

## CONTROL DE UNIDADES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA BRINDAR SERVICIOS AUXILIARES A LA RED

Pablo E. Muñoz<sup>1</sup>, Sergio A. Gonzalez<sup>1,3</sup>, Ricardo J. Mantz<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de investigaciones en electrónica, control y procesamiento de señales UNLP-CONICET.

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICpBA).

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

pablo\_e.m@hotmail.com

### Introducción

Fundamentalmente las unidades de generación distribuida (UGD) aprovechan las fuentes de energía inyectando potencia activa a la red. Las UGD se pueden conectar a la red a través de una máquina rotante de AC o mediante convertidores electrónicos de potencia (CEP) dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía. En particular, aquellas que utilizan CEP para conectarse a la red no tienen inercia. Esto disminuye la inercia total del sistema de potencia planteando nuevos desafíos en el control primario de frecuencia y comprometiendo la estabilidad de la red [1]. Más aún, los códigos de red establecen estándares para el control de frecuencia, en particular, en muchos casos se establece una banda de frecuencias de operación normal en donde se limitan las desviaciones de frecuencia a largo plazo, y la banda operativa, que establece los rangos permitidos para las desviaciones de frecuencia rápidas [2]. La reducción en la inercia del sistema presenta grandes desafíos en cuanto al control de la derivada temporal de la frecuencia, es decir, la tasa de cambio de la frecuencia (RoCoF, de sus siglas en inglés "*Rate of Change of Frequency*"). Una alta RoCoF puede causar el accionamiento de protecciones y sacar de funcionamiento unidades de generación e inclusive que se aislen porciones de la red [3].

Por tales motivos, conforme aumenta la penetración de las UGD en el sistema de potencia, es importante diseñar estrategias de control para que los CEP den una rápida respuesta de tal manera que las UGD brinden servicios auxiliares mediante la compensación o regulación de algunas variables (como, por ejemplo, compensación de potencia reactiva, armónicos, control de frecuencia primario, etc.) que contribuyan al correcto funcionamiento del sistema de potencia. En este sentido, el control por droop es una estrategia bien establecida mediante la cual las UGD son capaces de inyectar a la red una cierta cantidad de potencia activa y, además, regular su participación en el reparto de potencia activa y reactiva en función de la frecuencia y la tensión en el punto de conexión [4].

En este trabajo la propuesta se basa en diseñar un lazo de acondicionamiento de referencia por modos deslizantes [5] (SMRC de sus siglas en inglés "*Sliding-Mode Reference Conditioning*") que actúa sobre la referencia de los típicos controles de potencia por droop. Este lazo adicional permite que las UGD participen en el control primario de frecuencia manteniendo las características del control por droop. La señal de acondicionamiento se genera mediante la implementación de una señal discontinua. A partir de ella se logra que el sistema opere transitoriamente en régimen deslizante cuando la trayectoria intenta atravesarla superficie establecida en función de los límites establecidos en los códigos de red. El lazo de acondicionamiento de referencia sólo actúa cuando existe riesgo de que la RoCoF o la frecuencia superen los límites impuestos. De este modo, sólo se inyecta la potencia necesaria

para mantener las variables dentro de sus límites.

El lazo de acondicionamiento brinda una rápida respuesta capaz de limitar la desviación de frecuencia y de la RoCoF para contribuir a que el sistema opere dentro de los límites establecidos por los códigos de red. Se validó el diseño en simulación en condición nominal y con cambios en la carga. Los resultados muestran que la estrategia de control propuesta contribuye a mejorar el desempeño del control primario de frecuencia del sistema impidiendo que se excedan los límites establecidos.

**Control primario de frecuencia clásico**

La Fig. 1 muestra la respuesta típica en la frecuencia del sistema cuando ocurre un aumento en la demanda de potencia, donde  $\omega$  representa la frecuencia de red,  $\Delta\omega$  es la desviación de frecuencia y el nadir de frecuencia se refiere al mínimo valor que toma la frecuencia en el transitorio. El control primario de frecuencia actúa para detener la rápida caída en la frecuencia, es decir la RoCoF y el nadir de frecuencia, en unos pocos segundos y luego, en una escala de minutos el control secundario se ocupa de llevar nuevamente la frecuencia a su valor nominal.

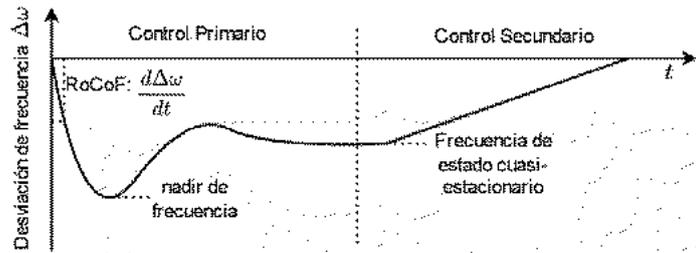


Figure 1: Transitorio de la frecuencia debido a un incremento en la demanda

La inercia, presente en los generadores sincrónicos (GS), es la responsable de la primera respuesta frente al desbalance de potencia y contribuye a estabilizar la frecuencia del sistema. Dadas las características físicas de los GS esta respuesta es inmediata y natural, es decir, el GS entrega parte de la energía cinética almacenada en el rotor al sistema en forma instantánea como forma de oponerse al cambio en su estado de movimiento. Esto se conoce como respuesta inercial. De este modo la tasa de cambio en la frecuencia ( $\frac{d\omega}{dt}$ ) es acotada por la inercia del sistema. A su vez, este efecto contribuye a disminuir el máximo apartamiento de la frecuencia ( $\Delta\omega$ ) ya que da tiempo a que los lazos de control primario actúen para estabilizar la frecuencia en un nuevo estado estacionario.

Si las UGDs no participan en el control primario de frecuencia del sistema entonces, la frecuencia de red es solamente regulada por los generadores sincrónicos. La Fig. 2 muestra en diagrama de bloques el modelo del lazo de regulación de frecuencia primario en este escenario, donde  $R$  es el coeficiente de droop,  $T_G$  es la constante de tiempo del control de velocidad y  $F_{HP}$ ,  $T_{RH}$  y  $T_{CH}$  son los coeficientes de la turbina térmica [6].

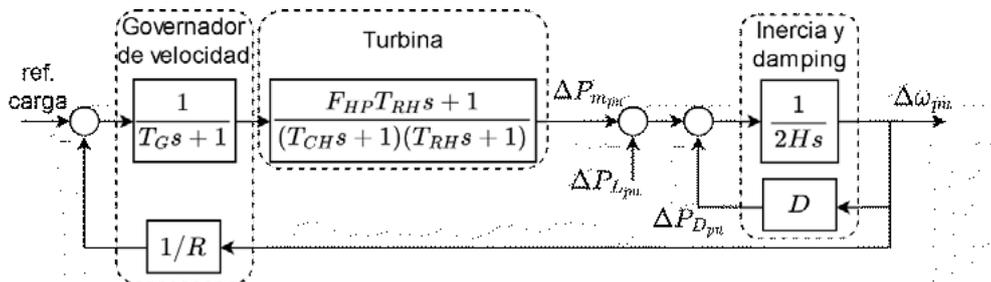


Figure 2: Diagrama en bloques de regulación de frecuencia sin la participación de las UGDs

En la Fig. 2, el bloque inercia y damping describe la conocida ecuación de oscilación que modela el comportamiento electromecánico del GS que se puede expresar de la siguiente manera

$$\Delta P_m - \Delta P_L = 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} + D \Delta\omega \tag{1}$$

donde  $\Delta P_m$  es la potencia mecánica de la máquina impulsora,  $\Delta P_L$  es la potencia demandada por la red,  $D$  es el factor de damping y  $H = E_{gen}/VA_{nom} = J\omega^2/2VA_{nom}$  representa el coeficiente de inercia, donde  $E_{gen}$  es la energía cinética,  $J$  es el momento de inercia total del generador y la turbina, y  $VA_{nom}$  representa la potencia base del sistema.

### Lazo de acondicionamiento de referencia para las UGDs

El acondicionamiento de referencia es uno de los métodos, llamados de dos pasos, para lidiar con problemas con restricciones. En este enfoque, el lazo de control primario se diseña sin considerar explícitamente las restricciones (primer paso), y luego se añade un lazo de compensación que se ocupa de que el sistema opere dentro de las restricciones impuestas (segundo paso). En términos generales, el acondicionamiento de referencia busca moldear la señal de referencia de tal manera que se aplique al sistema lo que se conoce como "referencia realizable", que es, por definición, la referencia que si se aplica desde el principio se evitaría que se superen las restricciones.

El acondicionamiento de referencia por modos deslizantes (SMRC) emplea una acción discontinua para generar la referencia realizable compatible con las restricciones del sistema [5]. Esta estrategia combina la idea del acondicionamiento de referencia con las propiedades de los regímenes deslizantes para mejorar la robustez con respecto al modelo del sistema con restricciones y las perturbaciones de salida [7].

Típicamente las UGDs participan en el control de tensión y frecuencia en base a las conocidas curvas de droop:

$$\begin{aligned} P &= -m(\omega - \omega^*) + P^* \\ Q &= -n(v_o - v_o^*) + Q^* \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $\omega^*$  es la frecuencia nominal del sistema,  $v_o^*$  es la tensión nominal,  $P^*$  es la referencia de potencia activa,  $Q^*$  es la referencia de potencia reactiva,  $m$  y  $n$  son las pendientes de los droops. En la Fig. 3 se muestra esquemáticamente cómo se implementa el lazo de acondicionamiento de referencia propuesto para las UGDs. Al lazo de droop (primer paso) se le añade el lazo de acondicionamiento (segundo paso) con el objetivo de moldear la referencia de potencia de tal manera que la desviación de frecuencia y la RoCoF no superen ciertos límites. En la Fig. 4 se muestra cómo se modifica el diagrama de bloques de la Fig. 2 con la participación de la UGD en el control primario de frecuencia, donde se omitió la referencia de potencia ya que las variables consideradas son incrementales ( $\Delta$ ). De este modo la UGD participa en el control primario de frecuencia, donde la potencia que inyecta,  $\Delta P_{UGD}$ , resulta de la potencia de referencia,  $P$ , que se construye a partir de la contribución del lazo de droop,  $\Delta P_{droop}$ , y el lazo de acondicionamiento,  $\Delta P_{\tilde{\sigma}_{1,2}}$  (donde el subíndice 1,2 se usa para representar en simultaneo  $\tilde{\sigma}_1$  y  $\tilde{\sigma}_2$ ).

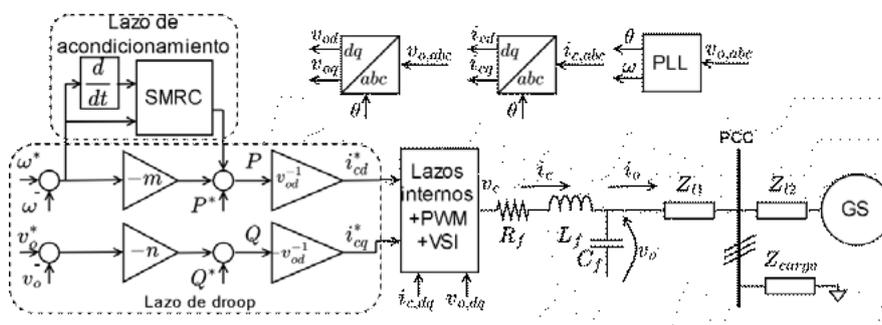


Figure 3: Diagrama esquemático de la UGD con el lazo de acondicionamiento de referencia conectado a la red

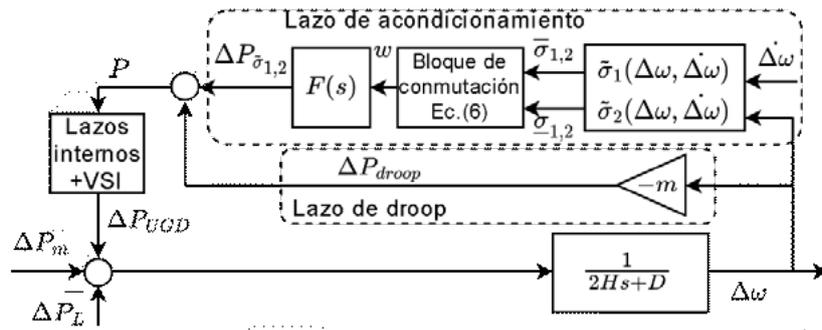


Figure 4: Diagrama en bloques de regulación de frecuencia con la participación propuesta de la UGD

El lazo de acondicionamiento está compuesto por las funciones de conmutación  $\tilde{\sigma}_1$  y  $\tilde{\sigma}_2$ , donde en cada una de ellas, se establecen los límites superior e inferior para la RoCoF y  $\Delta\omega$ , respectivamente ( $\tilde{\sigma}$  representa indistintamente a  $\bar{\sigma}$  y  $\underline{\sigma}$  para los límites superior e inferior, respectivamente), el bloque de conmutación en donde se implementa la acción discontinua y el filtro

$$F(s): \{\dot{\Delta P}_{\tilde{\sigma}_{1,2}} = -\lambda_F \Delta P_{\tilde{\sigma}_{1,2}} + \lambda_F w \quad (3)$$

donde  $w$  es la la acción discontinua y  $\lambda_F > 0 \in \mathbb{R}$  es el autovalor del filtro que se elige para filtrar la conmutación de alta frecuencia.

La función de conmutación  $\tilde{\sigma}_1$  define dos superficies de conmutación

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= \{(\Delta\omega, \dot{\Delta\omega}) \in \mathbb{R}^2: \bar{\sigma}_1 = 0\} \\ \underline{S}_1 &= \{(\Delta\omega, \dot{\Delta\omega}) \in \mathbb{R}^2: \underline{\sigma}_1 = 0\} \end{aligned} \quad (4)$$

y la función de conmutación  $\tilde{\sigma}_2$  define dos superficies de conmutación

$$\begin{aligned} \bar{S}_2 &= \{(\Delta\omega, \dot{\Delta\omega}) \in \mathbb{R}^2: \bar{\sigma}_2 = 0\} \\ \underline{S}_2 &= \{(\Delta\omega, \dot{\Delta\omega}) \in \mathbb{R}^2: \underline{\sigma}_2 = 0\} \end{aligned} \quad (5)$$

El bloque de conmutación genera la señal discontinua  $w$  que se usa para acondicionar la referencia de potencia  $P^*$  siguiendo la ley de conmutación

$$w = \begin{cases} w^+ \text{ si } \bar{\sigma}_{1,2} < 0 \\ w^- \text{ si } \underline{\sigma}_{1,2} > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

De este modo, cuando la trayectoria intenta superar alguno de sus límites, la ley de conmutación (6) junto con  $\tilde{\sigma}_1$  y  $\tilde{\sigma}_2$  hacen que  $w \neq 0$  y fuerza a la trayectoria del sistema a regresar a su región permitida. Consecuentemente, la señal acondicionada  $P^*$  será continuamente ajustada de tal manera que la trayectoria del sistema nunca exceda los límites predefinidos.

Por último, para que el acondicionamiento de referencia sea capaz de imponerle la restricción al sistema se debe garantizar que [7]: se satisfaga la condición de transversalidad y

$$\begin{aligned} 0 &< \bar{w}_{eq} < w^+ \\ w^- &< \underline{w}_{eq} < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

donde se asume que  $w^- < 0 < w^+$  y  $w_{eq}$  es la acción continua que mantiene a la trayectoria deslizando sobre la superficie  $\tilde{\sigma}_{1,2} = 0$ . Por lo tanto, las funciones de conmutación deben diseñarse de tal manera que se satisfaga la condición de transversalidad y la amplitud de la acción discontinua debe ser lo suficientemente grande para satisfacer (7). En este sentido, cabe mencionar que la selección de  $w^+$  y  $w^-$  se puede hacer de manera conservadora porque el lazo de acondicionamiento está restringido al lado de baja potencia del sistema.

#### Diseño de las funciones de conmutación

Teniendo en cuenta las condiciones planteadas arriba, en la Fig. 4 se considera la función de conmutación

$$\tilde{\sigma}_1 = \widetilde{\Delta\omega} - \Delta\dot{\omega} \quad (8)$$

para establecer los límites en la RoCoF y

$$\tilde{\sigma}_2 = \widetilde{\Delta\omega} - \Delta\omega - k\Delta\dot{\omega} \quad (9)$$

Para establecer los límites en la desviación de frecuencia. En (9) se introdujo el estado adicional  $\Delta\dot{\omega}$  para satisfacer la condición de transversalidad y de esta manera la acción discontinua sea capaz de establecer un régimen deslizando.

#### Resultados

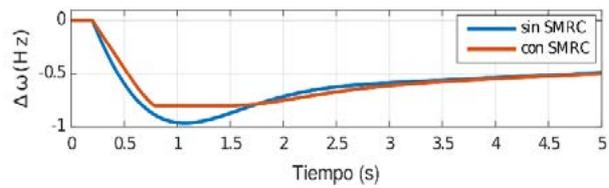
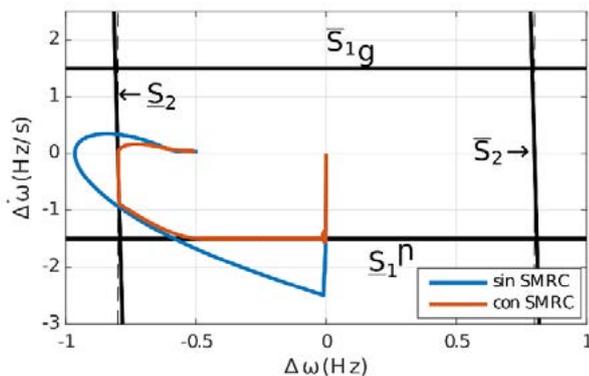
La Fig. 3 muestra el sistema considerado para evaluar el esquema de control propuesto. El lazo de control del GS es como se muestra en la Fig. 2. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 1. Las pendientes de las curvas de droop (2) se consideran  $n = m = 0.01$ . Para las superficies se consideran  $\widetilde{\Delta\omega} = 0.8 \text{ Hz}$ ,  $k = 0.006 \text{ s}$  y  $\Delta\dot{\omega} = 1.5 \text{ Hz/s}$  y el autovalor del filtro se elige  $\lambda_f = -20$ . Los límites fueron elegidos en función de la banda operativa establecida en el código de red europeo [2], y lo establecido en [3] respecto de la RoCoF. Para evaluar el desempeño del lazo de acondicionamiento propuesto se considera un cambio del 20% en la demanda de potencia por parte de la carga a los  $0.2 \text{ s}$ . Se muestran los resultados en dos escenarios: la UGD sin el lazo de acondicionamiento y la UGD con el lazo de acondicionamiento.

Tabla 1: Parámetros del sistema

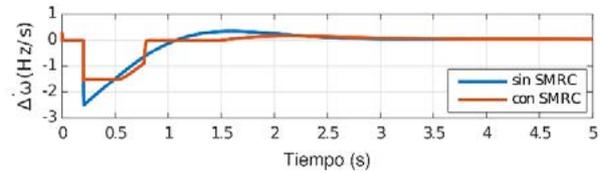
GS				Red y UGD	
$R$	0.05	$T_G$	0.2 s	$Z_{L1,2}$	$(0.8 + j1.2)\Omega$
$F_{HP}$	0.3 s	$T_{RH}$	7 s	$R_f$	0.01 $\Omega$
$T_{CH}$	0.3 s	$H$	2 s	$L_f$	3 mH
$D$	1	$VA_{base}$	1 MVA	$C_f$	20 $\mu\text{F}$

Figura 5: Plano  $\Delta\omega - \dot{\Delta\omega}$ Figura 6: Respuesta temporal (a)  $\Delta\omega$  (b)  $\dot{\Delta\omega}$ 

En la Fig. 5 se muestra la trayectoria del sistema en el plano  $\Delta\omega - \dot{\Delta\omega}$ . Se observa que la trayectoria sin el lazo de acondicionamiento supera ampliamente las restricciones tanto en la RoCoF como en el apartamiento de la frecuencia (línea azul). Por su parte, con el lazo de acondicionamiento (línea roja) la trayectoria del sistema queda confinada dentro de la región permitida y durante el transitorio la trayectoria alcanza las superficies  $\underline{S}_1$  y  $\underline{S}_2$ .



(a)



(b)

En la Fig. 6 se muestra la evolución temporal de la desviación de frecuencia y la RoCoF. Se observa que el transitorio de frecuencia, Fig. 6a, cuando la UGD cuenta con el lazo de acondicionamiento (línea roja) no supera las restricciones y una vez que la trayectoria deja de intentar superar la restricción el sistema evoluciona sin la acción del lazo de acondicionamiento (línea azul) por lo tanto la UGD no inyecta potencia extra si la trayectoria no intenta superar las restricciones. Esto también se verifica en la Fig. 6 en el comportamiento en la RoCoF.

En la Fig. 7 se muestra la potencia activa inyectada por el GS (Fig. 7a) y la UGD, en donde la potencia de la UGD está dividida en el aporte debido a la curva de droop, Fig. 7b, y el aporte debido al lazo de acondicionamiento, Fig. 7c. Se observa que sin el lazo de acondicionamiento (línea azul) la UGD sólo inyecta potencia una vez que  $\Delta\omega$  aumenta, esto se debe a que el lazo de droop sólo aporta potencia de damping al sistema. Sin embargo, con el lazo de acondicionamiento (línea roja) la UGD inyecta un pico de potencia inicial para limitar la RoCoF. Por supuesto, la potencia inyectada por la UGD se ve reflejada en el GS como un menor aporte de potencia inicial en concordancia con la menor RoCoF. Se observa otro pico de potencia cuando  $\Delta\omega$  alcanza su restricción. Esta vez, la potencia aportada debido al lazo de droop permanece constante debido a que la frecuencia queda limitada en su valor mínimo. Nuevamente, el GS experimenta una caída en la potencia que entrega al sistema. Esta caída es la necesaria para detener la desaceleración del rotor del GS y en consecuencia la caída en la frecuencia. A partir de allí, comienza a recuperarse la frecuencia y una vez que no hay peligro de superar las restricciones el sistema evoluciona del mismo modo que sin el lazo de acondicionamiento.

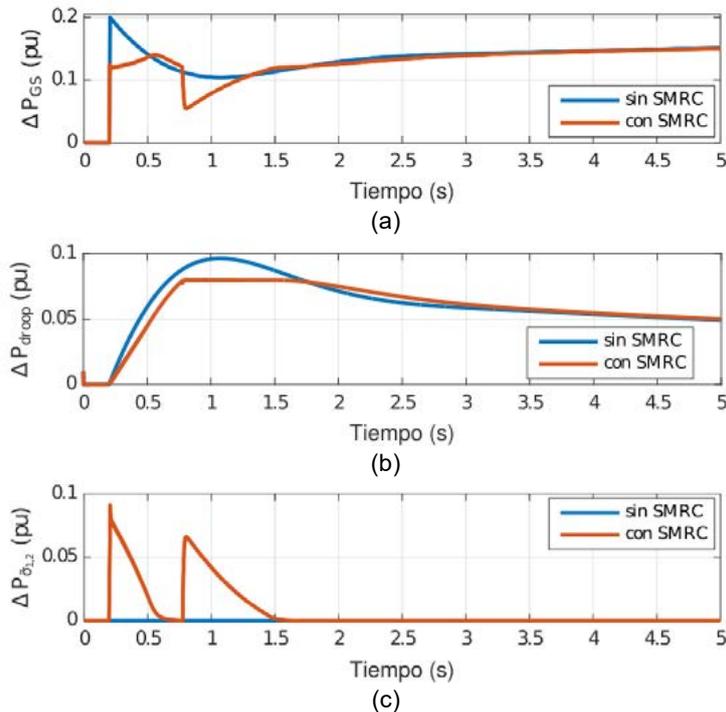


Figura 7: Respuesta temporal (a) Potencia del GS (b) Potencia de la UGD debido al droop (c) Potencia de la UGD debida el SMRC

## Conclusiones

En este trabajo se propone el uso de un lazo de acondicionamiento por modos deslizantes adicional en las típicas curvas de droop para que las UGD basadas en convertidores contribuyan al control primario de frecuencia. Con esta estrategia se busca impedir que la desviación de frecuencia y la RoCoF superen los límites impuestos. A diferencia de otras estrategias existentes en la bibliografía, el lazo de acondicionamiento sólo interviene cuando existe riesgo de superar alguna restricción. De este modo sólo se entrega/absorbe energía cuando existe riesgo de superar estos límites, con lo cual se logra un uso eficiente de la energía. Más aún, mientras el control del convertidor opera en régimen deslizante se puede interpretar la propuesta como un aporte transitorio de inercia y damping virtual al sistema, es decir, sólo cuando es necesario para no exceder los límites preestablecidos. Los resultados de simulación muestran que la estrategia es capaz de contribuir al control primario de frecuencia logrando que las variables permanezcan dentro de sus límites.

## Referencias

- [1] Peng, Q., Jiang, Q., Yang, Y., Liu, T., Wang, H., & Blaabjerg, F. (2019). On the stability of powerelectronics-dominated systems: Challenges and potential solutions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 7657-7670.
- [2] "P1-policy 1: Load-frequency control and performance," European Network of TSOs for Electricity, Belgium, 2017, [Online]. Available: <http://www.entsoe.eu>.
- [3] Fang, J., Li, H., Tang, Y., & Blaabjerg, F. (2018). On the inertia of future more-electronics power systems. *IEEE J of Emergi and Selected Topics in Power Electron*, 7(4), 2130-2146.
- [4] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2010). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 58(1), 158-172.
- [5] Garelli, F., Mantz, R. J., & Battista, H. D. (2011). Advanced control for constrained processes and systems. The Institution of Engineering and Technology.
- [6] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control.
- [7] Edwards, C., & Spurgeon, S. (1998). Sliding mode control: theory and applications. Crc Press.