

Jornadas de Automática

Control secundario de frecuencia en redes eléctricas mediante mediciones por cruce de umbrales

Isabel Roselló-González*, Julio-Ariel Romero-Pérez, Oscar Miguel-Escrig, Ricardo Vidal-Albalade

*Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño
Universitat Jaume I*

Castelló de la Plana, España

e-mail: {irosello,romeroj,omiguel,rvidal}@uji.es

To cite this article: Roselló-González, I, Romero-Pérez, J-A, Miguel-Escrig, O, Vidal-Albalade, R. 2026.
Secondary frequency control in electrical grids using threshold-crossing measurements, Jornadas de Automática, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13868>

Resumen

El control de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica se realiza mediante la transmisión periódica de datos. Este intercambio de mediciones representa un desafío para la escalabilidad. El control basado en eventos ha surgido como una alternativa a los paradigmas convencionales de control basado en el tiempo (control periódico), permitiendo una reducción en la comunicación de datos. Este artículo presenta una introducción de las técnicas de control basado en eventos para coordinar el control de frecuencia en la regulación secundaria de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, a partir de datos reales de variación de generación y consumo en la red eléctrica. Su objetivo es demostrar que la implementación de dichas estrategias de control permite la regulación de la frecuencia dentro de los límites establecidos de forma similar a la medición periódica, a la vez que se reducen los requisitos de tráfico de datos, dando como resultado comunicaciones más eficientes y seguras.

Palabras clave: Control descentralizado y distribuido, Estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, Control basado en eventos, Diseño de sistemas de control, Operación y control óptimo de sistemas eléctricos de potencia

Secondary frequency control in electrical grids using threshold-crossing measurements

Abstract

Current Electric Power Transmission and Distribution Systems and their communication networks are coordinated by the transmission of periodic data. This continuous exchange of measurements presents a challenge for two important Electric Power Transmission and Distribution Systems characteristics, such as scalability. At the same time, the Event-Based Control has emerged as an efficient alternative to conventional time-triggered control paradigms, enabling a reduction in data communication. This paper presents an introduction of event-based control techniques to coordinate frequency control in the secondary regulation of Electric Power Transmission and Distribution Systems, based on real demand and generation data of the power grid. It aims to show that implementing these control mechanisms ensures frequency regulation within established limits and reduces data traffic requirements, thereby delivering more efficient and secure communications.

Keywords: Decentralized and distributed control, Power systems stability, Event-based control, Control system design, Optimal operation and control of power systems

*Autor para correspondencia: irosello@uji.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

Los Sistemas de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (STDEE) cubren grandes áreas geográficas y requieren la operación coordinada de un número considerable de elementos. Dicha coordinación se realiza mediante sistemas de control distribuidos que requieren un intercambio constante de información de valores de variables medidas en distintos puntos del sistema. Dicho intercambio de datos se realiza a través de redes digitales, las cuales se caracterizan por su heterogeneidad (Etherden et al., 2016), y una buena parte de ellos se utiliza para realizar el control en tiempo real de parámetros de las líneas de transmisión y distribución como la frecuencia, la tensión o los flujos de potencia.

Uno de los principales algoritmos de control en tiempo real que requiere el envío de datos medidos en diferentes puntos del sistema eléctrico es la regulación de frecuencia. Dentro de la normativa que regula el funcionamiento del mercado eléctrico español se distinguen varios tipos de regulación de frecuencia, entre ellos la regulación primaria y la secundaria (CNMC, 2024a). La regulación primaria es un servicio obligatorio en España que tiene por objetivo estabilizar la frecuencia tras una perturbación (MINER, 1998). Esta estabilización se lleva a cabo mediante variadores de velocidad en los generadores en cada una de las centrales de generación. Por otro lado, la regulación secundaria es un servicio de carácter potestativo y remunerado cuyo objetivo es devolver el valor de la frecuencia al programado tras un incidente (CNMC, 2024b). Este control de la frecuencia requiere una comunicación de datos entre los puntos de medida y el Operador del Sistema (OS) que se encarga del cálculo del Error de Control de Área (ACE), medida fundamental usada para regular el desequilibrio entre la generación y la demanda de un sistema eléctrico (CNMC, 2024b). Actualmente, estos algoritmos de regulación se basan en el uso de mediciones periódicas, imponiendo un patrón periódico de envío de datos mediante las redes de comunicación.

El incremento del número de recursos energéticos distribuidos (DER) en los STDEE, debido a la alta penetración de las fuentes de energía renovables (RES) deriva en un aumento de tráfico en la red de comunicaciones, limitando el ancho de banda y generando latencias que afectan decisiones críticas y dificultan la gestión en tiempo real. Además, en relación con la ciberseguridad de las comunicaciones, el envío de datos a una frecuencia constante podría ser explotado por intrusos para interrumpir las comunicaciones o manipular datos críticos, (Sreejith and Swarup, 2024).

Con objeto de mitigar estos problemas, se plantea como alternativa el envío de datos basado en eventos. El envío por eventos permite reducir de forma significativa el volumen de datos a transmitir y, por tanto, el uso de las redes de comunicación, reduciendo la congestión y los problemas asociados a ella, como son la latencia y la pérdida de datos, los cuales pueden degradar de forma significativa el desempeño de los sistemas de control de los STDEE, si no se cumplen determinados requerimientos en las comunicaciones, (Zhong et al., 2020). Al mismo tiempo, el envío por eventos permite una desconexión de los dispositivos de medición de la red reduce de forma significativa el riesgo de ataques informáticos dirigidos a manipular los datos enviados por los sensores, (Griffioen et al.,

2024).

A pesar de las ventajas antes expuestas, el uso de técnicas basadas en eventos en STDEE ha sido abordado solo en algunas aplicaciones relacionadas con la estimación de impedancia de red, en los llamados métodos casi-pasivos. En ellos se monitoriza la red y solo cuando detecta algún cambio que indique una posible variación de la impedancia se activa el algoritmo de estimación, (Cobreces et al., 2009), (García et al., 2018), (Mohammed et al., 2021). De esta forma se consigue un compromiso entre la exactitud que brindan los métodos activos que requieren inyectar una señal de excitación en la red, y la baja perturbación de la red que caracteriza a los métodos pasivos, los cuales obtienen estimaciones menos precisas a partir de variaciones propias del funcionamiento normal de la red. Actualmente, no existen estudios rigurosos de la posible aplicación del CBE en STDEE.

Este trabajo presenta un estudio del uso de CBE para el control de frecuencia en la regulación secundaria de la red eléctrica. Para ello, se presenta un caso de estudio en el que se toman datos publicados por el OS en su web ESIOS (REE, 2026b). Estos datos incluyen dos semanas completas, una de ellas en época de invierno y otra en época de verano. Estos datos, que tienen en cuenta cinco días laborales y dos festivos para dos épocas del año distintas, buscan presentar un conjunto heterogéneo de escenarios en el consumo y la demanda de la red eléctrica de forma que se obtengan resultados para unas condiciones realista. El objetivo principal es demostrar la viabilidad del uso del control por cruce de umbrales aplicado a STDEE mediante datos reales proporcionados por el Operador del Sistema, de forma que se pueda analizar si esta estrategia de control mantiene la desviación de la frecuencia dentro de los límites permitidos al mismo tiempo que se reduce de forma significativa, del volumen de datos a transmitir, la congestión en la red de comunicación y los problemas asociados a ella.

2. Control por cruce de umbrales aplicado a la red de comunicaciones

En las últimas décadas, el control basado en eventos (CBE) de sistemas continuos ha sido objeto de numerosas investigaciones, tanto en lo que se refiere al desarrollo de métodos de análisis como de diseño de controladores, (Aranda-Escolástico et al., 2020). En este tipo de controladores, el algoritmo de control se ejecuta solo tras la ocurrencia de eventos asíncronos que indican cambios significativos en el estado del sistema; un ejemplo típico es el cruce de niveles por parte de la señal de error (diferencia entre la referencia o set-point y la salida controlada).

El CBE tiene dos objetivos fundamentales: 1) reducir la cantidad de información necesaria para realizar el control en bucle cerrado; 2) disminuir el coste computacional medio que requieren los algoritmos de control. Estas características han hecho que los algoritmos de CBE se apliquen principalmente en los sistemas de control distribuidos para reducir el tráfico de información a través de redes de comunicaciones industriales, por ejemplo, entre los nodos sensores, controladores y actuadores. Una de las estrategias para la generación de eventos que ha recibido mayor atención consiste en transmitir el valor

de la señal solo cuando esta atraviesa ciertos niveles o umbrales de magnitud δ . Esta estrategia, conocida como envío por cruce de niveles (SOD por sus siglas en inglés: Send On Delta) ha demostrado su eficacia en términos de control y reducción de comunicaciones, como se ha documentado ampliamente en (Dormido et al., 2008), (Ploennigs et al., 2010).

Una variante derivada de la estrategia SOD aplicada al control PI fue posteriormente propuesta en (Beschi et al., 2012). En esta variante, se realiza una cuantificación de la señal muestreada en cantidades que son múltiplos del umbral δ , asegurando así una relación simétrica entre la entrada y la salida del generador de eventos con respecto al origen. Esta estrategia se conoce como envío por cruce de niveles simétricos (SSOD por sus siglas en inglés: Symmetric Send On Delta). Entre algunos de los primeros resultados más significativos en el estudio de controladores PI basados en SSOD podemos encontrar trabajos como (Beschi et al., 2012) o (Chacón et al., 2013). En (Beschi and Visioli, 2013), se ha investigado el ajuste de controladores PI bajo una estrategia de muestreo SSOD para el control de sistemas de primer orden con retardo, limitando los resultados obtenidos a este tipo de modelos.

Dada la prevalencia del algoritmo PID en las aplicaciones industriales, la influencia del esquema de muestreo SSOD en su estabilidad y rendimiento ha sido ampliamente caracterizada (Chacón et al., 2013; Romero et al., 2014; Beschi and Visioli, 2013). Diversos trabajos han estudiado la robustez de estos lazos de control, centrándose particularmente en la prevención de los ciclos límite inherentes a la realimentación cuantificada (Miguel-Escrig and Romero-Pérez, 2020; Miguel-Escrig and Romero-Pérez, 2024). Estos estudios han culminado en el desarrollo de reglas prácticas de sintonización y metodologías de diseño que aseguran la ausencia de oscilaciones por ciclos límites y, al mismo tiempo, optimizan la generación de eventos (Sanchis et al., 2024; Miguel-Escrig and Romero-Pérez, 2021).

3. Caso de estudio

En esta sección se presenta un caso de estudio sobre el uso de mediciones basadas en el muestreo SSOD para transmitir las variaciones de frecuencia a través de la red de comunicaciones de los sistemas eléctricos, necesarias para llevar a cabo la regulación secundaria. Para este análisis, se ha tenido en cuenta la normativa española vigente para la regulación de la frecuencia del sistema eléctrico.

En la Figura 1 se muestra el esquema del caso de estudio, así como las funciones de transferencia utilizadas para modelar la dinámica de los sistemas de generación.

El sistema está compuesto por dos áreas de control, donde cada una de las áreas cuenta con dos centrales de generación; una de ellas está constituida por una turbina hidráulica con su correspondiente generador y compensación de estado transitorio, mientras que la otra es un sistema de turbina de vapor con recalentamiento y generador. En cada área de control, ambas centrales participan en la regulación primaria de frecuencia y su participación en la regulación secundaria está determinada por un factor de participación α_{ij} , donde i indica el área de control y j el generador que participa en la regulación. Cada área cuenta con un controlador secundario de frecuencia que se ejecuta de forma continua, cuya entrada

es el ACE y proporciona las referencias de potencia a los distintos generadores que participan en la regulación secundaria. Una descripción más detallada de los elementos del sistema se puede ver en Kundur (1994).

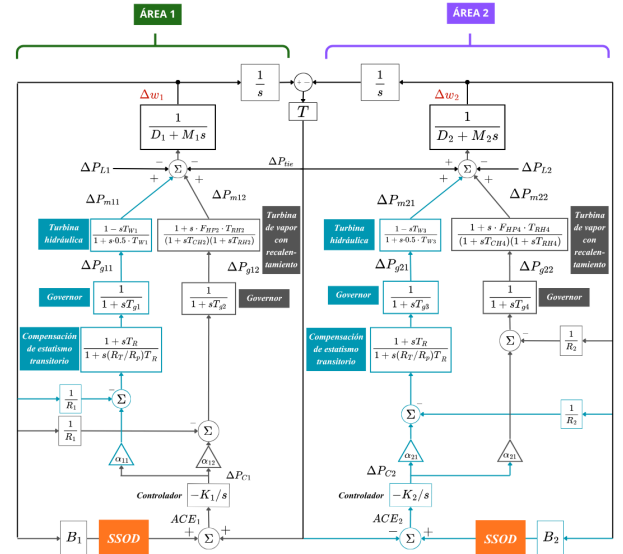


Figura 1: Esquema del sistema incluyendo las funciones de transferencia que modelan la dinámica del sistema

En este contexto, la medición mediante SSOD se implementa en los puntos del sistema donde se miden las desviaciones de frecuencia Δw . De este modo, las desviaciones medidas se transmitirán al operador del sistema (OS) para el cálculo del ACE solo cuando Δw cruce los umbrales $n\delta_f$; $n \in \mathbb{Z}$, donde δ_f , se ha establecido de acuerdo con la regulación que establece un umbral de insensibilidad máximo de 10 mHz CNMC (2024a). Por tanto, el valor de δ_f se ha fijado en $\delta_f = 10\text{mHz}$.

3.1. Parámetros del sistema

Los parámetros usados en las simulaciones se muestran en las Tabla 1 y Tabla 2. Los parámetros K_i de los controladores secundarios se han elegido dentro del rango de valores $[\frac{1}{50}, \frac{1}{200}]$ permitidos por normativa, ENTSO-E (2019). Para llevar a cabo la simulación se ha tenido en cuenta la potencia de ambas áreas de control (S_1 y S_2) para obtener la potencia base del sistema y normalizar los cálculos.

Tabla 1: Datos para la simulación.

	Área 1	Área 2
S [MVA]	20000	42000
B [MW/Hz]	2500	5000
H [s]	5	6
D [%]	1	1,5
Fph [-]	$Fph_2 : 0,3$	$Fph_4 : 0,3$
R [-]	0.05	0.05
R_t [-]	0.38	0.38
K_i [s^{-1}]	0.01	0.01
α_{ij} [-]	$\alpha_{11} : 0,63$ $\alpha_{12} : 0,37$	$\alpha_{21} : 0,54$ $\alpha_{22} : 0,46$
δ_f [pu]	0.0002	0.0002

Tabla 2: Constantes de tiempo empleadas en la simulación.

	Governor			Turbina		
	T_{g2} [s]	0,2	T_{ch2} [s]	0,3	Trh_2 [s]	6,5
Área 1	T_{g4} [s]	0,2	T_{w4} [s]	2,0	Tr [s]	5,0
Área 2	T_{g1} [s]	0,2	T_{ch1} [s]	0,3	Trh_1 [s]	5,0
	T_{g3} [s]	0,2	T_{w3} [s]	1,0	Tr [s]	5,0

Para la simulación de la variación en la carga, indicada en el esquema como ΔP_L , se han tomado los datos que proporciona el OS español, Red Eléctrica, a través de su portal ESIOS (REE, 2026b). Esta variación de carga se ha calculado como:

$$\Delta P_L = (Total_Generacion + Total_Interconexion) - Demanda_Nacional_Real$$

Siendo $Total_Generacion + Total_Interconexion$ la suma del total de la generación y del total de potencia intercambiada por medio de las conexiones con otras áreas (p.ej. Portugal, Francia, Andorra, etc.) (REE, 2026c) y $Demanda_Nacional_Real$ el consumo a nivel nacional (REE, 2026a).

Los datos recogidos se encuentran en escalones de tiempo de una hora. Para poder llevar a cabo la simulación de acuerdo con la dinámica del sistema definido previamente, se ha realizado una interpolación de los datos para obtener una variación de carga continua como corresponde a un caso de aplicación real. En la Figura 2 se muestra la variación de carga obtenida a partir de los datos tomados de ESIOS en rojo y los datos resultante de la interpolación realizada para una semana de invierno en azul. De la misma manera, en la Figura 3, se muestran la carga a partir de los datos de ESIOS y la función continua para una semana de verano.

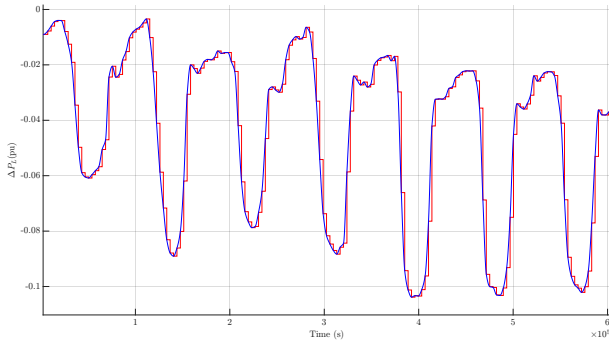


Figura 2: Variación en la carga del área 1 durante una semana en invierno.

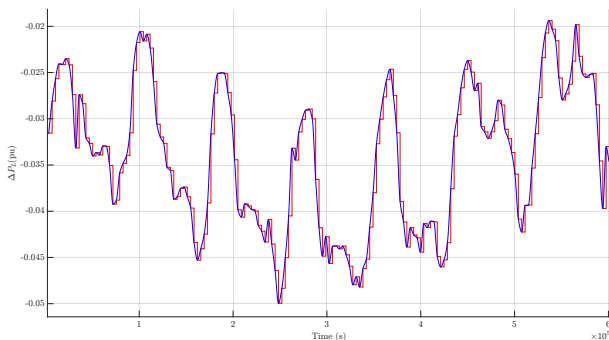


Figura 3: Variación en la carga del área 1 durante una semana en verano.

3.2. Resultados obtenidos

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una simulación con la variación de carga de una semana de invierno en la que se ha comparado el envío de datos con medición periódica y el envío de datos con medición SSOD.

En la Figura 4 se muestran los resultados para la variación de frecuencia Δw_1 obtenida al realizar el envío de datos mediante el uso de SSOD, comparados con los obtenidos con envío periódico. Estos mismos resultados para la variación de frecuencia en el área 2 (Δw_2) se muestran en la Figura 5. En ambas figuras se pueden ver los umbrales $n \cdot \delta_f$ en líneas horizontales rojas discontinuas.

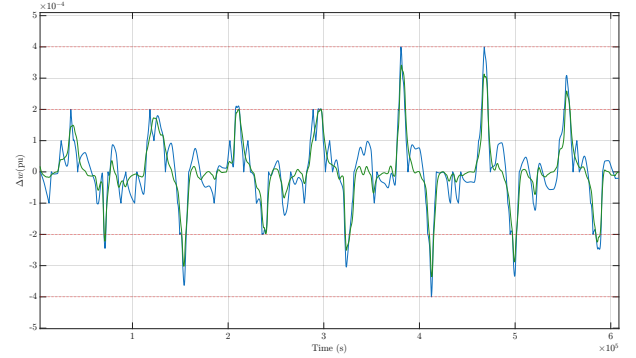


Figura 4: Variación en la frecuencia del área 1 una semana de invierno con medición periódica (verde) y medición con SSOD (azul).

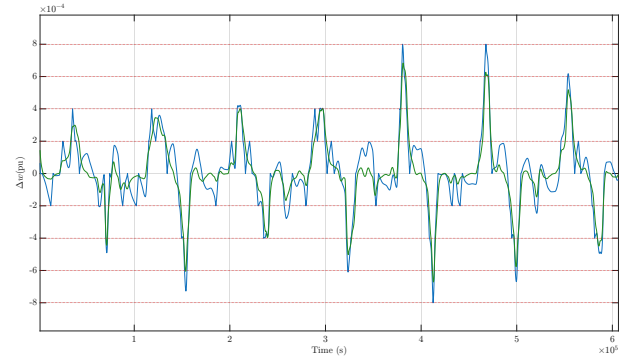


Figura 5: Variación en la frecuencia del área 2 una semana de invierno con medición periódica (verde) y medición con SSOD (azul).

En ambas figuras se puede observar que la variación de frecuencia frente a una variación de carga ΔP_L cuando se realiza el envío de datos mediante SSOD es similar a la regulación de frecuencia realizada a partir de un envío de datos periódico y que se mantiene dentro de los límites aceptados de variación de frecuencia, pues la mayor desviación que se produce es de 810^{-4} [pu], es decir, un total de 0,04 [Hz], siendo así la máxima frecuencia 50,04 [Hz] y la mínima, 49,96 [Hz]. Según la normativa española, una desviación de frecuencia normal se encuentra entre 49,85 y 50,15 [Hz] (Secr. Estado Energía, 2019), por tanto, se puede afirmar que la medición mediante SSOD permite mantener la desviación de frecuencia en el rango establecido por la norma.

Por otro lado, en la Figura 6 se muestran los eventos enviados tras el cruce de los umbrales $n \cdot \delta_f$ por parte de la variación de frecuencia Δw_1 para el cálculo del ACE. Como se puede observar, el número de eventos generados para regular

la frecuencia es muy bajo, un total de 84 eventos en un periodo de 7 días, de forma que se reduce significativamente el envío de señales puesto que si se supone un envío de datos cada 4 segundos en la medición periódica que se realiza actualmente, se reduciría un 99.94 % el envío de datos. En la Figura 7 se muestran los mismos resultados para Δw_2 , con un envío de datos total de 118 en un periodo de 7 días, lo que supone una reducción de envío de datos del 99.92 %.

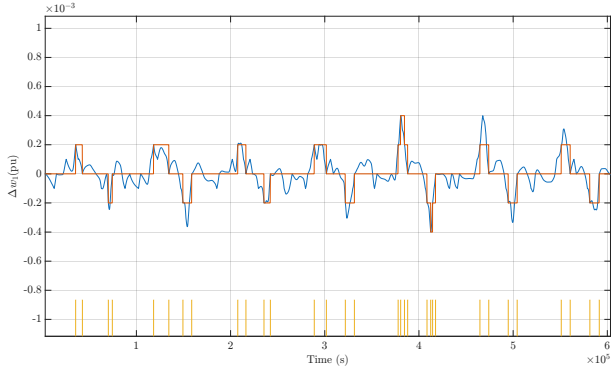


Figura 6: Señal Δw_1 con medición SSOD y eventos enviados (en amarillo) para una semana de invierno.

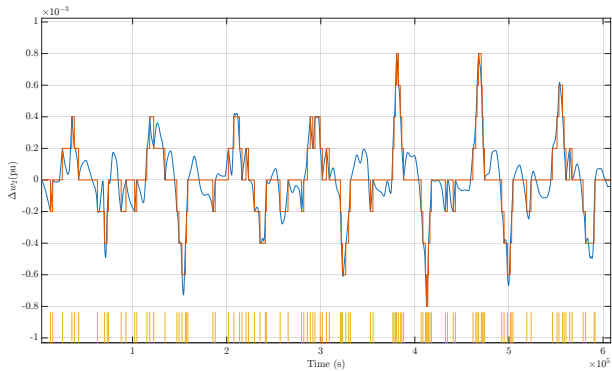


Figura 7: Señal Δw_2 con medición SSOD y eventos enviados (en amarillo) para una semana de invierno.

Los resultados obtenidos para la semana analizada en época de verano se muestran a continuación. Así, en las Figuras 8 y 9 se muestra una comparación de la variación de frecuencia obtenida en cada área si se realiza el envío de datos con medición periódica o con medición SSOD. Además, en las Figuras 10 y 11 se pueden observar los eventos enviados tras el cruce de los umbrales $n \cdot \delta_f$ por parte de las variaciones de frecuencia Δw_1 y Δw_2 , respectivamente. En el caso de verano, se tiene que el número total de eventos generados para regular Δw_1 es de 0 eventos en un periodo de 7 días, de forma que se reduciría el envío de datos al 100 %. Para Δw_2 , el envío total de datos es de 136 en un periodo de 7 días, lo que supone una reducción del envío de datos del 99.91 %.

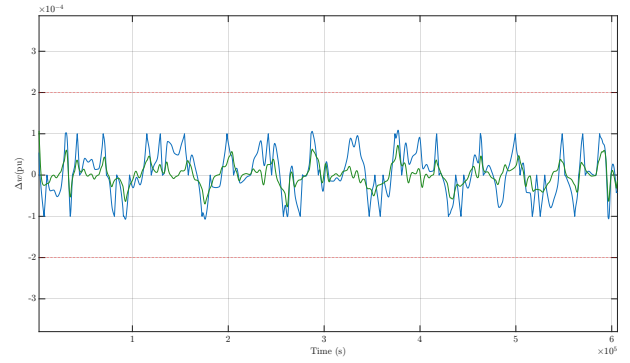


Figura 8: Variación en la frecuencia del área 1 una semana de verano con medición periódica (verde) y medición con SSOD (azul).

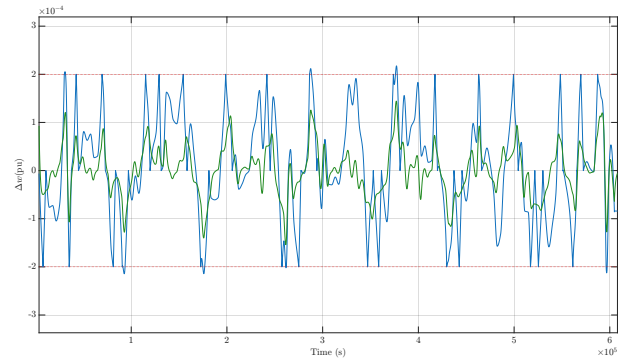


Figura 9: Variación en la frecuencia del área 2 una semana de verano con medición periódica (verde) y medición con SSOD (azul).

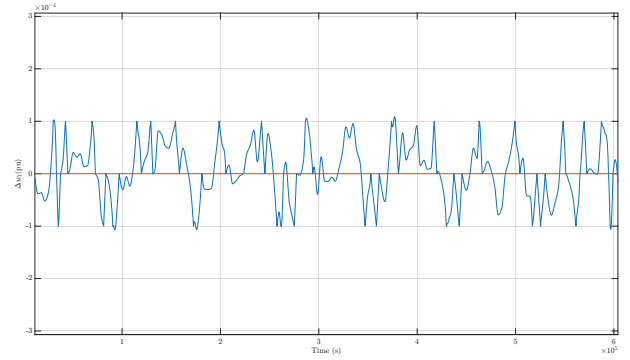


Figura 10: Señal Δw_1 con medición SSOD y eventos enviados (en amarillo) para una semana de verano.

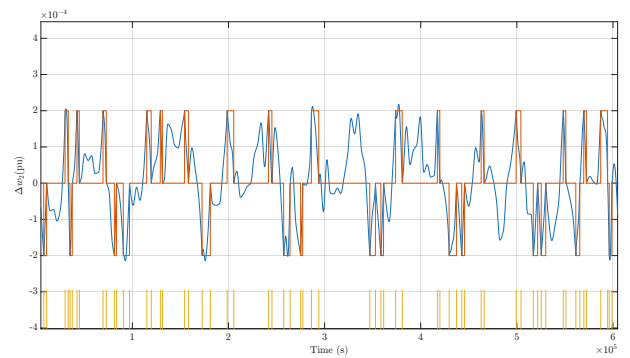


Figura 11: Señal Δw_2 con medición SSOD y eventos enviados (en amarillo) para una semana de verano.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta un nuevo enfoque en la transmisión de datos en las redes de comunicación de los STDEE mediante la introducción del *Symmetric-Send On Delta* (SSOD) como técnica de medición de la frecuencia para llevar a cabo la regulación secundaria. La simulación que se ha llevado a cabo demuestra que el uso del SSOD en el envío de datos al Operador del Sistema (OS) para el cálculo del Error de Control de Área (ACE) permite mantener la desviación de frecuencia dentro del rango establecido por la normativa, al mismo tiempo que reduce de forma muy significativa el volumen de datos transmitidos.

La introducción del muestreo por cruce de umbrales en la medición de la frecuencia de las áreas produce una reducción significativa del número de datos a transmitir, al mismo tiempo que se regula el desvío de frecuencia de forma adecuada a la normativa actual. Este cambio en la periodicidad del envío de datos permite descongestionar las comunicaciones y resolver los problemas asociados, entre ellos la pérdida de datos retardo en las comunicaciones.

Finalmente, este trabajo abre la puerta a un nuevo enfoque en el control de frecuencia y presenta una oportunidad para investigar las posibles mejoras en la eficiencia de las comunicaciones resultantes del uso de las estrategias de control por cruce de umbrales. En este sentido, se plantea como trabajo futuro evaluar si la ventaja en cuanto a reducción de envío de datos se mantendría en escenarios con mayor penetración de energías renovables caracterizados por una mayor inestabilidad de las redes eléctricas.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los proyectos de investigación PID2021-125634OB-I00 y PID2024-160455OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por ERD-F/EU. También es parte del proyecto de investigación CIAICO/2024/74 financiado por la Conselleria d'Educació, Cultura, Universitats i Ocupació de la Generalitat Valenciana y la Universitat Jaume I bajo las subvenciones UJI-2024-22 y GACUJIMA/2025/08.

Referencias

Aranda-Escolástico, E., et al., 2020. Event-based control: A bibliometric analysis of twenty years of research. *IEEE Access* 8, 47188–47208. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978174

Beschi, M., Dormido, S., Sánchez, J., Visioli, A., 2012. Characterization of symmetric send-on-delta pi controllers. *Journal of Process Control* 22 (10), 1930–1945.

Beschi, M., Visioli, A., 2013. Tuning of symmetric send-on-delta proportional-integral controllers. *IET Control Theory and Applications* 8.

Chacón, J., Sánchez, J., Visioli, A., Yebra, L., Dormido, S., 2013. Characterization of limit cycles for self-regulating and integral processes with pi control and send-on-delta sampling. *Journal of Process Control* 23 (6), 826–838.

CNMC, 2024a. P.O. 1.5 Reserva para regulación frecuencia-potencia. BOE-A-2024-11535. URL: [https://www.boe.es/eli/es/res/2024/05/30/\(1\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2024/05/30/(1))

CNMC, 2024b. P.O. 7.2 Regulación secundaria. BOE-A-2024-11535. URL: [https://www.boe.es/eli/es/res/2024/05/30/\(1\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2024/05/30/(1))

Cobreces, S., Bueno, E. J., Pizarro, D., Rodríguez, F. J., Huerta, F., 2009. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 58 (9), 3112–3121.

Dormido, S., Sánchez, J., Kofman, E., 2008. Muestreo, control y comunicación basados en eventos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 5 (1), 5–26.

ENTSO-E, 2019. Synchronous area framework agreement for regional group continental europe. annex 1: Policy on load-frequency control and reserves. Policy document, European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), Brussels, Belgium, entrada en vigor: 14 de abril de 2019. URL: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/>

Etherden, N., Vyatkin, V., Bollen, M. H. J., 2016. Virtual power plant for grid services using iec 61850. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12 (1), 437–447. DOI: 10.1109/TII.2015.2414354

García, P., Sumner, M., Navarro-Rodríguez, A., Guerrero, J. M., García, J., 2018. Observer-based pulsed signal injection for grid impedance estimation in three-phase systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65 (10), 7888–7899.

Griffioen, P., Romagnoli, R., Krogh, B. H., Sinopoli, B., 2024. Reducing attack opportunities through decentralized event-triggered control. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 11 (3), 1576–1586. DOI: 10.1109/TCNS.2023.3343151

Kundur, P., 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York.

Miguel-Escrig, O., Romero-Pérez, J.-A., 2024. Robustness study for networked event-based control system under regular quantization with hysteresis sampling. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 12 (1), 125–134.

Miguel-Escrig, O., Romero-Pérez, J. A., 2021. Tuning procedure for event-based pi controllers under regular quantization with hysteresis. *Journal of the Franklin Institute* 358 (9), 4643–4670.

Miguel-Escrig, O., Romero-Pérez, J. A., 2020. Regular quantisation with hysteresis: a new sampling strategy for event-based pid control systems. *IET Control Theory & Applications* 14 (15), 2163–2175.

MINER, 1998. P.O. 7.1 Servicio complementario de regulación primaria. BOE n. 197. URL: [https://www.boe.es/eli/es/res/1998/07/30/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/res/1998/07/30/(3))

Mohammed, N., Kerekes, T., Ciobotaru, M., 2021. An online event-based grid impedance estimation technique using grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics* 36 (5), 6106–6117. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3029872

Ploennigs, J., Vasyutynskyy, V., Kabitzsch, K., 2010. Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 6 (3), 416–424.

REE, 2026a. Demanda real nacional (Indicador 2037). <https://www.esios.ree.es/es/analisis/2037>, accedido: 27-may-2026.

REE, 2026b. Generación y consumo. URL: <https://www.esios.ree.es/es/generacion-y-consumo>

REE, 2026c. Total Generación + Total Interconexiones medidas (Indicador 10049). <https://www.esios.ree.es/es/analisis/10049>, accedido: 27-may-2026.

Romero, J. A., Sanchis, R., Penarrocha, I., 2014. A simple rule for tuning event-based pid controllers with symmetric send-on-delta sampling strategy. In: 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). pp. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005070

Sanchis, R., Miguel-Escrig, O., Romero-Pérez, J.-A., 2024. Experimental tuning of PI controllers with symmetric send-on-delta sampling from the step response. *International Journal of Control* 97 (1), 101–110.

Secr. Estado Energía, 2019. Resolución de 11-12-2019 (adaptación rd 244/2019). BOE (305), 137788–138122. URL: <https://boe.es/id/BOE-A-2019-18275>

Sreejith, A., Swarup, K. S., 2024. *Cyber-Security for Smart Grid Control: Vulnerability Assessment, Attack Detection, and Mitigation*. Springer Singapore. DOI: 10.1007/978-981-97-1302-8

Zhong, W., Murad, M. A. A., Liu, M., Milano, F., 2020. Impact of virtual power plants on power system short-term transient response. *Electric Power Systems Research* 189, 106609. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106609