

Algoritmo *Super-twisting* con *Anti-windup* para Control de un Convertidor de Energía Undimotriz

1st Facundo D. Mosquera

LEICI - Instituto de Investigaciones en Electrónica,
Control y Procesamiento de Señales - UNLP - CONICET
La Plata, Buenos Aires, Argentina
facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar

2nd Nicolás Faedo

Marine Offshore Renewable Energy Lab (MORE)
Department of Mechanical and
Aerospace Engineering, Politecnico di Torino
Torino, Italia

3rd Paul F. Puleston

LEICI - Instituto de Investigaciones en Electrónica,
Control y Procesamiento de Señales - UNLP - CONICET
La Plata, Buenos Aires, Argentina

4th Carolina A. Evangelista

LEICI - Instituto de Investigaciones en Electrónica,
Control y Procesamiento de Señales - UNLP - CONICET
La Plata, Buenos Aires, Argentina

Resumen—En el ámbito de control, la extracción de energía undimotriz ha ganado creciente interés en los últimos años. Desarrollar estrategias de control que maximicen la extracción de energía es crucial para alcanzar la comercialización de los convertidores de energía de las olas. En este trabajo, se presenta una estrategia de control que combina un término de control óptimo basado en momentos, que define la acción de control que maximiza la conversión de energía en condiciones nominales y proporciona una referencia de velocidad óptima. El seguimiento robusto a esta referencia se garantiza mediante un lazo de control con características de robustez basado en *Super-twisting*, de la familia de los modos deslizantes de segundo orden, con una adaptación para trabajar con actuadores que tienen limitaciones de saturación. Los resultados obtenidos mediante simulación demuestran la efectividad de la estrategia de control desarrollada.

Palabras Clave—Energía undimotriz, Control óptimo basado en momentos, Control por modos deslizantes de segundo orden, *Super-twisting* con anti-windup.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de la energía de las olas aún se encuentra en fase de desarrollo a nivel mundial. Según estimaciones basadas en modelos de viento y oleaje, el potencial teórico global del recurso es de aproximadamente 3 TW de potencia disponible [1], lo que equivale a una generación anual de 29500 TWh según la Agencia Internacional de Energía Renovable [2]. Es relevante destacar que la producción mundial de energía primaria en 2022, considerando todas las fuentes de energía, fue de 28527 TWh [3]. No obstante, al considerar la instalación de sistemas de energía undimotriz, es esencial realizar relevamientos locales y mediciones específicas del recurso para determinar su potencial real [4].

El papel de Argentina en esta transición energética resulta altamente interesante, especialmente debido a que en momentos en que una tecnología, como la de extracción de energía undimotriz, se encuentra en desarrollo, los países semiperiféricos tienen una oportunidad única para reducir la

brecha tecnológica al adoptar tecnologías que aún no han alcanzado todo su potencial y que todavía tienen un largo camino por recorrer hasta su completa madurez [5], [6].

En este marco, este trabajo se enfoca en el desarrollo de una estrategia de control automático que busca maximizar la extracción de energía en un convertidor de energía de olas, teniendo en cuenta sus límites físicos de operación. Esta estrategia de control combina una técnica de control óptimo basada en momentos, que calcula la acción de control y el movimiento óptimo del dispositivo en función de la fuerza que le está aplicando la ola, con un lazo de control que asegura que el equipo funcione de manera robusta de acuerdo con la referencia óptima de movimiento calculada. En este sentido, se ha utilizado modos deslizantes para el lazo de control robusto, y por esta razón, la estrategia ha sido denominada como *Sliding Mode Moment-based Control* (SM²C).

La estrategia SM²C, que incorpora para el lazo de seguimiento al algoritmo *Super-twisting*, perteneciente a la familia de los modos deslizantes de segundo orden, ha sido presentada y validada en entornos de simulación [7], así como en un sistema *hardware-in-the-loop* [8]. El propósito de este trabajo es extender esta estrategia de control y con el objetivo de poder probarla en un tanque de olas utilizando prototipos similares al *Wavestar* [9], que fueron empleados para generar la base de datos SWELL [10], [11].

El algoritmo *Super-twisting* (STA) es un conocido método de control de modos deslizantes de segundo orden, que ha sido aplicado con éxito en sistemas afectados por ciertas perturbaciones (Lipschitz continuas con respecto al tiempo) [12], [13]. Se aplica a sistemas de grado relativo uno con respecto a la entrada de control y tiene la ventaja de prescindir de la medición de la derivada de la función de deslizamiento, que para otros algoritmos de la familia de los modos deslizantes de segundo orden si es necesaria [14].

En el caso en el que la entrada de control es aplicada a través de un actuador que satura, la señal generada por el controlador *Super-twisting* convencional puede exceder los

límites de saturación. Esto da lugar al efecto de *windup* debido a la acción integral del controlador. Para mitigar o evitar este efecto en el algoritmo *Super-twisting*, se han propuesto diversas soluciones en la literatura [13], [15]–[17]. Entre las distintas opciones, en este trabajo, se opta por utilizar la adaptación presentada en [13], ya que se trata de una solución compacta y de fácil implementación.

Por lo tanto, el propósito de este trabajo es mostrar la adaptación realizada a la estructura de control SM²C, incorporando el término de seguimiento *Super-twisting* para su utilización con actuadores que presentan saturación. El resto del trabajo se presenta de la siguiente manera: en la Sección II se describe la obtención del modelo del prototipo bajo estudio a través de una identificación. En la Sección III se presenta la estructura de control SM²C con el agregado del término de *anti-windup* (AW). Los resultados con esta estructura de control son mostrados en la Sección IV y las conclusiones del trabajo se presentan en la Sección V.

II. MODELO

El sistema que se desea controlar en este trabajo es un prototipo a escala 1:20 de un convertidor de energía undimotriz (WEC) tipo *Wavestar* (ver Figura 1). Para obtener el modelo del sistema, se lleva a cabo una identificación tipo caja negra, siguiendo el enfoque propuesto por [18], con el fin de relevar las dinámicas relevantes para el diseño del control. Esta identificación permite capturar las características clave del sistema y proporcionar la base necesaria para el diseño de estrategias de control efectivas.

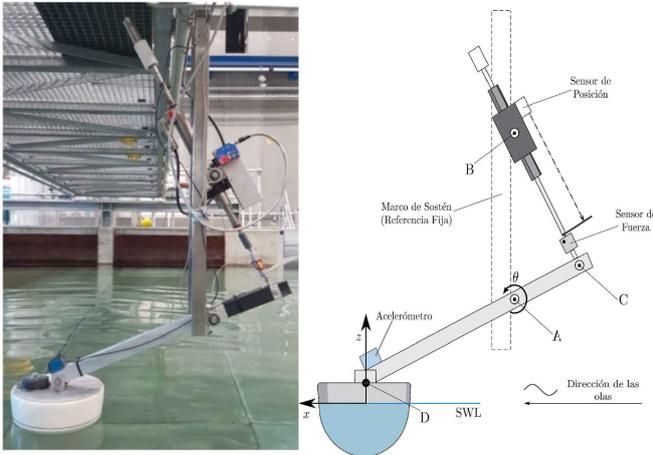


Fig. 1. Prototipo escala 1:20 del dispositivo *Wavestar* (izquierda) y esquema del mismo (derecha).

Cabe mencionar que se podría haber realizado un modelo a partir de calcular una caracterización numérica basada en métodos de elementos de contorno (BEM) a partir de la teoría potencial lineal [19], sin embargo, tal como se menciona en [18], ese enfoque solamente se concentra en la hidrodinámica, ignorando cualquier característica física no lineal asociada a la naturaleza experimental del sistema, como los efectos de fricción en el sistema de extracción de potencia (PTO) que

generan zonas muertas para el movimiento del dispositivo (ver [10]).

Para el experimento de identificación se diseña en primer instancia un conjunto de señales de entrada (cuplas) de tipo chirp, f_{ID} , cuyas amplitudes se varían entre experimentos pero siempre se generan en un rango de frecuencia $\mathcal{W}_{ID} = [\omega_i, \omega_f] \subset \mathbb{R}^+$ con $\omega_i > \omega_f$, creando de esta manera una señal chirp descendente. El uso de una chirp descendente en vez de la más comúnmente utilizada chirp ascendente es porque se considera que de esta manera se minimiza el efecto de las olas radiadas en los resultados experimentales, como se menciona en [18], [20].

Una vez definida la entrada conocida al sistema, se procede a realizar el experimento de identificación de la siguiente manera: En agua calma, es decir, sin la presencia de olas en el tanque, se aplica la entrada diseñada a través del sistema PTO, midiendo, como señal de interés a la salida, la velocidad producida por el dispositivo, v_{ID} . Con esta información se genera una caracterización no paramétrica en el dominio de la frecuencia, a partir de calcular la estimación de la función de transferencia empírica promedio (EFTE) [21] de la forma:

$$\begin{aligned} \bar{G}_\theta(j\omega) &= \frac{1}{N} \sum_{p \in \mathcal{N}_N} \tilde{G}_\theta^p(j\omega). \\ \tilde{G}_\theta^p(j\omega) &= \frac{V_{ID}^p(j\omega)}{F_{ID}^N(j\omega)}, \end{aligned} \quad (1)$$

con $\bar{G}_\theta(j\omega) \in \mathbb{C}^N$ y $\tilde{G}_\theta^p(j\omega) \in \mathbb{C}^N$ donde el superíndice p indica que esa EFTE está asociada a la amplitud de la chirp A_p .

Una vez calculada $\bar{G}_\theta(j\omega)$, se pueden utilizar técnicas estándar de identificación de sistemas para aproximar el operador de respuesta correspondiente. En este caso, se utilizan técnicas basadas en subespacios (ver [22]), que proporcionan un modelo en el espacio de estados en tiempo continuo, de dimensión finita y estrictamente propio

$$G_\theta \approx G_{ID-\theta} \equiv \begin{cases} \dot{x} &= Ax + B(f_\theta + u), \\ \nu_\theta &= Cx, \end{cases} \quad (2)$$

donde x son los estados de una identificación tipo caja negra, f_θ es la cupla de excitación, u es la cupla de control, ν_θ es la velocidad angular y la salida del sistema, y la terna $(A, B, C) \in \mathbb{R}^{n \times n} \times \mathbb{R}^{n \times N} \times \mathbb{R}^{N \times n}$ es mínima, y el sistema (2) es asintóticamente estable.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de Bode correspondiente a la función de transferencia empírica promedio del dispositivo identificado, calculado para cada experimento realizado (líneas verdes con transparencia), junto con la respuesta característica del modelo identificado $G_{ID-\theta}$ (línea punteada gris). Además, en la misma figura se presenta la respuesta en frecuencia del modelo pasivado (línea negra sólida). La pasivación del sistema se lleva a cabo siguiendo la metodología propuesta en [22], con el objetivo de cumplir con la condición de positividad real. Esta condición es fundamental para garantizar la existencia y unicidad de las soluciones de

maximización de energía utilizando la teoría de momentos en el cálculo del control óptimo.

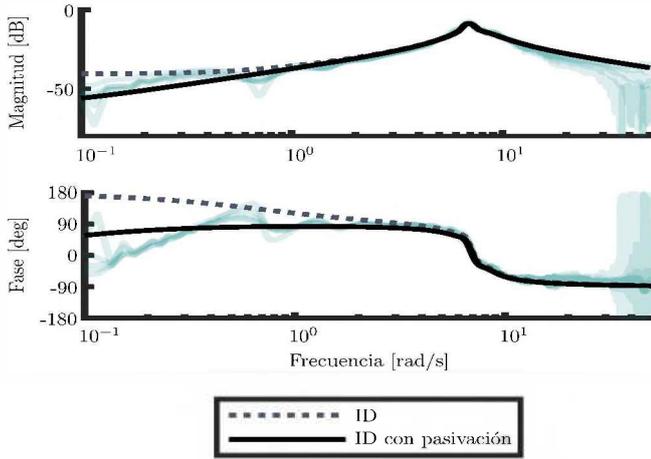


Fig. 2. Diagrama de bode de la respuesta en frecuencia para la función de transferencia empírica promedio.

III. ESTRATEGIA DE CONTROL

En esta sección se presenta el esquema de control SM²C con AW, y un diagrama de esta estrategia de control puede observarse en la Figura 3, en donde se identifican los bloques de control que se describen en esta sección, es decir, el control óptimo basado en momentos y el algoritmo *Super-twisting* con *Anti-windup*.

La estrategia de control SM²C está compuesta por dos términos:

$$u = u_{\text{opt}} + u_{STA}, \quad (3)$$

el primero, u_{opt} , es un término de control óptimo, calculado para maximizar la extracción de energía del WEC en condiciones de operación nominales. El segundo, u_{STA} , es un término que permite el seguimiento robusto de referencias, que asegura que el sistema se mantendrá en las condiciones para las que se calculó la maximización a pesar de la incertidumbre del sistema y las posibles perturbaciones.

A. Diseño del término de control óptimo

En la extracción de energía undimotriz, el diseño de control óptimo implica proponer un criterio de maximización que busca absorber la mayor cantidad posible de energía de las olas del océano en intervalos finitos de tiempo $\mathcal{T} = [kT, (k+1)T] \subset \mathbb{R}^+$, $k \in \mathbb{N}$. La energía absorbida de las olas se convierte en energía del sistema PTO, y puede calcularse directamente como la integral en el tiempo de la potencia instantánea convertida. Por lo tanto, este procedimiento de control se puede plantear como un problema de control óptimo con la función objetivo $\mathcal{J} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ definida por:

$$\mathcal{J}(u_{\text{opt}}) = \frac{1}{T} \int_{\mathcal{T}} u_{\text{opt}}(\tau) \nu_{\theta}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

donde $u_{\text{opt}} : \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}$ es la fuerza de control del PTO. El conjunto de restricciones se puede plantear como:

$$\mathcal{C} : \begin{cases} |\nu_{\theta}(t)| \leq V_{\max}, \\ |u_{\text{opt}}(t)| \leq U_{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

donde $t \in \mathcal{T}$, y $\{V_{\max}, U_{\max}\} \subset \mathbb{R}^+$.

Con la función objetivo definida en (4) y el conjunto de restricciones de estado definido en (5), el problema de control óptimo (OCP) se puede plantear como:

$$\begin{aligned} u_{\text{opt}} &= \arg \max_{u \in \mathcal{U}} \mathcal{J}(u), \\ \text{sujeto a:} & \begin{cases} \text{dinámica del WEC } G_{\theta}, \\ \text{restricciones de estados y entrada } \mathcal{C}, \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

donde \mathcal{U} indica el conjunto de entradas admisibles y el sistema G_{θ} describe la dinámica de movimiento del dispositivo, es decir, la ecuación (2).

La técnica basada en momentos se emplea para expresar la respuesta del sistema en estado estacionario en términos de momentos, que son soluciones específicas de una ecuación invariante. Esta técnica permite traducir el problema de maximización de energía, que tiene dimensiones infinitas, a un programa de optimización de dimensiones finitas. En el marco del control óptimo basado en momentos descrito en esta sección, el problema de maximización de energía se transforma en un programa cuadrático (QP) estrictamente cóncavo [23], lo que garantiza de forma sistemática una única solución para el objetivo de maximizar la energía. Además, esta solución cumple simultáneamente con las restricciones impuestas en la entrada de control y en los estados [24].

Este enfoque tiene un impacto significativo en la viabilidad práctica del control basado en momentos, ya que facilita el uso de sistemas de cálculo QP, resultando en una solución de control computacionalmente eficiente.

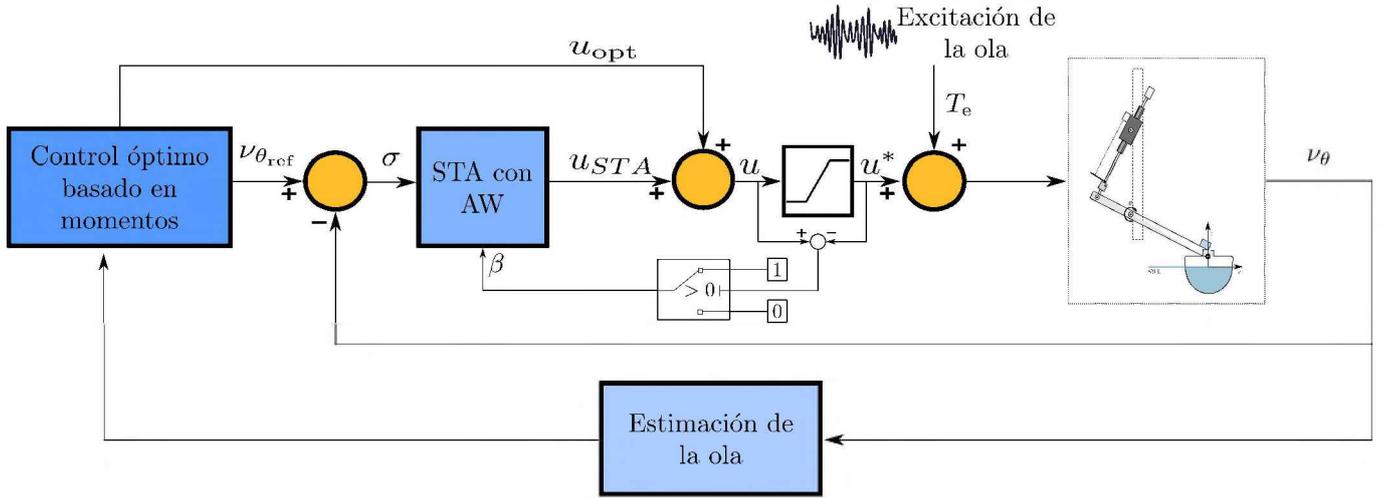
El procedimiento de generación de referencias puede sintetizarse en los siguientes pasos [25]:

- 1) Determinar el conjunto de soluciones $\mathcal{R} : \{u_{\text{opt}}, \nu_{\theta_{\text{opt}}}\}$ a partir de resolver el OCP (6) dentro de un período de tiempo $\Xi_K = [K\Delta_h, K\Delta_h + T_h] \subset \mathbb{R}$, $K \in \mathbb{N}$, donde T_h es el horizonte para el cual (4) es efectivamente maximizado, y donde Δ_h es el paso del horizonte móvil.
- 2) Proveer el conjunto \mathcal{R} al lazo de control de seguimiento en el intervalo $[K\Delta_h, (K+1)\Delta_h] \subset \mathbb{R}^+$, en el intervalo de un horizonte móvil Δ_h .
- 3) Avanzar $\Xi_K \mapsto \Xi_{K+1}$ y volver a 1.

B. Diseño del término de seguimiento

El término de control de seguimiento se diseña para asegurar que el sistema se comporte según la referencia provista por el control óptimo basado en momentos. Por este motivo, se propone una variable de deslizamiento de la forma:

$$\sigma = \nu_{\theta_{\text{opt}}} - \nu_{\theta}. \quad (7)$$


 Fig. 3. Esquema de control SM²C con *Anti-windup*.

Esta variable de deslizamiento es de grado relativo 1 para la entrada de control u en el modelo del sistema (2), es decir, que su primera derivada puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma} &= \dot{v}_{\theta_{\text{opt}}} - CAx - CBu = \\ &= \underbrace{\dot{v}_{\theta_{\text{opt}}} - CAx - CBu_{\text{opt}}}_{a(x,t)} - \underbrace{CB}_{b(t)} u_{\text{STA}} = \\ &= a(x,t) + b(t)u_{\text{STA}}.\end{aligned}\quad (8)$$

Entre los algoritmos de modos deslizantes de segundo orden, el *Super-Twisting* es el algoritmo más utilizado para trabajar con variables de deslizamiento de grado relativo 1 con respecto a la entrada de control. El STA como se propone en [12] tiene la siguiente estructura:

$$\begin{aligned}u_{\text{STA}}(t) &= -\alpha_1[\sigma(t)]^{1/2} + v_1 \\ \dot{v}_1 &= -\alpha_2[\sigma(\tau)]^0\end{aligned}\quad (9)$$

donde α_1 y α_2 son las ganancias constantes del algoritmo y se utiliza la abreviación $[\sigma]^p = |\sigma|^p \text{sign}(\sigma)$, con $[\sigma]^0 = \text{sign}(\sigma)$.

El algoritmo *Super-twisting* utiliza una integral para generar una señal de control continua, como se muestra en la ecuación (9). Sin embargo, cuando esta señal se aplica a un actuador que satura y la acción de control calculada por el algoritmo excede los límites del actuador, el sistema entra en lazo abierto y el término integral continúa acumulando el error generado, lo que da lugar al efecto de *integral windup*. Para abordar este problema, en este trabajo se implementa la propuesta de [13], que modifica la estructura del algoritmo *Super-twisting* convencional para tener en cuenta el efecto del *integral windup* en el diseño del control.

La técnica de *anti-windup* propuesta por [13] modifica el diseño tradicional del *Super-Twisting*, agregando un término adicional de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}u_{\text{STA}} &= -k_1[\sigma]^{1/2} + v, \\ \dot{v} &= -k_2[\sigma]^0 - k_3\beta v.\end{aligned}\quad (10)$$

Esta modificación requiere que el estado v cumpla con una condición inicial $|v_0| \leq \frac{k_2}{k_3}$ que, como se trata del estado integral del algoritmo de control, es simple de verificar. β es una variable binaria que se determina en función del valor de la saturación:

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{si } |u| > \rho, \\ 0 & \text{si } |u| \leq \rho, \end{cases}\quad (11)$$

siendo ρ el valor en el cual el actuador satura.

Mediante un análisis de estabilidad [13], se prueba que las ganancias del algoritmo en (10) deben cumplir con:

$$k_1 > 2\sqrt{\frac{k_2\rho}{b_m\rho - a_M}}, \quad k_2 > \frac{L_a + L_b a_M}{b_m^2}, \quad \frac{k_2}{k_3} \leq \rho.\quad (12)$$

en donde a_M , L_a , b_m y L_b son constantes conocidas que acotan la amplitud y la variación de las funciones a y b , garantizando que esas funciones están globalmente acotadas y son Lipschitz continuas, es decir:

$$\begin{aligned}|a(t)| &\leq a_M, & \left| \frac{da(t)}{dt} \right| &\leq L_a, & \forall t > 0, \\ 0 < b_m &\leq b(t) \leq 1, & \left| \frac{db(t)}{dt} \right| &\leq L_b, & \forall t > 0.\end{aligned}\quad (13)$$

Calcular las ganancias del algoritmo en función de las cotas mencionadas asegura que el sistema converja al origen en tiempo finito, incluso en presencia de incertidumbre y perturbaciones. Además, genera una acción de control continua en todo el dominio, garantizando que si su valor absoluto supera la saturación, el efecto de *windup* es mitigado.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación de la estrategia de control SM²C con *anti-windup*. Las pruebas mostradas se realizan con el modelo identificado del sistema físico como se describe en la Sección II y la entrada utilizada para excitar el sistema es la cupla de

excitación obtenida de la base de datos SWELL [10], [11], que cuenta con mediciones experimentales. Las ganancias del control fueron calculadas considerando como incertidumbre (en los parámetros), variaciones de hasta el 15% en el sistema identificado y los valores para las ganancias del STA con *anti-windup* son $k_1 = 14.9$, $k_2 = 16.1$ y $k_3 = 1.46$. Se tiene en cuenta que el actuador del sistema real satura en $\rho = 11$ [Nm].

Primero se muestra la cupla de excitación que mueve al dispositivo en la Figura 4, valores que han sido relevados en la campaña experimental mencionada previamente. Para la simulación se considera un tiempo de 200 [s] con un paso igual al período de muestreo que se tiene para el experimento, es decir, $T_s = 1/200$ [s].

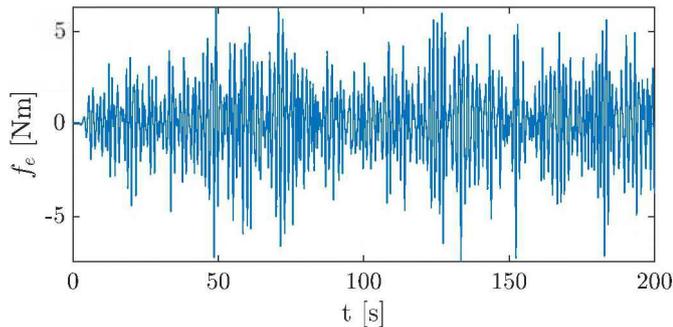


Fig. 4. Cupla de excitación.

Con la información de la cupla de excitación, el control óptimo basado en momentos genera una referencia de velocidad, en tiempo real, que maximiza la extracción de energía para esa entrada. Luego, el control de seguimiento, implementado en este caso con el STA con AW, garantiza el seguimiento de esa referencia, como puede observarse en la Figura 5.

En el gráfico superior de la Figura 5, se muestra la velocidad del dispositivo en color azul y la referencia que maximiza la extracción de energía según la estrategia de control óptimo basado en momentos, en color rojo, puede verse que están prácticamente superpuestas. En la figura inferior, se presenta la variable de deslizamiento σ a lo largo del tiempo, asociada al seguimiento de la referencia óptima. Se puede observar que entre los 40 y 60, y los 70 y 75 segundos, el control no logra mantener al sistema operando en la superficie de modo deslizante, que es $\sigma = \dot{\sigma} = 0$. La explicación de este comportamiento se entiende mejor al observar la Figura 6, donde se observan la acción de control calculada por el algoritmo (u) en azul y la acción de control efectivamente aplicada al sistema (u^*), en rojo. Es evidente que los momentos en los que el sistema se desvía de la superficie de deslizamiento coinciden con los momentos en los que la acción en el actuador llega a la saturación. Sin embargo, gracias al término de *anti-windup* agregado, el sistema es capaz de volver a converger a la superficie de deslizamiento, incluso después de haber quedado en lazo abierto debido a la saturación de la acción de control.

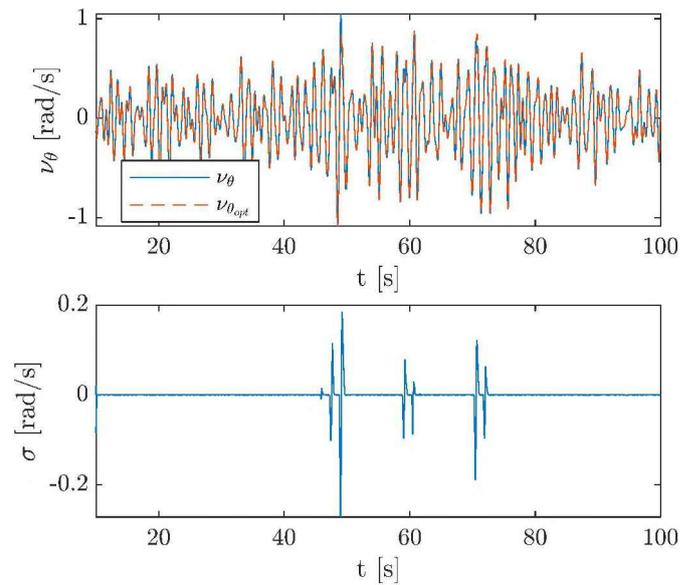


Fig. 5. Velocidad angular del sistema en azul y la referencia óptima de velocidad en rojo presentados en el gráfico superior. En el gráfico inferior puede observarse la variable de deslizamiento asociada al error de seguimiento.

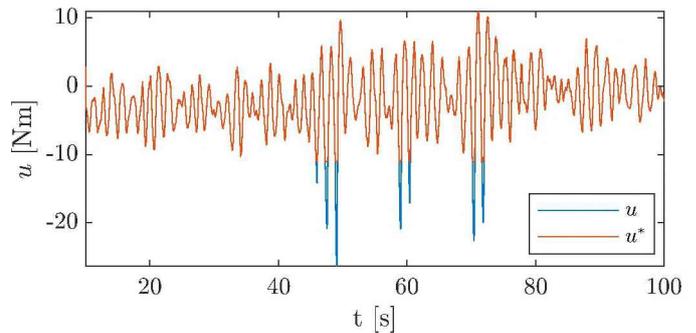


Fig. 6. Acción de control calculada (azul) y aplicada (rojo).

Finalmente, en el gráfico superior de la Figura 7, se representa el comportamiento de la acción de control del STA, cuando no se utiliza un mecanismo de *anti-windup*, es decir, se aplica la acción de control siguiendo la ecuación (9). En el gráfico inferior de la Figura 7, se puede observar cómo, una vez que la acción de control satura y el sistema queda en lazo abierto, la variable de deslizamiento asociada al error de seguimiento ya no retorna a cero, por no contar con una acción de control realimentada que lo fuerce a volver.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentan los resultados de utilizar una técnica ya existente en la literatura para mitigar el efecto de *integral windup* en el algoritmo *Super-twisting*, el cual forma parte de una estructura de control compuesta por un término de control óptimo basado en momentos y un término de seguimiento robusto basado en modos deslizantes. Específicamente, al emplear el algoritmo *Super-twisting* en

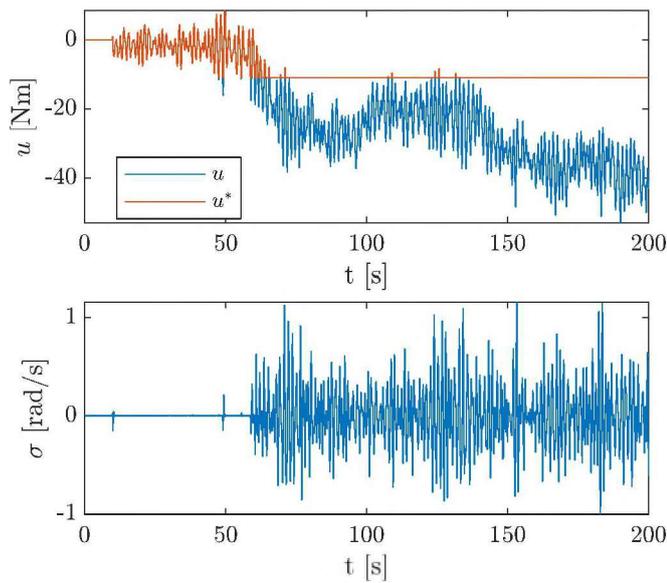


Fig. 7. Velocidad angular del sistema y su referencia, con la estrategia de control sin *anti-windup*.

el lazo de seguimiento, que contiene un término integral, se pueden presentar problemas de *integral windup* cuando el actuador satura.

El objetivo principal de esta estrategia de control es maximizar la extracción de energía de un dispositivo de extracción de energía undimotriz, similar al *Wavestar*.

La técnica de mitigación del *windup* demostró ser efectiva en la simulación presentada, ya que, a pesar de que la acción de control superó los límites del actuador, el sistema logró reacomodarse rápidamente y mantenerse siguiendo la referencia que maximiza la extracción de energía.

Finalmente, aunque la modificación realizada al algoritmo para mitigar el *windup* es simple y efectiva, sería interesante en el futuro comparar esta estrategia con otras técnicas de *anti-windup* que podrían aplicarse al algoritmo *Super-twisting*. Además, el próximo paso en este desarrollo de la estructura de control es probar esta estrategia experimentalmente en un tanque de olas.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido financiamiento del programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie No 101024372. Esta investigación también cuenta con el respaldo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), CONICET y la Agencia I+D+i de Argentina.

REFERENCIAS

- [1] G. Mork, S. Barstow, A. Kabuth, and M. T. Pontes, "Assessing the global wave energy potential," in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 49118, pp. 447–454, 2010.
- [2] IRENA: *Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies*. Abu Dhabi, UAE: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [3] "Electricity production by source, world." <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>, 2022. Accessed on: 23/7/2023.
- [4] A. Pecher and J. P. Kofoed, *Handbook of ocean wave energy*. Springer London, 2017.
- [5] J. Arroyo, "Energía," in *Clima: el desafío de diseño más grande de todos los tiempos* (T. Marchini, ed.), pp. 179–259, El gato y la caja, 2022.
- [6] D. D. Roger, "Una nueva matriz energética para argentina: rentas termodinámicas y desarrollo industrial, tecnológico y científico," *Realidad económica*, vol. 48, no. 328, pp. 27–a, 2019.
- [7] F. Mosquera, N. Faedo, C. A. Evangelista, P. F. Puleston, and J. V. Ringwood, "Energy-maximising tracking control for a nonlinear heaving point absorber system commanded by second order sliding modes," in *IFAC CAMS, Lyngby, Denmark, 2022*.
- [8] N. Faedo, F. Mosquera, C. A. Evangelista, P. F. Puleston, and R. J. V., "On the preliminary experimental assessment of second-order sliding modes control for wave energy conversion systems," in *Australian and New Zealand Control Conference 2022, 2022*.
- [9] R. H. Hansen and M. M. Kramer, "Modelling and control of the wavestar prototype," in *Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, EWTEC 2011*, University of Southampton, 2011.
- [10] N. Faedo, Y. Peña-Sanchez, E. Pasta, G. Papini, F. D. Mosquera, and F. Ferri, "Swell: An open-access experimental dataset for arrays of wave energy conversion systems," *Renewable Energy*, 2023.
- [11] N. Faedo, Y. Peña-Sanchez, E. Pasta, G. Papini, F. Mosquera, and F. Ferri, "Swell: An open-access experimental dataset for arrays of wave energy conversion systems." Mendeley Data, 2023.
- [12] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control," *Int. J. Control*, vol. 58, no. 6, pp. 1247–1263, 1993.
- [13] M. A. Golkani, S. Koch, R. Seeber, M. Reichhartinger, and M. Horn, "An anti-windup scheme for the super-twisting algorithm," in *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 6947–6952, IEEE, 2019.
- [14] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding Mode Control and Observation*. Springer New York, 2013.
- [15] A. Ferrara and M. Rubagotti, "A sub-optimal second-order sliding mode controller for systems with saturating actuators," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, pp. 1082–1087, May 2009.
- [16] I. Castillo, M. Steinberger, L. Fridman, J. A. Moreno, and M. Horn, "Saturated super-twisting algorithm: Lyapunov based approach," in *14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, pp. 269–273, June 2016.
- [17] I. Castillo, M. Steinberger, L. Fridman, J. Moreno, and M. Horn, "Saturated super-twisting algorithm based on perturbation estimator," in *IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 7325–7328, Dec 2016.
- [18] D. García-Violini, Y. Peña-Sanchez, N. Faedo, C. Windt, F. Ferri, and J. V. Ringwood, "Experimental implementation and validation of a broadband LTI energy-maximizing control strategy for the Wavestar device," *IEEE Tran. on Control Sys. Tech.*, vol. 29, no. 6, pp. 2609–2621, 2021.
- [19] L. Papillon, R. Costello, and J. V. Ringwood, "Boundary element and integral methods in potential flow theory: a review with a focus on wave energy applications," *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, pp. 1–35, 2020.
- [20] D. García-Violini, Y. Peña-Sanchez, N. Faedo, F. Ferri, and J. V. Ringwood, "A broadband time-varying energy maximising control for wave energy systems (lite-con+): Framework and experimental assessment," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023.
- [21] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall information and system sciences series, Prentice Hall PTR, 1999.
- [22] T. McKelvey, H. Akçay, and L. Ljung, "Subspace-based multivariable system identification from frequency response data," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 41, no. 7, pp. 960–979, 1996.
- [23] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [24] N. Faedo, *Optimal control and model reduction for wave energy systems: A moment-based approach*. PhD thesis, Department of Electronic Engineering, Maynooth University, 2020.
- [25] N. Faedo, Y. Peña-Sanchez, and J. V. Ringwood, "Receding-horizon energy-maximising optimal control of wave energy systems based on moments," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 378–386, 2020.