

Control Super-Twisting con adaptación basada en cruce por cero. Análisis de estabilidad y validación.

Jorge Luis Anderson^{a, *}, Jerónimo José Moré^a, Paul Federico Puleston^a, Vicente Roda^b, Ramon Costa-Castelló^b

^aInstituto de investigación en Electrónica, Control y Procesamiento de señales (LEICI), FI UNLP - CONICET, La Plata, Argentina

^bInstitut de Robòtica i Informàtica industrial (IRI), CSIC-UPC, Barcelona, España.

To cite this article: Anderson, J.L., Moré, J.J., Puleston, P.F., Roda, V. and Costa-Castelló R. 2023. Super-Twisting control with zero crossing gain adaptation. Stability analysis and validation. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 20, 104-114. 1-5. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16724>

Resumen

En los últimos años, los algoritmos de control diseñados a partir de técnicas por Modos Deslizantes de Segundo Orden (MDSO) se han consolidado como una importante alternativa al modos deslizantes tradicional. Dentro de estos algoritmos, el control por MDSO Super-Twisting permite una importante reducción del *chattering* (oscilaciones de alta frecuencia), gracias a su acción de control continua, manteniendo las características de robustez y convergencia en tiempo finito deseadas. Sin embargo, en su implementación práctica, en ciertas ocasiones es necesario sobredimensionar las ganancias del controlador, con el objetivo de permitir el rechazo de grandes, aunque usualmente esporádicas, perturbaciones. Esto redundando inevitablemente en un incremento en el esfuerzo del controlador y, por ende, en un incremento del *chattering* del sistema.

De esta manera, en este trabajo se presenta el análisis de estabilidad y validación de un mecanismo de Adaptación de Ganancias para un algoritmo de control por MDSO Super-Twisting. El mismo, continúa con el enfoque de adaptación basada en cruce por cero desarrollado por Pisano et al. para sistemas con grado relativo 2. El algoritmo propuesto es evaluado, en primera instancia, por simulación para el caso de aplicación de un sistema de potencia. Posteriormente, el sistema controlado es implementado y validado experimentalmente en una plataforma de 700W. Los resultados obtenidos mostraron una importante reducción del *chattering* y similares características de robustez, en comparación con el algoritmo Super-Twisting tradicional.

Palabras clave: Control por Modos Deslizantes, Adaptación de Ganancias, Algoritmo Super-Twisting, Sistemas de Potencia.

Super-Twisting control with zero crossing gain adaptation. Stability analysis and validation.

Abstract

In the latest years, the Second Order Sliding Mode (SOSM) control have been emerged as a powerful alternative to traditional sliding mode control. Within this kind of algorithms, the SOSM Super-Twisting Algorithm (STA) allows to significantly reduce the control chattering (high frequency oscillations), through its continuous control action, while preserving conventional SMC's features of robustness and finite time convergence. However, in practical implementation, it is sometimes required to oversize the STA gains, in order to allow the system controller to deal with large, but commonly sporadic, disturbances. This situation produces an inevitable increment of control effort and, in consequence, and increment of control chattering.

In this framework, in the present paper the stability analysis and validation of an adaptation mechanism for the Super-Twisting Algorithm are developed. It is based on the zero crossing gain adaptation approach developed by Pisano et al. for systems of relative degree 2. Firstly, the proposed algorithm is validated by simulation for its application on a power converter system. Then, the controlled system is implemented on a experimental 700W power platform. The results showed an important reduction of control chattering, and similar features of robustness, in comparison with the conventional Super-Twisting Algorithm.

Keywords: Sliding Mode Control, Gain Adaptation, Super-Twisting Adaptation, Power systems

*Autor para correspondencia: jorgeluis.anderson@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Desde hace décadas, el control por Modos Deslizantes (MD) ha surgido como una importante estrategia para el estudio y diseño de controladores robustos frente a perturbaciones del sistema. Sin embargo, su implementación práctica por medio de acciones de control discontinuas ha generado ciertos inconvenientes, siendo las oscilaciones de alta frecuencia, comúnmente llamadas *chattering*, una de las más perjudiciales (Utkin et al. (2020)). Dichas oscilaciones son causadas principalmente por la presencia de dinámicas no modeladas y limitaciones en los actuadores y sensores de los sistemas a controlar. Por este motivo, en los últimos años, diferentes estrategias de control por MD han sido propuestas especialmente enfocados en su reducción, permitiendo mantener las características de robustez y convergencia en tiempo finito (Fridman et al. (2015), Boiko et al. (2007)) del control por MD convencional.

En particular, este tipo de estructuras de control ha sido ampliamente difundida para su aplicación en los sistemas de potencia, en diversos campos de aplicación (Hidalgo and Huerta (2021), Kunusch et al. (2008), Silva-Ortigoza et al. (2008)). Las importantes no linealidades en las diferentes topologías de convertidores CC/CC existentes, sumado a la variabilidad en el recurso energético empleado, ha requerido el diseño de controladores robustos que puedan garantizar la confiabilidad del sistema en un amplio rango de operación.

En este contexto, los algoritmos de control por Modos Deslizantes de Segundo Orden (MDSO) han surgido como una interesante alternativa, existiendo en la actualidad diversos algoritmos desarrollados en la literatura. De entre las topologías más empleadas, pueden nombrarse a los algoritmos de control por MDSO Subóptimo (Bartolini et al. (1993)), Twisting y Super-Twisting (Levant (1993)), siendo este último el único directamente aplicable a sistemas de grado relativo uno.

Aunque la implementación de los algoritmos por MDSO es relativamente simple y con un bajo costo computacional, su etapa de diseño puede resultar bastante dificultosa. En particular, especialmente en su fase de implementación práctica, en ciertas ocasiones es necesario sobredimensionar las ganancias del controlador, con el objetivo de poder lidiar con perturbaciones grandes, aunque no necesariamente muy frecuentes. Dicho incremento en el esfuerzo del controlador suele llevar inevitablemente al incremento del *chattering* resultante.

En la actualidad, los algoritmos por MDSO que incorporan mecanismos de adaptación de ganancias han sido desarrollados y estudiados ampliamente. Estas estructuras de control permiten preservar las características de robustez del control por MD-SO, garantizando la estabilidad del sistema controlado frente a posibles perturbaciones, mientras que logran a su vez una reducción del *chattering* mediante un ajuste en tiempo real de los parámetros del controlador. En este contexto, se han propuesto diversas estrategias de adaptación en la literatura para diferentes algoritmos por MDSO, con excelentes resultados (por ejemplo, Edwards and Shtessel (2019), Luo et al. (2018), Bartolini et al. (2013), Utkin and Poznyak (2013), Shtessel et al. (2012) y Gonzalez et al. (2012)).

En particular, en los últimos años, Pisano et al. (2012) han propuesto un mecanismo de adaptación para sistemas reales

con frecuencia de conmutación finita. Dicho mecanismo ha sido desarrollado satisfactoriamente para los algoritmos por MD-SO Twisting (Pisano et al. (2012)) y Subóptimo (Pisano et al. (2016)), aplicables directamente a sistemas de grado relativo 2. Como principio de funcionamiento, este particular enfoque de adaptación de ganancias hace uso de la cantidad de cruces por cero de la variable de deslizamiento, en una determinada ventana temporal. De esta manera, la operación del sistema sobre el régimen real de MD es establecida cuando dicha cantidad de cruces es suficientemente grande para satisfacer un determinado criterio de existencia de MD. Así esta ley de adaptación propuesta disminuye las ganancias del controlador por MDSO, siempre y cuando dicho criterio sea satisfecho. Por el contrario, si por algún motivo el sistema deja de operar sobre el régimen por MD establecido, el mecanismo de adaptación incrementará rápidamente las ganancias, evitando así condiciones de operación inestables del sistema.

Dentro de este marco de trabajo, en este artículo se propone el desarrollo del mecanismo de adaptación de ganancias de Pisano *et al.* aplicado a un controlador por Modos Deslizantes de Segundo Orden Super-Twisting (MDSO ST). El algoritmo por MDSO Super-Twisting con Ganancias Fijas (ST-GF) ha sido ampliamente validado en la literatura en diversas aplicaciones, y en particular para el control de sistemas de potencia (Terán et al. (2020), Derbeli et al. (2019)). Entre otras ventajas, su acción de control continua permite una implementación sencilla en dispositivos digitales, sin necesidad de utilizar información adicional sobre las derivadas del sistema. Combinado con un adecuado mecanismo de adaptación de ganancias, el algoritmo Super-Twisting resulta en una poderosa herramienta para el control de convertidores de potencia, capaz de mantener excelentes propiedades de robustez y convergencia en tiempo finito con mínimas amplitudes de *chattering* (Rakhtala and Casavola (2022)).

Con el objetivo de garantizar la operación estable del algoritmo por MDSO Super-Twisting con Adaptación de Ganancias (ST-AG) propuesto, las condiciones de estabilidad del controlador son desarrolladas de forma teórica. Adicionalmente, se realiza una estimación de la superficie de deslizamiento real de segundo orden, donde las oscilaciones de alta frecuencia se encuentran contenidas. Finalmente, el algoritmo propuesto es evaluado para el control de corriente de un sistema de potencia. En primer lugar, la validación es realizada mediante la simulación del sistema, considerando la existencia de perturbaciones de tensión en el bus de continua. Posteriormente, el algoritmo propuesto es evaluado experimentalmente en una plataforma de 700W.

El trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta el Algoritmo Super-Twisting convencional, estableciendo las condiciones para la estabilidad del mismo. Posteriormente, en la Sección 3 se desarrolla el algoritmo de adaptación de ganancias propuesto. En la Sección 4 se presenta la validación del algoritmo aplicado a un sistema de potencia. Por último, en la Sección 5 se comentan las conclusiones finales.

2. Control por Modos Deslizantes de Segundo Orden Super-Twisting

En esta sección se presenta el algoritmo de control por modos deslizantes Super-Twisting tradicional con ganancias fijas. Dicho algoritmo será la base para el posterior desarrollo de la estrategia de adaptación de ganancias. Para ello, empezaremos primero por introducir el problema del sistema auxiliar, el cual nos servirá para realizar el análisis de estabilidad del algoritmo en la Sección 3. Seguidamente, las expresiones del controlador por MDSO ST son desarrolladas, estableciendo las condiciones necesarias para la estabilidad del sistema controlado.

2.1. Problema del sistema auxiliar

Considerando el sistema afín al control, dado por:

$$\dot{x} = a(x) + b(x)u \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u \in \mathbb{R}$ es la acción de control y $a, b \in \mathbb{R}^n$ son funciones vectoriales suaves, parcialmente conocidas. Sea $\sigma(x) \in \mathbb{R}$ la variable de deslizamiento diseñada para compensar el comportamiento dinámico del sistema, cuando el sistema opera sobre la superficie de deslizamiento:

$$\mathcal{S} = \{x \in \mathbb{R}^n : \sigma(x) = \dot{\sigma}(x) = 0\}. \quad (2)$$

La variable σ debe ser diseñada para que el sistema descrito en (1) tenga una dinámica de los ceros o dinámica escondida estable (Hernández et al. (2016)), cuando el sistema alcanza y se mantiene sobre la superficie \mathcal{S} .

Entonces, seleccionando el vector de estados:

$$z = [z_1, z_2]^T = [\sigma(x), \dot{\sigma}(x)]^T \in \mathbb{R}^2, \quad (3)$$

y considerando que σ tiene un grado relativo igual a 1 con respecto a la acción de control u , podemos reescribir el sistema de ecuaciones dinámicas de la variable de deslizamiento (denominado el problema del sistema auxiliar) como:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = f(z, u) + g(z)v = g(z)(\eta(z, u) + v) \end{cases} \quad (4)$$

con

$$\eta(z, u) = \frac{f(z, u)}{g(z)} \quad (5)$$

donde $v = \dot{u}$, y f y g son funciones continuas suaves del vector de estados, parcialmente conocidas y localmente acotadas por:

$$|f(z, u)| \leq F \text{ y } 0 < G_m \leq g(z) \leq G_M, \quad (6)$$

De igual manera, la función vectorial η estará localmente acotada por:

$$|\eta(z, u)| \leq \frac{F}{G_m} \quad (7)$$

y al ser f y g funciones suaves con $g(z) \neq 0$, la primer derivada de η también se encontrará acotada localmente por:

$$\left| \frac{d\eta(t)}{dt} \right| \leq P. \quad (8)$$

2.2. Algoritmo de control por MDSO Super-Twisting

Dado el sistema auxiliar de grado relativo uno definido en (4)-(8), el controlador diseñado mediante técnicas de MDSO Super-Twisting permite llevar y mantener la operación del sistema sobre la superficie de deslizamiento de segundo orden \mathcal{S} , definida en (2).

Para ello, la acción de control u es definida como (Shtessel et al. (2014)):

$$\begin{cases} u = -\alpha|z_1|^{1/2}\text{sign}(z_1) + \omega \\ \dot{\omega} = -\beta\text{sign}(z_1) \end{cases} \quad (9)$$

con α y β valores constantes, para el caso del algoritmo de ganancias fijas convencional.

Puede demostrarse [Shtessel et al. (2014)] que si las funciones del sistema auxiliar f y g cumplen con las condiciones establecidas en (6), entonces los parámetros del controlador α y β pueden ser diseñados para satisfacer las condiciones:

$$\beta > \frac{F}{G_m} \text{ y } \alpha^2 > \frac{2}{G_m^2} \frac{(G_m\beta + F)^2}{(G_m\beta - F)} \quad (10)$$

que garantizan la convergencia en tiempo finito del sistema hacia la superficie de deslizamiento \mathcal{S} . Cabe destacar que dichas condiciones son únicamente suficientes, por lo que pueden existir valores de α y β que no cumplan con (10), pero igual permitan la convergencia y mantenimiento del sistema en la superficie \mathcal{S} .

Las constantes F , G_m y G_M , cotas del sistema controlado, son obtenidas considerando la peor condición para el sistema perturbado. En este contexto, principalmente en su implementación práctica, los parámetros del controlador β y α suelen ser sobredimensionadas, con el objetivo de asegurar la estabilidad del sistema frente a posibles perturbaciones esporádicas.

Dicho sobredimensionamiento de los parámetros, en combinación con las limitaciones propias del sistema real, tienden inevitablemente a un incremento del *chattering* resultante del controlador. Por este motivo, suele ser necesario un mecanismo de adaptación de ganancias, que permita reducir los parámetros del controlador, sin desatender el rechazo del controlador a posibles perturbaciones del sistema.

3. Adaptación de ganancias para controlador por MDSO ST

En esta sección se presenta el mecanismo de adaptación de ganancias propuesto, como una capa superior del controlador por MDSO ST desarrollado anteriormente. Su principio de funcionamiento se basa en la modificación de las ganancias α y β , cuando la cantidad de cruces por cero de la variable de deslizamiento cumple con un determinado criterio.

Luego de presentada la ley de adaptación, se realizará el estudio y análisis de la estabilidad del algoritmo propuesto. A partir de esto, se determinarán las condiciones suficientes para garantizar la operación segura del controlador desarrollado. Seguidamente, se realizará una estimación de la superficie real de deslizamiento. Por último, se comentarán algunas nociones básicas para el diseño de los parámetros del algoritmo propuesto.

3.1. Ley de adaptación de ganancias.

Como ya se comentó anteriormente, la ley de adaptación propuesta para el algoritmo por MDSO ST tiene como principal objetivo reducir la amplitud del *chattering* del sistema en condiciones normales de funcionamiento, sin desatender el rechazo a perturbaciones. Su principio de funcionamiento se basa en la idea de que la frecuencia de conmutación limitada de los actuadores del sistema no permiten que el controlador MDSO ST alcance idealmente a la superficie de deslizamiento \mathcal{S} . De hecho, las trayectorias del sistema controlado permanecen confinadas dentro de una región entorno a \mathcal{S} , usualmente conocida como superficie de deslizamiento real \mathcal{S}_R , donde las oscilaciones de alta frecuencia quedan contenidas.

Partiendo de esta idea básica, el algoritmo propuesto computa la cantidad de cruces por cero $N_k(z_1)$, de la variable de deslizamiento, en un determinado intervalo de tiempo \mathcal{T}_k . De esta manera, la operación del sistema sobre el regimen real de MD es asumida cuando $N_k(z_1)$ es suficientemente grande para satisfacer un determinado criterio de existencia de MD. Dicho criterio es establecido cuando $N_k(z_1)$ es mayor a un valor umbral $\tilde{N} > 0$.

En este marco, la medición del número de cruces por cero en un determinado instante k , $N_k(z_1)$, es computado para cada intervalo de tiempo superpuesto \mathcal{T}_k :

$$\mathcal{T}_k = [kT_a - T, kT_a], \quad T = \tilde{k}T_a \quad (11)$$

donde T_a es el periodo de actuación y el tamaño de ventana T es proporcional a T_a con constante entera positiva \tilde{k} (ver Figura 1).

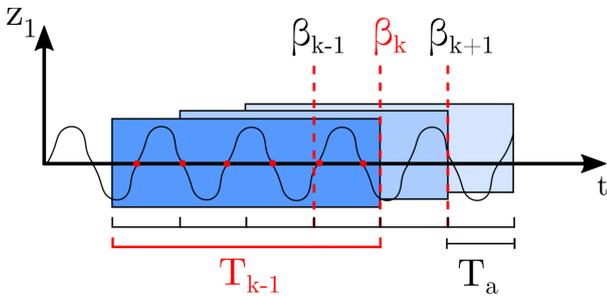


Figura 1: Ilustración del intervalo de tiempo superpuesto \mathcal{T}_k

Así, la estrategia de adaptación de ganancias propuesta consiste en modificar el valor de la ganancia β , cuando $N_k(z_1) > \tilde{N}$. Para ello, primeramente se redefinen los parámetros del controlador α y β , de (9), como:

$$\beta(t) = \beta_k, \quad (12)$$

$$\alpha(t) = \varepsilon \sqrt{\beta_k} \quad (13)$$

para $t \in T_k = [kT_a, (k+1)T_a]$ con $k \in \mathbb{N}_0$, ε constante mayor a cero y el valor umbral $\tilde{N} \geq 3$. El valor del parámetro β en el instante k , β_k , se calcula como:

$$\beta_k = \begin{cases} \text{máx}(\beta_{k-1} - \Lambda T_a, \beta_{\min}), & \text{if } N_{k-1}(z_1) \geq \tilde{N} \\ \text{mín}(\beta_{k-1} + \Gamma T_a, \beta_{\max}), & \text{if } N_{k-1}(z_1) < \tilde{N} \end{cases} \quad (14)$$

para $k \geq \tilde{k}$ y constantes positivas Λ, Γ . Los valores de saturación de β, β_{\min} y β_{\max} son elegidos para satisfacer:

$$0 < \beta_{\min} \leq \beta_{\max} = \gamma \frac{F}{G_m}, \quad \gamma > 1 \quad (15)$$

y el parámetro ε es elegido para cumplir:

$$\varepsilon^2 > \frac{4(\gamma+1)}{G_m(\gamma-1)}. \quad (16)$$

Adicionalmente, para poder obtener una primer medición de $N_{\tilde{k}-1}(z_1)$, la inicialización del algoritmo se realiza asumiendo un valor de β_k constante para los primeros valores:

$$\beta_k = \beta_0, \quad \text{para } k \leq \tilde{k} - 1 \quad (17)$$

donde β_0 cumple con $\beta_{\min} \leq \beta_0 \leq \beta_{\max}$.

3.2. Análisis de estabilidad del algoritmo propuesto.

Assumiendo una condición inicial del sistema alejada de la superficie de deslizamiento \mathcal{S} , dada por $z_1 \neq 0$, se diferencian dos situaciones posibles para la inicialización del algoritmo:

(1) La ganancia del controlador β comienza a incrementar-se a partir del valor inicial β_0 , y por lo tanto también lo hará α , hasta saturar en su valor máximo β_{\max} . Si las condiciones de estabilidad para el algoritmo de ganancias fijas son satisfechas [Levant (1993)] para los valores saturados β_{\max} y α_{\max} , es decir:

$$\beta_{\max} > \frac{F}{G_m} \quad \text{y} \quad (18)$$

$$\alpha_{\max}^2 > \frac{2(\beta_{\max}G_m + F)^2}{G_m^2(\beta_{\max}G_m - F)}, \quad (19)$$

las trayectorias del sistema controlado comenzarán a converger hacia la superficie de deslizamiento.

Para demostrar que α_{\max} cumple con la condición (19), puede notarse que, debido a que los parámetros β_{\max} y ε son elegidos de acuerdo con las condiciones (15) y (16), y además se cumple que el valor máximo de α es igual $\alpha_{\max} = \varepsilon \sqrt{\beta_{\max}}$, se deriva que:

$$\alpha_{\max}^2 = \varepsilon^2 \beta_{\max} > \frac{4\beta_{\max}(\gamma+1)}{G_m(\gamma-1)}. \quad (20)$$

Y, usando el hecho de que debido a la condición: (18):

$$\beta_{\max} > \frac{F}{G_m} \implies 2\beta_{\max}G_m - \beta_{\max}G_m > F \quad (21)$$

$$\implies 2\beta_{\max} > \frac{1}{G_m}(\beta_{\max}G_m + F) \quad (22)$$

el valor de saturación α_{\max} satisface la condición:

$$\alpha_{\max}^2 > \frac{2(\beta_{\max}G_m + F)(\gamma+1)}{G_m^2(\gamma-1)} = \frac{2(\beta_{\max}G_m + F)^2}{G_m^2(\beta_{\max}G_m - F)} \quad (23)$$

definida en (19), que garantiza la convergencia de las trayectorias del sistema hacia \mathcal{S} .

Esto implica que las trayectorias eventualmente cruzarán $z_1 = 0$ y el número de cruces por cero $N_k(z_1)$ comenzará a incrementar su valor. Por lo tanto, en determinado instante de tiempo, definido para algún $k = k_1$, el algoritmo cumplirá la condición:

$$N_{k_1}(z_1) \geq \tilde{N} \quad (24)$$

Es interesante notar que, idealmente, si los parámetros de control se encuentran saturados en su valor máximo y las condiciones dadas por (18) son satisfechas, eventualmente las trayectorias del sistema alcanzarán la superficie de deslizamiento S y el número de cruces por cero de la variable de deslizamiento $N_k(z_1)$ tenderá a infinito (condición de existencia ideal del MD).

(2) La segunda situación posible ocurre cuando el sistema alcanza la condición (24), para algún instante de tiempo definido por $k = k_1$, antes de que los parámetros saturen en su valor máximo.

Luego de que la condición $N_{k_1}(z_1) \geq \tilde{N}$ es satisfecha, el algoritmo de adaptación de ganancias comenzará a reducir la ganancia del controlador β , de acuerdo a (14). Dicha reducción continuará hasta algún instante de tiempo $k = k_2$, cuando la condición $N_{k_2}(z_1) \geq \tilde{N}$ deje de ser válida. De esta manera, la idea general del diseño del algoritmo es determinar el valor de β_{k_2} , tal que permite restaurar la condición (24) un periodo de tiempo T_a después, es decir $N_{k_2+1}(z_1) \geq \tilde{N}$. Lo anterior implica que la condición (24) es satisfecha en $k = k_2 - 1$, un periodo de tiempo anterior a ser violada, y también se deberá cumplir para $k = k_2 + 1$, un periodo posterior.

Por otro lado, la condición $\beta > \frac{F}{G_m} > |\eta(t)|$ es necesaria para garantizar el cruce por cero de la variable de deslizamiento z_1 [Shtessel et al. (2014)]. Es decir que, si se cumple que $N_k(z_1) \geq \tilde{N}$, entonces al menos uno de los parámetros de control β en el intervalo de tiempo \mathcal{T}_k (esto es, $\beta_{k-\tilde{k}}, \dots, \beta_{k-1}$; ver Figura 1), necesariamente tendrá que dominar la cota superior de $|\eta(t)|$ sobre \mathcal{T}_k . Notar que β_k no es aplicado sobre \mathcal{T}_k , sino durante \mathcal{T}_{k+1} .

De esta manera, se cumple que:

$$\max \{\beta_{k-\tilde{k}}, \dots, \beta_{k-1}\} > |\eta(t)| \quad \text{para algún } t \in \mathcal{T}_k. \quad (25)$$

Más aún, todos los parámetros β , aplicados durante el intervalo \mathcal{T}_k , se encuentran acotados por:

$$\beta_{k-\tilde{k}} + (\tilde{k} - 1)\Gamma T_a \geq \max \{\beta_{k-\tilde{k}}, \dots, \beta_{k-1}\} \quad (26)$$

$$\geq \min \{\beta_{k-\tilde{k}}, \dots, \beta_{k-1}\} \quad (27)$$

$$\geq \beta_{k-\tilde{k}} - (\tilde{k} - 1)\Lambda T_a \quad (28)$$

En particular, combinando las condiciones (25)-(28), puede derivarse que los parámetros β_{k_2-2} y β_{k_2} tendrán que satisfacer:

$$\beta_{k_2-2} + (\tilde{k} - 1)(\Gamma + \Lambda)T_a > |\eta(t)|, t \in \mathcal{T}_{k_2-1} \quad (29)$$

$$\beta_{k_2} + (\tilde{k} - 1)(\Gamma + \Lambda)T_a > |\eta(\tau)|, \tau \in \mathcal{T}_{k_2+1}. \quad (30)$$

Por otro lado, a partir de la condición (8) requerida para el sistema auxiliar bajo estudio, se desprende que $|\eta(t)|$ se encuentra acotado por:

$$-Pdt \leq d\eta \leq Pdt \quad (31)$$

$$\implies -P \int_t^\tau dt \leq \int_{\eta(t)}^{\eta(\tau)} d\eta \leq P \int_t^\tau dt \quad (32)$$

$$\implies |\eta(\tau)| - |\eta(t)| \leq |\eta(\tau) - \eta(t)| \leq P|\tau - t| \quad (33)$$

$$\implies |\eta(\tau)| \leq |\eta(t)| + P|\tau - t| \leq |\eta(t)| + PT_a(\tilde{k} + 2). \quad (34)$$

Siguiendo con esta línea, y considerando la condición (29), resulta:

$$\beta_{k_2-2} + PT_a(\tilde{k} + 2) + (\tilde{k} - 1)(\Gamma + \Lambda)T_a > |\eta(\tau)|. \quad (35)$$

Por lo tanto, es posible establecer el valor de β_{k_2} con el objetivo de satisfacer la condición (30), de la forma:

$$\beta_{k_2} > \beta_{k_2-2} + PT_a(\tilde{k} + 2). \quad (36)$$

Para finalizar, es posible relacionar los valores de β_{k_2} y β_{k_2-2} , considerando la ley de adaptación propuesta en (14). Por lo tanto, notando que el parámetro β_{k_2-1} es reducido y β_{k_2} es incrementado, se puede establecer la siguiente relación entre ambos parámetros:

$$\begin{cases} \beta_{k_2-1} = \beta_{k_2-2} - T_a\Lambda \\ \beta_{k_2} = \beta_{k_2-1} + T_a\Gamma \end{cases} \implies \beta_{k_2} = \beta_{k_2-2} + T_a(\Gamma - \Lambda). \quad (37)$$

Y finalmente, combinando la relación (37) y la condición (36), si el parámetro de adaptación Γ es elegido para satisfacer:

$$T_a(\Gamma - \Lambda) > PT_a(\tilde{k} + 2) \implies \Gamma > (\tilde{k} + 2)P + \Lambda, \quad (38)$$

la condición (24) será restablecida luego de un periodo de tiempo T_a .

3.3. Estimación de la superficie de deslizamiento real de segundo orden.

Para finalizar las demostraciones, se realizará una estimación de la superficie real de deslizamiento S_R , donde las oscilaciones de alta frecuencia quedarán contenidas.

En primer lugar, debe notarse que si se cumple la condición de número de cruces por cero $N_k(z_1) \geq \tilde{N}$, con $\tilde{N} \geq 3$, en algún intervalo de tiempo \mathcal{T}_k entonces, por el Teorema de Rolle, $\dot{z}_1 = z_2$ deberá cruzar aunque sea dos veces la condición $z_2 = 0$ en dicho intervalo. De esta manera, considerando la operación del sistema de control en una región suficientemente cercana al origen, puede definirse la variable auxiliar ξ , tal que su primera derivada:

$$\dot{\xi} = f(z, u) + g(z)\dot{\omega}. \quad (39)$$

Esta definición implica que, cuando la variable de deslizamiento $z_1 = 0$, se cumple que $z_2 = \xi$ (esta definición puede encontrarse más detalladamente en Shtessel et al. (2014)). De esta manera, ξ satisface la desigualdad:

$$\beta_{\min}G_m - F < -\dot{\xi}\text{sign}(z_1) \leq \beta_{\max}G_M + F \quad (40)$$

y mediante simple integración (considerando el análisis sólo para la región $z_1 \geq 0$, sin pérdida de generalidad), se llega a:

$$\xi(t_0) - \xi(t_1) \leq (\beta_{\max}G_M + F)(t_1 - t_0) \quad (41)$$

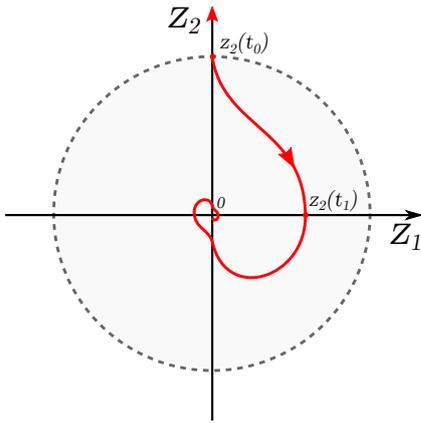


Figura 2: Diagrama de fase para una trayectoria convergente del algoritmo Super-Twisting.

Por lo tanto, tomando como t_0 al valor instantáneo donde se produce el valor máximo en el intervalo \mathcal{T}_k (ver Figura 2), más formalmente $|z_2(t_0)| = \sup_{t \in \mathcal{T}_k} |z_2(t)|$, y considerando $z_2(t_1) = 0$, se tiene que:

$$|z_2(t)| \leq \sup_{t \in \mathcal{T}_k} |z_2(t)| < (\beta G_m - F)(t_1 - t_0). \quad (42)$$

Adicionalmente, si se cumple $N_k(z_1) \geq \tilde{N}$, dado que sobre el intervalo \mathcal{T}_k , con tamaño de ventana T , existen dos cruces por cero y, por lo tanto, se cumple que $(t_1 - t_0) < T$. A partir de esto, puede encontrarse una cota del valor máximo absoluto de z_2 como:

$$|z_2(t)| < (\beta_{max} G_m - F)T = \mu T. \quad (43)$$

Esta expresión estima una cota máxima para la derivada de la variable de deslizamiento en cada intervalo de ventana \mathcal{T}_k . De esta manera, teniendo una cota para la derivada de z_1 , puede obtenerse una cota para z_1 por simple integración, resultando:

$$|z_1(t)| < \mu T^2. \quad (44)$$

Por lo tanto, la superficie de deslizamiento real de segundo orden puede estimarse como:

$$\mathcal{S}_R = \{x \in \mathbb{R}^n : \sigma(x) < \mu T^2, \dot{\sigma}(x) < \mu T\}. \quad (45)$$

Es interesante notar que el tamaño de la superficie resultante depende directamente del parámetro de diseño T . Por lo tanto, deberá existir una relación de compromiso entre el desempeño del algoritmo deseado y el *chattering* del sistema. De esta manera, en la siguiente subsección se darán algunas nociones básicas sobre el diseño de los parámetros del controlador.

3.4. Selección de los parámetros.

En la siguiente sección se discutirán algunas nociones básicas para el diseño de los parámetros del algoritmo *Super-Twisting* con adaptación de ganancias por cruces por cero. En primer lugar, debe verificarse que la estabilidad de la dinámica interna del sistema sobre la superficie de deslizamiento S sea estable (Hernández et al. (2016)). De igual manera, con el objetivo de garantizar la robustez del controlador, las constantes de cota F , G_m , G_M y P deben ser computadas considerando las

posibles perturbaciones e incertidumbres del sistema. A causa de las dificultades de obtener dichas cotas de forma analítica, comúnmente se emplean métodos numéricos para hallarlas (ver Anderson et al. (2019), para un sistema de potencia). Una vez encontradas, los parámetros β_{max} y α_{max} , correspondientes al algoritmo Super-Twisting convencional, pueden ser calculados utilizando las expresiones en (18) y luego ajustados de forma empírica.

Luego de diseñarse los parámetros correspondientes al algoritmo Super-Twisting de ganancias fijas tradicional, los parámetros correspondientes al mecanismo de adaptación propuesto pueden obtenerse de forma independiente. De esta manera, puede comenzarse por seleccionar el tamaño de ventana T , utilizado en la medición de $N_k(z_1)$. La elección de la ventana T está directamente vinculada a la dinámica resultante de parámetro β , siendo dicha dinámica más lenta a mayor tamaño de ventana. De igual manera, la selección del valor umbral \tilde{N} se encuentra sujeta al valor de T , debiendo ser elegidos en conjunto. A mayor tamaño de ventana T , mayor será la cantidad de cruces por cero medidos $N_k(z_1)$, por lo tanto \tilde{N} deberá ser seleccionado de forma acorde. Con el objetivo de contemplar dentro de la sintonización el ruido propio de medida del sistema, una vez definido el tamaño de ventana T , el valor de \tilde{N} puede obtenerse de forma empírica. Un procedimiento habitual para su obtención consiste en la medición de la cantidad de cruces por cero de σ cuando el sistema real opera con el control ST de Ganancias Fijas. De esta manera, la condición de activación del mecanismo de adaptación asegurará la reducción de ganancias cuando el sistema trabaje en condiciones sin perturbaciones.

Por otro lado, el parámetro Λ no posee restricción alguna, en términos de la estabilidad del sistema, y puede ser elegido con libertad. Sin embargo, un valor muy elevado del mismo puede provocar fuertes variaciones en el parámetro β que deteriorará el desempeño del controlador. Por el contrario, el diseño de Γ debe tener un recaudo especial. La condición (38) permite asegurar que si $N_k(\sigma)$ disminuye por debajo de \tilde{N} , se vuelva a cumplir con la condición $N_k(\sigma) > \tilde{N}$ en un tiempo menor a T . Sin embargo, esta condición es muy conservativa y en la práctica puede relajarse para obtener mejores resultados.

4. Resultados de aplicación en sistema de conversión de potencia.

En esta sección, el controlador por MDSO ST con Adaptación de Ganancias propuesto es validado por simulación y, posteriormente, de forma experimental para su aplicación en sistemas electrónicos de potencia. El objetivo principal del controlador será regular la potencia eléctrica suministrada por una fuente de energía a un bus común de tensión fija.

4.1. Sistema de potencia basado en Convertidor CC/CC.

Las diferentes partes del sistema bajo estudio pueden observarse en la Figura 3. Como se aprecia en la figura, el sistema se encuentra compuesto principalmente por un convertidor CC/CC del tipo elevador, conectado a un bus común de tensión fija. La fuente de energía es conectada al convertidor de potencia por medio de un filtro LC. Dicho filtro tiene como principal objetivo reducir la amplitud del rizado en la corriente de la fuente i_s , propia de esta clase de sistemas.

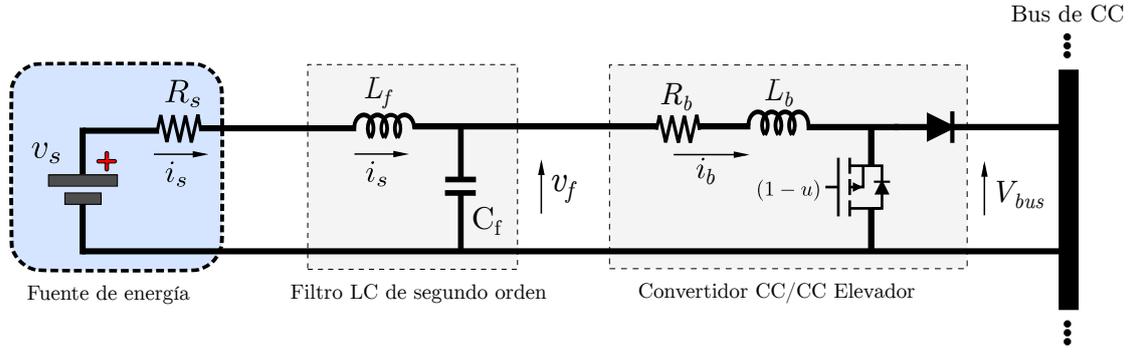


Figura 3: Esquema circuital del sistema de potencia bajo estudio.

Bajo esta estructura particular, el conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento promediado del sistema viene por la ecuación afin al control:

$$\dot{x} = a(x) + b(x)u \quad (46)$$

donde el vector de estados x es:

$$x = [\bar{i}_s \quad \bar{v}_f \quad \bar{i}_b] \quad (47)$$

siendo \bar{i}_s la corriente media sobre la fuente de energía v_s , \bar{v}_f la tensión media sobre el capacitor de filtro de entrada C_f e \bar{i}_b la corriente media sobre el convertidor de potencia. Por otro lado las funciones de estado $a(x)$ y $b(x)$ del sistema se encuentran definidas como:

$$a(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f}v_s - \frac{R_s}{L_f}\bar{i}_s - \frac{1}{L_f}\bar{v}_f \\ \frac{1}{C_f}\bar{i}_s - \frac{1}{C_f}\bar{i}_b \\ \frac{1}{L_b}\bar{v}_f - \frac{R_b}{L_b}\bar{i}_b \end{bmatrix}, \quad b(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{V_{bus}}{L_b} \end{bmatrix}. \quad (48)$$

La acción de control u corresponde al ciclo de trabajo del convertidor, el cual puede modificarse en el intervalo $0 < u_{min} < 1$ cada T_s segundos. El parámetro u_{min} se encuentra limitado por el rango de operación del convertidor CC/CC, evitando su operación en modo de conducción discontinua. Los parámetros que modelan al sistema descrito en (46) se encuentran detallados en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del sistema de potencia

v_s	35V	L_f	140 μ H	C_f	2200 μ F
R_s	50m Ω	R_b	100m Ω	L_b	190 μ H
V_{bus}	75V	f_s	20 kHz		

A partir de la teoría de Modos Deslizantes, el objetivo de control deseado puede expresarse por medio de la variable de deslizamiento σ , como:

$$\sigma = \bar{i}_b - i_{b,r}. \quad (49)$$

donde $i_{b,r}$ es la corriente de referencia del sistema, establecida por un control supervisor externo. Notar que, asumiendo la operación del sistema con una tensión de bus fija, la potencia suministrada por el módulo de potencia resulta directamente proporcional a la corriente \bar{i}_b .

Para la implementación del controlador, los parámetros del algoritmo Super-Twisting propuesto fueron obtenidos de forma numérica, mediante un enfoque similar al empleado en Anderson et al. (2019). Los parámetros obtenidos pueden apreciarse en la Tabla 2, en conjunto con las cotas del sistema.

Tabla 2: Parámetros del MDSO ST con Adaptación de Ganancias propuesto

β_{min}	0,01	Λ	1,25	F	2 kA/s ²
β_{max}	0,2	Γ	2,5	G_m	3e2 kA/s
ε	0.075	T	25 ms	G_M	5,3e2 kA/s

Adicionalmente, con el objetivo evaluar el desempeño y rendimiento del controlador propuesto, se ha implementado un algoritmo Super-Twisting con Ganancias Fijas a modo de comparación. Dicho algoritmo se sintonizó para trabajar con los parámetros β_{max} y α_{max} , que cumplen las condiciones de estabilidad del algoritmo convencional.

4.2. Resultados de simulación del algoritmo MDSO ST con Adaptación de Ganancias

En primer lugar, el desempeño del controlador MDSO ST-AG propuesto para el control del sistema de potencia es validado mediante simulación. Los ensayos propuestos consisten en el seguimiento de una corriente de referencia, $i_{b,r}$, constante, frente a la presencia de una perturbación sinusoidal en el bus de continua. Estos ensayos se realizarán en dos etapas: Primeramente, se asume un escalón de amplitud para la perturbación sinusoidal. Posteriormente, la amplitud de dicha perturbación es modificada de forma lineal, a través de una variación de tipo rampa.

Ambos ensayos fueron replicados para un algoritmo Super-Twisting con adaptación de ganancias, estudiado y validado experimentalmente en la literatura para un sistema de potencia de similares características. Dicho algoritmo, presentando por Boubzizi et al. (2018), utiliza un mecanismo de adaptación de ganancias para el algoritmo Super-Twisting basado en amplitud de la variable de deslizamiento (ST-AVD). De esta manera, los parámetros del algoritmo Super-Twisting, descrito en la Ec. (9), α y β , son redefinidos como:

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} k_1 |\sigma(x)| & \text{si } |\sigma(x)| > \mu \\ 0 & \text{si } |\sigma(x)| \leq \mu \end{cases} \quad (50)$$

con:

$$\beta = k_2 \alpha \quad (51)$$

donde las constantes positivas k_1 y k_2 deben ser seleccionadas para satisfacer las condiciones de estabilidad del algoritmo (Boubzizi et al. (2018)). Por otro lado, el parámetro μ establece la amplitud del *chattering* mínima para la activación del mecanismo de adaptación. En particular, para los ensayos realizados, dichos parámetros fueron sintonizados para obtener esfuerzos de control y velocidades de respuesta similares al algoritmo propuesto.

4.2.1. Primer ensayo de simulación: Perturbación sinusoidal con escalón de amplitud.

La tensión en el bus V_{bus} del primer ensayo puede apreciarse en la Figura 4, donde la perturbación es aplicada de forma transitoria. Dicha perturbación sinusoidal presenta una amplitud máxima del 2% de la tensión del bus, con una frecuencia constante de 25Hz.

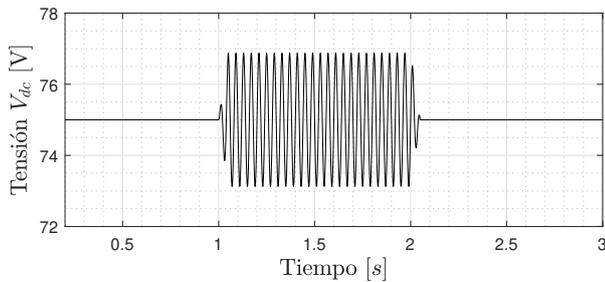


Figura 4: Tensión de bus V_{bus} del primer ensayo.

La respuesta temporal del seguimiento de la corriente es mostrada en la Figura 5. En la figura puede apreciarse como todos los controladores muestran un excelente desempeño en el seguimiento de la referencia impuesta. Sin embargo, en condiciones de operación sin perturbación, ambos controladores MDSO ST con adaptación de ganancias presentan una importante reducción del *chattering* en comparación con el MDSO ST-GF.

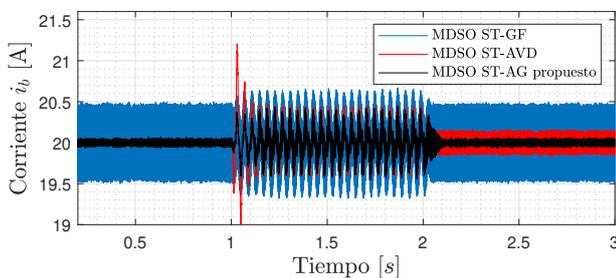


Figura 5: Evolución temporal de la corriente del convertidor i_b .

Por otro lado, cuando la perturbación aparece en el instante 1s., los controladores con adaptación de ganancias incrementan rápidamente los parámetros del control para poder rechazarla. Notese como el controlador propuesto logra una importante mejora en el transitorio, ya que comienza a actuar inmediatamente cuando el número de cruces por cero se ve reducido.

En la Figura 6 se muestra las señales del actuador u impuestas por los controladores. En presencia de la perturbación, todos los controladores aumentan su esfuerzo de control para poder rechazarla adecuadamente. Sin embargo, en ausencia de la misma, puede observarse como los algoritmos con adaptación de ganancias logran reducir efectivamente el esfuerzo de control significativamente. Notese como, naturalmente, el control propuesto logra volver el esfuerzo de control a su mínimo valor luego de extinta la perturbación, debido a que incorpora intrínsecamente un mecanismo de reducción de ganancias.

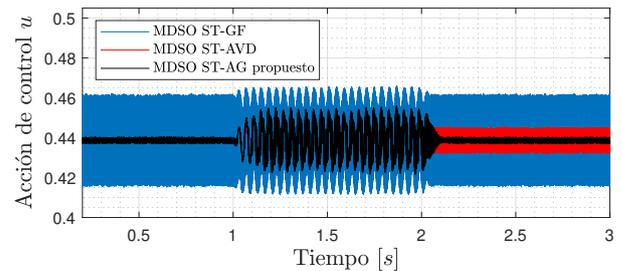


Figura 6: Respuesta temporal de la acción de control u .

Lo anterior puede apreciarse mejor mediante el análisis de la evolución temporal del parámetro β . La variación de β de los algoritmos MDSO ST con Adaptación de Ganancias puede observarse en la Figura 7. Debido a la presencia de la perturbación en V_{bus} a partir del segundo 1, el valor de β es aumentado rápidamente para permitir rechazar la perturbación, a igual tasa de crecimiento. Sin embargo, debido a una condición de existencia de MD más estricta, el algoritmo propuesto alcanza un valor medio de β levemente superior, ya que asegura el cruce por cero de la variable de deslizamiento, σ .

Cabe destacar que, por lo comentado anteriormente, el aumento en el parámetro implica también un incremento del esfuerzo del controlador, por lo que el *chattering* aumenta inevitablemente a costa de mantener la robustez del sistema. Sin embargo, una vez extinta la perturbación, el mecanismo de adaptación propuesto comenzará a reducir β nuevamente, reduciendo una vez más el *chattering* resultante.

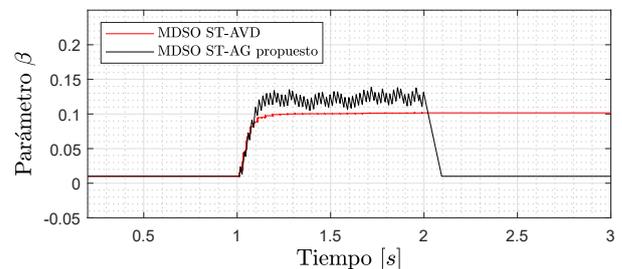


Figura 7: Variación del parámetro β .

Adicionalmente, en la Figura 8 se muestra la evolución de la variable de deslizamiento σ y su primer derivada $\dot{\sigma}$, cuando el sistema ha alcanzado \mathcal{S}_R . Como puede apreciarse en la figura, las trayectorias del sistema quedan completamente confinadas en la vecindad del origen, dentro de la superficie de deslizamiento real \mathcal{S}_R .

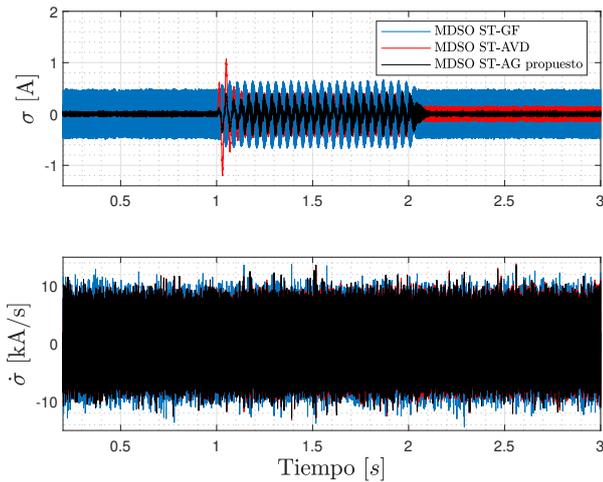


Figura 8: Evolución temporal de la variable de deslizamiento σ y su primer derivada.

4.2.2. Segundo ensayo de simulación: Perturbación con variación de amplitud en rampa.

Para el segundo ensayo por simulación, ahora la amplitud de la perturbación sinusoidal es modificada de forma lineal a partir del 1s. hasta los 3s., para luego saturar en un valor constante. La evolución de la perturbación en la tensión del bus V_{dc} puede apreciarse en la Figura 9. Dicha perturbación sinusoidal presenta una variación en amplitud desde 0% hasta un valor máximo de 3,5% de la tensión del bus, con una frecuencia constante de 20Hz.

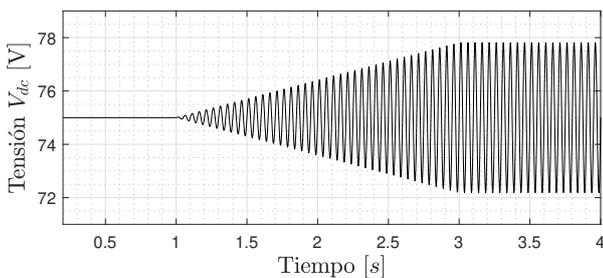


Figura 9: Perturbación en la tensión de bus V_{bus} para el segundo ensayo.

En la Figura 10 se muestra la evolución temporal de la corriente y la robustez lograda por los controladores. Como puede apreciarse, en ausencia de perturbación, los algoritmos con adaptación de ganancias logran una importante reducción de las oscilaciones del controlador. Sin embargo, cuando la perturbación toma valores significativos, los controles por MSDO-ST con adaptación de ganancias se comportan de forma similar al control ST convencional. Notar como, debido a que el algoritmo propuesto no impone a priori una región de amplitud de σ , el *chattering* del controlador se irá incrementando paulatinamente a medida que la perturbación crece.

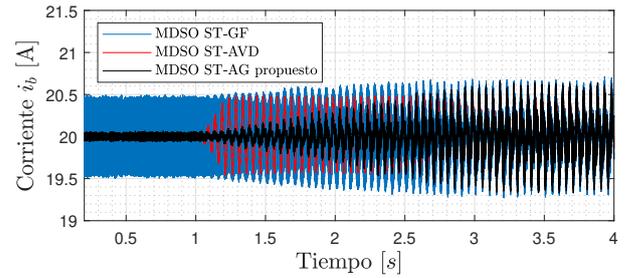


Figura 10: Respuesta temporal de la corriente i_b en el segundo ensayo.

El esfuerzo de control resultante para los diferentes algoritmos pueden observarse en la Figura 11. Como ocurre en el ensayo anterior, en ausencia de perturbaciones ambos algoritmos mantienen el esfuerzo de control al mínimo posible. Sin embargo, a medida que la perturbación incrementa, el esfuerzo de control debe incrementarse también para lograr rechazarla.

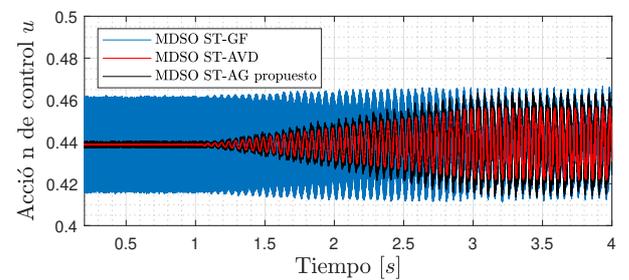


Figura 11: Esfuerzo de control u para ambos controladores ensayados.

La variación del parámetro β se presenta en la Figura 12 para ambos mecanismos de adaptación. Puede observarse como ambos algoritmos irán aumentando el parámetro β , de forma gradual, según la amplitud de la perturbación. Al igual que en el ensayo anterior, debido a un criterio de existencia de MD real más estricto, el parámetro β del algoritmo propuesto es levemente superior al algoritmo por MDSO ST-AVD. Dicho criterio de existencia de MD implica un valor de *chattering* variable, dependiente del tamaño de la perturbación.

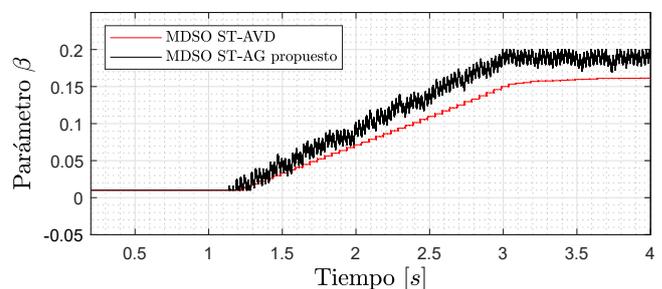


Figura 12: Variación del parámetro β en el segundo ensayo.

Para finalizar, la Figura 13 muestra la variable de deslizamiento σ y su primer derivada $\dot{\sigma}$ para el segundo ensayo. Como puede apreciarse, al igual que en primer ensayo, el sistema se mantiene operando en todo momento dentro de la región que limita la superficie de deslizamiento real de segundo orden.

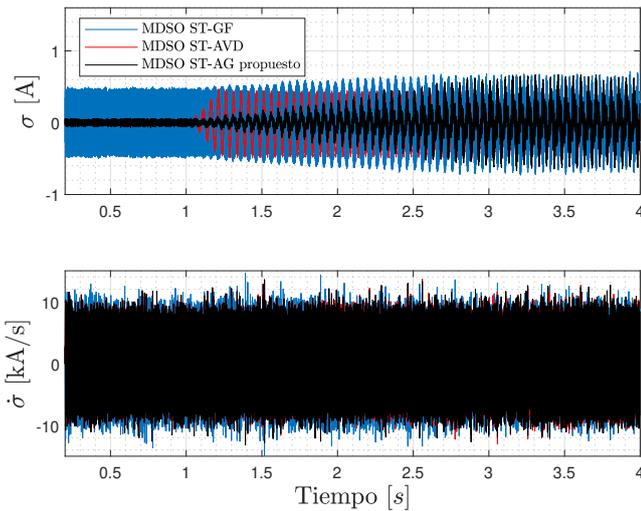


Figura 13: Evolución temporal de la variable de deslizamiento σ y su derivada $\dot{\sigma}$ en el segundo ensayo.

4.3. Validación experimental

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos para el sistema de potencia bajo estudio. El ensayo realizado consistió en la generación de una perturbación sinusoidal, de frecuencia variable, sobre la tensión del bus común. De esta manera, la frecuencia de la perturbación fue incrementada gradualmente, desde un valor de 0 a 20Hz, manteniendo su amplitud constante.

En la Figura 14 se muestra la regulación de la corriente i_b del convertidor para ambos controladores. Como puede apreciarse, en ausencia de perturbaciones (desde 0 a 10s.), el controlador por MDSO ST con Adaptación de Ganancias logra obtener una importante reducción del *chattering* en la corriente, mayor al 50 %.

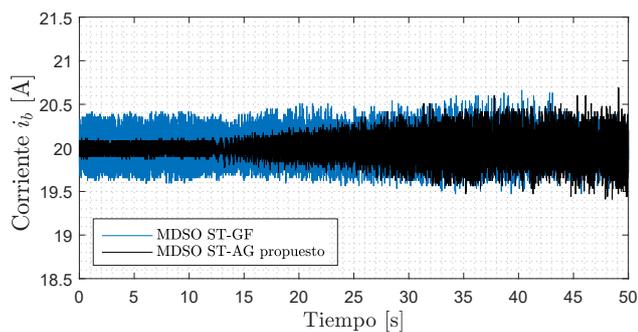


Figura 14: Respuesta temporal del controlador propuesto al sistema de potencia bajo una perturbación variable.

Sin embargo, a medida que la frecuencia de la perturbación va aumentando gradualmente (desde 10 a 50s.), ambos algoritmos requieren un mayor esfuerzo de control para poder rechazarla. Por lo tanto, para mantener las características de robustez deseadas del algoritmo Super-Twisting convencional, el algoritmo con adaptación de ganancias propuesto deberá necesariamente ir incrementando los parámetros del controlador MDSO ST con adaptación.

Esto último puede apreciarse en la Figura 15, donde se muestra la variación temporal del parámetro β para el control por MDSO ST con adaptación propuesto. En general, a medida que la frecuencia de la perturbación va aumentando, el mecanismo de adaptación requerirá incrementar, a su vez, también el valor de β .

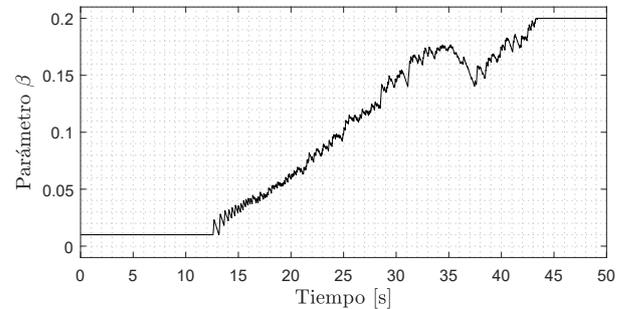


Figura 15: Variación temporal del parámetro β del algoritmo por MDSO ST con adaptación propuesto.

Cabe destacar que, si bien el valor mínimo de β parece obtener un excelente comportamiento en términos de *chattering*, β_{min} no es un valor que pueda emplearse en la práctica para el ST de ganancias fijas. Esto se debe a que dicho valor no cumple con las condiciones de estabilidad propias del algoritmo, derivando en un comportamiento inestable del sistema en presencia de las perturbaciones analizadas.

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso un mecanismo de adaptación de ganancias para el control por Modos Deslizantes de Segundo Orden Super-Twisting. En particular, se presentó el análisis teórico de la estabilidad del algoritmo propuesto, estableciendo las condiciones necesarias para garantizar la operación segura del sistema controlado. De igual manera, se presentó una estimación de la superficie de deslizamiento real, donde las oscilaciones de alta frecuencia se encuentran contenidas. Adicionalmente, se establecieron nociones básicas sobre la selección de los parámetros del algoritmo de control.

El controlador propuesto fue evaluado para su aplicación en un sistema de potencia basado en un convertidor CC/CC. En primer lugar, el sistema controlado fue ensayado por simulación, donde se verificó el rechazo a perturbaciones en el bus común de tensión continua. Las simulaciones mostraron cómo el mecanismo de adaptación, frente a la presencia de perturbaciones sinusoidales, permite garantizar la robustez del sistema incrementando el valor de los parámetros del controlador gradualmente.

Por último, el algoritmo fue implementado en una plataforma experimental de 700W. En condiciones con bajos niveles de perturbación en la tensión del bus, los resultados mostraron como el algoritmo propuesto permite obtener una significativa reducción del *chattering* del sistema, en comparación con el algoritmo tradicional *Super-Twisting* de Ganancias Fijas.

Acknowledgment

Este trabajo fue realizado bajo el apoyo de la FI-UNLP, CONICET y Agencia I+D+i. El trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto nacional de España DOVELAR ref. RTI2018-096001-B-C32 (MCIU/AEI/FEDER, UE), la Agencia Nacional de Investigación de España a través del Sello de Excelencia María de Maeztu al IRI (MDM-2016-0656) y la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP).

Referencias

- Anderson, J., Moré, J., Puleston, P., 2019. Design and stability analysis of a super-twisting controller for a PS-FBC-based fuel cell module. *Advanced Control for Applications 1*. doi:10.1002/adc2.19.
- Bartolini, G., Ferrara, A., Levant, A., Usai, E., 1993. On second order sliding mode controllers, in: *VSS, SM and Nonlinear Control.*, pp. 329–350. doi:10.1007/BFb0109984.
- Bartolini, G., Levant, A., Plestan, F., Taleb, M., Punta, E., 2013. Adaptation of sliding modes. *IMA JMCI* 30. doi:10.1093/imamci/dns019.
- Boiko, I., Fridman, L., Pisano, A., Usai, E., 2007. Performance analysis of second-order sliding-mode control systems with fast actuators. *IEEE Transactions on Automatic Control* 52, 1053–1059. doi:10.1109/TAC.2007.899090.
- Boubzizi, S., El Sied, M., Bester, J.E., Mabwe, A.M., 2018. Cascaded Adaptive Super Twisting controller for DC/DC converters in electrical vehicle applications, in: *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2007–2014. doi:10.1109/IECON.2018.8591380.
- Derbeli, M., Barambones, O., Ramos-Hernanz, J.A., Sbita, L., 2019. Real-time implementation of a super twisting algorithm for pem fuel cell power system. *Energies* 12. doi:10.3390/en12091594.
- Edwards, C., Shtessel, Y., 2019. Enhanced continuous higher order sliding mode control with adaptation. *Journal of the Franklin Institute* 356, 4773–4784. doi:10.1016/j.jfranklin.2018.12.026.
- Fridman, L., Moreno, J., Bandyopadhyay, B., Kamal, S., Chalanga, A., 2015. *Continuous Nested Algorithms : The Fifth Generation of Sliding Mode Controllers*. Springer, Cham. volume 24. chapter 1. pp. 5,35.
- Gonzalez, T., Moreno, J.A., Fridman, L., 2012. Variable Gain Super-Twisting Sliding Mode Control. *IEEE TAC* 57, 2100. doi:10.1109/TAC.2011.2179878.
- Hernández, D., Castaños, F., Fridman, L., 2016. Zero-dynamics design and its application to the stabilization of implicit systems. *Systems & Control Letters* 98, 74–78. doi:10.1016/j.sysconle.2016.10.008.
- Hidalgo, H., Huerta, H., 2021. Control por modos deslizantes para vehículo eléctrico con velocidad diferencial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18, 115–124. doi:10.4995/riai.2020.13440.
- Kunusch, C., Puleston, P.F., Mayosky, M.A., 2008. Estudio de Algoritmos 2-Deslizantes Aplicados al Control de Pilas de Combustible. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* doi:10.1016/S1697-7912(08)70161-4.
- Levant, A., 1993. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International Journal of Control* 58, 1247–1263. doi:10.1080/00207179308923053.
- Luo, D., Xiong, X., Jin, S., Kamal, S., 2018. Adaptive gains of dual level to super-twisting algorithm for sliding mode design. *IET Control Theory Applications* 12, 2347–2356.
- Pisano, A., Tanelli, M., Ferrara, A., 2012. Time-based switched sliding mode control for yaw rate regulation in two-wheeled vehicles, in: *2012 CDC*, pp. 5028–5033. doi:10.1109/CDC.2012.6426311.
- Pisano, A., Tanelli, M., Ferrara, A., 2016. Switched/time-based adaptation for second-order sliding mode control. *Automatica* 64, 126 – 132. doi:10.1016/j.automatica.2015.11.006.
- Rakhtala, S.M., Casavola, A., 2022. Real-time voltage control based on a cascaded super twisting algorithm structure for dc-dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 69, 633–641. doi:10.1109/TIE.2021.3051551.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A., 2014. *Sliding Mode Control and Observation*. Springer New York. doi:10.1007/978-0-8176-4893-0.
- Shtessel, Y., Taleb, M., Plestan, F., 2012. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica* 48, 759 – 769. doi:https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.024.
- Silva-Ortigoza, R., Sira-Ramírez, H., Hernández-Guzmán, V.M., 2008. Control por Modos Deslizantes y Planitud Diferencial de un Convertidor de CD/CD Boost: Resultados Experimentales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 5, 77–82.
- Terán, R., Pérez, J., Beristáin, J., Cárdenas, V., 2020. Sintonización del controlador en cascada PI-STA para aplicaciones de filtros activos de potencia. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 17, 130–143. doi:10.4995/riai.2020.12403.
- Utkin, V., Poznyak, A., Orlov, Y., Polyakov, A., 2020. *Road Map for Sliding Mode Control Design*. Springer. doi:10.1007/978-3-030-41709-3.
- Utkin, V.I., Poznyak, A.S., 2013. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method. *Automatica* 49, 39 – 47. doi:10.1016/j.automatica.2012.09.008.