

Control para máxima extracción de energía undimotriz por Modos Deslizantes de Segundo Orden real con Ganancias Adaptivas

F. D. Mosquera^{‡*}, C. A. Evangelista*, P. F. Puleston*, J. V. Ringwood[†]

*Instituto LEICI, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata - CONICET.

[†]Centre for Ocean Energy Research, Maynooth University, National University of Ireland.

[‡] facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar

Resumen—La optimización del aprovechamiento de la energía de las olas se está desarrollando fuertemente de manera internacional y Argentina tiene gran potencial de este recurso. Entre todos los dispositivos capaces de transformar la energía undimotriz, los sistemas de Columna de Agua Oscilante han sido los más estudiados y maximizar la extracción de potencia de la ola es el objetivo primordial de los últimos años. Este trabajo avanza sobre una propuesta inicial de controladores de Modo Deslizante de Segundo Orden, considerando condiciones realistas de funcionamiento para el sistema y una configuración de ganancias adaptivas que reduce el *chattering*. Los resultados muestran notablemente la mejora esperada, a partir de reducir el esfuerzo de control, manteniendo la robustez ante incertidumbre en los parámetros, dinámica no modelada y perturbaciones.

I. INTRODUCCIÓN

Entre los sistemas más desarrollados para extraer energía de las olas se encuentra el dispositivo llamado Columna de Agua Oscilante (OWC, del inglés), el cual convierte la energía de la ola en energía mecánica mediante una cámara semi sumergida y una turbina autorrectificante [1]. Seguidamente, la conversión de energía mecánica a eléctrica es realizada a través de un generador de velocidad variable, que en general es un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG, en inglés), gracias a su probada eficiencia en este tipo de aplicaciones [2]–[5]. Estos equipos pueden ser integrados en escolleras, entre otras configuraciones, lo que lo vuelve atractivo para aplicaciones en zonas portuarias de la provincia de Buenos Aires, en donde existe un interesante potencial undimotriz [6].

Distintos métodos han sido elaborados para aumentar la eficiencia de conversión de los sistemas OWC. Algunos investigadores han obtenido buenos resultados regulando la velocidad de rotación del sistema para evitar que la turbina entre en pérdida [4], [7]. Otra propuesta se basa en hacer operar al sistema en el punto de máxima eficiencia aerodinámica [2]. Por su parte, los autores diseñaron un método con un enfoque diferente [8], que permite maximizar la extracción de energía de la ola considerando al sistema OWC como un todo.

Para lograr poner en práctica estos métodos, es necesario sintetizar sistemas de control capaces de cumplir con los objetivos y lidiar con incertidumbres en los parámetros de la

turbina y eléctricos, perturbaciones externas y no linealidades. Los Modos Deslizantes (MD) han probado ser una técnica especialmente apta para cumplir con tan demandantes especificaciones. En particular, [7] y [2] han propuesto recientemente técnicas de MD de Primer Orden aplicados a sistemas OWC, logrando resultados altamente satisfactorios. Por su parte, los autores avanzaron en este sentido incluyendo técnicas de control por MD de Segundo Orden (MDSO) en la propuesta mencionada [8]. Esta familia de algoritmos, entre otras características, resulta en controladores robustos con tiempo de convergencia finito, reducción del *chattering* (oscilaciones de alta frecuencia producidas por los controladores de MD), leyes relativamente simples de control con carga computacional moderada y de sencilla implementación, agregando además la posibilidad de trabajar con salidas de grado relativo 2, como en el caso del sistema bajo estudio.

A partir de los excelentes resultados encontrados para los controladores por MDSO, se exploró el caso realista de contar con una velocidad de conmutación limitada, para contemplar las restricciones de actuación de un sistema práctico. Este apartamiento de las condiciones ideales repercute en que el sistema opera en MD real, deteriorando el desempeño de los controladores por MDSO y aumentando el *chattering* en las variables de deslizamiento. Por lo tanto, se propone como solución incorporar un mecanismo de adaptación para las ganancias, el cual mejora el comportamiento del sistema.

Esta publicación se estructura de la siguiente manera: la Sección II presenta las ecuaciones que modelan el sistema OWC y el recurso energético. Luego, en la Sección III se explica el procedimiento seguido para el diseño de la estructura de control con ganancias adaptivas. A continuación, en la Sección IV se exhiben y evalúan resultados obtenidos con el esquema propuesto, comparándolos con los de ganancias fijas. Finalmente, en la Sección V se presentan algunas conclusiones.

II. MODELO DEL SISTEMA OWC

Esta sección presenta las consideraciones para el modelado del sistema OWC. La Fig. 1 representa un esquema del mismo en una estructura fija integrada a una escollera.

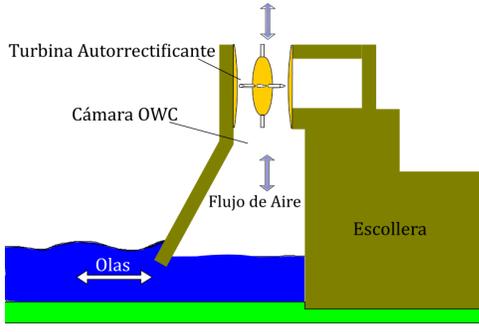


Figura 1: Diagrama Sistema OWC

II-A. Cámara OWC y Turbina Bidireccional

El primer elemento del sistema que enfrenta la ola es la cámara OWC, la cual transforma la energía cinética de la ola en energía neumática y cinética de aire. Está conformada por una estructura sólida y hueca, con un orificio en su parte inferior, por debajo del nivel medio de agua. Las olas entran a la cámara por el orificio, comprimiendo y descomprimiendo el aire dentro de la estructura y creando un flujo de aire oscilante. Este flujo pasa a través de una turbina acoplada a un generador que lo transforma en energía eléctrica [1].

Para convertir el movimiento oscilante bidireccional en un movimiento de rotación unidireccional, se utilizan turbinas autorrectificantes. La mayoría de ellas son máquinas de flujo axial y los dos tipos más utilizados son la turbina Wells y la turbina de Impulso [9]. Las turbinas Wells están constituidas por palas simétricas ubicadas a 90 grados con respecto al flujo incidente y son las más empleadas gracias a su simplicidad de operación y fiabilidad [10]. Ellas están modeladas por [11]:

- Potencia disponible en la turbina:

$$P_{in} = q \Delta p \quad [W] \quad (1)$$

donde Δp [pa] y q [m^3/s] son la caída de presión y el caudal de flujo de aire incidente en la turbina, respectivamente.

- Caudal del flujo de aire:

$$q = \nu_x a \quad (2)$$

donde ν_x [m/s] es la velocidad unidireccional del fluido (propiedad autorrectificante de la turbina), que incide normal al área de las palas y a [m^2] es el área del ducto de la turbina.

- Caída de presión en la turbina:

$$\Delta p = C_a(\phi) k \frac{1}{a} \left[\nu_x^2 + (r\Omega_r)^2 \right] \quad (3)$$

donde $k = \rho b n l / 2$ [kg/m] es una constante de la turbina, siendo ρ [kg/m^3] la densidad del aire, b [m] el largo de la pala, n el numero de palas y l [m] el largo de la cuerda. Asimismo, Ω_r [rad/s] es la velocidad de rotación de las palas de la turbina y $C_a(\phi)$ es el coeficiente de presión que es monótonamente creciente.

- Coeficiente de flujo ϕ :

$$\phi = \frac{\nu_x}{r\Omega_r} \quad (4)$$

donde r [m] es el radio de las palas.

- Cupla de la Turbina:

$$T_t = C_t(\phi) k r \left[\nu_x^2 + (r\Omega_r)^2 \right] \quad [Nm] \quad (5)$$

donde $C_t(\phi)$, coeficiente de cupla, es función no lineal de ϕ .

- Eficiencia Aerodinámica:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_t \Omega_r}{q \Delta p} = \frac{C_t}{C_a \phi} \quad (6)$$

relaciona la potencia mecánica de salida con la potencia disponible para conversión, debida a la diferencia de presión y al caudal de flujo de aire.

II-B. Dinámica del sistema

El comportamiento dinámico del sistema se describe adecuadamente a partir de un modelo completo de cinco ecuaciones diferenciales. Cuatro de ellas describen la dinámica del DFIG vista desde dos marcos de referencia en cuadratura rotando a velocidad sincrónica, uno para las variables de rotor y otro para las de estator. La quinta ecuación describe la dinámica mecánica [12].

II-C. Modelo del recurso: Olas Policromáticas

Una manera adecuada para describir las variaciones de altura de las olas que inciden en el sistema es a partir del espectro Pierson-Moskowitz para olas completamente desarrolladas [13]:

$$S_{pm}(\omega) = \frac{0,11 H_s^2 T_z}{2\pi} \left(\frac{\omega T_z}{2\pi} \right)^{-5} e^{-0,44 \left(\frac{\omega T_z}{2\pi} \right)^{-4}} \quad (7)$$

donde ω [rad/s] es frecuencia, H_s [m] es la *altura significativa de ola* y T_z [s] el *periodo de cruce de media cero*. A los efectos de considerar condiciones propias de la provincia de Buenos Aires (Fig. 2), en las simulaciones de este trabajo se utilizan los parámetros obtenidos por Lanfredi et. al [6].

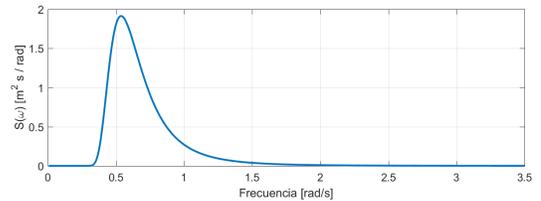


Figura 2: Espectro de Ola - Provincia de Buenos Aires

III. DISEÑO DEL CONTROL

En esta sección se diseña una estructura de control, conformada por dos controladores MDSO, orientada a asegurar el cumplimiento de dos objetivos: con carácter principal, maximizar la potencia extraída de las olas, y de manera secundaria, regular la potencia reactiva a demanda de la red. Para ello, se proponen variables de deslizamiento que permitan realizar un diseño desacoplado. Cada uno de los controladores, asociado a una de las variables de deslizamiento y a una de las dos entradas de control del sistema (tensiones de rotor), debe cumplir con un objetivo diferente.

III-A. Modelo reducido del OWC para el diseño del control

Se presenta a continuación un modelo reducido, apto para el diseño del control [5], de la dinámica del sistema:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{qr} &= \frac{L_s}{L_{eq}} (v_{qr} - R_r i_{qr}) - \left(i_{dr} + \frac{L_m L_s V_s}{\omega_s L_{eq}} \right) (\omega_s - p\Omega_r) \\ \dot{i}_{dr} &= \frac{L_s}{L_{eq}} (v_{dr} - R_r i_{dr}) + i_{qr} (\omega_s - p\Omega_r) \\ \dot{\Omega}_r &= \frac{1}{J} \left(T_t(\nu, \Omega_r) - \frac{3pL_m V_s}{2\omega_s L_s} i_{qr} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

donde V_s es la tensión de fase de la red, v_{dr} y v_{qr} (i_{dr} y i_{qr}) las tensiones (corrientes) de rotor directa y en cuadratura. Además R_r es la resistencia rotórica, L_s , L_r y L_m las inductancias de estator, rotor y mutua, respectivamente, y $L_{eq} = L_s L_r - L_m^2$. Finalmente, p es el número de pares de polos y $\omega_s = 2\pi f_s$ la frecuencia de la red.

En este modelo, la potencia reactiva de estator se expresa:

$$Q = \frac{3pV_s^2}{2\omega_s L_s} - \frac{3pL_m V_s}{2L_s} i_{dr} \quad (9)$$

y la cupla electromagnética del generador:

$$T_e = \frac{3pL_m V_s}{2\omega_s L_s} i_{qr} \quad (10)$$

III-B. Variables de deslizamiento en MDSO

Las técnicas de control por modos deslizantes se basan en definir una función de los estados, la variable de deslizamiento σ , de tal manera que el objetivo de control deseado se cumpla cuando $\sigma = 0$. Los algoritmos MDSO garantizan la convergencia y permanencia en cero de σ y de su primera derivada temporal, $\dot{\sigma}$, generalmente en tiempo finito y con acción de control discontinua actuando sobre la segunda derivada temporal de σ . La condición $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ determina la llamada superficie de deslizamiento en el espacio de estados. Una vez que las trayectorias de los estados alcanzan la superficie de deslizamiento, el control garantiza que se mantendrán operando en esa condición de forma robusta [14].

III-B1. σ para máxima extracción de potencia de ola:

En [8] los autores desarrollaron un método para maximizar la potencia extraída de la ola por el sistema OWC, esta última puede calcularse como:

$$P_{out} = \underbrace{\frac{2k}{\rho a} \eta(\phi) C_a(\phi) [1 + \phi^{-2}]}_{C_{P_f}(\phi)} \underbrace{\frac{\rho a}{2} \nu_x^3}_{P_f(\nu_x)} = C_{P_f}(\phi) P_f(\nu_x) \quad (11)$$

donde $C_{P_f}(\phi)$ (Fig. 3) es un coeficiente adimensional que depende de ϕ de manera no-lineal y relaciona la potencia extraída, P_{out} , con una potencia ficticia P_f . Dado que, como puede observarse, $C_{P_f}(\phi)$ tiene un único máximo en $\phi = \phi_{opt}$, la potencia será maximizada si el sistema opera en esa condición. Por esta razón, se define la siguiente referencia óptima para la velocidad de rotación:

$$\Omega_{opt} = \frac{\nu_x}{r\phi_{opt}} \quad (12)$$

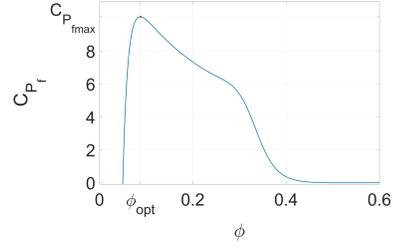


Figura 3: Coeficiente $C_f(\phi)$

Para evitar la detención de la turbina, se implementa una solución sub-óptima, definiendo una referencia a trozos limitada por un umbral de velocidad mínima, Ω_{rmin} :

$$\Omega_{ref} = \begin{cases} \Omega_{opt} = \frac{\nu_x}{r\phi_{opt}} & \text{si } \Omega_{opt}(\nu_x) > \Omega_{rmin} \\ \Omega_{rmin} & \text{si } \Omega_{opt}(\nu_x) \leq \Omega_{rmin} \end{cases} \quad (13)$$

De acuerdo a lo expuesto, la variable de deslizamiento que se define para cumplir el primer objetivo de control es:

$$\sigma_1 = \Omega_{ref} - \Omega_r, \quad (14)$$

la cual resulta de grado relativo (GR) 2 con respecto a v_{qr} .

III-B2. σ para regulación de potencia reactiva: Para σ_2 , la referencia es la potencia reactiva demandada por la red, $Q_{ref}(t)$. Por lo tanto, a partir de (9), la segunda variable de deslizamiento queda:

$$\sigma_2 = Q_{ref} - Q = Q_{ref} - \frac{3pV_s^2}{2\omega_s L_s} + \frac{3pL_m V_s}{2L_s} i_{dr}. \quad (15)$$

Ésta es de GR 1 con respecto a v_{dr} .

III-C. Diseño de los Controladores MDSO

Habiendo definido las dos variables de deslizamiento según los objetivos, en esta subsección se diseñan los controladores por MDSO para ambas entradas de control. Cabe recordar que, a los efectos de contemplar las restricciones de actuación del sistema real, se ha limitado la velocidad de conmutación. Esto resulta en una operación en MD real, deteriorándose el desempeño con mayor *chattering* en las variables de deslizamiento. Para resolver la problemática que conlleva esta condición no ideal de operación, se incorporan al diseño propiedades adaptivas para las ganancias de la estructura de control MDSO propuesta.

III-C1. Controlador Twisting de ganancias adaptivas para máxima extracción de potencia de ola: El proceso de diseño del control MDSO de ganancias adaptivas consta de dos pasos. En el primero, se diseña un controlador MDSO de ganancias fijas. En el segundo, aplicando al OWC la técnica de Pisano *et al* [15], se desarrolla el algoritmo de adaptación para el ajuste *online* de las ganancias del controlador, teniendo como tope superior los valores obtenidos en el primer paso.

Primer Paso. Twisting: Siendo que la variable asociada a este objetivo es de GR 2, el diseño del controlador se basó en el algoritmo *Twisting* [8]. La acción de control consta de dos términos:

$$v_{qr} = v_{qrE} + v_{qrT} \quad (16)$$

El término v_{qrE} es la acción de control continua de “polarización”, responsable de llevar al sistema a los alrededores de $\sigma_1 = 0$, lo cual permite aliviar el esfuerzo de control de MDSO y reducir, por ende, el valor de sus ganancias fijas. Por su parte, v_{qrT} es la acción de control por MDSO *Twisting*, que se encarga de brindar robustez ante incertidumbres y perturbaciones.

En primer lugar, se obtiene v_{qrE} siguiendo un procedimiento inspirado en el concepto de control equivalente en MD. Utilizando la segunda derivada de σ_1 , en la que v_{qr} aparece explícitamente por ser σ_1 de GR 2:

$$\ddot{\sigma}_1 = a_1(x, t) + b_1(x, t)v_{qr} \quad (17)$$

donde $x = [\dot{i}_{qr}; \dot{i}_{dr}; \Omega_r]$ denota los estados. v_{qrE} es el control continuo que asegura $\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = \ddot{\sigma}_1 = 0$, es decir:

$$v_{qrE} = v_{qr} \left. \vphantom{v_{qrE}} \right|_{\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = \ddot{\sigma}_1 = 0} = - \left. \frac{a_1(x, t)}{b_1(x, t)} \right|_{\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = \ddot{\sigma}_1 = 0} \quad (18)$$

en condiciones nominales.

En segundo lugar, el control por MDSO *Twisting* de ganancias fijas, se describe a partir de la ley de control:

$$v_{qrT}(\sigma_1) = -\alpha_T W \text{sign}(\sigma_1(t)) - W \text{sign}(\dot{\sigma}_1(t)), \quad (19)$$

donde α_T y W , son los parámetros a diseñar. Para ello se reescribe (17) incorporando (16) y (18):

$$\begin{aligned} \ddot{\sigma}_1 &= \underbrace{a_1(x, t) + b_1(x, t)v_{qrE}}_{\lambda_1(x, t)} + \underbrace{b_1(x, t)}_{\gamma_1(x, t)} v_{qrT} \\ &= \lambda_1(x, t) + \gamma_1(x, t)v_{qrT} \end{aligned} \quad (20)$$

Luego, las funciones $\lambda_1(x, t)$ y $\gamma_1(x, t)$ deben ser acotadas por tres constantes positivas $\Gamma_{m_1} < \Gamma_{M_1}$ y C_1 , tal que verifiquen:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\lambda_1(x, t)}{\gamma_1(x, t)} \right| &\leq C_1 \\ \Gamma_{m_1} &\leq \gamma_1(x, t) \leq \Gamma_{M_1} \end{aligned} \quad (21)$$

Nótese que, para garantizar convergencia en tiempo finito y obtener un funcionamiento robusto, las perturbaciones e incertidumbres deben ser consideradas al calcular estas cotas. Finalmente, las ganancias deben ser seleccionadas de acuerdo a las siguientes condiciones suficientes.

$$W > \frac{C}{\Gamma_m}, \quad \alpha_T > 2 + \frac{\Gamma_M}{\Gamma_m}. \quad (22)$$

Segundo Paso. Algoritmo de adaptación de ganancias:

El concepto este algoritmo se basa en el hecho de que, en la práctica, la acción de control MD no podrá conmutar a frecuencia infinita, estableciéndose una operación en MD real [15]. Como criterio para determinar si el sistema está trabajando en MD real o no, el algoritmo contará la cantidad

de cruces por cero de $\sigma_1(t)$ en ventanas de duración T_v . De superar ésta cierto número N , establecido en la etapa de diseño, se considera que el sistema está operando en MD.

El controlador de ganancias adaptativas tiene la forma:

$$v_{qrT}(\sigma_1) = -\alpha_T W^j \text{sign}(\sigma_1(t)) - W^j \text{sign}(\dot{\sigma}_1(t)), \quad (23)$$

y el algoritmo de adaptación que modifica W^j es:

$$\begin{aligned} W^1 &= W \\ W^{j+1} &= \begin{cases} \max(W^j - \Lambda_1 T_v, W_{min}) & \text{si } N_{sw}^j \geq N \\ \min(W^j + \Lambda_2 T_v, W) & \text{si } N_{sw}^j < N \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

donde W^1 es el valor de inicialización, W la ganancia fija de (19) (límite superior) y $W_{min} \geq 0$ el límite inferior, N_{sw}^j es la cantidad de cruces por cero que tuvo la variable σ_1 dentro del intervalo j , de duración T_v , y el superíndice j indica el intervalo actual. Además, Λ_1 y Λ_2 , que determinan el decremento e incremento de la ganancia, se ajustan heurísticamente tal que $\Lambda_2 \gg \Lambda_1 > 0$.

Por su parte, el tamaño de la ventana T_v se define en el caso del modelo bajo análisis en base a la frecuencia real de conmutación f_c . La frecuencia de actuación es $f_c = 10kHz$ ($T_c = 0,1ms$). Para que la ventana abarque un número suficiente de potenciales cruces, se seleccionó $T_v = 30T_c = 3ms$.

Luego, el valor de N se encontró realizando diversas simulaciones del sistema empleando el control de ganancias fijas previamente sintetizado. Se contó la cantidad de cruces por cero de σ_1 en intervalos de duración T_v (ejemplo: Fig.4). Finalmente, N se selecciona menor que la mitad del promedio de cruces (regla práctica). De este análisis se definió $N = 3$.

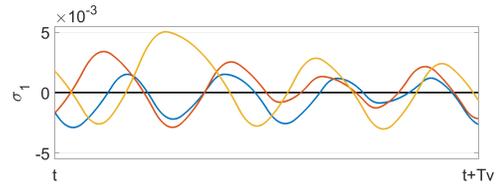


Figura 4: Cruces por cero de σ_1 en intervalos de ventana.

De esta manera, cuando N_{sw}^j supera N (se considera que se está operando en MD), la ganancia W^j disminuye en $\Lambda_1 T_v$. Si esto no sucede, W^j aumenta en $\Lambda_2 T_v$.

III-C2. Controlador Super-Twisting para regulación de potencia reactiva: A partir de analizar el desempeño del sistema con ganancias adaptativas en el primer control, se estableció que el mismo alcanza la reducción de *chattering* deseada no solo en una, sino en ambas variables de deslizamiento. Por lo tanto, se optó por utilizar ganancias fijas para el *Super-Twisting*, evitando así incrementar el costo computacional *online* de la estructura de control MDSO propuesta. Para cumplir de manera robusta con este objetivo, también se propone una ley de control con dos términos:

$$v_{dr} = v_{drE} + v_{drST}, \quad (25)$$

Esta comprende un término de “polarización” suave v_{dr_E} y un término de MDSO *Super-Twisting* $v_{dr_{ST}}$, seleccionado porque fue desarrollado para variables de deslizamiento de GR 1, como lo es σ_2 , y además provee una acción de control continua y robusta.

El procedimiento de diseño es análogo al utilizado en el Primer Paso de III-C1. Por ser de GR 1, v_{dr_E} se calcula según:

$$\dot{\sigma}_2 = A_2(x, t) + B_2(x, t)v_{dr}, \quad (26)$$

$$v_{dr_E} = v_{dr} \bigg|_{\sigma_2=\dot{\sigma}_2=0} = - \frac{A_2(x, t)}{B_2(x, t)} \bigg|_{\sigma_2=\dot{\sigma}_2=0} \quad (27)$$

considerando el sistema nominal o imperturbado.

Luego se diseña el término que provee robustez según el algoritmo *Super-Twisting*, que tiene la siguiente ley

$$v_{dr_{ST}}(\sigma) = -\beta|\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) - \alpha \int_0^t \text{sign}(\sigma(\tau)) d\tau \quad (28)$$

donde α y β son las ganancias a diseñar. Para su ajuste se halla la expresión de $\ddot{\sigma}_2$ en términos de $\dot{v}_{dr_{ST}}$, empleando (25)-(27):

$$\begin{aligned} \ddot{\sigma}_2 &= \underbrace{a_2(x, v_{qr}, v_{dr}, t) + b_2(x, t)\dot{v}_{dr_E}}_{\lambda_2(x, v_{qr}, v_{dr}, t)} + \underbrace{b_2(x, t)\dot{v}_{dr_{ST}}}_{\gamma_2(x, t)} \\ &= \lambda_2(x, v_{qr}, v_{dr}, t) + \gamma_2(x, t)\dot{v}_{dr_{ST}} \end{aligned} \quad (29)$$

Luego, las funciones $\lambda_2(x, v_{qr}, v_{dr}, t)$ y $\gamma_2(x, t)$ se acotan con tres constantes positivas $\Gamma_{m_2} < \Gamma_{M_2}$ y C_2 tal que

$$\begin{aligned} |\lambda_2(x, v_{qr}, v_{dr}, t)| &\leq C_2 \\ \Gamma_{m_2} &\leq \gamma_2(x, t) \leq \Gamma_{M_2}, \end{aligned} \quad (30)$$

teniendo en cuenta en este cálculo las perturbaciones e incertidumbres. Finalmente, las ganancias se seleccionan tal que:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{C_2}{\Gamma_{m_2}} \\ \beta &= \frac{\sqrt{2(\alpha\Gamma_{M_2} + C_2)}}{\Gamma_{m_2}}, \end{aligned} \quad (31)$$

con lo cual, quedan garantizadas la convergencia en tiempo finito a $\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0$ y la operación robusta en MDSO, incluso ante la presencia de las perturbaciones e incertidumbres consideradas.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para comprobar el logro de los objetivos buscados, así como para evaluar el desempeño del sistema controlado, se realizaron exhaustivas simulaciones empleando diversos perfiles de olas y el modelo completo del generador, considerando las limitaciones mencionadas de actuación del control e incertidumbre en los parámetros.

En la presente sección se exponen resultados de una simulación representativa, asociados a una realización de 30 segundos del proceso aleatorio que describe la altura de la ola (densidad espectral de la Fig. 2). Ésta genera el flujo de aire v_x de la Fig. 5, el cual ingresa al sistema OWC bajo estudio, cuyos parámetros se muestran en la Tabla I.

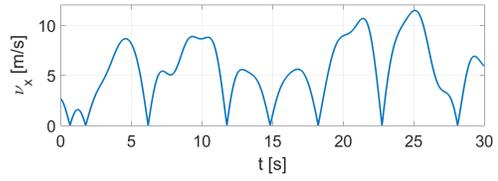


Figura 5: Velocidad de flujo de aire (en valor absoluto).

Tabla I: Parámetros del Sistema.

Cámara y Turbina		Generador 7,5 kW	
$n = 5$		$p = 1$	$L_{ls} = 1,7 \text{ mHy}$
$l = 0,165 \text{ m}$		$J_g = 0,07 \text{ kg m}^2$	$L_{lr} = 2,4 \text{ mHy}$
$b = 0,21 \text{ m}$		$L_m = 76,6 \text{ mHy}$	
$r = 0,375 \text{ m}$		$V_{rms} = 400 \text{ Vrms}$	
$l_c = 4,3 \text{ m}$		$f_n = 50 \text{ Hz}$	
$w = 4,5 \text{ m}$		$R_s = 0,2702 \Omega$	
$J_p = 0,44 \text{ kg m}^2$		$R_r = 0,2305 \Omega$	

La incertidumbre considerada fue del 5 % para los parámetros eléctricos.

Los valores finales de las ganancias y parámetros de los controladores fueron:

$$\begin{aligned} W &= 40; & \alpha_T &= 2 \\ \Lambda_1 &= 30; & \Lambda_2 &= 430 \\ \alpha &= 2,164; & \beta &= 0,322 \end{aligned} \quad (32)$$

y se consideró $W_{min} = 0$. Para realizar los gráficos se recopilaron datos asociados a variables mensurables en la práctica.

A continuación, se muestran las comparaciones de velocidad de rotación Ω_r en la Fig. 6 y de la potencia reactiva de estator Q en la Fig. 7 cuando son controladas por el esquema de ganancias fijas (azul) y por el esquema de ganancias adaptivas (verde). Se incluyen también en la figura las referencias para ambas variables, Ω_{ref} y Q_{ref} , respectivamente. Puede observarse el logro de los objetivos de control en ambos casos, aunque se evidencia la mejora del método adaptivo ya que las oscilaciones son menores al emplear ganancias que se van reduciendo con la operación en modo deslizante.

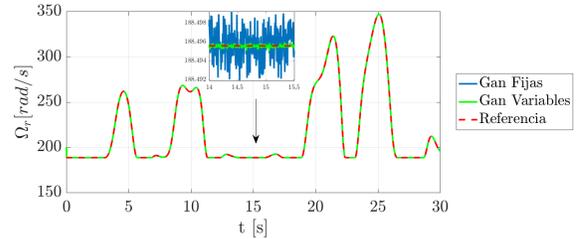


Figura 6: Velocidad de rotación y referencia.

La Fig. 8 exhibe las acciones de control. Las dos primeras figuras son las asociadas a σ_1 . La Fig. 8a muestra el comportamiento de la salida de control para el *Twisting* de ganancias fijas, mientras que la Fig. 8b es la evolución cuando el controlador está trabajando con ganancias adaptivas. La

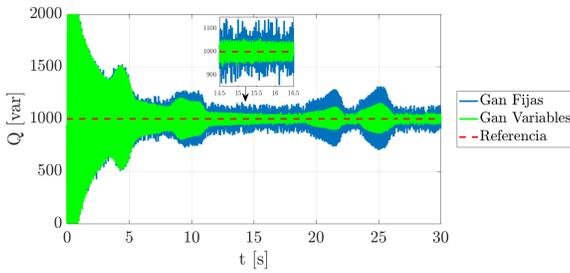


Figura 7: Potencia Reactiva de estator.

tercera figura (Fig. 8c) es la acción de control basada en *Super-Twisting* cuando se utiliza el *Twisting* de ganancias variables.

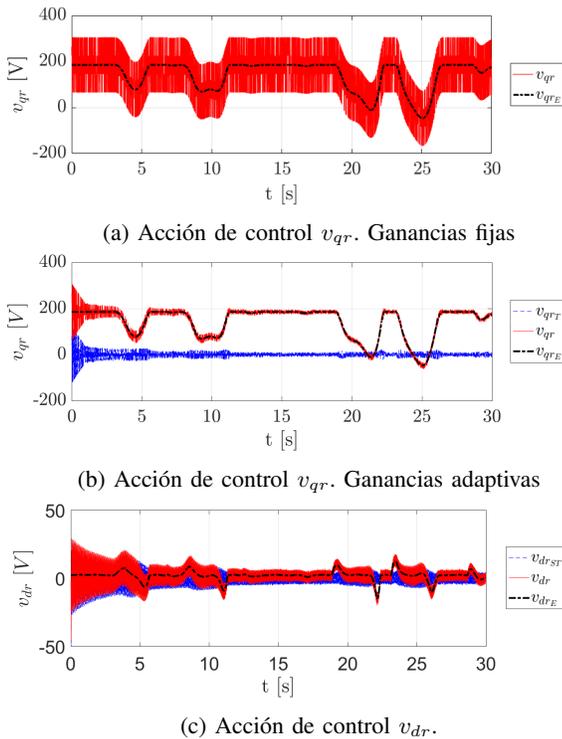


Figura 8: Entradas de control. v_{qr} y v_{dr} en línea roja sólida, los términos de MD en líneas de a guiones azul y las componentes equivalentes en líneas negras de guión-punto.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una estrategia de control simple y robusta que maximiza la potencia extraída de la ola y regula la potencia reactiva de estator en un sistema OWC. El método para máxima extracción corresponde a una propuesta original recientemente presentada por los autores, en tanto que la potencia reactiva se regula según las demandas de la red eléctrica.

La estructura de control propuesta está conformada por dos controladores basados en modos deslizantes de segundo orden empleando un modelo dinámico reducido del sistema. Este esquema incluye un mecanismo de adaptación de ganancias

que permite reducir el *chattering* cuando se consideran limitaciones en los tiempos de actuación.

Los resultados obtenidos, empleando el modelo dinámico completo del sistema en condiciones realistas de funcionamiento, muestran que el sistema controlado logra los objetivos propuestos operando en modo deslizante real, de manera robusta frente a incertidumbres paramétricas y dinámica no modelada. La técnica utilizada presenta una evidente mejora cuando se compara con el esquema de ganancias fijas, ya que reduce las oscilaciones de las variables controladas y los esfuerzos de control innecesarios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Nacional de La Plata, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de Argentina.

REFERENCIAS

- [1] A. F. O. Falcao, J. C. C. Henriques y L. M. C. Gato, "Rotational speed control and electrical rated power of an oscillating-water-column wave energy converter," *Energy*, vol. 120, pp. 253–261, feb 2017.
- [2] O. Barambones, J. A. Cortajarena, J. M. Gonzalez de Durana y P. Alkorta, "A real time sliding mode control for a wave energy converter based on a wells turbine," *Ocean Eng.*, vol. 163, no. May, pp. 275–287, 2018.
- [3] F. M'zoughi, S. Bouallègue, A. J. Garrido, I. Garrido y M. Ayadi, "Stalling-Free control strategies for oscillating-water-column-based wave power generation plants," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 1, pp. 209–222, 2018.
- [4] S. K. Mishra, S. Purwar y N. Kishor, "An Optimal and Non-Linear Speed Control of Oscillating Water Column Wave Energy Plant with Wells Turbine and DFIG," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 995–1006, 2016.
- [5] B. Beltran, M. E. H. Benbouzid y T. Ahmed-Ali, "Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 2, pp. 261–269, jun 2012.
- [6] N. W. Lanfredi, J. L. Pousa, C. A. Mazio y W. C. Dragani, "Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina," *Energy*, vol. 17, no. 11, pp. 997–1006, nov 1992.
- [7] A. J. Garrido, I. Garrido, M. Amundarain, M. Alberdi y M. D. la Sen, "Sliding-Mode Control of Wave Power Generation Plants," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2372–2381, nov 2012.
- [8] F. D. Mosquera, C. A. Evangelista y P. F. Puleston, "Energía Undimotriz: Control de Potencia por Modos Deslizantes de Segundo Orden," en *AADECA 2018 - 26 Congr. Arg. Control Autom.*, pp. 339–344, 2018.
- [9] A. F. O. Falcao y J. C. C. Henriques, "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016.
- [10] T. Ghisu, P. Puddu y F. Cambuli, "A detailed analysis of the unsteady flow within a Wells turbine," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 231, no. 3, pp. 197–214, 2017.
- [11] M. Amundarain, M. Alberdi, A. J. Garrido y I. Garrido, "Modeling and simulation of wave energy generation plants: Output power control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 105–117, 2011.
- [12] J. Lekube, A. J. Garrido y I. Garrido, "Rotational Speed Optimization in Oscillating Water Column Wave Power Plants Based on Maximum Power Point Tracking," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 681–691, 2017.
- [13] G. Nolan, J. V. Ringwood y B. Holmes, "Short Term Wave Energy Variability off the West Coast of Ireland," Tech. Rep., 2007.
- [14] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control," *Int. J. Control*, vol. 58, no. 6, pp. 1247–1263, 1993.
- [15] A. Pisano, M. Tanelli y A. Ferrara, "Time-based switched sliding mode control for yaw rate regulation in two-wheeled vehicles," en *Decis. Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annu. Conf.*, 2012, pp. 743–1546.