamente relacionada con el esquema de control basado en eventos. La sintonía del controlador tiene un efecto más interactivo sobre el rendimiento del sistema. A partir de los parámetros de PI se dispone de dos grados de libertad para ajustar la forma de la respuesta y la influencia de cada uno de ellos resulta muy intuitiva. Otras ventajas del enfoque propuesto es que la respuesta no presentará sobrepaso, reduciendo la tasa de eventos a la mínima posible y reduciendo a su vez los índices anteriores. En este contexto, considerando los parámetros de sintonía y el esquema del controlador según la Figura 1, es posible calcular el número de eventos esperado como:

$$S = \frac{r}{\Delta} + 1 \quad (5)$$

donde $\frac{r}{\Delta}$ representa la división entera. De manera similar se puede definir el tiempo de asentamiento esperado como:

$$T_{ST} = L + \frac{a}{|j_{max}| \alpha} + \sum_{i=|j_{max}|}^2 \frac{\Delta}{i \Delta \alpha} + T_s \quad (6)$$

Cabe destacar que la predicción del tiempo de asentamiento representa una cuestión difícil en control basado en eventos dada la naturaleza asíncrona de los eventos.

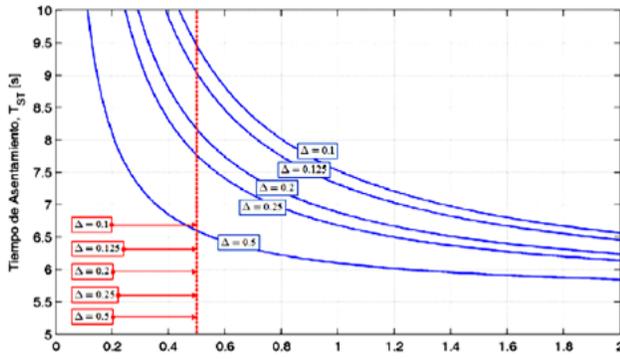


Fig. 4 Tiempo de asentamiento y la integral del valor absoluto de la señal de error (IAE).

Como se comentó previamente, otro de los aspectos que se han considerado en la sintonía son las restricciones del actuador. Este artículo se ha centrado en las restricciones dadas por la limitación en la tasa de cambio del actuador del proceso.

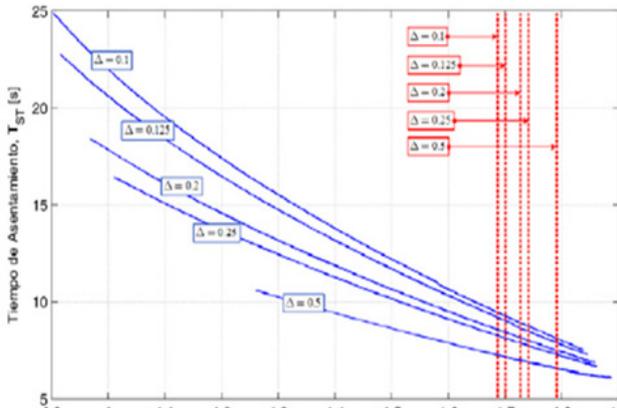


Fig. 5 Tiempo de asentamiento y la integral del valor absoluto de la señal de error (IAU).

Todo lo comentado permite definir un marco de trabajo para la especificación de la sintonía de acuerdo a las necesidades de usuario. Las Figuras 4,5 y 6 muestran ejemplos ilustrativos de regiones de sintonía para los parámetros de diseño (Δ, α) en función de varios índices de rendimiento. A modo de ejemplo, se han especificado los parámetros del sistema como $K=1, \tau=1, L=0,6, r=1, (J\Delta, \alpha)_{MAX}=0.5$ y $\Delta=\{0,1;0,125;0,2;0,25;0,5\}$. La Figura 4 muestra una región de sintonía donde se relacionan los parámetros (Δ, α) con un posible índice de rendimiento como es el tiempo de asentamiento de la respuesta. Cada una de las curvas continuas azules representa la evolución del tiempo de asentamiento con respecto al valor de Δ para el mismo valor de la tasa de eventos (valor de Δ). Las líneas rojas rayadas indican las cotas superiores de α para cada valor de tasa de eventos Δ .

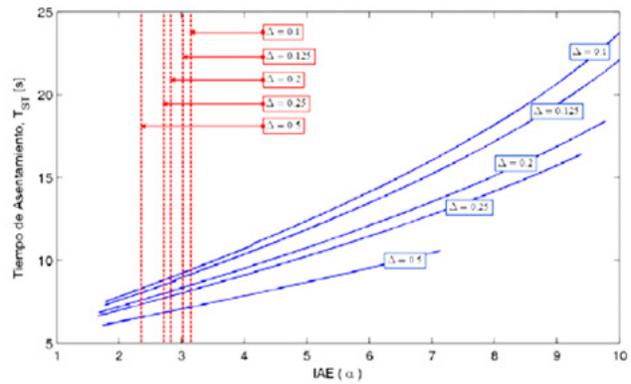


Fig. 6 Tiempo de asentamiento, con relación a los parámetros de sintonía.

En este ejemplo, y para los valores de α considerados, las líneas de cota máxima coinciden. De manera similar, la Figura 5 muestra una región de sintonía que relaciona dos posible índices de rendimiento como son el tiempo de asentamiento y el esfuerzo de control (IAU). Cada una de las curvas continuas azules representa

la evolución del tiempo de asentamiento con respecto al esfuerzo de control (como una función de α) para el mismo valor de la tasa de eventos (valor de Δ). En este caso, las líneas rojas rayadas también indican las cotas superiores en términos del valor máximo del IAU conseguible (y consecuentemente, el valor máximo de α admisible). Como muestran las Figuras 4 y 5, cuanto mayor es el valor de α , menor es el valor del tiempo de asentamiento para la misma tasa de eventos esperada y mayor es el esfuerzo de control.

B. Estimación de perturbaciones

Considerando la arquitectura de control de la Figura 1, la tarea de identificación podría ser desarrollada en el bloque SSOD, mediante la detección de los instantes de tiempo en que suceden los eventos y el cálculo del intervalo entre los mismos. Con esta filosofía, se propone un algoritmo de bajo coste para estimación on-line de las perturbaciones a la entrada y a la salida. En este artículo se han considerado perturbaciones de tipo escalón y se ha asumido que aparecen de manera independiente. Las respuestas temporales de las posibles perturbaciones sobre la entrada y la salida se definen, respectivamente, como:

$$d_u(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{du} \\ d_u & t \geq t_{du} \end{cases} \quad d_y(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{dy} \\ d_y & t \geq t_{dy} \end{cases} \quad (7)$$

Donde t_{du} y t_{dy} representan los instantes de tiempo en los cuales aparecería la perturbación.

Compensación de la incertidumbre

La desventaja fundamental de los esquemas de control basados en el Predictor de Smith son las incertidumbres y los errores de modelado. Con el enfoque propuesto, si estas desventajas existen, aparecerán nuevas componentes en la realimentación del sistema. Este aspecto provocaría que el sistema presentara error en estado estacionario cuando alcanzase el estado de equilibrio y en el peor caso, podría

posibles perturbaciones en el conjunto de parámetros (K, L, τ) , la señal de realimentación en el dominio de la frecuencia para un estado dado j en el cual actúa el control PI vendría descrita así

$$Y_r(s) = \left(\alpha - \alpha e^{-Ls} + \frac{\alpha K(\bar{\tau}s + 1)}{K(\tau s + 1)} e^{-Ls} \right) \frac{1}{s} \frac{j\Delta}{s} \quad (8)$$

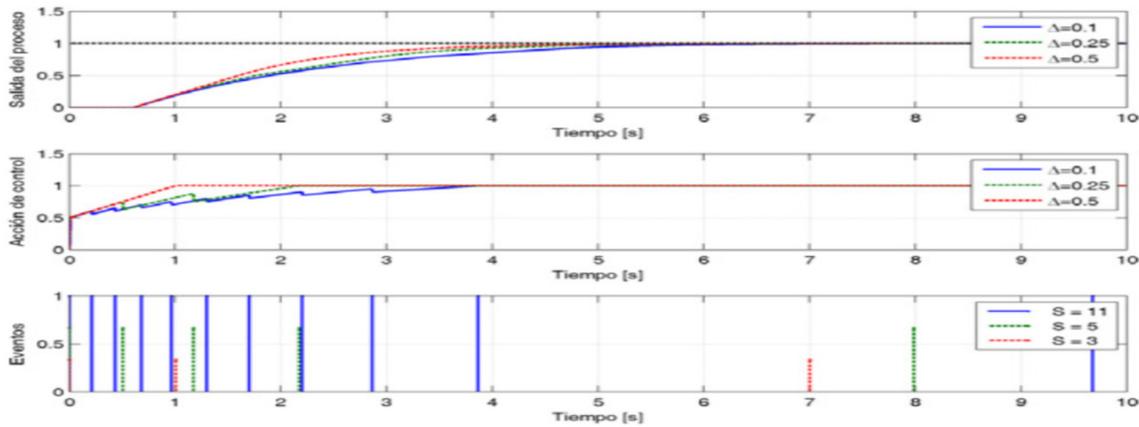


Fig. 7 Gráfica superior: Salida del proceso. Gráfica intermedia: Acción de control. Gráfica inferior: Eventos generados.

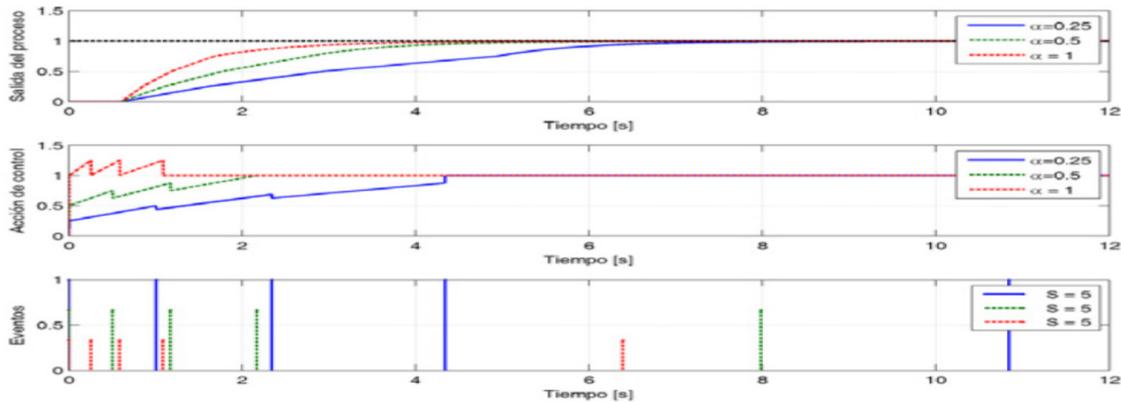


Fig. 8 Gráfica superior: Salida del proceso. Gráfica intermedia: Acción de control. Gráfica inferior: Eventos generados.

degenerar en ciclos límite. Por esta razón, en línea con el esquema desarrollado, se propone un algoritmo para la compensación del error e_{ss} estacionario originado por las incertidumbres paramétricas del modelo $\bar{P}(s)$. El error en estado estacionario podría ser compensado con un reajuste adecuado de la ganancia del controlador P. El algoritmo propuesto debe adaptar la ganancia de la parte P respecto de (4) en base a las incertidumbres detectadas. En este artículo se ha considerado la compensación de las incertidumbres paramétricas en L y τ (en referencia al modelo $P(s)$), dado que los errores de modelado en el parámetro K no son habituales. Ante

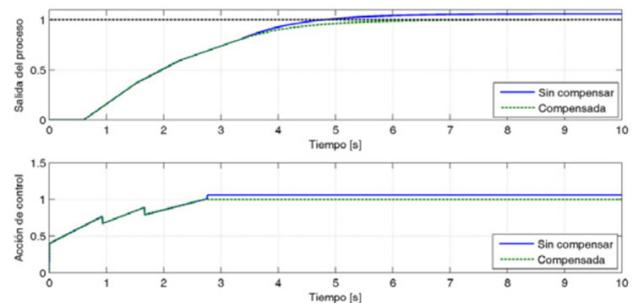


Fig. 9 Respuestas del sistema compensada y sin compensar ante un error de modelado en L de -50%. Gráfica Superior: Salidas del proceso. Gráfica inferior: Acciones de control.

La consecuencia práctica de las incertidumbres consideradas son variaciones en los instantes de eventos y, por lo tanto, si se asume que las incertidumbres pueden ser estimadas, el algoritmo propuesto puede compensar on-line el error en estado estacionario. Esto consiste en estimar el instante en el cual el bloque Lógica conmuta al controlador P y ajustar la ganancia K_{P2} para alcanzar la referencia. Si para una referencia dada r se denota como $t_{PI \rightarrow P}$ el instante del ciclo de control en el cual los controladores son conmutados, y como $y(t_{PI \rightarrow P})$ o la salida del proceso en ese instante, si existen incertidumbres en L

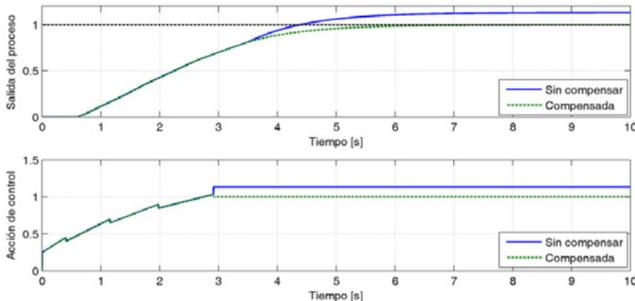


Fig. 10 Respuestas del sistema compensada y sin compensar ante un error de modelado en L de -50%. Gráfica Superior: Salidas del proceso. Gráfica inferior: Acciones de control.

IV. CONCLUSIONES

En conclusión una nueva arquitectura de control basado en eventos con una metodología de sintonía simple y eficaz ha sido presentada. El sistema basado en eventos, obtenido mediante la integración del esquema del Predictor de Smith y un esquema de muestreo SSOD, evita los ciclos límites consecuencia del retardo del proceso y reduce el error en estado estacionario. Además de lo anterior, se ha propuesto un controlador adaptativo que garantiza la estabilidad en condiciones de perturbación así como mecanismos para la compensación de incertidumbres estructuradas.

Las simulaciones han confirmado la relevancia en el desarrollo de reglas simples de sintonía para este tipo de controladores basados en eventos. El esquema se construye a partir de la estructura típica del Predictor de Smith en conjunción con un esquema de muestro por eventos SSOD (Symmetric-Send-OnDelta) presentando en [13] y un controlador adaptativo que actúa con muestreo periódico. El Predictor de Smith resulta clave para la prevención de los ciclos límites, el algoritmo SSOD para la generación de eventos de muestreo sobre la señal de error y el controlador para la reducción del error en estado estacionario. A pesar de que el esquema de muestreo SOD es el más empleado en la literatura,

el esquema SSOD aplicado sobre el error de control presenta ciertas ventajas con respecto al primero, fundamentalmente en el seguimiento de referencias. Además del diseño del esquema, se ha desarrollado el análisis de estabilidad del sistema proporcionando condiciones suficientes para la existencia de un punto de equilibrio sin ciclos límite alrededor de la referencia para procesos FOPTD, y se proponen mecanismos para compensar los errores de modelado

V. REFERENCIAS

- [1] Velásquez Sergio, Custodio Angel, «Propuesta de algoritmos de control en líneas tcp/ip y compensación de retardos,» *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 18, n° 70, pp. 23-30, 2014.
- [2] Lujo Bauer , Yuan Liang , Michael K. Reiter , Chad Spensky, «Discovering access-control misconfigurations: new approaches and evaluation methodologies,» *Proceedings of the second ACM conference on Data and Application Security and Privacy*, 2012.
- [3] A. Bemporad, «Predictive Control of Teleoperated Constrained Systems with Unbounded Communication Delays,» de *47th IEEE Conference on Decision and Control*, EEUU, 2008.
- [4] H. F. a. M. T. A. Sano, «Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation,» de *Gain-Scheduled Compensation for Time Delay of Bilateral Teleoperation Systems*, Leuven, Belgium, 1998.
- [5] Sergio Velásquez, Ronny Velásquez ,Miguel Leyton, José Borjas, Ángel Custodio, «Modelado de controlador respiratorio a través de la herramienta Simulink de Matlab,» *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 16, n° 65, pp. 244-248, 2012.
- [6] G. Buttazzo, *Hard real-time computing systems*, Scuola Superiore S. Anna, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [7] David A. Wagner, Daniel L. Dvorak, Lynn E. Baroff, Matthew B. Bennett, Michel D. Ingham, David S. Mittman, Andrew H. Mishkin, «A Control Architecture for Safe Human-Robotic Interactions During Lunar Surface Operations,» *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, pp. 10-22, 2009.
- [8] Jean I. Garcia, M. Mark Colavita, and Andrew J. Booth, «Real-time control system for the Keck Interferometer Nuller: methods and maintenance,» *Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, CA*, pp. 27-36, 2006.
- [9] N. C. a. M. S. R. Lozano, «Proceedings of the 8th

- Mechatronics Forum International Conference,» de *Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay*, Entschede, Netherlands, 2002.
- [10] J. M. Azorín Poveda, «Control Bilateral por convergencia de estados de sistemas teleoperados con retardos en la transmisión,» Universidad Miguel Hernandez, Elche, 2003.
- [11] Velásquez, Sergio, «Estudio de las variaciones al azar en bioinstrumentos. Caso: Filtro del Kalman,» Trabajo de Grado UNEXPO, Guayana, BOLIVAR, 2011.
- [12] Aguirre Gil, Iñaki; Andueza, Luis; Arismendi, Cesar, *Sistema manipulador antropomórfico de tres grados de libertad*, Madrid, 2011.
- [13] A. Ambike, «Closed-Loop Real-Time Control on Distributed Networks, Masters' Thesis,» Texas A&M University, College Station, Texas, 2009.
- [14] Mahmoud, M.S. and Ismail, A., «New results on delay-dependent control of time-delay systems,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, n° 50, p. 95–100, 2005.
- [15] R. Rasmussen, «Achieving Control and Interoperability through Unified Model-based Systems and Software Engineering,» *Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace*, pp. AIAA-2005-6918, 2005.
- [16] Andrei Bourchtein, Ludmila Bourchtein, *Counterexamples on Uniform Convergence: Sequences, Series, Functions, and Integrals*, 4 ed., WILEY, 2016, p. 320.
- [17] Hespanha, J.P., Naghshtabari, J.P., and Xu, Y., «A survey of recent results in networked control system,» *Proceedings of the IEEE*, n° 95, p. 138–162, 2007.
- [18] Sergio Velasquez, Ronny Velasquez, *Fundamentos de Analisis Numérico*, Guayana: Autores y Editores, 2014.
- [19] K. Åström, *Introduction to Stochastic Control Theory.*, New York: Academic Press, 1970.
- [20] Chopra, N., & Spong M. W., «Output synchronization of nonlinear systems with time delay in communication,» *IEEE*, pp. 4986-4992, 2006.
- [21] Garcia, E. and Antsaklis, P.J., «Model-based event-triggered control for systems with quantization and time-varying network delays,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 1, n° 58, p. 422–434, 2013.
- [22] P. Kumar, «Fundamental issues in networked control system,» de *Proceedings of the 3rd WIDE Ph.D. School on Networked Control System*, Siena, Italy, 2009.
- [23] Velásquez Sergio, Velásquez Ronny, *Fundamentos de Análisis de Señales*, 1 ed., vol. 1, S. Velásquez, Ed., Guayana, BOLIVAR: CENAL, 2014, p. 144.
- [24] Melchiorri, P. Arcara and C., «Control Schemes for Teleoperation with Time Delay: A Comparative Study,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2002.