

Event-triggered Controlled Charger for Lithium Battery Packs

Javier Blanco Rico , and Basil Mohammed Al-Hadithi 

Abstract—Event-triggered Control is a modification for digital based control systems that has gain popularity in recent years. This alteration in control algorithms offers advantages like reductions in computation times or even in the requirements of system’s hardware bay reducing its processing and communications to the minimum required; allowing for less computation and communication time needed to perform control actions and making them relevant for environments with shared communication mediums or hardware handling multiple processes simultaneously. In this work, a comparison is presented between a classic control scheme and its event-triggered counterpart when controlling a Power Source for a simple Lithium Battery Charger. The event-triggered versions of the current programmed control and the voltage Proportional-Integral-Derivative controllers are designed to adhere to the maximum admissible errors of the system (voltage and current output ripple) and results are presented to show how the modifications manage to obtain equivalent results to those of their classic continuous counterparts while minimizing control loop actuation and therefore improve computation and communications performance without hindering system efficiency. This results are especially relevant for such ubiquitous devices in complex systems like electric vehicles or portable consumer electronics, allowing for computation time to be dedicated to other tasks and freeing communication channels for other devices.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/8662>

Index Terms—Battery Chargers, Digital Control, Event-triggered Control, Power Electronics

I. INTRODUCCIÓN

Las estrategias de control basadas en eventos (Event-triggered Control) son un área de estudio en la actualidad [1] por la ventaja que proporcionan al reducir los requisitos de comunicación en un sistema de control [2], permitiendo de este modo ahorrar en recursos; especialmente en la utilización del ancho de banda para las comunicaciones entre el control y la planta, lo que las hacen algoritmos especialmente interesantes para entornos con canales de comunicación compartidos o para reducir los requisitos del hardware.

Estas estrategias de control pueden implementarse como una modificación sobre algoritmos convencionales ya establecidos sin afectar a su estabilidad, ya que se basan en modificar las comunicaciones entre la planta y el control dentro de unos límites establecidos (en la definición de los eventos)

J. B. Rico is with the Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain (e-mail: javier.blancori@gmail.com).

B. M. Al Hadithi is with the Centre for Automation and Robotics UPM-CSIC, Madrid, Spain (e-mail: basil.alhadithi@upm.es).

y sin modificar el propio algoritmo de control original. Se pueden encontrar algunos ejemplos en la literatura, como son probar su implementación en sistemas robustos donde la planta presenta características desconocidas [3], sistemas adaptativos donde el comportamiento de la planta es cambiante [4] u otros muchos ejemplos de sistemas con diferentes condiciones [5]–[8]. De hecho, su naturaleza reduciendo el número de interacciones puede ser una mejora para sistema en la red, pudiendo incluso ser una estrategia para mejorar el funcionamiento frente a ataques de denegación de servicio [9].

En este trabajo se presenta un ejemplo de implementación de un control basado en eventos sobre una fuente de alimentación conmutada diseñada para la carga de paquetes de baterías de litio y para ser controlada por un microcontrolador de bajas prestaciones. Esto no es una implementación novedosa, pues ya existen ejemplos en la literatura [10], pero es un buen ejemplo didáctico de su funcionamiento. Se compara el resultado del control basado en eventos frente a la estrategia de control clásica formada por un control por corriente de pico (Current Programmed Control) para la regulación de la corriente más un regulador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) tradicional para la regulación de la tensión; mostrando que el cambio de estrategia proporciona un desempeño equivalente con una menor demanda de recursos; lo que podría utilizarse para el desarrollo de sistemas más económicos, empleando electrónica con menores prestaciones, o permitir que un único microcontrolador comande múltiples sistemas, por ejemplo para permitir la carga de múltiples baterías a la vez desde un único dispositivo de control.

La distribución del documento es la siguiente: En el apartado II se describe brevemente el funcionamiento del control basado en eventos y la clasificación de algunas de sus variantes. En el apartado III se presenta la fuente de alimentación sobre la que se ha realizado la comparación de los algoritmos propuestos, así como los parámetros de los mismos. En el apartado IV se presentan y analizan los resultados de las pruebas. En el apartado V se hace un último resumen de las conclusiones obtenidas con la comparación de los resultados obtenidos por los algoritmos.

II. CONTROL BASADO EN EVENTOS

El control basado en eventos puede entenderse como una evolución de los controladores discretos, ya que frente a una planta real (continua) buscan minimizar el número de interacciones (cambios en la señal de control) generando de esta forma una actuación discreta en la que solo se actualizan las señales de control en momentos específicos cuando se produce

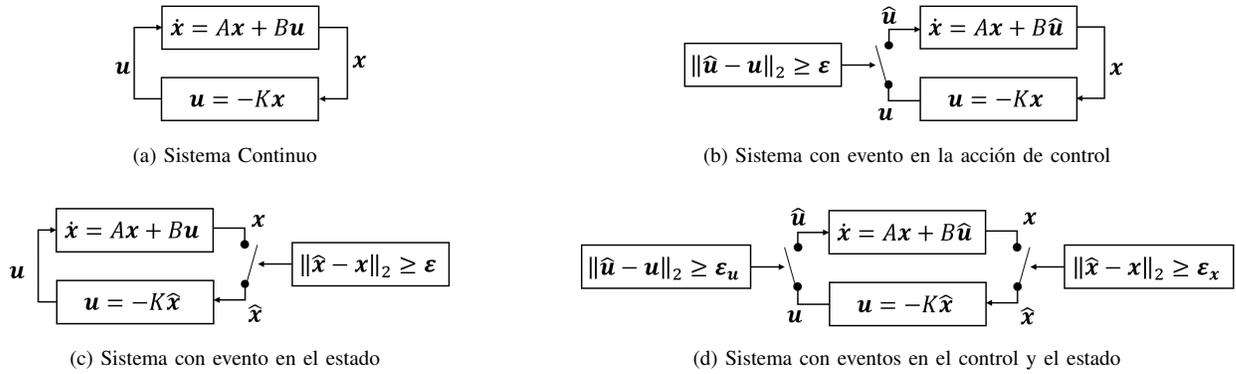


Fig. 1. Variantes de sistemas basados en eventos

un evento y el resto del tiempo el sistema funciona en cadena abierta manteniendo como constante la última señal de control recibida. Este comportamiento es una variación frente a los controles discretos que realizan acciones de control de manera periódica, mientras que los eventos no lo serán necesariamente [11]. Del mismo modo que en si en los sistemas discretos se utiliza una frecuencia de muestreo demasiado lenta (sin cumplir el criterio de Nyquist) vuelve el sistema inestable, si se impone a un sistema eventos que no sean lo bastante restrictivos (que permitan un error o ruido demasiado grandes) pueden llegar a volver al sistema inestable, pues permanecería en cadena abierta más tiempo del que debería.

Una forma de clasificar los sistemas basados en eventos puede ser observando la periodicidad de los eventos. Si estos se evalúan de manera continua hablaremos de un Control Basado en Eventos “puro” (Event-triggered control), si los eventos se evalúan de manera periódica será un Control Basado en Eventos Periódico (Periodic Event-triggered control) [12], [13], pero pueden existir otras implementaciones; por ejemplo Control Basado en Eventos “Autogenerados” (Self-triggered control) [14]–[17]. Para este trabajo, se compara el comportamiento de un sistema evaluando los eventos de forma continua frente a un regulador PID equivalente, esto es equivalente a que un comparador (periférico del microcontrolador) genere una señal de interrupción cuando el error supere el umbral de referencia.

Otra forma de clasificar estos sistemas puede ser según dónde se evalúa la condición del evento. Generalmente dado un sistema como el de la Fig. 1a (en este caso representado en variables de estado donde x representa el vector de estados, u la señal de control, A y B las matrices que modelan el sistema y K la ganancia de la realimentación), el control basado en eventos podrá afectar al lazo de control en la realimentación del estado o en la señal de control del sistema, teniendo efectos ligeramente diferentes en el comportamiento final del sistema realimentado.

En sistemas con el evento evaluando la acción de control, como en la Fig. 1b, se consigue una reducción en las interacciones entre el controlador y planta, pero el control sigue evaluando la señal de control constantemente. Por tanto, se reduce el uso del canal de comunicación pero no el tiempo de

cómputación del controlador.

Para sistemas con el evento evaluando la realimentación del estado (o la salida de la planta, dependiendo del sistema), como en la Fig. 1c, el resultado es una reducción en la intervención del controlador a cuando la señal de error supera cierto umbral. De este modo se reevalúa la señal de control cuando el error deja de ser admisible; dicho de otra forma, se permite cierto error en la salida en lugar de una salida específica objetivo.

Por supuesto esto son simplificaciones, nada impide desarrollar sistemas con múltiples eventos diferentes en un mismo lazo de control [18].

Por último, pueden darse sistemas combinación de los anteriores, donde se evalúe el evento tanto en la realimentación como en la señal de control, Fig. 1d. Esto tiene como resultado que se combinan los beneficios de ambos casos: la señal de control solo se reevaluará cuando el error aumente en exceso, pero esta solo se transmitirá a la planta cuando el cambio en la señal de control sea significativo. De esta forma se reduce el uso de los canales de comunicación tanto en la entrada como la salida del controlador y también se reduce el tiempo de cómputación del propio controlador.

Para este trabajo se ha utilizado un algoritmo de control evaluando los eventos de forma continua en función del error en las salidas del sistema (corriente y tensión), equivalente al caso de la Fig. 1c. En el contexto de una fuente de alimentación tiene sentido evaluar las señales de salida, ya que al final del día es nuestro objetivo mantenerlas dentro de unos valores concretos, pero también sería posible imponer eventos adicionales; por ejemplo, limitando la corriente máxima por el primario del convertidor. Nótese que, aunque los eventos se evalúen de manera continua la señal de control solo se actualizará si el evento se cumple, por lo que la evaluación continua del evento no supone que el sistema deje de ser basado en eventos. Adicionalmente, esta evaluación continua supone una carga computacional mínima (una comparación) que puede ser fácilmente implementada en sistemas periféricos en lugar de en el microprocesador principal.

III. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA Y DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DE CONTROL

Para demostrar la efectividad del control basado en eventos, se ha escogido como planta a controlar una fuente de alimentación para carga de baterías de litio con topología de convertidor directo con fijación activa como el de la Fig. 2. Se ha elegido esta planta por ser representativa de un sistema con múltiples lazos de control (tensión y corriente) así como un ejemplo de aplicación que puede beneficiarse de reducir las interacciones entre el control y la planta; permitiendo el uso de microcontroladores con menores prestaciones y liberando ancho de banda para las comunicaciones del cargador con otros sistemas como ordenadores de abordo en vehículos eléctricos o del sistema que haga uso de la batería. Además de tratarse de una aplicación (fuente de alimentación para la carga de baterías) cada vez más común en nuestro día a día, gracias a la proliferación de los sistemas electrónicos de consumo y de los vehículos eléctricos.

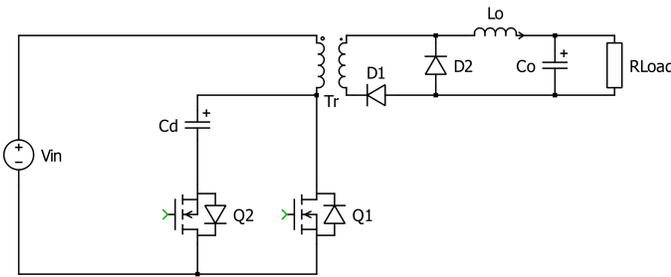


Fig. 2. Convertidor Directo con Fijación Activa

En cuanto a la topología, al tratarse de un cargador de baterías pensado para conectarse a la red eléctrica era necesario utilizar una topología con aislamiento galvánico. Las más comunes son: regulador de retroceso (flyback), regulador directo o alguna variante del convertidor de puente (half bridge, full bridge...). Para la potencia que se utilizará en este ejemplo (86 W) podría argumentarse utilizar tanto un regulador de retroceso como uno directo. Se optó por el regulador directo al simplificar la construcción del transformador (ya que los reguladores de retroceso necesitan entrehierro) y dentro de esta topología se optó por la variante de fijación activa por el mismo motivo (transformador de solo 2 bobinados) y eligiendo la variante con el condensador de descarga referenciado a tierra facilita también las señales de control (a costa de utilizar un MOSFET de conmutación auxiliar de canal P).

El proceso de carga de las baterías depende de la química en la que se basen y una mala implementación puede afectar considerablemente a su vida útil [19]. Para el caso de baterías de litio se sigue un proceso en dos fases: primero carga a corriente constante y después carga a tensión constante [20] (Dependiendo del estado de carga inicial de la batería se darán ambos estados o se empezará directamente en el estado de tensión constante y adicionalmente en algunos sistemas más complejos se pueden incluir fases adicionales al principio o al final para estresar menos la batería y mejorar aún más su vida útil; como un proceso de carga inicial más lento cuando la batería está más descargada de lo normal). Esto conlleva

el diseño de un sistema de control capaz de regular tanto la tensión como la corriente del sistema; para este trabajo se ha elegido una topología en cascada como la de la Fig. 3 (el significado de cada bloque se explica más adelante junto con las ecuaciones que representan), con dos lazos de control: uno interno para la corriente y otro externo para la tensión. El sistema buscará cargar la batería hasta su tensión máxima y durante el proceso la corriente comenzará saturando la máxima permitida para la batería (limitada por el bucle de control interno de control por corriente de pico) y cuando se alcance bajará progresivamente hasta que la carga esté completa, siguiendo unas curvas de tensión y corriente como las de la Fig. 4. (Por supuesto, otras topologías serían posibles; por ejemplo, una que controle la tensión y la corriente en paralelo, pero se ha elegido la topología en cascada porque mantiene patente que existe una relación física entre la tensión y la corriente del sistema, en vez de tratarlas como entidades independientes).

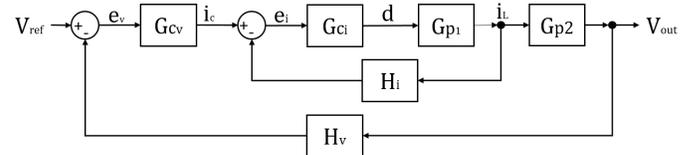


Fig. 3. Sistema realimentado continuo

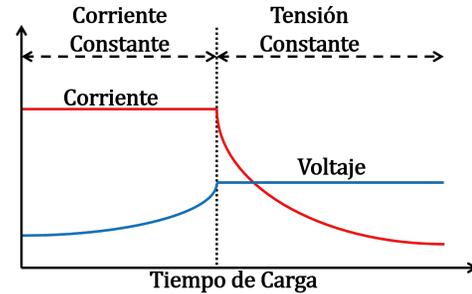


Fig. 4. Curvas de carga de una batería

El control que se tomará como referencia y que se modificará para hacerlo basado en eventos es un control por corriente de pico para la corriente [21] y un PID real (Compensador Tipo III) para la tensión [21]. Se trata de dos estrategias de control muy extendidas en la industria. El control por corriente de pico (u otras variantes como el control por corriente media) son ampliamente utilizados para realizar control y limitar la corriente en circuitos de potencia, mientras que el PID es el regulador más extendido y estudiado de la ingeniería de control y sigue siendo el estándar de referencia para casi cualquier función. Utilizando la nomenclatura de la Fig. 3 y el Cuadro I, los componentes del sistema son los siguientes:

- Voltaje objetivo del cargador: V_{ref}
- Tensión de salida del cargador: $V_{out} = i_L G_{p2}$
- Error de tensión: $e_v = V_{ref} - H_v V_{out}$

- Realimentación de tensión: $H_v = 1$
- Control de tensión (Regulador Tipo III):

$$G_{cv} = G_{cm} \frac{\left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} = 1,22 \frac{\left(1 + \frac{2\pi 2500}{s}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 8608,19}\right)}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 72605,27}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 4822,877}\right)} \quad (1)$$

- Corriente objetivo del cargador: $i_c = e_v G_{cv}$
- Realimentación de corriente: $H_i = 1$
- Error de corriente: $e_i = i_c - H_i i_L$
- Control de corriente: $G_{ci} = \frac{1}{M_o T_s} = 1,491$
- Ciclo de trabajo del convertidor: $d = e_i G_{ci}$
- Modelo de la planta 1 (relación entre el ciclo de trabajo d y la corriente por la bobina de salida i_L):

$$G_{p1} = \frac{sC_o(R_{C_o} + R_{Load}) + 1}{s^2A + sB + C} G = 1,652 \cdot 10^5 \frac{s + 6,95 \cdot 10^3}{(s + 3,428 \cdot 10^4)(s + 0,752 \cdot 10^4)} \quad (2)$$

Donde:

$$G = V_{in} \frac{N_s}{N_p} + V_{D2} - V_{D1} + I_o \left[R_{D2} - R_{D1} - d \left(R_{Q1} + R_p \frac{N_s^2}{N_p^2} + R_s \right) \right]$$

$$A = C_o(R_{C_o} + R_{Load}) [L_o + 2dL_s]$$

$$B = L_o + 2dL_s + C_o((R_{C_o} + R_{Load})(R_{L_o} + R_{D2}(1-d) + (R_{D1} + R_s + \frac{V_{in} N_s}{I_o d N_p} - (R_{Q1} + R_p) \frac{N_s^2}{N_p^2})d) + R_{C_o})$$

$$C = R_{L_o} + R_{D2}(1-d) + \left(R_{D1} + R_s + \frac{V_{in} N_s}{I_o d N_p} - (R_{Q1} + R_p) \frac{N_s^2}{N_p^2} \right) d + 1$$

- Corriente por la bobina de salida: $i_L = dG_{p1}$
- Modelo de la planta 2 (relación entre la corriente por la bobina de salida i_L y la tensión de salida):

$$G_{p2} = R_{Load} \frac{sC_o R_{C_o} + 1}{sC_o(R_{C_o} + R_{Load}) + 1} = 0,771 \frac{s + 3,0310^4}{s + 6,9510^3} \quad (3)$$

Los datos utilizados para el diseño del sistema pueden verse en el Cuadro I; estos provienen de componentes reales “of the self” (salvo el transformador, que se construyó y después se caracterizó para obtener sus características). Estos corresponden para un cargador para paquetes de baterías de litio modelo 18650 (células individuales de tensión nominal 3.7 V y capacidad 2500 mAh) en configuración 4S2P (4 células en

TABLA I
COMPONENTES CARGADOR DE BATERÍAS

Componente	Valor
Condensador de enclavamiento (C_{cl})	75 μF
Resistencia del condensador de enclavamiento ($R_{C_{cl}}$)	3,1 $m\Omega$
Resistencia de conducción del MOSFET primario (R_{Q1})	320 $m\Omega$
Resistencia de conducción del MOSFET auxiliar (R_{Q2})	720 $m\Omega$
Caída de tensión de los diodos (V_{D1}, V_{D2})	1,25 V
Resistencia de conducción de los diodos (R_{D1}, R_{D2})	100 $m\Omega$
Inductancia de la bobina (L_O)	345 μH
Resistencia de conducción de la bobina (R_{L_O})	200 $m\Omega$
Condensador de salida (C_O)	33 μF
Resistencia del condensador de salida (R_{C_O})	1 Ω
Resistencia parásita del primario del transformador (R_p)	2,2 Ω
Resistencia parásita del secundario del transformador (R_s)	0,128 Ω
Inductancia parásita del primario del transformador (L_p)	404,8 nH
Inductancia parásita del secundario del transformador (L_s)	24,9 nH
Inductancia de magnetización del transformador (L_m)	64,1 μH
Relación del transformador ($N = N_p/N_s$)	4
Tensión de entrada (V_{in})	230 V
Tensión de salida objetivo ($V_o = V_{ref}$)	16,8 V

serie y 2 en paralelo) con una tensión máxima de 16.8 V (12 V cuando está descargada), corriente de carga de $I_o = 5 A$ y el cargador se ha diseñado con una frecuencia de conmutación de 250 kHz (relativamente baja para un circuito de potencia para que pueda ser controlada por un microcontrolador de bajas prestaciones).

Para el control basado en eventos, estos se han definido imponiendo límites a los errores de corriente y tensión a la salida, quedando un sistema como el de la Fig. 5. Se ha impuesto que el error máximo admisible sea el del rizado permitido para el proceso de carga de la batería: $\pm 0,1 A$ y $\pm 0,1 V$. De este modo si la señal de salida se encuentra dentro de los márgenes de diseño del sistema el control no intervendrá, manteniendo la última consigna que se haya calculado para el sistema (ciclo de trabajo del conmutador) y funcionando en lazo abierto.

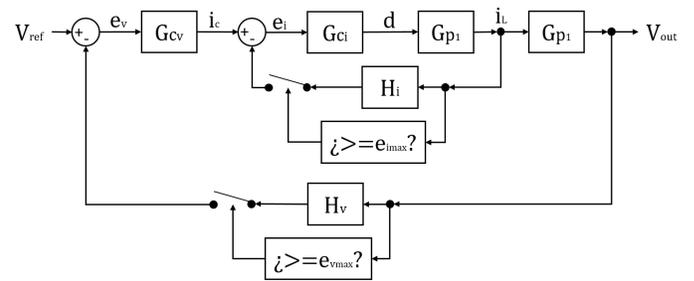


Fig. 5. Sistema realimentado basado en eventos

IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El sistema se ha simulado mediante la herramienta de simulación *PLECS*, por tratarse de una herramienta especialmente pensada para la validación de circuitos de potencia, como es el caso de la fuente de alimentación. La simulación utiliza un modelo simplificado del comportamiento de una batería (como se ha explicado antes, principio de la carga a corriente constante y después termina a tensión constante) implementado mediante resistencias variables (El comportamiento se programa como

la fracción de 2 funciones: el numerador modela la tensión y el denominador la corriente) y operando en un tiempo muy reducido (apenas 75 milisegundos) para facilitar la simulación. En una batería real el proceso sería sustancialmente más lento, pero los resultados deberían ser equiparables. Resultados equivalentes pueden obtenerse con otros programas de simulación, como *Matlab* o *SIMatrix/SIMPLIS*.

La Fig. 6 muestra el comportamiento normal del sistema utilizando los algoritmos de control clásicos, sin eventos. En rojo se muestra la tensión en voltios y en verde la corriente en Amperios. Se puede apreciar el comportamiento esperado para el proceso de carga: con la tensión creciendo mientras la corriente se mantiene constante hasta que la tensión llega al valor máximo y la corriente desciende progresivamente hasta anularse, momento en el cual la batería estaría completamente cargada. Con este sistema y algoritmo de control se obtiene un rendimiento del 79 % (84 W de salida y 22 W de pérdidas: 9W en los diodos del secundario, 7 W en el transformador, 5 W en el filtro de salida y 1 W en los MOSFETS).

La Fig.7 muestra el comportamiento del sistema con los algoritmos de control modificados para que sean basados en eventos. Vemos que se mantiene el comportamiento correctamente. La única diferencia apreciable en las formas de onda es al final, donde se ha simulado más tiempo para que se aprecie el efecto de los eventos en el régimen permanente. En el control continuo las mínimas variaciones en la salida estarían siendo corregidas constantemente por el control; pero aquí solo interviene cuando se supera el error, lo cual queda patente en la forma del rizado. El controlador no afecta al rendimiento del sistema, que sigue siendo del 79 % (mismas pérdidas que en el caso anterior).

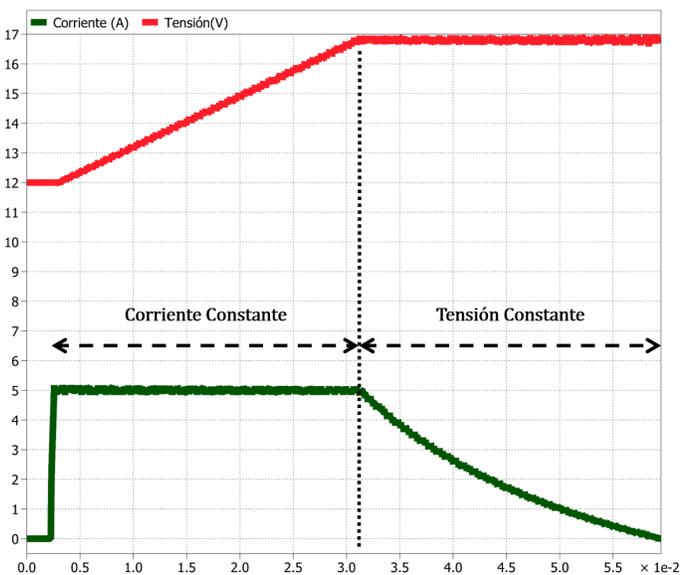


Fig. 6. Respuesta del sistema. Control continuo

Con estos resultados queda patente que la modificación del comportamiento del sistema para hacerlo basado en eventos no afecta a la estabilidad del mismo y solo tiene de impacto en el comportamiento la introducción de un rizado (ruido) aceptable en la salida y que además solo es apreciable cuando se alcanza

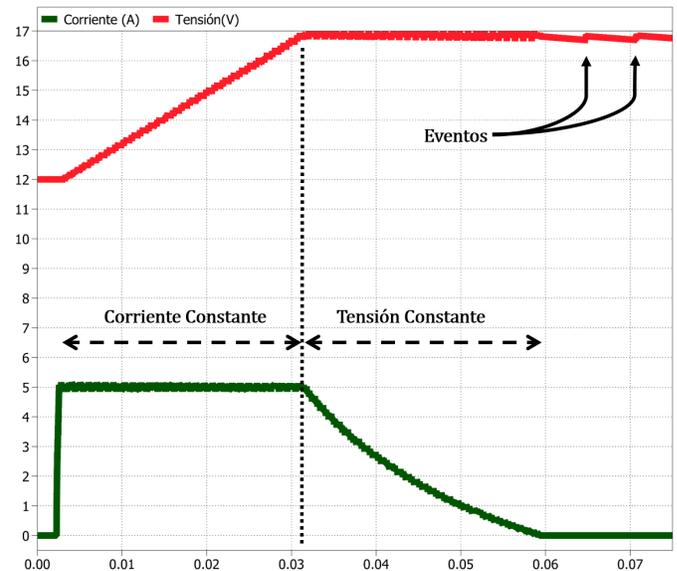


Fig. 7. Respuesta del sistema. Control basado en eventos

el régimen permanente.

El otro efecto del control basado en eventos queda patente si nos fijamos en el porcentaje de tiempo que están produciéndose los eventos o, dicho de otra forma, cuando los lazos de control están cerrados. Esto puede verse en la Fig.8, donde se muestra el porcentaje de tiempo que el sistema ha trabajado en lazo cerrado en cada momento de la simulación, calculado como una media móvil. Aquí se aprecia como la corriente es controlada un porcentaje relativamente bajo del tiempo, solo actuando como un control continuo en el arranque del sistema, con el resto del tiempo el control actuando menos de un 20 % del tiempo (hay que destacar que al tratarse de un control por corriente de pico nunca se reducirá su actuación a un 0 %, ya que este algoritmo de control interviene en cada ciclo de muestreo). En el caso de la tensión una vez se alcanza el voltaje deseado las acciones de control se reducen sustancialmente con valores <90 % y llega a ser del 0 % cuando la corriente se anula y por tanto la salida queda estable a tensión y corrientes constantes, salvo por las correcciones periódicas anteriormente mencionadas.

Las consecuencias de esta reducción en un sistema de control digital es que se libera el microcontrolador o microprocesador para llevar a cabo otras tareas y en caso de que el canal por el que se transmiten los datos (medidas del sensor y cambios en la señal de control) sea compartido se libera ancho de banda para que pueda ser utilizado por otros sistemas de la red.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se han mostrado los beneficios de los sistemas basados en eventos utilizando para ello un cargador de paquetes de baterías de litio sobre el que se ha implementado un sistema de control continuo estándar (control por corriente de pico para el control de corriente y regulador PID para la tensión) y el mismo sistema modificado para implementar

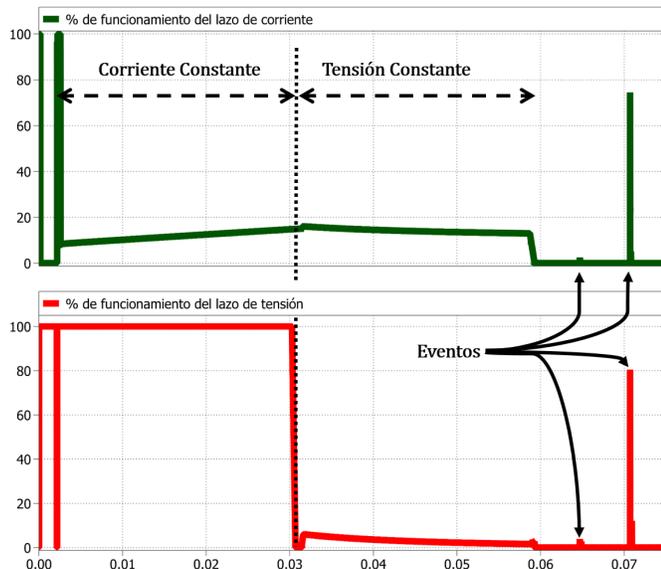


Fig. 8. Porcentaje de utilización de los lazos de control del control basdo en eventos

eventos y que solo actualicen la señal de control cuando el error a la salida del sistema supere el límite establecido.

Se ha verificado que la respuesta del sistema no se ve afectada por el cambio en el control más allá de los márgenes establecidos en los eventos y en el proceso se reduce sustancialmente el tiempo que el control necesita actual: en un 80 % de forma general para la corriente y más de un 90 % para la tensión cuando se alcanza la tensión nominal de funcionamiento. De esta forma queda patente como la modificación de algoritmos de control digital pueden beneficiarse de su implementación basada en eventos liberando de este modo tiempo de computación y ancho de banda para canales de comunicación compartidos.

REFERENCIAS

- [1] W. Heemels, K. Johansson, and P. Tabuada, "An introduction to event-triggered and self-triggered control," in *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2012. doi: 10.1109/CDC.2012.6425820 pp. 3270–3285.
- [2] K.-E. Årzn, "A simple event-based pid controller," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 32, no. 2, pp. 8687–8692, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)57482-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)57482-0) 14th IFAC World Congress 1999, Beijing, Chia, 5-9 July. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017574820>
- [3] D. Wang, C. Mu, H. He, and D. Liu, "Event-driven adaptive robust control of nonlinear systems with uncertainties through ndp strategy," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 7, pp. 1358–1370, 2017. doi: 10.1109/TSMC.2016.2592682
- [4] H. Schlüter, F. Solowjow, and S. Trimpe, "Event-triggered learning for linear quadratic control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66, no. 10, pp. 4485–4498, 2021. doi: 10.1109/TAC.2020.3030877
- [5] W. Zhuang, Z. Liu, H. Su, and Q. Zhang, "Event-triggered output feedback control for a class of discrete-time nonlinear systems," in *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, 2019. doi: 10.23919/ChiCC.2019.8866152 pp. 739–744.
- [6] J. Huang, W. Wang, C. Wen, and G. Li, "Adaptive event-triggered control of nonlinear systems with controller and parameter estimator triggering," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 1, pp. 318–324, 2020. doi: 10.1109/TAC.2019.2912517

- [7] Z. Zhang, C. Wen, L. Xing, and Y. Song, "Adaptive event-triggered control of uncertain nonlinear systems using intermittent output only," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 8, pp. 4218–4225, 2022. doi: 10.1109/TAC.2021.3115435
- [8] M. Yuan, "Dynamic event-triggered output feedback control for a class of high-order feedforward nonlinear time-delay systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 11, pp. 3436–3440, 2021. doi: 10.1109/TCSII.2021.3070873
- [9] Y. Lin, F. Li, and Q. Ling, "Stabilization of event-triggered quantized feedback control systems under denial-of-service attacks," in *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, 2020. doi: 10.23919/CCC50068.2020.9189147 pp. 4365–4370.
- [10] B. Wang, J. Huang, C. Wen, J. Rodriguez, C. Garcia, H. B. Gooi, and Z. Zeng, "Event-triggered model predictive control for power converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 715–720, 2021. doi: 10.1109/TIE.2019.2962489
- [11] A. K. Behera, B. Bandyopadhyay, N. Xavier, and S. Kamal, "Event-triggered sliding mode control for robust stabilization of linear multi-variable systems," *Recent advances in sliding modes: From control to intelligent mechatronics*, pp. 155–175, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-18290-2_8
- [12] W. P. M. H. Heemels, M. C. F. Donkers, and A. R. Teel, "Periodic event-triggered control for linear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 4, pp. 847–861, 2013. doi: 10.1109/TAC.2012.2220443
- [13] W. Wang, R. Postoyan, D. Nešić, and W. P. M. H. Heemels, "Periodic event-triggered control for nonlinear networked control systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 2, pp. 620–635, 2020. doi: 10.1109/TAC.2019.2914255
- [14] X. Wang and M. D. Lemmon, "Self-triggered feedback control systems with finite-gain \mathcal{L}_2 stability," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 3, pp. 452–467, 2009. doi: 10.1109/TAC.2009.2012973
- [15] A. Anta and P. Tabuada, "Exploiting isochrony in self-triggered control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 4, pp. 950–962, 2012. doi: 10.1109/TAC.2011.2169631
- [16] E. Pecker Marcosig, F. Felicioni, and A. Zanini, "Self-triggering based on lyapunov with adaptive control law for wncs," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 7, pp. 1242–1249, 2014. doi: 10.1109/TLA.2014.6948859
- [17] A. Girard, "Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 60, no. 7, pp. 1992–1997, 2015. doi: 10.1109/TAC.2014.2366855
- [18] G. Chen and J. Dong, "Data-driven control for discrete-time nonlinear systems with dual-channel dynamic event-triggered mechanism," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 70, no. 12, pp. 4439–4443, 2023. doi: 10.1109/TCSII.2023.3285769
- [19] D. Ciarlini Chagas Freitas, J. Lopes de Moraes, E. Cavalcanti Neto, and J. R. B. Sousa, "Battery charger lead-acid using ic bq2031," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 32–37, 2016. doi: 10.1109/TLA.2016.7430058
- [20] F. C. Arsandi, M. Z. Efendi, and F. D. Murdianto, "Constant current constant voltage for precise lithium-ion battery charging," in *2022 International Electronics Symposium (IES)*, 2022. doi: 10.1109/IES5876.2022.9888703 pp. 48–53.
- [21] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2007. doi: <https://doi.org/10.1007/b100747>



Javier Blanco Rico is B. Sc. in Industrial Electronics and Automation Engineering and M. Sc. in Industrial Electronics from the Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Spain) in 2021. He is now carrying out PhD studies in the field of robotics and automation at the Universidad Politécnica de Madrid.



Basil Mohammed Al-Hadithi received the title of B. Sc. in control and system engineering in 1983 and the M. Sc. in control and instrumentation engineering in 1988. He received a Ph.D. in process control and artificial intelligence in 2002 from Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Spain) with a thesis on analysis, design and stability of fuzzy slide-mode control systems. He is a full professor at UPM. His teaching activity covers control engineering and analogue electronics, being an author and co-author of seven textbooks and having supervised and co-supervised several B. Sc. final year projects and M. Sc. theses and 6 Ph.D. theses. He is a researcher at the Centre for Automation and Robotics UPM-CSIC. His interest is mainly focused on fuzzy control and slide mode control. He has several publications (JCR), book chapters and conference papers. Moreover, he has participated in several research projects and industrial contracts with companies. He is a board member and reviewer of several international scientific societies and International journals in modelling and designing control systems.