

# Control Twisting con Adaptación Basada en Cruce por Cero para un Sistema de Columna de Agua Oscilante con Generador Sincrónico

F. D. Mosquera\*, C. A. Evangelista\*, P. F. Puleston\* and J. V. Ringwood†

\*Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI)

Universidad Nacional de La Plata (UNLP) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET),

Email: facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar

† Centre for Ocean Energy Research (COER)

**Resumen**—Este trabajo presenta el control de un dispositivo de columna de agua oscilante, que incluye un generador sincrónico de imán permanente, para la extracción óptima de potencia. Se diseñan dos controladores de modo deslizante de segundo orden adaptables, que funcionan de manera robusta en modo deslizante real y muestran una notable mejora en la reducción del *chattering* cuando se los compara con el mismo esquema con ganancias fijas, al ser probados sobre el modelo completo del sistema.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los dispositivos de extracción de energía de las olas se encuentra el de Columna de Agua Oscilante (OWC, en inglés). Los sistemas OWC son ampliamente estudiados por tener algunas ventajas sobre otros, tales como, tener pocas partes móviles y todas ellas encontrarse fuera del agua, eliminar la necesidad de una caja de engranajes y tener las partes necesarias accesibles para mantenimiento [1]. Un dibujo esquemático de un sistema OWC de cámara fija puede observarse en la Fig. 1.

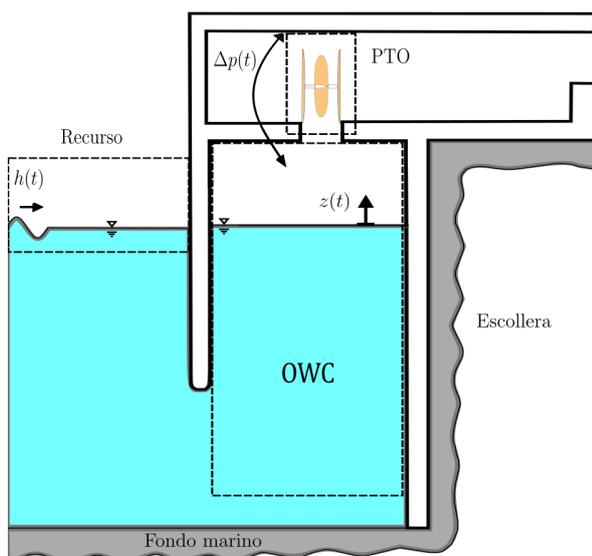


Fig. 1. Dibujo esquemático sistema OWC.

Existen diversos modelos dinámicos de estos sistemas, cada uno enfocado en el aspecto a estudiar, como ser, compresión del aire en la cámara [2], evitar la entrada en pérdida de la turbina [3], [4] o el acondicionamiento de la potencia entregada a la red [5]. Sin embargo, son pocos los trabajos que presentan un modelo ola-red que integre todo lo anterior [6], [7]. Los modelos ola-red, para un enfoque de control, pueden describirse en tres partes. Primero el recurso, luego la cámara y finalmente, el sistema extractor de potencia. El recurso son las olas, y su descripción es a través de espectros de energía para caracterizar el clima de ola de cada locación en particular [8]. Existen diferentes espectros, los más utilizados son: Pierson-Mostkowitz, JONSWAP y Bretschneider [9], estos, pueden ser calculados a partir de conocer  $H_s$ , la altura significativa de ola, y  $T_p$ , el período pico, y permiten la obtención de  $h(t)$ , la altura de ola. Por su parte, la cámara de captura (el OWC propiamente dicho) es el elemento del sistema que transforma la energía provista por las olas a una energía neumática. Dentro de la cámara se modela el movimiento del agua como un pistón rígido [10] y la compresión de la columna de aire como un resorte no lineal [11]. Finalmente, el sistema de extracción de potencia (PTO, por sus siglas en inglés), está compuesto por una turbina autorrectificante y un generador. Este módulo es el encargado de transformar la energía neumática en energía eléctrica.

En esta última etapa del sistema es donde se aplica el control. Para llevarlo a cabo, en el último tiempo se viene mostrando un gran interés en aplicar técnicas de control que permitan la conversión de energía de manera eficiente, robusta y saludable para el sistema. Entre la gran variedad de técnicas conocidas, las de modos deslizantes poseen características que las convierten en opciones atractivas para estos sistemas. En particular, existen ya algunos muy buenos resultados del empleo de esquemas de control por Modos Deslizantes de Segundo Orden (MDSO) [12]–[14], que demuestran su aptitud para lidiar de manera robusta con las perturbaciones e incertidumbres que presentan los sistemas OWC. En [15], los autores consideraron incluir limitaciones reales en el tiempo de conmutación de la acción de control, por tal motivo, se observó un notable deterioro en el funcionamiento del

sistema (aumento significativo del *chattering*). Este trabajo continúa con dicha propuesta, modificando el esquema de control propuesto y probando ese diseño sobre un generador sincrónico de imán permanente.

Las secciones de esta publicación incluyen el modelado del sistema (Sección II), el diseño del control en la Sección III, los resultados de aplicar el control al modelo completo en la Sección IV y las conclusiones en la Sección V.

## II. MODELOS

El principio de esta sección presenta el modelo utilizado para el diseño de control. Luego, al final, se muestra la ampliación del mismo para obtener el modelo completo.

### II-A. Sistema de extracción de potencia (PTO)

La etapa de extracción de potencia (PTO) se compone de los siguientes elementos:

*II-A1. Turbina autorrectificante:* Una turbina autorrectificante mantiene su sentido de giro independientemente de la dirección del flujo de aire. Actualmente, los tres tipos más conocidos son: Wells (la más famosa), de impulso y biradial. La primera de ellas tiene una operación simple y un costo reducido, y la descripción de su comportamiento se explica mediante las ecuaciones [16]:

$$\Delta p = C_a(\phi) K \rho_{in} \frac{1}{A_t} \left[ v_x^2 + (r\Omega_m)^2 \right] \quad (1)$$

$$\phi = \frac{v_x}{r\Omega_m} \quad (2)$$

$$T_t = C_t(\phi) K \rho_{in} r \left[ v_x^2 + (r\Omega_m)^2 \right] \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_t \Omega_m}{q \Delta p} = \frac{C_t}{C_a \phi} \quad (4)$$

en donde (1) muestra la relación de la caída de presión,  $\Delta p$ , con las velocidades de flujo de aire a través de la turbina  $v_x = |v_t|$  y de rotación del eje  $\Omega_m$ , a partir del coeficiente de presión  $C_a(\phi)$ , función no lineal del coeficiente de flujo ( $\phi$ ). Por su parte, (3) modela el comportamiento de la cupla en la turbina ( $T_t$ ), donde aparece  $C_t(\phi)$  como el coeficiente de cupla. Además,  $K_t = nlb/2$  es la constante de la turbina, dependiente de  $n$ ,  $b$  y  $l$ , que son el número, altura y largo de cuerda de la pala, respectivamente, con  $A_t$  como el área del ducto de la turbina,  $r$  su radio y  $\rho_{in} = \rho_{atm}$  la densidad de aire que atraviesa la turbina. Por último, (4), describe el rendimiento de la turbina ( $\eta$ ), donde  $q = v_x A_t$  es el caudal de aire. Los parámetros de la turbina pueden observarse en Fig. 2.

*II-A2. Generador:* Con respecto al generador, en estos sistemas pueden emplearse de diversos tipos, como por ejemplo generadores de inducción de jaula de ardilla [17], generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG en inglés) [13], [16] y generadores sincrónicos de imán permanente (PMSG,

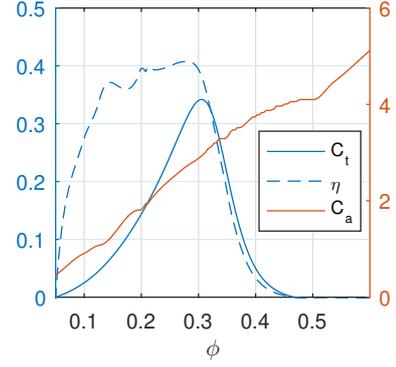


Fig. 2. Parámetros de la turbina Wells.

en inglés) [12]. En este trabajo, se utiliza un PMSG debido a sus ventajas de mantenimiento, cuyo modelo es [18]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_d/L_d i_d + \frac{L_q}{L_d} i_q p_p \Omega_m \\ -R_q/L_q i_q - \frac{L_d}{L_q} i_d p_p \Omega_m - \psi_a p_p \Omega_m / L_q \\ T_t/J - T_e/J - B_w \Omega_m / J \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_d \\ 1/L_q \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde,  $\psi_a$  es el acoplamiento inductivo,  $p_p$  el número de pares de polos,  $R_d = R_q = R_s$  y  $L_d = L_q = L_s$  son la resistencia e inductancia de estator, respectivamente, asumiendo que el flujo en el entrehierro es uniforme. Finalmente,  $v$  ( $i$ ) representa las tensiones (corrientes) directa ( $d$ ) y en cuadratura ( $q$ ), respectivamente,  $\Omega_m$  la velocidad de rotación mecánica,  $T_t$  es (3) y  $J$  es la inercia total de las partes móviles del sistema (turbina y generador). Por otra parte,

$$T_e = p_p [(L_d - L_q) i_d + \psi_a] i_q \quad (6)$$

es la cupla electromagnética.

### II-B. Modelo expandido para ensayos del diseño de control

Luego de realizar el diseño del control, éste se prueba sobre un modelo completo de la ola al generador, que contempla la dinámica de la compresión del aire y la descripción del movimiento de la superficie de agua, ambas dentro de la cámara de captura.

La dinámica compresible del aire queda descrita por [19]:

$$\Delta p(t) + \frac{\rho_{in} \Omega_m(t) V_0}{\gamma p_{atm} 2r} \Delta \dot{p}(t) = \frac{\rho_{in} \Omega_m(t)}{2r} A_c \dot{z}(t). \quad (7)$$

donde  $A_c$  es el área de la cámara,  $z$  es la variación, con respecto al nivel medio del mar, del agua encerrada en la cámara y  $V_0$  es el volumen de aire encerrado en la cámara cuando  $z = 0$ . Por otra parte, el movimiento de la superficie de agua se modela mediante una aproximación a la ecuación de Cummins [20], como la propuesta por [7].

### III. DISEÑO DEL CONTROL

En esta sección se diseña un esquema de control donde se adaptan las ganancias de dos controladores *Twisting* tradicionales, según [21]. Para llegar hasta esa etapa en el diseño, primero es necesario plantear los objetivos de control, luego, traducir esos objetivos a variables de deslizamiento. Acto seguido, diseñar el esquema de control de ganancias fijas, que después será el marco del esquema de control adaptable, el cual se diseña en última instancia. Durante toda la sección se trabaja con la dinámica dominante del sistema, asociada al PTO. Por lo cual, los estados y acciones de control presentes en la etapa de diseño son  $x = [i_d, i_q, \Omega_m]$  y  $u = [v_d, v_q]$ .

#### III-A. Objetivos de Control - Variables de Deslizamiento

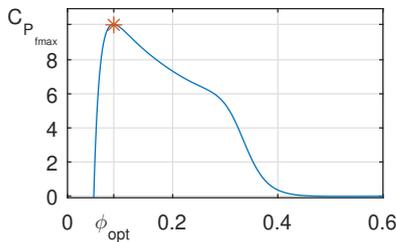
Los objetivos de control propuestos están orientados a, por un lado, mantener al PTO funcionando en su punto óptimo [13] y, por el otro, a reducir las oscilaciones en la cupla electromagnética ( $T_e$ ) [18].

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos de control, debe diseñarse una variable de deslizamiento  $\sigma$  tal que los mismos se verifiquen cuando  $\sigma$  y su primera derivada temporal sean nulas. El control por MDSO se encarga de llevar y mantener en cero, tanto a  $\sigma$  como a su derivada ( $\sigma = \dot{\sigma} = 0$ ), de manera robusta frente a las perturbaciones e incertidumbres en el sistema que son contempladas en la etapa de diseño.

**III-A1. 1<sup>er</sup> Objetivo - Operación óptima del PTO:** En [13], los autores propusieron que la potencia mecánica de salida de la turbina, a partir de (4) y (1), puede escribirse como:

$$P_{out} = \underbrace{\frac{2k}{\rho a} \eta(\phi) C_a(\phi) (1 + \phi^{-2})}_{C_{P_f}(\phi)} \underbrace{\frac{\rho a}{2} v_x^3}_{P_f} = C_{P_f}(\phi) P_f(v_x). \quad (8)$$

Así, separando la potencia de salida en dos factores, uno dependiente de la excitación,  $P_f(v_x)$ , y el otro dependiente del punto de operación, será posible maximizar la potencia de salida eligiendo correctamente ese punto, determinado de manera única por  $C_{P_f}(\phi)$  (Fig. 3).



**Fig. 3.** Coeficiente  $C_{P_f}$ .

La estrategia para mantener al sistema funcionando en su punto óptimo,  $\phi = \phi_{opt}$ , se logra controlando la velocidad de rotación de la turbina con la referencia:

$$\Omega_{opt} = \frac{v_x}{r\phi_{opt}} \quad (9)$$

Finalmente, la variable de deslizamiento se diseña en base a este valor óptimo de velocidad, de la siguiente manera:

$$\sigma_1 = \Omega_m - \Omega_{opt} \quad (10)$$

**III-A2. 2<sup>do</sup> Objetivo - Reducir oscilaciones en  $T_e$ :** Se ha probado que las oscilaciones en la cupla electromagnética son fuertemente atenuadas cuando la corriente  $i_d$  es forzada a cero [18]. Por lo tanto, para reducir las oscilaciones en la turbina y, consecuentemente, la fatiga, la referencia que permitirá cumplir con el segundo objetivo de control es:

$$I_{dref} = 0. \quad (11)$$

Esto permite plantear la siguiente variable de deslizamiento:

$$\sigma_2 = i_d - I_{dref} \quad (12)$$

#### III-B. 1<sup>ra</sup> Etapa del esquema de control - Gan. Fijas

En la presente subsección se explica el diseño del esquema de control de ganancias fijas que, tal como se dijo al principio de esta sección, es una etapa previa necesaria en el diseño del esquema de ganancias adaptativas. A partir (10), (12) y (5), se determina que  $\sigma_1$  es de grado relativo 2 ( $GR = 2$ ) con respecto a  $v_q$  y que  $\sigma_2$  es de  $GR = 1$  con respecto a  $v_d$ . Acorde al método de diseño [21], el primer paso consiste en el diseño de dos controladores basados en el algoritmo *Twisting*. En tanto que uno de ellos se aplica directamente a  $v_q$ , para el otro es necesaria una expansión integral en la entrada de control para que pueda aplicarse a  $v_d$ , ya que el algoritmo es para sistemas de  $GR = 2$ . Luego de la selección de los algoritmos, es necesario calcular las cotas que permiten definir el valor de las ganancias que aseguran la robustez frente a las perturbaciones e incertidumbres propuestas. A continuación se explica el procedimiento del cálculo de las cotas llevado a cabo para cada algoritmo.

**III-B1. 1<sup>er</sup> Objetivo - Operación óptima del PTO:** La acción de control  $v_q$  consta de dos términos:

$$v_q = v_{qE} + v_{qMD} \quad (13)$$

El término  $v_{qE}$  es la acción de control que guía al sistema a los alrededores de  $\sigma_1 = 0$ , permitiendo aliviar el esfuerzo de control de MDSO y reduciendo el valor de sus ganancias fijas. Asimismo,  $v_{qMD}$  es la acción de control de modo deslizante, que se encarga de garantizar  $\sigma = \dot{\sigma} = 0$  y brindar robustez ante incertidumbres y perturbaciones.

Para obtener  $v_{qE}$  se sigue un procedimiento inspirado en el concepto de control equivalente en MD. Utilizando la segunda derivada de  $\sigma_1$  en donde la acción de control  $v_{qE}$  aparece explícitamente por ser de GR 2:

$$\ddot{\sigma}_1 = \frac{1}{J} \dot{T}_t + \frac{K_g}{J} \left( -\frac{R_s}{L_s} i_q - i_d p_p \Omega_m - \psi_a p_p \Omega_m / L_s \right) - \frac{B}{J} \dot{\Omega}_m - \ddot{\Omega}_{ref} + \frac{K_g}{J L_s} v_q = a_1(x, t) + b_1(x, t) v_q \quad (14)$$

donde  $K_g = p_p \psi_a$  es la constante del generador y  $\dot{T}_t(v_x, \Omega_m)$  se obtiene de (3).  $v_{qE}$  es el control continuo que logrará

$\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = 0$  en condiciones nominales, sin perturbaciones o incertidumbre presentes, y se despeja de (14), cuando  $\ddot{\sigma}_1 = 0$ :

$$v_{qE} = v_q \Big|_{\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = \ddot{\sigma}_1 = 0} = - \frac{a_{1_{NOM}}(x, t)}{b_{1_{NOM}}(x, t)} \Big|_{\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = \ddot{\sigma}_1 = 0} \quad (15)$$

Luego, el término  $v_{qMD}$  es de la forma:

$$v_{qMD}(\sigma_1) = -r_1 \text{sign}(\sigma_1) - r'_1 \text{sign}(\dot{\sigma}_1); r_1 > r'_1 > 0, \quad (16)$$

correspondiente al algoritmo *Twisting* [22]. Para su diseño, es necesario escribir  $\ddot{\sigma}_1$  de la siguiente manera:

$$\ddot{\sigma}_1 = \lambda_1(x, t) + \gamma_1(x, t)v_{qMD}. \quad (17)$$

Para esto, sustituimos (13) en (14) para obtener:

$$\ddot{\sigma}_1 = \underbrace{a_1(x, t) + b_1(x, t)v_{qE}}_{\lambda_1} + \underbrace{b_1(x, t)}_{\gamma_1} v_{qMD} \quad (18)$$

Las funciones  $\lambda_1$  y  $\gamma_1$  deben ser acotadas por tres constantes positivas  $\Gamma_{m1} < \Gamma_{M1}$  y  $C_1$ , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} |\lambda_1(x, t)| &\leq C_1 \\ \Gamma_{m1} &\leq \gamma_1(x, t) \leq \Gamma_{M1} \end{aligned} \quad (19)$$

Es importante notar que el algoritmo de control será robusto a las perturbaciones e incertidumbres que sean consideradas al calcular las cotas de (19). Finalmente, las ganancias del algoritmo son seleccionadas de acuerdo a las condiciones suficientes que garantizan la convergencia finita a  $\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = 0$ :

$$\begin{aligned} r_1 &= r'_1 + \Delta_T \\ r'_1 &> \frac{\Delta_T(\Gamma_{M1} - \Gamma_{m1}) + 2C_1}{2\Gamma_{m1}} \\ \Delta_T &> \frac{C_1}{\Gamma_{m1}} \end{aligned} \quad (20)$$

**III-B2. 2<sup>do</sup> Objetivo - Reducir oscilaciones en  $T_e$ :** Para cumplir de manera robusta con este objetivo, también se propone un esquema de control con dos términos:

$$v_d = v_{dE} + v_{dMD} \quad (21)$$

compuesto por un término de polarización  $v_{dE}$  y un término de modo deslizante  $v_{dMD}$ . El proceso de diseño es análogo al explicado anteriormente, teniendo en cuenta que  $\sigma_2$  ahora es de GD 1.

Primero, para el cálculo del control de polarización es necesario calcular la primera derivada de  $\sigma_2$ , en la que aparece explícitamente  $v_d$ , y expresarla en la forma:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_2 &= \dot{i}_d - \dot{I}_{ref} = -\frac{R_s}{L_s} i_d + i_q p_p \Omega_m - + \frac{1}{L_s} v_d \\ &= A_2(x, t) + B_2(x, t)v_d. \end{aligned} \quad (22)$$

El control  $v_{dE}$  que garantiza  $\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0$ , cuando el sistema tiene parámetros nominales y no está sometido a perturbación e incertidumbre, es:

$$v_{dE} = v_d \Big|_{\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0} = - \frac{A_{2_{NOM}}(x, t)}{B_{2_{NOM}}(x, t)} \Big|_{\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0}. \quad (23)$$

Luego, la robustez estará a cargo de un controlador *Twisting*. Sin embargo, debido a que  $\sigma_2$  es una variable de GR 1,

es necesario expandir el sistema para poder aplicar la ley *Twisting*. Así, se crea una variable artificial  $\nu_I$  tal que:

$$\dot{v}_{dMD} = \nu_I \quad (24)$$

y el algoritmo de control se aplica a  $\nu_I$ :

$$\nu_I(\sigma_2) = -r_2 \text{sign}(\sigma_2) - r'_2 \text{sign}(\dot{\sigma}_2); r_2 > r'_2 > 0. \quad (25)$$

Para sintonizar las ganancias, es necesario expresar  $\ddot{\sigma}_2$  explícitamente en términos de  $\dot{v}_{dMD} = \nu_I$ :

$$\ddot{\sigma}_2 = \lambda_2(x, u, t) + \gamma_2(x, t)\nu_I. \quad (26)$$

Así, derivando dos veces  $\sigma_2$  e incorporando (21), se obtiene:

$$\begin{aligned} \ddot{\sigma}_2 &= -\frac{R_s}{L_s} \dot{i}_d + \underbrace{i_q p_p \Omega_m + i_q p_p \dot{\Omega}_m + \frac{\dot{v}_{dE}}{L} - \ddot{I}_{ref}}_{\lambda_2(x, u, t)} + \\ &+ \underbrace{\frac{1}{L_s}}_{\gamma_2(x, t)} \nu_I = \lambda_2(x, u, t) + \gamma_2(x, t)\nu_I, \end{aligned} \quad (27)$$

Las funciones  $\lambda_2$  y  $\gamma_2$  deben ser acotadas por las constantes positivas  $\Gamma_{m2} < \Gamma_{M2}$  y  $C_2$ , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} |\lambda_2(x, u, t)| &\leq C_2 \\ \Gamma_{m2} &\leq \gamma_2(x, t) \leq \Gamma_{M2}, \end{aligned} \quad (28)$$

teniendo en cuenta las perturbaciones e incertidumbres que podrían afectar al sistema. Finalmente, las ganancias se seleccionan de tal manera que verifiquen las condiciones de (20).

### III-C. 2<sup>da</sup> Etapa del esquema de control - Gan. Adaptivas

El esquema de control de la subsección III-B, presenta *chattering* reducido al operar en condiciones ideales, es decir, con una frecuencia de conmutación infinita. Dado que esta condición no es implementable en la práctica, en [15] los autores propusieron limitar la frecuencia de conmutación ( $f_c$ ) de la acción de control, forzando al esquema de control a trabajar en MD real. Se mostró que mantener las ganancias fijas en esta condición realista deteriora el funcionamiento del sistema (aumenta el *chattering*) cuando se trabajaba con un DFIG. Este trabajo muestra que también es necesario un esquema de ganancias adaptivas cuando el generador es un PMSG.

El algoritmo de *Twisting* adaptable de [21], [23], se enmarca dentro del *Twisting* de ganancias fijas y está basado en contar los cruces por cero de la variable de deslizamiento.

La cuenta se realiza dentro de ventanas de duración fija  $T_v$ , obteniéndose para cada una la cantidad de cruces  $N_{sw}$ . La operación en MD se establece si  $N_{sw} \geq N$ , donde  $N$  es una cantidad de cruces preestablecida en la etapa de diseño.

El algoritmo de control tiene la forma:

$$u(\sigma) = -\alpha_T W^j \text{sign}(\sigma) - W^j \text{sign}(\dot{\sigma}) \quad (29)$$

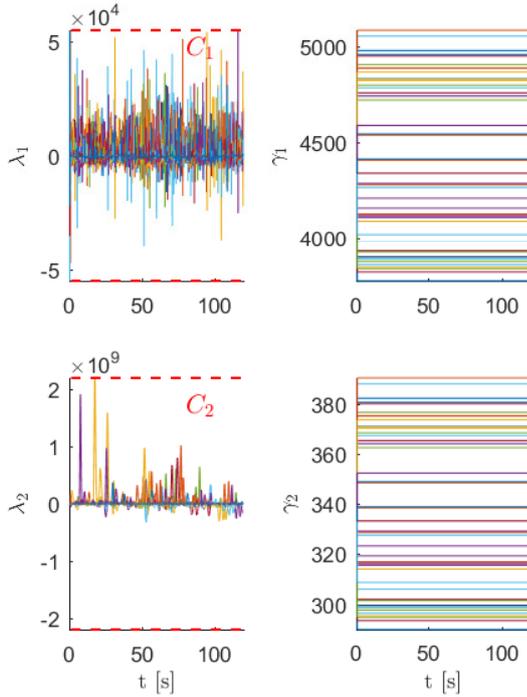
donde  $W$  son las ganancias que varían según:

$$\begin{aligned} W^1 &= W_{max} \\ W^{j+1} &= \begin{cases} \max(W^j - \Lambda T_v, W_{min}) & \text{si } N_{sw}^j \geq N \\ \min(W^j + \Lambda' T_v, W_{max}) & \text{si } N_{sw}^j < N \end{cases} \end{aligned} \quad (30)$$

donde  $j$  indica sobre qué intervalo se está trabajando,  $W_{max}$  es la ganancia definida en la Subsección III-B,  $W_{min}$  es la mínima ganancia arbitraria que puede tomar el algoritmo,  $\Lambda > 0$  es la pendiente de decremento y  $\Lambda' > |\lambda|/\Gamma_m$  la de incremento [23]. El tamaño de la ventana  $T_v$  se define en función de la frecuencia de conmutación  $f_c = 1/T_c$ , de manera tal que abarque un número suficiente de potenciales cruces y se ha establecido empíricamente que  $N = 3$  es suficiente [23].

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para llegar al diseño final, primero, las cotas de los controladores de ganancia fija se calcularon mediante simulaciones del sistema PTO, excitándolo con olas policromáticas y controlándolo solamente con la acción de polarización ( $v_{dE}$  y  $v_{qE}$ ). Para su cálculo, se propuso una variación uniforme de los parámetros eléctricos con una incertidumbre de 15% y se perturbó al sistema con un escalón de cupla proporcional al 15% de la cupla de la turbina. Se realizaron exhaustivas simulaciones, cubriendo un rango de clima de olas entre  $1 \leq H_s \leq 1,5 m$  y  $8 \leq T_p \leq 12 s$ . Un extracto de los resultados del procedimiento puede verse en la Fig. 4, donde se muestran 50 ensayos únicamente, por motivos de visualización. Una vez obtenidos los valores de las cotas se calculan las



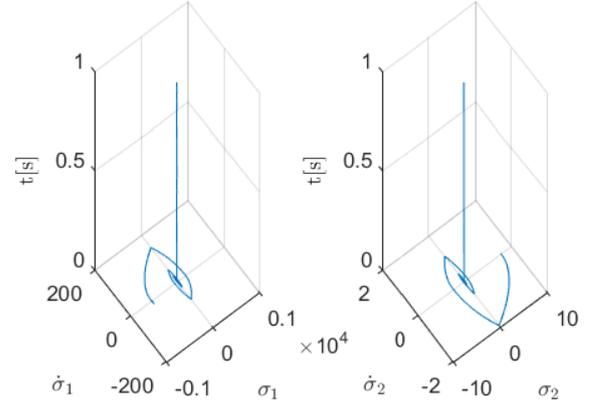
**Fig. 4.** Cálculo de cotas para  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , en fila 1 y 2 respectivamente.

ganancias, verificando (20) para ambos controladores *Twisting* (ver Tabla I). El comportamiento del control a frecuencia ideal, con las ganancias de diseño, puede verse en la Fig. 5.

Luego, se activa en el modelo de diseño (PTO) la limitación en la frecuencia de conmutación ( $f_c = 2kHz$ ), ya que

Tabla I: Parámetros del sistema

Cámara	PTO	Control
$A_c = 19,35 [m^2]$	$K_t = 0.1031$	$r_1 = 91.1; r'_1 = 46.7$
$r = 0,375 [m]$	$R_s = 0.08 [\Omega]$	$r_2 = 1,6 * 10^7$
$A_d = 0,4418 [m^2]$	$L_s = 3 [mHy]$	$r'_2 = 8,6 * 10^6$
$r_e = 4,3 [m]$	$\psi_a = 0.31 [V.s]$	$\Lambda_1 = 5; \Lambda'_1 = 2 * 10^3$
$\rho_w = 1030 [kg/m^3]$	$p_p = 1$	$N_1 = N_2 = 3$
$\rho_{atm} = 1,19 [kg/m^3]$	$J = 0.0357 [Kg.m^2]$	$\Lambda_2 = 3 * 10^4$
$p_{atm} = 101325 [Pa]$	$B_w = 0.03 [N.m.s]$	$\Lambda'_2 = 2,4 * 10^7$



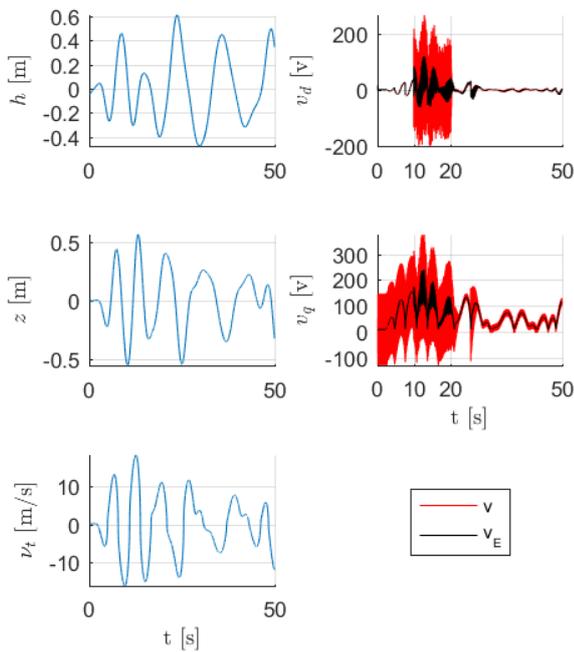
**Fig. 5.** Convergencia y permanencia de  $\sigma - \hat{\sigma}$  en 0.

el actuador será un convertidor de potencia. Se diseña el algoritmo de ganancias variables seleccionando una ventana de  $T_v = 15ms$ , un umbral de cruces  $N = 3$  y los mínimos de ganancias en los algoritmos de  $W_{min_1} = 4,6$  y  $W_{min_2} = 863$ . El resto de los valores se observan en la Tabla I.

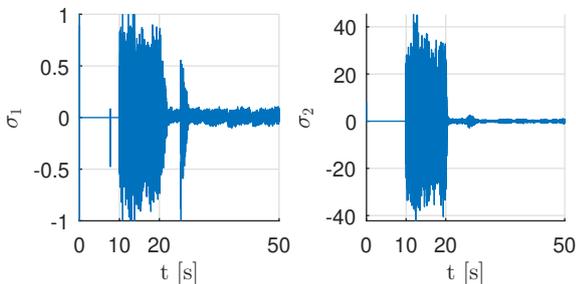
Por último, el diseño final de los algoritmos de control se prueba sobre el modelo completo del sistema, es decir, contemplando también la dinámica del pistón rígido y la compresión del aire en la cámara. Las pruebas se efectuaron con realizaciones de un espectro de ola Jonswap, de parámetros  $H_s = 1m$  y  $T_p = 12s$ . Para una mejor visualización del proceso de diseño, se muestra una simulación de 50s de duración, en la cual, de 0 a 10s el sistema se controla con el MDSO ideal, de 10 a 20s se activa la limitación en la frecuencia de conmutación del sistema y después de los 20s el sistema funciona con el esquema de control adaptable (Fig. 6 y Fig. 7).

#### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó un esquema de control con dos controladores *Twisting* adaptables. El diseño se realizó sobre un modelo reducido de una turbina Wells con generador sincrónico de imán permanente. Luego, se probó sobre un modelo completo del sistema de agua oscilante, incluyendo los efectos de compresión del aire y del movimiento del agua dentro de la cámara. Se observó un buen rendimiento del sistema con las ganancias adaptativas y una notable reducción del *chattering* cuando se lo compara con



**Fig. 6.** Resultados sobre el modelo completo.  $h(t)$  es la altura de ola,  $z(t)$  es la variación en la posición del pistón,  $\nu_t$  es la velocidad del flujo de aire,  $v_d$  y  $v_q$  son las acciones de control equivalentes (negro) y totales (rojo).



**Fig. 7.** Chattering en  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ .

el esquema de ganancias fijas. Una posible modificación en el futuro será reemplazar por un *Super-Twisting* adaptable el control de corriente  $i_d$ , para evitar la expansión en una de las entradas de control.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Facultad de Ingeniería, la UNLP, CONICET y la Agencia I+D+i.

#### REFERENCIAS

[1] T. V. Heath, "A review of oscillating water columns," *Trans. R. Soc. A*, vol. 370, pp. 235–245, 2012.  
 [2] W. Sheng and A. Lewis, "Wave energy conversion of oscillating water column devices including air compressibility," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 5, p. 054501, sep 2016.

[3] F. M'zoughi, S. Bouallègue, A. J. Garrido, I. Garrido, and 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] O. Barambones, J. A. Cortajarena, J. M. Gonzalez de Durana, and 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.  
 [5] G. Rajapakse, S. Jayasinghe, A. Fleming, and M. Negnevitsky, "Grid integration and power smoothing of an oscillating water column wave energy converter," *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1871, jul 2018.  
 [6] M. Penalba and J. Ringwood, "A review of wave-to-wire models for wave energy converters," *Energies*, vol. 9, no. 7, p. 506, jun 2016.  
 [7] R. Suchithra, K. Ezhilsabareesh, and A. Samad, "Development of a reduced order wave to wire model of an OWC wave energy converter for control system analysis," *Ocean Engineering*, vol. 172, pp. 614–628, jan 2019.  
 [8] U. A. Korde and J. Ringwood, *Hydrodynamic Control of Wave Energy Devices*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.  
 [9] Y. Goda, *Random Seas and Design of Maritime Structures (2nd Edition)*. World Scientific Pub Co Inc, 2000.  
 [10] D. V. Evans, "The oscillating water column wave-energy device," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 22, no. 4, pp. 423–433, 1978.  
 [11] A. F. Falcão and J. C. Henriques, "The spring-like air compressibility effect in oscillating-water-column wave energy converters: Review and analyses," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 483–498, sep 2019.  
 [12] R. Suchithra, K. Ezhilsabareesh, and A. Samad, "Optimization based higher order sliding mode controller for efficiency improvement of a wave energy converter," *Energy*, vol. 187, p. 116111, nov 2019.  
 [13] F. D. Mosquera, C. A. Evangelista, P. F. Puleston, and J. V. Ringwood, "Optimal wave energy extraction for oscillating water columns using second-order sliding mode control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 9, pp. 1512–1519, jul 2020.  
 [14] D. T. Gaebele, M. E. Magana, T. K. Brekken, and J. C. Henriques, "Constrained sliding mode control for oscillating water column wave energy converters."  
 [15] F. Mosquera, C. Evangelista, P. Puleston, and J. Ringwood, "Control para máxima extracción de energía undimotriz por modos deslizantes de segundo orden real con ganancias adaptivas," in *Anales Congreso RPIC 2019*.  
 [16] F. M'zoughi, A. J. Garrido, I. Garrido, S. Bouallègue, and M. Ayadi, "Sliding mode rotational speed control of an oscillating water column-based wave generation power plants," in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2018, pp. 1263–1270.  
 [17] J. Henriques, J. Portillo, W. Sheng, L. Gato, and A. Falcão, "Dynamics and control of air turbines in oscillating-water-column wave energy converters: Analyses and case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 571–589, sep 2019.  
 [18] P. Vas, *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford New York: Oxford University Press, 1998.  
 [19] A. F. Falcão, J. C. Henriques, L. M. Gato, and R. P. Gomes, "Air turbine choice and optimization for floating oscillating-water-column wave energy converter," *Ocean Engineering*, vol. 75, pp. 148–156, jan 2014.  
 [20] W. Cummins, D. T. M. B. W. D. C., and D. W. T. M. Basin, *The Impulse Response Function and Ship Motions*, ser. Report (David W. Taylor Model Basin). Navy Department, David Taylor Model Basin, 1962.  
 [21] A. Pisano, M. Tanelli, and A. Ferrara, "Time-based switched sliding mode control for yaw rate regulation in two-wheeled vehicles," in *Decis. Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annu. Conf.*, 2012, pp. 743–1546.  
 [22] G. Bartolini, A. Ferrara, A. Levant, and E. Usai, "On second order sliding mode controllers," in *Var. Struct. Syst. sliding mode nonlinear Control*, K. Young and U. Özgüner, Eds. London: Springer London, pp. 329–350.  
 [23] L. M. Capisani, A. Ferrara, and A. Pisano, "Second-order Sliding Mode Control with Adaptive Control Authority for the Tracking Control of Robotic Manipulators," in *18th IFAC World Congr.*, Italy, 2011.