

## Estudio de estrategias de control PI disparado por eventos para sistemas basados en red <sup>\*</sup>

M. García Juárez <sup>\*</sup>, J. F. Guerrero Castellanos <sup>\*\*</sup>,  
C. Grano Romero, R.C. Ambrosio Lázaro,  
J. Castañeda Camacho

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE-BUAP)*

<sup>\*</sup> e-mail: chamoymoy12@hotmail.com

<sup>\*\*</sup> e-mail: fguerrero@ece.buap.mx.

---

Resumen: A diferencia de las técnicas de control comúnmente usadas, donde se considera que la ley de control es calculada y actualizada de manera periódica, ya sea bajo un enfoque de diseño en tiempo continuo o en tiempo discreto, en el control disparado por eventos, la ley de control se calcula y la señal de control se envía a los actuadores “solamente” cuando un evento ocurre. Esta característica es de gran beneficio en sistemas de control donde el lazo de retroalimentación se cierra mediante una red de comunicaciones, ya que permite reducir el tráfico de datos en la red de comunicación sin sacrificar el desempeño del sistema en lazo cerrado. El presente trabajo presenta un estudio y análisis de un conjunto de técnicas de control PI disparado por eventos propuestas por (Durand., (2011)). A diferencia del trabajo citado, aquí se analizan tales técnicas en un sistema de control retroalimentado por una red CAN-BUS. Cada estrategia se evalúa en simulación utilizando el toolbox TrueTime, el cual es un simulador basado en MATLAB/Simulink para sistemas de control embebidos y en red. Cada estrategia de control PI disparado por eventos es evaluada y comparada con una estrategia de control diseñada en tiempo continuo (control disparado por tiempo). En cada estrategia se comprueba la robustez ante perturbaciones en la red y perturbaciones en el sistema controlado, así como el número de mensajes enviados a través de la red. Los resultados muestran la eficiencia de las estrategias de control PI disparado por eventos y su gran ventaja en la implementación de éstas respecto al control basado en tiempo, para el control de sistemas distribuidos y basados en red.

*Keywords:* Control disparado por eventos, sistemas de control basados en red, Estudio comparativo, Red CAN-BUS, anti win-dup.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés y la investigación de técnicas de control automático utilizando muestreo asíncrono han aumentado considerablemente. La razón es una consecuencia directa del impacto de las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks (WSN)) y Sistemas de Control Basados en Red (SCBR o NCS del inglés Networked Control Systems). Los SCBR son sistemas de control en los cuales el lazo de control se cierra a través de una red en tiempo real. Las ventajas de este tipo de sistemas son principalmente la arquitectura flexible y la reducción de costo en instalación y mantenimiento.

Los SCBR son aplicados en un rango muy amplio de sistemas, tales como redes de sensores móviles, cirugía

remota, sistemas de automatización de autopistas y en vehículos aéreos no tripulados (Tipsuwan et al., (2003)), (Hespanha et al., (2007)), (Yang., (2006)).

Las principales desventajas de los SCBR son los efectos de la red, los cuales influyen en el desempeño y estabilidad del lazo de control. Tales efectos son los retardos y la pérdida de paquetes de información los cuales producen una pérdida de sincronización entre el control principal y los diferentes agentes o nodos. En esta situación se han propuesto diferentes estrategias de control basado en eventos, donde el intercambio de la información conjuntamente con los demás agentes se realiza sólo cuando se produce un evento y no por el paso del tiempo, como lo marcaría la teoría de control en tiempo continuo o digital (Åström et al., (2008)).

Las estrategias de control basado en eventos utilizando una estructura PI y PID han sido abordadas desde hace más de una década. En la primera estrategia de control basada en eventos propuesta en (Árzen., (1999)) y posteriormente retomada en (Dormido et al., (2008)), se propone una

---

<sup>\*</sup> Este trabajo fue apoyado por la Vicerrectoría de Investigación y estudios de posgrado, bajo el proyecto GUCJ-ING15-1. El trabajo fue desarrollado en el laboratorio de control de sistemas ciber-físicos de la FCE-BUAP. De manera especial se agradece al Dr. S. Durand por sus valiosos comentarios y consejos durante la elaboración de este trabajo.

metodología en la que se actualiza la señal de control cuando ocurre un evento y cuando se sobrepasa un periodo máximo de muestreo denominado  $h_{max}$ . Después en (Durand et al., (2009), Durand et al., (2011)) son propuestas nuevas estrategias de control donde es eliminado el periodo máximo de muestreo  $h_{max}$ , ya que lo considera demasiado conservativo. Finalmente en (Durand., (2011)) un conjunto de estrategias basadas en eventos son detalladas, donde una estrategia llamada híbrida permite la reducción en términos de energía más aparte eficiencia en términos de control, ya que no presenta un sobreimpulso máximo después de un largo periodo  $h$  sin actualizar la señal de control.

Si bien varias técnicas de control disparado por eventos bajo una estructura PI y PID han sido propuestas, raramente alguna de ellas ha sido validada en un SCBR. No obstante, validar tales técnicas en un SCBR resulta bastante interesante, ya que el envío de datos entre los diferentes nodos que componen a una red de comunicación implica, retardos, posible pérdida de datos, congestión de datos y por supuesto un consumo de energía, como por ejemplo una red CAN-BUS llega a consumir una potencia de 0.25W (Granja., (2012)) y entre más alejados estén los nodos más potencia será consumida. La herramienta TRUE TIME de MATLAB/Simulink (Ohlin et al., (2007)) es de gran utilidad para simular las diferentes estrategias de control basado en eventos de los SCBR, ya que permite simular diferentes protocolos de redes de comunicación y se puede variar sencillamente cada uno de los parámetros específicos de cada protocolo. Además, la programación de cada nodo en TRUE TIME es muy similar a la programación de los nodos de una red física.

En este trabajo se hace un estudio de las técnicas de control PI disparado por eventos propuestas en (Durand., (2011)) pero a diferencia del trabajo mencionado aquí el lazo de control se cierra mediante una red CAN-BUS. La validación se realiza usando el simulador TRUE TIME. Se compara la respuesta del control basado en tiempo, con las diferentes estrategias de control basado en eventos, se prueba la robustez del control ante perturbaciones externas al sistema y ante perturbaciones en la red (reduce el ancho de banda disponible en la red CAN-BUS). Se comprueba cual permite la mayor optimización del ancho de banda de la red CAN-BUS sin afectar la dinámica del sistema, así reducir el consumo de energía y por consiguiente reducir costos. El trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 describe el conjunto de estrategias de control basado en eventos, las cuales se implementarán y validarán en la sección 3. En esta misma sección se presentan resultados, los cuales son discutidos. Finalmente en la sección 4 se mencionan las conclusiones.

## 2. ESTRATEGIAS DE CONTROL PID

En esta sección primeramente se habla de la estrategia de control basada en tiempo y su implementación en computadora. Después son presentadas las estrategias de control PID basado en eventos.

### 2.1 Estrategia de control PID basado en tiempo

Esta estrategia ha sido ampliamente estudiada, por lo que existe una teoría bien definida, por ejemplo en (Åström et al., (2008)) se propone la siguiente ecuación.

$$u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Donde  $y$  es la variable del proceso medido,  $r$  ó  $y_{sp}$  es la señal de referencia,  $u$  es la señal de control y  $e$  es el error ( $e = r - y_{sp}$ ). La señal de control  $u$  es así una suma de los tres términos: el término  $P$  (es proporcional al error), el término  $I$  (es proporcional a la integral del error), y el término  $D$  (es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son proporcionales a la ganancia  $k_p$ , tiempo integral  $T_i$ , y tiempo derivativo  $T_d$ . La parte integral pueden ser interpretada como acción de control basada en el pasado. La parte derivativa puede ser interpretada como predicción.

*Implementación en computadora:* La estrategia de control basada en tiempo es implementada en computadora (Åström et al., (2008)) utilizando la ecuación 2, donde cada periodo  $h_{nom}$  se actualizará la señal de control. La señal  $v$  implementada en computadora, es la suma de los términos proporcional, integral y derivativo, la salida del controlador es  $u = sat(v)$ , donde  $sat$  es la función de saturación que modela el actuador. La implementación del término proporcional  $k_p(\beta(r - y))$  es simple solo se rempazan las variables continuas con su versión muestreada. Por lo tanto:

$$P(t_k) = k_p(\beta(r(t_k) - y(t_k))) \quad (2)$$

Donde  $t_k$  denota el instante de muestreo que es el tiempo donde la computadora lee una entrada. El operador da  $h_{nom}$  que representa el periodo de muestreo, así que  $t_{k+1} = t_k + h_{nom}$ . El término integral es obtenido aproximando la integral con la suma.

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + k_i h_{nom} e(t_k) + \frac{h_{nom}}{T_t} (sat(v) - v) \quad (3)$$

Donde  $T_t = h_{nom}/k_t$  representa el término anti-windup. El término de derivada filtrada  $D$  es dado por la ecuación en diferencias

$$D(t_k) = \frac{T_f}{T_f + h_{nom}} D(t_k - 1) - \frac{k_d}{T_f + h_{nom}} (y(t_k) - y(t_k - 1)) \quad (4)$$

### 2.2 Estrategias de control PID basado en eventos

En este apartado se muestran las más emblemáticas estrategias de control PID y PI basado en eventos que han sido propuestas en la literatura .

Control PID basado en eventos propuesto por Árzén:

La decisión de calcular una nueva señal de control es tomada cuando se cruza cierto nivel. El controlador propuesto en (Árzén., (1999)) se basa en dividir el controlador en dos partes: 1) la lógica de detección de eventos y 2) la lógica de control. El detector de eventos se ocupa de indicar a la lógica de control que debe producir una acción de control debido a que se dan las circunstancias adecuadas, es decir cuando se cruza el nivel propuesto. La lógica de detección de eventos es síncrona y está sujeta a un periodo de muestreo nominal de forma que cada  $h_{nom}$  se examina si se cumplen las condiciones necesarias para activar la lógica de control. Las dos condiciones de activación del control PID basado en eventos de Árzén son las siguientes:

$$|e(t_a) - e(t_{a-1})| \geq q_{nom} \quad \text{ó} \quad (t_k - t_{k-1}) \geq h_{max} \quad (5)$$

Las condiciones anteriores expresan que el cálculo de una nueva acción de control puede producirse ante dos situaciones: por error o por tiempo. La primera de las condiciones analiza si el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual del error  $e(t_a)$ , y el valor del error en que se disparó el cálculo de la última acción de control  $e(t_{a-1})$ , supera un umbral  $q_{nom}$ , esta condición es llamada *condición relativa*. La segunda condición es una medida de seguridad que obliga a producir una nueva acción de control cuando el tiempo transcurrido desde que se calculó la última supera un límite  $h_{max}$ . En el trabajo de Árzén, si se cambia la señal de referencia después de un periodo de estado estacionario largo, aparecerán importantes sobre tiros. La parte integral de la ecuación 6 del controlador PID basado en eventos, es responsable de estos sobre tiros. Donde  $t_a$  es el instante actual donde se detectó un evento,  $t_{a-1}$  es el instante anterior donde se detectó un evento.

$$u_i(t_a) = u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot h(t_a) \cdot e(t_a) \quad (6)$$

Después de esperar a un evento durante mucho tiempo, el valor de  $h(\cdot)$  se va haciendo muy grande (Durand., (2011)). Mientras no ocurre un evento  $u_i(t_a)$  crece desmedidamente, el valor de  $e(\cdot)$  aumenta drásticamente y así termina el estado estacionario. El cálculo de la parte integral necesita del producto  $he(\cdot)$  que es llamado *ganancia integral*, este producto explota al final del intervalo del estado estacionario. El estado estacionario se puede dividir en dos partes (ver Fig.1), que son: *i*) el intervalo de tiempo donde la señal está realmente en estado estacionario y *ii*) el intervalo de tiempo requerido para detectar un nuevo cruce de nivel. La primera parte inicia después del calculo de la última señal de control, es en el instante de muestreo  $t_{a-1}$  y termina justamente después de que la señal de referencia cambia.

Nuevas estrategias de control

El trabajo original de Árzén tiene un periodo máximo de seguridad  $h_{max}$  que fuerza el cálculo de la señal de control, si la señal medida permanece sin cambios; esta condición parece haber sido agregada por razones de inestabilidad, para que se cumpla la condición del teorema de muestreo de Nyquist-Shanon. Sin embargo con estas nuevas estra-

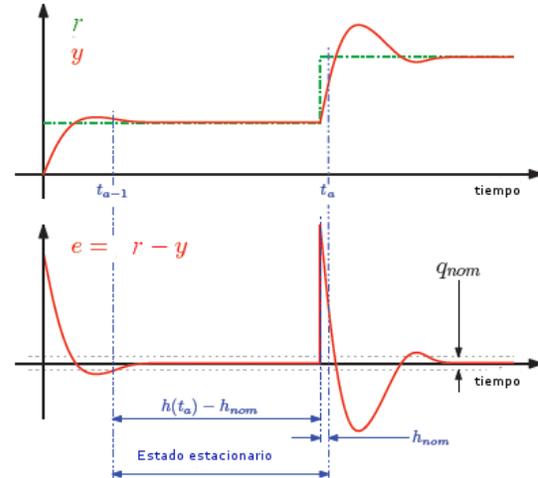


Figura 1. Descomposición de un intervalo de estado estacionario(Durand., (2011)).

tegias se propone remover el límite de periodo máximo de seguridad gracias a la detección de nivel, ya que la condición de muestreo de Nyquist-Shannon no tiene sentido en este nuevo paradigma. En (Durand et al., (2011)) se muestran los resultados experimentales de estas estrategias basadas en eventos. En esta sección se estudian cuatro de las estrategias de control PID basado en eventos que evitan volver a calcular la señal de control.

En estas estrategias se sustituye la condición relativa propuesta por Árzén por la absoluta  $abs(e(t_a)) > q_{nom}$ , donde se calcula una señal de control nueva tan pronto como el error actual cruza el nivel  $q_{nom}$ . Con este método el número de muestreos aumenta inevitablemente durante los transitorios, pero el error entre el sistema y la referencia seguramente es menor que  $q_{nom}$  durante el periodo de estado estacionario. Este método es requerido por controladores basados en eventos sin condición límite de seguridad  $h_{max}$ , para asegurar que un estado estacionario es realmente activado antes de decidir no actualizar la señal de control mientras la referencia no cambia, o no ocurre una perturbación. Como un resultado la señal medida  $y$  tiene que rastrear la referencia esperada  $r$  durante el intervalo de estado estacionario, que significa un pequeño error( y no un pequeño error relativo, por que el error relativo podría ser pequeño,  $abs(e(t_a) - e(t_{a-1})) > q_{nom}$ , mientras el sistema esté lejos de la referencia).

Estas estrategias basadas en eventos fueron propuestas en (Durand et al., (2009), Durand et al., (2011)):

Estrategia 1: Únicamente sin condición de límite de seguridad

Este algoritmo corresponde al de Árzén donde la condición de límite de seguridad  $h(t_a) \geq h_{max}$  es removida. Para este primer algoritmo, la parte integral queda expresada por la siguiente.

$$u_i(t_a) = u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he(t_a) \quad (7)$$

Donde  $he(t_a) = h(t_a) \cdot e(t_a)$

Se esperan importantes sobre tiros después de un largo intervalo de estado estacionario.

#### Estrategia 2: Saturación de la ganancia integral

Este segundo algoritmo consiste en reducir el producto  $he(\cdot)$  después de un largo intervalo de estado estacionario, en orden para reducir los sobre-impulsos. De esta manera la ganancia integral es limitada. La parte integral queda definida por la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he_{sat}(t_a) \\ \text{Donde} \\ he_{sat}(t_a) &= (h(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (8)$$

En (8) la ganancia integral  $he(\cdot)$  es limitada superiormente durante el tiempo de detección de un transitorio por el producto  $h_{nom} \cdot e(t_a)$ . El periodo de estado estacionario corre únicamente del instante de tiempo  $t_{a-1}$  a  $t_a - h_{nom}$  que es igual al intervalo de tiempo  $h(t_a) - h_{nom}$ . Durante este periodo, el error permanece muy pequeño, el error es menor que el nivel de detección  $q_{nom}$ , de lo contrario el estado estacionario no sería logrado, y así es el producto  $he(\cdot)$ . De esta manera, la ganancia integral también se limita superiormente por el producto  $(h(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom}$ . A pesar de limitar la ganancia integral todavía aumenta con respecto a  $h(\cdot)$  y  $e(\cdot)$ .

#### Estrategias 3: Factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo

Otro método consiste en reducir el impacto del intervalo de muestreo que principalmente aumenta durante el intervalo de estado estacionario. Por eso se agrega el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. Se elige una función exponencial para disminuir este impacto cuando el tiempo del estado estacionario aumenta, que está dada por la siguiente ecuación:

$$h_{exp}(t_a) = h(t_a) \cdot \exp(\alpha \cdot (h_{nom} - h(t_a))) \quad (9)$$

Donde el parámetro  $\alpha$  permite un grado de libertad o disminuye el intervalo exponencial de muestreo. Esto produce un intervalo de muestreo exponencial  $h_{exp}(\cdot)$  en la parte integral del controlador como el siguiente:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he_{exp}(t_a) \\ \text{Donde } he_{exp}(t_a) &= h_{exp}(t_a) \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (10)$$

Esta función permite tener *i*) un intervalo de muestreo nominal durante los transitorios, donde  $h(t_a) = h_{nom}$ , el intervalo de muestreo exponencial es  $h_{exp}(t_a) = h_{nom}$  y *ii*) una disminución exponencial del intervalo de muestreo durante los intervalos de muestreo de estado estacionario. Sin embargo, el producto  $he(\cdot)$  es más grande cuando el intervalo de muestreo es pequeño.

#### Estrategia 4: Híbrida

Finalmente este algoritmo es una mezcla entre la saturación de la ganancia integral y el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. La idea es tener un menor impacto del intervalo de muestreo todo el tiempo. Por esa razón, el factor de olvido exponencial dado en (10) se usa dentro del algoritmo de saturación (8). Así el producto

$he(\cdot)$  es ahora limitado superiormente por  $(h_{exp}(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a)$  y la parte integral llega a ser:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot he_{hibrida}(t_a) \\ \text{Donde :} \\ he_{hibrida}(t_a) &= (h_{exp}(t_a) - h_{nom}) \cdot q_{nom} + h_{nom} \cdot e(t_a) \end{aligned} \quad (11)$$

#### 2.3 Integral absoluta como índice de desempeño del error

Cada una de las cuatro estrategias anteriormente descritas se pueden evaluar por tres diferentes integrales absolutas (Durand., (2011)), como índices de desempeño.

La primera es la integral IAE, da la información del seguimiento de la señal de referencia.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| d(t) \quad (12)$$

La segunda es la integral IAEP, compara la respuesta del sistema de control basado en tiempo con la del control basado en eventos.

$$IAEP = \int_0^{\infty} |y_{basada\_tiempo}(t) - y_{basada\_eventos}(t)| d(t) \quad (13)$$

La tercera integral IAD, compara el índice IAE basado en tiempo con el basado en eventos.

$$IAD = \int_0^{\infty} |IAE_{basado\_tiempo}(t) - IAE_{basado\_eventos}(t)| d(t) \quad (14)$$

### 3. IMPLEMENTACIÓN Y ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PI BASADO EN EVENTOS

En esta sección se estudia el desempeño de las estrategias de control PI basado en eventos, y también se comparan con la estrategia basada en tiempo. El sistema de control diseñado, es para controlar la velocidad de un motor de CD. Por conveniencia la velocidad del motor CD es controlada por un control PI ya que en lazo cerrado resulta un sistema de segundo orden. Utilizando la ecuación característica de la respuesta transitoria un sistema de segundo orden, se diseña el control con un error en estado estacionario del 2%, tiempo de asentamiento  $t_s = 1s$ .

En el estudio de las estrategias de control se consideran las siguientes variables: tiempo de asentamiento( $t_s$ ), sobre impulso máximo(Mp), voltaje máximo de la señal de control (SC(MAX)), mensajes enviados en la red(Menv), estimación en días de duración de la batería (Dtb), los índices de desempeño (IAE, IAEP, IAD). Es considerada la condición de detección de eventos absoluta (a), y la condición de detección de eventos relativa (r). Cundo una de las variables evaluadas es indefinida se abrevia (Indf).

Se considera que el error límite ( $elim$ ) es igual al umbral ( $q_{nom}$ ). Entonces  $elim$  puede ser variado en términos del porcentaje de la referencia.

### 3.1 Diagrama a bloques del SCBR

El diagrama a bloques del NCS para controlar la velocidad del motor de CD se muestra en la figura 2.

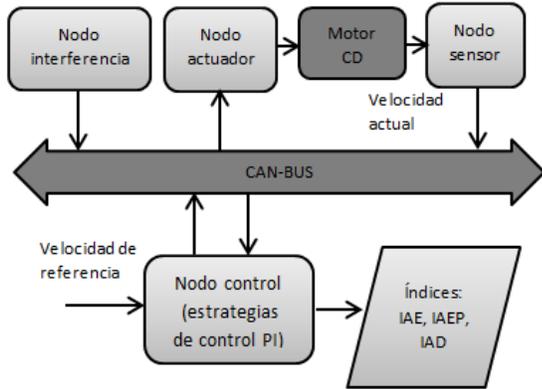


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema SCR.

Este SCBR está formado por 4 nodos principales (ver Fig. 2), el que mide la velocidad actual del motor (nodo sensor), el nodo donde se calcula la nueva señal de control (nodo control) respecto a la señal de referencia y la señal que le envió a éste el nodo sensor a través de la red, el nodo que aplica al sistema (nodo actuador) la acción de control recibida del nodo control a través de la red y un nodo (nodo de interferencia) que se encarga de enviar información al azar para reducir el ancho de banda en la red. El protocolo de red utilizado es el CAN-BUS.

### 3.2 Definición de la función de transferencia del sistema de control

La función de transferencia del sistema de primer orden que describe la velocidad del motor de CD, se describe la ecuación 15. De forma práctica es obtenida la función de transferencia, a un motor CD se le aplica una entrada escalon de 12V que es el voltaje de alimentación del motor, también se considera que un encoder de 90 ranuras se utiliza para medir la frecuencia con la que gira el eje del motor:

$$H(S) = \frac{15 \cdot 3}{S + 8 \cdot 772} \quad (15)$$

La ecuación (16) del sistema de control en lazo cerrado de la velocidad del motor, utilizando un control PI, tiene la característica tener la misma forma que la ecuación característica de la respuesta transitoria de un sistema de segundo orden, por lo tanto se seleccione un error en estado estacionario del 2% y un  $t_s = 1s$ .

$$H_{LC}(S) = \frac{K_P(ST_i + 1)15 \cdot 3}{T_i(S^2 + S(8 \cdot 772 + K_P15 \cdot 3) + \frac{K_P15 \cdot 3}{T_i})} \quad (16)$$

### 3.3 Sistema NCS implementado

La configuración de la red CAN-BUS del sistema implementado (ver Fig. 2) en TRUE TIME en Simulink de MATLAB es el siguiente: velocidad de transferencia de datos 80000 bits/s, 4 nodos como se describió anteriormente. Cada estrategia de control se evalúa durante un tiempo de 20s.

### 3.4 Respuesta de las estrategias de control en un caso nominal

En esta sección son evaluadas las estrategias de control en caso nominal (es decir sin perturbaciones). Son evaluadas las condiciones de evento tanto la del error relativo, como del error absoluto.

*Evaluación de las condiciones de detección de eventos la relativa y absoluta, utilizando la estrategia propuesta por Árzén*

Primero son evaluadas las condiciones de detección de eventos, la condición relativa y la absoluta. En la estrategia propuesta por Árzén se evalúan estas estrategias. En el cuadro 1 se muestra que en la estrategia propuesta por Árzén la condición de detección de eventos absoluta (a) es mejor que la condición de detección de eventos relativa (r); ya que tiene mejores resultados con un  $elim$  del 1% de la referencia, presenta un  $Mp$  del 19.4% lo cual no es muy conveniente, pero los  $Menv$  los más bajos, y los índices de desempeño son regulares.

Cuadro 1. Evaluación de las condiciones de detección de eventos la relativa y absoluta

	ts		Mp		SC(Vmax)		Menv	
	a	r	a	r	a	r	a	r
elim=0.001*r hmax=0.04s	1s	1s	1.80%	2%	9.9V	9.9V	656	552
elim=0.01*r hmax=0.04s	1s	1s	1.60%	2.20%	10V	10V	590	475
elim=0.001*r hmax=1s	1s	Indf	18.80%	19.10%	12V	12V	488	550
elim=0.01*r hmax=1s	1s	Indf	19.40%	2.40%	12V	12V	333	345

	Dtb(días)		IAE		IAEP		IAD	
	a	r	a	r	a	r	a	r
elim=0.001*r hmax=0.04s	16.3	19.4	6.13	6.05	0.12	0.25	1.16	2
elim=0.01*r hmax=0.04s	18.1	22.5	6.13	6.24	0.13	0.36	1.15	0.4
elim=0.001*r hmax=1s	21.8	19.4	4.73	16.51	4.73	16.37	15.82	69.05
elim=0.01*r hmax=1s	32	31	5.51	34.85	5.51	30.13	11.27	168.2

*Comparación de la estrategia de control basada en tiempo vs. estrategias basadas en eventos*

Ya que la condición de detección de eventos absoluta resultó mejor con  $elim=1\%*r$  y  $h_{max} = 1s$ ; estos valores se utilizan para evaluar las estrategias basadas en eventos

(Árzén., (1999), Durand., (2011)) con la estrategia basada en tiempo (Cuadro 2). Por los resultados mostrados en este cuadro se comprueba que la estrategia híbrida muestra mejores resultados,  $t_s$  es 1s igual al valor de diseño,  $M_p$  es 1.5% que es menor al 2% del error en estado estacionario,  $M_{env}$  disminuye un 88.3% en comparación con la estrategia basada en tiempo,  $D_{tb}$  aumenta aproximadamente 8.6 veces su valor con respecto a la estrategia basada en tiempo. Los valores de IAE, IAEP, IAD también son mejores en la estrategia basada en eventos híbrida. La estrategia híbrida presenta un perfecto equilibrio en todas las variables presentadas en el cuadro 2.

Cuadro 2. Comparación de la estrategia de control basada en tiempo vs. estrategias basadas en eventos

Estrategia de control:	$t_s$	$M_p$	$M_{env}$	$D_{tb}$ (días)	IAE	IAEP	IAD
Basado en tiempo	1s	1.76%	2000	5.3	6.25	-	-
Basado en eventos de Árzén	1s	19.40%	333	32	5.51	5.51	11.27
Basado en eventos sin condición de límite de seguridad	1s	21.40%	237	45	5.94	5.9	8.27
Basado en eventos de saturación de la ganancia integral	1s	2.10%	229	46.6	5.79	2.5	9.26
Basado en eventos del factor exponencial olvidado del intervalo de muestreo	1s	1.50%	236	45.2	7.32	1.13	6.59
Basado en eventos híbrida	1s	1.50%	235	45.4	7.32	1.15	6.46

Dado que la estrategia basada en eventos híbrida resultó mejor, es interesante comparar la respuesta dinámica de ésta estrategia (ver Fig. 3), con la respuesta de la estrategia basada en eventos de Árzén y con la respuesta de la estrategia basada en tiempo. También en estas gráficas se muestra que la estrategia híbrida no tiene el sobre impulso máximo ( $M_p$ ) que presenta la estrategia propuesta por Árzén a los 10s en que cambia la señal de referencia, se observa que con la estrategia basada en eventos híbrida durante más instantes de tiempo el ancho de banda de la red permanece vacío, el resultado de cada una de las variables es evaluado en el cuadro 2.

### 3.5 Evaluación gráfica de las estrategias de control PI ante perturbaciones

Esta evaluación se hace para corroborar que tan robusta es la estrategia basada en eventos híbrida ante perturbaciones externas (en 4s y 14s) y perturbaciones en la red (81% del ancho de banda del nodo de interferencias). La estrategia basada en eventos híbrida muestra mejores resultados. Ante perturbaciones en la red: no presenta oscilaciones como lo es la estrategia basada en tiempo que son provocadas gracias a la limitación del ancho de banda de la red por el nodo de interferencias, tampoco tiene el sobre impulso máximo que tiene la estrategia propuesta por Árzén. Aunque  $M_{env}$  no es el más bajo ya que tiene que actualizar la señal de control ante las perturbaciones, pero la ventaja es que si mantiene una dinámica aceptable,

respecto al  $t_s$ ,  $M_p$ , que son más cercanos al diseño del sistema de control.

## 4. CONCLUSIONES

La estrategia híbrida de control PI basado en eventos (Durand., (2011)) en un sistema retroalimentado por red, muestra mejores resultados que la estrategia basada en tiempo y las otras estrategias basadas en eventos propuestas en la literatura, ya que demuestra ser más robusta ( $t_s$  y  $M_p$  se mantienen cerca del valor de diseño; IAE, IAEP y IAD son bajos) ante perturbaciones en la red y perturbaciones externas. La cantidad de veces que se actualiza la señal de control es menor que en las demás estrategias ya que se reduce hasta un 88% la cantidad de mensajes enviados en la red (respecto al caso nominal) y en consecuencia disminuye el consumo de energía. En un futuro se usará esta técnica para intercambiar información en una red CAN-BUS de un automóvil dentro del marco de un proyecto de vehículo terrestre autónomo.

## REFERENCIAS

- Tipsuwan, Y., Chow, M. Y. (2003). *Control methodologies in networked control systems*. Control Eng. Practice, Vol. 11, 2003, pp. 1099-1111.
- Hespanha, J. P., Naghshtabrizi, P., Xu, Y. (2007). *A survey of recent results in networked control systems*. Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, Enero, 2007, pp. 138-162.
- Yang, T. C. (2006). *Networked control system: A brief survey*. IEEE Proc. Control Theory Appl, vol. 153, no. 4, Jul, 2006, pp. 403-412.
- Åström, K. J., Murray, R. M. (2008). *Feedback Systems*, Princeton University Press, 2008, pp. 293-313.
- Árzén, K.E. (1999). *A simple event-based PID controller*. In Preprints of the 14th World Congress of IFAC, Beijing, P.R. China, 1999.
- Dormido, S., Sánchez, J., Kofman, E. (2008). *Muestreo, control y comunicación basado en eventos*. Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI), ISSN 1697-7912, Vol. 5, No. 1, Enero, 2008, pp. 5-26.
- Durand, S., Marchand, N. (2009). *Further Results on Event-Based PID Controller*, Proceedings of the European Control Conference, Budapest Hungary, 23 - 26 Agosto, 2009.
- Durand, S., Guerrero, J. F., Marchand, N. (2011). *Event-Based PID Controllers without Safety Limit Condition Experimental Results*. Reporte interno GIPSA-LAB y FCE-BUAP, Julio, 2011.
- Durand, S. (2011). *Reduction of the energy consumption in embedded electronic devices with low control computational cost*. Tesis doctoral, Universidad de GRENOBLE, 18 de Abril, 2011.
- Granja, A., Javier, F., Esteban, H., Francisco, J. Desarrollo de una interface USB-CAN. Tesis de ingeniería, Universidad de Valladolid, Junio, 2012, pp. 15.
- Ohlin, M., Henriksson, D., Cervin, A. (2007). *TRUETIME1.5-Reference Manual*. Department of Automatic Control, Lund University, Enero, 2007.

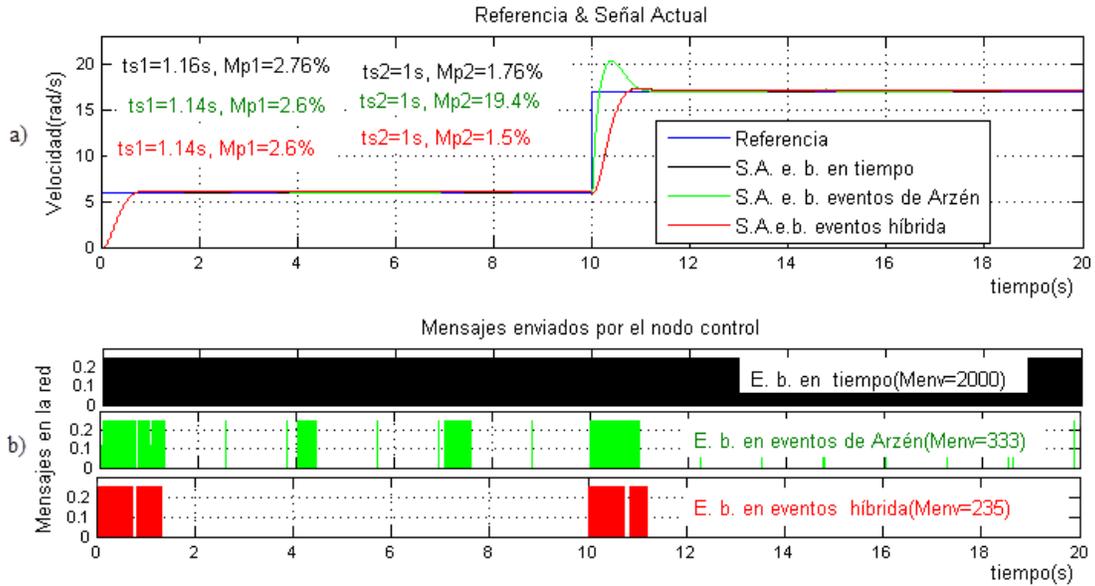


Figura 3. Comparación gráfica de la estrategia basada en eventos híbrida, con la basada en eventos de Arzén y con la basada en tiempo (caso nominal).

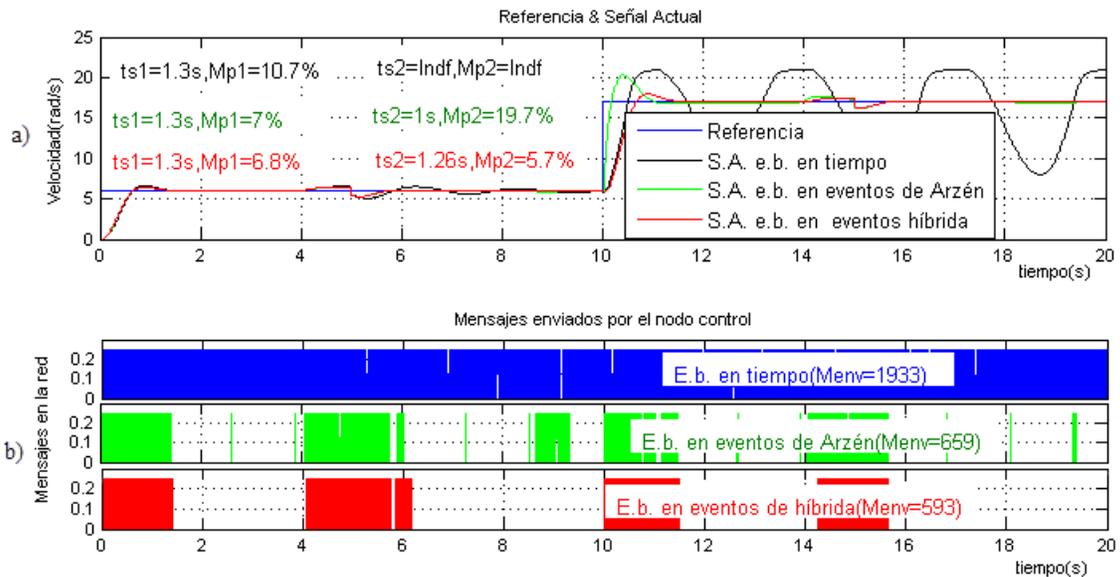


Figura 4. Comparación gráfica de la estrategia basada en eventos híbrida, con la basada en eventos de Arzén y con la basada en tiempo (con perturbaciones externas y en la red).