

# Jornadas de Automática

## Mitigación de vibraciones con control del flujo de aire basado en GA-ANFIS de una turbina eólica marina flotante híbrida con columnas de agua oscilantes

M'zoughi, F.<sup>a,\*</sup>, Aboutalebi, P.<sup>a</sup>, Ahmad, I.<sup>a</sup>, Bagheri Rouch, T.<sup>a</sup>, Garrido, I.<sup>a</sup>, Garrido, A.J.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Automatic Control Group—ACG, Institute of Research and Development of Processes—IIDP, Department of Automatic Control and Systems Engineering, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country—UPV/EHU, Po Rafael Moreno no3, 48013 Bilbao, Spain.

**To cite this article:** M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Ahmad, I., Bagheri Rouch, T., Garrido, I., Garrido, A.J. 2024. GA-ANFIS-based airflow control vibration mitigation of a hybrid floating marine wind turbine with oscillating water columns. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10975>

### Resumen

Este artículo presenta un enfoque novedoso para modelar y estabilizar una turbina eólica marina flotante (FOWT) mediante el empleo de columnas de agua oscilantes (OWC) como sistema de control estructural activo. El concepto innovador implica diseñar una nueva plataforma flotante similar a una barcaza con OWC integrados en lados opuestos de la plataforma para mitigar las oscilaciones no deseadas del sistema. Estos OWC contrarrestan las fuerzas de flexión provocadas por el viento en la torre y las olas en la plataforma de la barcaza. Para sincronizar las fuerzas opuestas con la inclinación del sistema, se emplea una estrategia de control de flujo de aire basada en un sistema de inferencia neurodifusa adaptativa de algoritmo genético. Mediante la manipulación del ángulo de inclinación de la plataforma de la barcaza, el sistema de control de flujo de aire GA-ANFIS ajusta las válvulas en cada lado, abriendo una y cerrando la otra en consecuencia. Los resultados de la simulación, en comparación con un FOWT estándar, demuestran la eficacia del control del flujo de aire GA-ANFIS. Se ha demostrado que es superior a la hora de reducir el cabeceo de la plataforma y la traslación longitudinal de la parte superior de la torre.

*Palabras clave:* ANFIS, control de flujo de aire, plataforma de barcaza, turbina eólica marina flotante, algoritmo genético, columna de agua oscilante, control estructural activo.

### GA-ANFIS-based airflow control vibration mitigation of a hybrid floating marine wind turbine with oscillating water columns

#### Abstract

This paper introduces a novel approach to model and stabilize a Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) by employing Oscillating Water Columns (OWC) as an active structural control system. The innovative concept involves designing a new floating barge-like platform with integrated OWCs on opposite sides of the platform to mitigate undesired oscillations of the system. These OWCs counteract the bending forces caused by wind on the tower and waves on the barge platform. To synchronize the opposing forces with the system's tilting, a proposed Genetic Algorithm-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-based airflow control strategy is employed. Through manipulation of the barge platform's pitch angle, the GA-ANFIS airflow control system adjusts the valves on either side, opening one and closing the other accordingly. Simulation results, compared with a standard FOWT demonstrate the effectiveness of the GA-ANFIS airflow control. It is shown to be superior in reducing platform pitching and the fore-aft translation of the tower top.

*Keywords:* ANFIS, Airflow Control, Barge Platform, Floating Offshore Wind Turbine, Genetic Algorithm, Oscillating Water Column, Active Structural Control.

## 1. Introducción

Se espera que la industria eólica marina desempeñe un papel importante en su consecución del objetivo de triplicar la capacidad de energía renovable en todo el mundo para 2030. Turbinas más grandes, instalaciones en aguas más profundas y avances tecnológicos podrían permitir que los parques eólicos marinos capturen enormes cantidades de energía sostenible frente a las costas del mundo. Para satisfacer la creciente demanda de energía y diversificar la combinación energética, esta expansión es esencial. La industria mundial de la energía eólica marina ayuda a cumplir los objetivos globales para mitigar el cambio climático y garantizar un futuro más limpio y verde mediante la utilización del poder de los vientos marinos fuertes y constantes (Kaldellis, 2013). Como resultado, las emisiones de carbono se reducen significativamente. La incorporación de 8,8 gigavatios de nueva energía eólica marina a la red, lo que refleja una disminución del 58% con respecto a los notables logros de 2021, caracterizó a 2022 como el segundo año más alto de la historia para instalaciones eólicas marinas (Bagheri Rouch, 2022). A pesar de esta disminución, las instalaciones recientes contribuyen a una capacidad global de energía eólica marina de 64,3 GW, lo que demuestra un crecimiento interanual del 16% y representa el 7% del total acumulado de instalaciones eólicas marinas en el mundo (Pérez-Collazo, 2015).

A medida que la energía eólica se desplaza cada vez más hacia tecnologías marinas, los investigadores e inversores han abogado por la adopción de plataformas multipropósito. Estas plataformas están diseñadas para aprovechar múltiples recursos energéticos simultáneamente. Uno de los conceptos más estudiados es el de plataforma eólica, que integra turbinas eólicas (TE) con convertidores de energía de las olas para aprovechar tanto la energía de las olas como la eólica (Hu, 2020), (Ahmad, 2022), (Ahmad, 2023), (Aboutalebi, 2023), (Aboutalebi, 2024). Estudios anteriores han explorado la integración del WEC con turbinas eólicas marinas flotantes, arrojando resultados prometedores. Por ejemplo, en (Kluger, 2017), se emparejó una matriz WEC con un FOWT tipo mástil OC3-Hywind, mientras que (Slocum, 2019) investigó WEC de agitación tanto externa como interna en OC3-Hywind. Además, (Kamarlouei, 2020) concluyó que las vibraciones de la plataforma durante el movimiento vertical y el cabeceo se reducen con una matriz WEC. Sin embargo, estos estudios aún no han explorado el uso de OWC en plataformas de barcasas.

El objetivo de este artículo es integrar un OWC con un FOWT para aprovechar tanto la energía de las olas como la eólica. Además, el estudio se centra en el uso de OWC para estabilizar el FOWT y reducir las vibraciones estructurales. El FOWT considerado en este estudio es la turbina eólica NREL de 5MW montada en una plataforma de barcaza de ITI Energy (Vijfhuizen, W.J.M.J., 2006). El control de los OWC se logrará a través de un control de flujo de aire del Sistema Adaptativo de Inferencia Neuro-Fuzzy (ANFIS), que regulará la apertura y el cierre de las válvulas de aire para controlar el flujo de aire y la presión dentro de cada cámara de aire (M'zoughi, 2018), (M'zoughi, 2020).

Las secciones restantes del documento están organizadas

de la siguiente manera: La Sección 2 detalla el modelo OWC-FOWT desarrollado basado en las fuerzas adicionales de los OWC. En la Sección 3, se presenta el control de flujo de aire GA-ANFIS diseñado. La Sección 4 presenta los resultados de la simulación obtenidos para la nueva estructura e incluye un estudio comparativo que analiza su comportamiento estructural frente a un FOWT estándar. Finalmente, la Sección 5 concluye el artículo con algunas observaciones finales.

## 2. Modelo híbrido OWC-FOWT

A diferencia de las turbinas eólicas terrestres, que experimentan principalmente desplazamientos de adelante hacia atrás y de lado a lado debido a los momentos de flexión en la torre, las turbinas eólicas marinas flotantes enfrentan desafíos adicionales como el desplazamiento de la parte superior de la torre, los modos de rotación y los modos de traslación. Estos factores contribuyen a una mayor vibración e inestabilidad de la estructura. El FOWT estudiado es la TE de línea base costa afuera NREL de 5MW montado en una barcaza de ITI Energy, comúnmente utilizado para analizar interacciones de carga y probar nuevos conceptos para FOWT por J. Jonkman et al. en (Jonkman, 2007).

Estudios anteriores han demostrado que los cambios en el ángulo de inclinación de la plataforma contribuyen significativamente a la flexión de la torre (Jonkman, 2008), (Lackner, 2011). Además, debido a que la flexión de la torre causada por el cabeceo de la barcaza afecta los desplazamientos de la parte superior de la torre, el modo longitudinal también es importante para la estabilidad FOWT. Por lo tanto, el modelo FOWT en este estudio se centra en estos dos modos: ángulo de inclinación de la plataforma y flexión de la torre hacia adelante y hacia atrás. Además, este manuscrito de investigación explora la dinámica de vibración de las turbinas eólicas marinas flotantes, particularmente en relación con las interacciones de las olas. Para lograr un modelo matemático dinámico lineal y desarrollar una estrategia de control estructural activo adecuada para la estabilización de la plataforma, se ha ignorado la influencia de los vientos sobre la turbina.

### 2.1. Modelado matemático del híbrido OWC-FOWT.

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de inclinación de la plataforma y el desplazamiento de la torre hacia adelante y hacia atrás son los grados de libertad más críticos que afectan la estabilidad de la plataforma del FOWT. Por lo tanto, el modelo desarrollado en este estudio se centrará en describir estos dos grados de libertad para diseñar un modelo matemático dinámico de orden reducido. Este modelo, ilustrado en el diagrama de la Fig. 1 (adoptado de (Stewart, 2013), (Hu, 2017)), capturará la dinámica esencial del sistema.

Se supone que la torre TE está conectada a la plataforma a través de un resorte rotacional, caracterizado por la rigidez  $k_r$ , y un amortiguador denominado amortiguación  $d_r$ . La constante de resorte  $k_p$  representa la rigidez de las líneas de amarre, los momentos de restauración hidrostáticos y las propiedades de amortiguación hidrodinámicas que interactúan con la plataforma de la barcaza. El coeficiente de amortiguación  $d_p$  tiene en cuenta las propiedades viscosas y la radiación de las ondas. Las propiedades estructurales del FOWT estudiado se resumen en la Tabla 1.

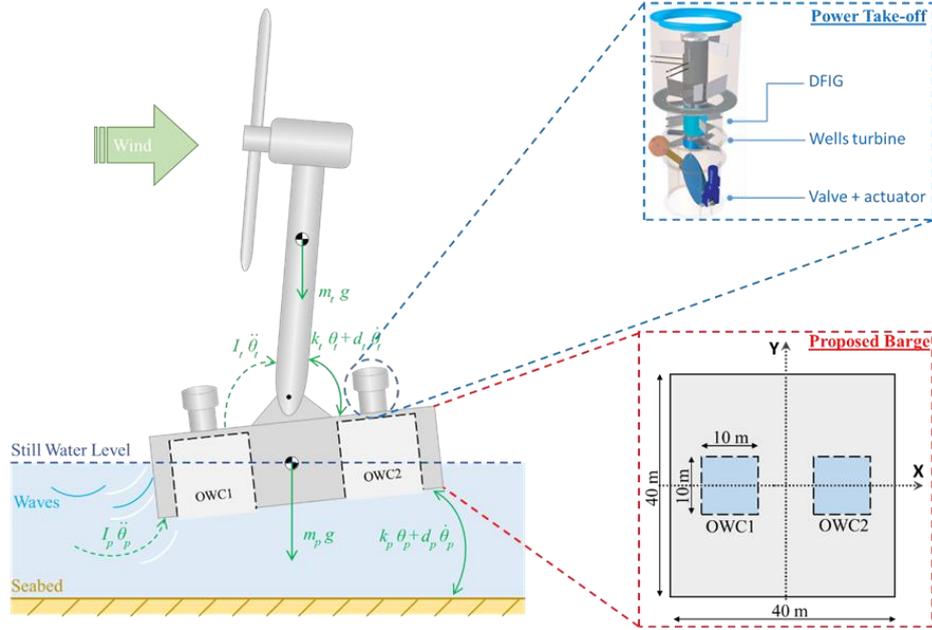


Figura 1: Esquema del concepto OWC-FOWT híbrido propuesto.

La estructura de plataforma híbrida de ondas de viento propuesta tiene como objetivo reducir el ángulo de inclinación de la plataforma y el desplazamiento de la torre hacia adelante y hacia atrás.

Tabla 1: Parámetros de la estructura FOWT

Torre	
Parámetro	Valor
Rigidez	$k_t = 9.7990 \cdot 10^9$ (N m rad <sup>-1</sup> )
Amortiguación	$d_t = 2.1032 \cdot 10^7$ (N m s rad <sup>-1</sup> )
Inercia	$I_t = 1.8217 \cdot 10^9$ (kg m <sup>2</sup> )
Plataforma de barcaza	
Parámetro	Valor
Rigidez	$k_p = 1.4171 \cdot 10^9$ (N m rad <sup>-1</sup> )
Amortiguación	$d_p = 3.6374 \cdot 10^7$ (N m s rad <sup>-1</sup> )
Inercia	$I_p = 1.6945 \cdot 10^9$ (kg m <sup>2</sup> )

Para lograrlo, se integraron dos OWC en la plataforma de la barcaza, ubicados en la parte delantera y trasera de la torre eólica.

Las ecuaciones de Euler-Lagrange de un sistema no conservador con  $n$  coordenadas generalizadas se describen mediante (1) y (2):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$L = T - V \quad (2)$$

donde  $T$  y  $V$  son la energía cinética total y la energía potencial total del sistema, respectivamente.  $L$  es el operador de Lagrange.

La energía cinética total y la energía potencial total de la turbina eólica flotante tipo barcaza se pueden expresar como:

$$T = \frac{1}{2} I_t \dot{\theta}_t^2 + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}_p^2 \quad (3)$$

$$V = \frac{1}{2} k_t (\theta_t - \theta_p)^2 + \frac{1}{2} k_p \theta_p^2 + m_t g R_t \cos \theta_t - m_p g R_p \cos \theta_p \quad (4)$$

donde  $k$  es el coeficiente de rigidez del resorte equivalente,  $\theta$  es el ángulo de rotación alrededor del eje vertical  $z$ ,  $I$  es el momento de inercia alrededor del centro de masa.  $m$  es la masa,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $R$  es la distancia desde el centro de masa hasta la sujeción de la torre. Los subíndices  $p$  y  $t$  representan la plataforma y la torre, respectivamente.

Las fuerzas generalizadas consisten en la fuerza de amortiguación y las cargas de viento y oleaje externas expresadas como:

$$\begin{cases} Q_{\theta_t} = -d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wind} \\ Q_{\theta_p} = -d_p \dot{\theta}_p + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wave} - R_{owc1} f_{owc1} + R_{owc2} f_{owc2} \end{cases} \quad (5)$$

donde  $d$  es el coeficiente de amortiguamiento equivalente,  $M_{wind}$  y  $M_{wave}$  son los momentos flectores causados por el viento externo y las cargas de las olas que actúan sobre la base de la torre y la parte superior de la plataforma, respectivamente.  $f_{owc1}$  y  $f_{owc2}$  son las fuerzas inducidas por las presiones en las cámaras de captura de OWC1 y OWC2, respectivamente.

Sustituyendo (3)-(5) en (1) y (2) y considerando aproximaciones de ángulo pequeño porque ninguna de las excede los 10 grados de inclinación, incluso en las cargas de viento y oleaje más fuertes y asumiendo que ambos OWC están a la misma altura distancia desde la bisagra de la torre ( $R_{owc1} = R_{owc2}$ ) el modelo dinámico no lineal de contacto de la turbina eólica flotante de barcaza se expresa por (6).

$$\begin{cases} I_p \ddot{\theta}_p - k_t (\theta_t - \theta_p) + m_p g R_p \theta_p + k_p \theta_p = -d_p \dot{\theta}_p + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wave} - R_{owc} (f_{owc1} - f_{owc2}) \\ I_t \ddot{\theta}_t + k_t (\theta_t - \theta_p) - m_t g R_t \theta_t = -d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wind} \end{cases} \quad (6)$$

El viento y las olas interactúan con la estructura FOWT de una manera aeroelástica e hidroelástica compleja. Además, existe un acoplamiento inherente entre las respuestas estructurales inducidas por el viento y las olas (Hu, 2018).

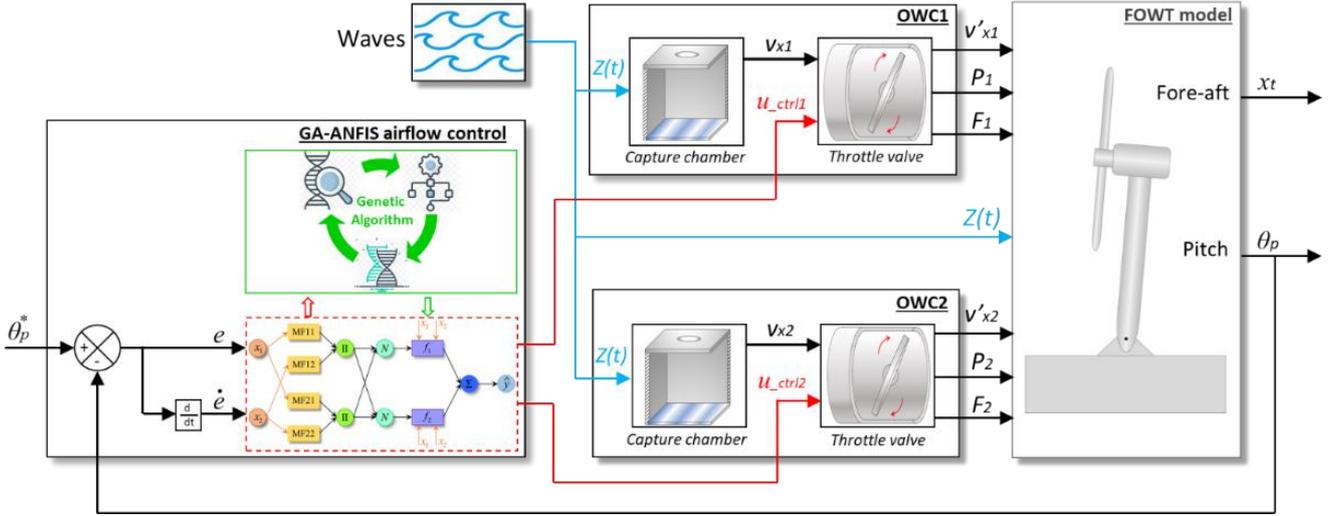


Figura 2: Control de flujo de aire GA-ANFIS propuesto para la estabilización FOWT.

## 2.2. Fuerzas de columnas de agua oscilantes

Suponiendo que la superficie libre interna dentro de la cámara se comporta como un pistón y la presión es uniforme, la fuerza se puede definir como (M'zoughi, 2021):

$$f_{OWCi} = -p_i(t) S \quad (i = 1,2) \quad (7)$$

donde  $p_i(t)$  es la presión de la cámara y  $S$  es la superficie libre interna de la cámara, que es la misma para ambos OWC. El subíndice  $i = 1,2$  se refiere a OWC1 o OWC2.

Considerando el aire como un gas ideal y el sistema es adiabático y las transformaciones son lo suficientemente lentas como para ser reversibles, pueden entonces considerarse isentrópicas y la densidad del aire se define como:

$$\rho_i(t) = \rho_a \left( \frac{P_i(t)}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (i = 1,2) \quad (8)$$

donde  $p_a$  y  $\rho_a$  son la presión atmosférica y la densidad.  $\gamma$  es la proporción de calor.

La linealización de la transformación isentrópica produce la derivada de la densidad del aire:

$$\dot{\rho}_i(t) = \frac{\rho_a}{P_a \gamma} \dot{p}_i(t) \quad (i = 1,2) \quad (9)$$

El caudal másico dentro de las cámaras de captura de los OWC se puede escribir como:

$$\dot{m}_i(t) = \frac{\rho_a V_0}{P_a \gamma} \dot{p}_i(t) + \rho_a \dot{V}_{OWCi}(t) \quad (i = 1,2) \quad (10)$$

donde  $V_0$  es el volumen de aire en la cámara y  $V_{OWC}(t)$  es el volumen de aire instantáneo.

El volumen de aire oscilante  $V_{OWC}(t)$  depende de la geometría de las cámaras de captura OWC y se define como:

$$V_{OWCi}(t) = V_0 - S Z_i(t) \quad (11)$$

donde  $S=l_c.w_c$  es la superficie libre interior de la cámara y  $Z_i$  es el desplazamiento vertical del agua en forma de pistón, que aumenta en dirección ascendente.

Por tanto, la presión dentro de las cámaras depende del caudal de masa y del volumen de aire oscilante (M'zoughi, 2022), (M'zoughi, 2023):

$$\dot{p}_i(t) = \frac{P_a \gamma}{\rho_a V_0} \dot{m}_i(t) - \frac{P_a \gamma}{V_0} \dot{V}_i(t) \quad (i = 1,2) \quad (12)$$

## 3. Control de flujo de aire propuesto GA-ANFIS

Para ayudar a estabilizar la estructura FOWT, se han incorporado un par de OWC a la estructura de la plataforma de barcasas ITI Energy. Ambos OWC son idénticos y se han colocado a ambos lados de la torre (delante y detrás) a distancias iguales para mantener la simetría. Al controlar las válvulas de aire de cada OWC a través de una estrategia de control del flujo de aire para ajustar el flujo de aire y la presión dentro de las cámaras de captura, los OWC pueden ayudar a contrarrestar algunas de las fuerzas hidrodinámicas.

El sistema de control de flujo de aire propuesto utiliza un ANFIS para gestionar eficazmente la apertura y el cierre de válvulas de aire en función del ángulo de paso  $\theta_p$ , como se ilustra en la figura 2.

El controlador ANFIS toma el error del ángulo de paso de la plataforma y su derivada  $e$  y  $\dot{e}$  como entradas, produciendo las señales de control para las válvulas de aire, concretamente  $U_{ctrl1}$  y  $U_{ctrl2}$ , como salidas. A medida que las ondas oscilan, la apertura y el cierre de las válvulas regulan la liberación o atrapamiento de aire, induciendo la compresión o descompresión dentro de las cámaras. En consecuencia, se generan fuerzas en las cámaras para contrarrestar las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la plataforma de la barcaza.

Para mejorar las capacidades del controlador ANFIS, se ha utilizado el Algoritmo Genético (GA) para optimizar las características del modelo ANFIS durante el proceso de entrenamiento como se explica en la Figura 3.

El problema de optimización para la estrategia de control del flujo de aire de las columnas de agua oscilantes se puede formular como un problema de optimización no lineal y restringido, denotado como (13), que se abordará utilizando el algoritmo GA propuesto:

$$\begin{cases} \text{minimize} & J(x) \\ x \in S \subseteq \mathbb{R}_+^d \\ \text{subject to:} & \\ g_1(x) = E_{ss} - E_{ss}^{\max} \\ g_2(x) = t_r - t_r^{\max} \\ g_3(x) = t_s - t_s^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

aquí,  $J: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  representa la función de costos, donde  $d$  es la dimensión del problema.  $S = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^d, \mathbf{x}_{\text{lower}} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\text{upper}}\}$  denota el espacio de búsqueda acotado para las variables de decisión. Como se muestra en la Figura 3, la función de costo  $J$  puede ser  $MSE$ ,  $RMSE$  o  $SD$ . Sin embargo, en este trabajo se utiliza el  $MSE$ .

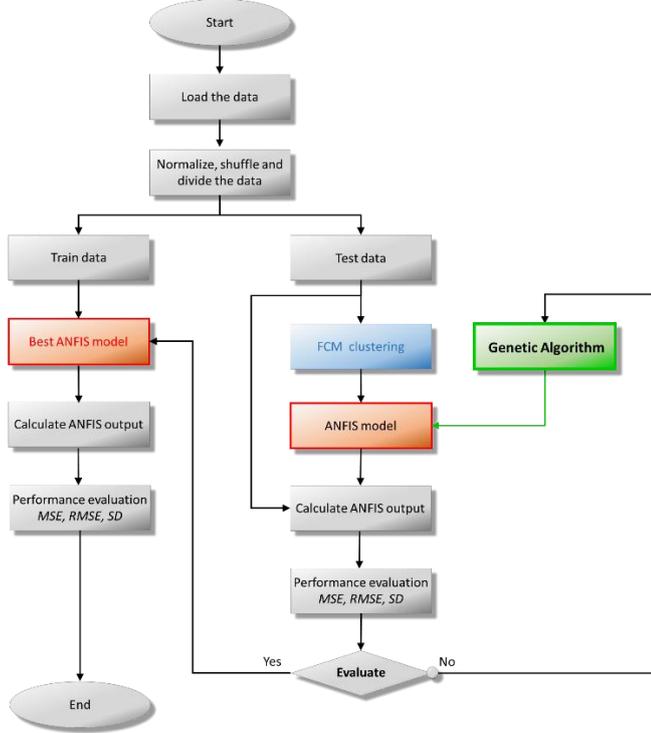


Figura 3: Diagrama de flujo de entrenamiento y pruebas de ANFIS utilizando algoritmo genético.

Las funciones  $g_j: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ , ( $j = 1, 2, 3$ ) representan las restricciones de desigualdad del problema. Los términos  $E_{ss}$ ,  $t_r$  and  $t_s$  corresponden a los criterios de error en estado estacionario, tiempo de subida y tiempo de estabilización, respectivamente. Además,  $E_{ss}^{max}$ ,  $t_r^{max}$  and  $t_s^{max}$  representan los valores máximos pre-especificados para el error en estado estacionario, el tiempo de subida y el tiempo de estabilización, respectivamente.

Para manejar las limitaciones del problema (13), se han sugerido varias técnicas. Uno de estos enfoques implica aplicar penalizaciones a la función de costos  $J$ .

En esta investigación, se toma en consideración una técnica de penalización estática externa y se implementa de la siguiente manera:

$$\varphi(\mathbf{x}) = J(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{n_{con}} \Lambda_j \max[0, g_j(\mathbf{x})]^2 \quad (14)$$

aquí,  $J$  es la función de costo,  $\Lambda_j$  representa los parámetros de penalización de escala y  $n_{con}$  es el número de restricciones.

#### 4. Resultados y discusiones

Para evaluar la respuesta estructural del híbrido FOWT-OWC propuesto y evaluar la eficiencia del control de flujo de aire GA-ANFIS desarrollado, se realizó una simulación utilizando la frecuencia de resonancia de la estructura híbrida

propuesta. Utilizando la frecuencia de resonancia, se introdujo una entrada de onda con una amplitud de 1 m y un período de 11,6 s en el modelo numérico del híbrido OWC-FOWT como se muestra en la Fig. 4.

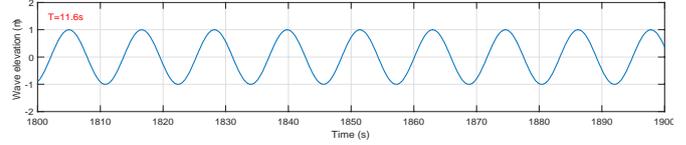


Figura 4: Entrada de onda elegida  $Z(t)$  con el período de onda resonante.

El ángulo de inclinación de la plataforma de la barcaza y el desplazamiento longitudinal de la parte superior de la torre ( $TTD_{FA}$ ) se obtienen y se presentan en las Fig. 5 y 6, respectivamente.

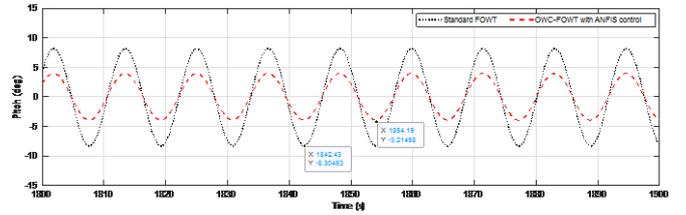


Figura 5: Ángulo de inclinación de la plataforma en estructuras FOWT estándar y basadas en OWC con control GA-ANFIS.

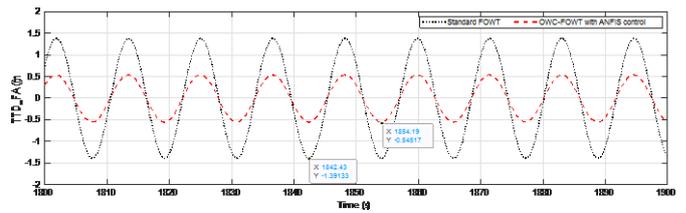


Figura 6: Flexión longitudinal en estructuras FOWT estándar y basadas en OWC con control GA-ANFIS.

La Fig. 5 muestra el ángulo de paso de la plataforma de barcaza cuando se utiliza el OWC-FOWT controlado por flujo de aire GA-ANFIS en comparación con el ángulo de paso de un FOWT tipo barcaza estándar. Con referencia a estos resultados, los sistemas controlados por GA-ANFIS regulan efectivamente las válvulas en función del paso de la plataforma, lo que resulta en una reducción notable del paso de la plataforma. Específicamente, el ángulo de cabeceo disminuye de  $8,304^\circ$  en una barcaza estándar a  $3,214^\circ$  en la barcaza basada en OWC controlada por GA-ANFIS.

El  $TTD_{FA}$  logrado del OWC-FOWT controlado por el ANFIS se compara con el  $TTD_{FA}$  de un FOWT estándar, como se ilustra en la Fig. 6. Al igual que el ángulo de cabeceo, es evidente que el FOWT controlados con GA-ANFIS han reducido efectivamente el  $TTD_{FA}$  en condiciones de onda resonante. En concreto, en un FOWT estándar el  $TTD_{FA}$  es de 1,3913m y disminuye a 0,5451m en el OWC-FOWT con control GA-ANFIS.

#### 5. Conclusiones

Este artículo presenta un concepto novedoso de control estructural activo mediante la integración de OWC en una plataforma de barcaza de ITI Energy para un FOWT. Este enfoque innovador se basa en las fuerzas contrarias generadas por las presiones acumuladas dentro de las cámaras de aire de

las columnas de agua oscilantes. Estas fuerzas contrarias tienen como objetivo mitigar las cargas hidrodinámicas que actúan sobre la estructura, reduciendo así las oscilaciones indeseables en el ángulo de inclinación de la plataforma y el desplazamiento longitudinal de la torre, mejorando en última instancia la estabilidad general de la estructura.

Se desarrolló un modelo dinámico de orden reducido para el concepto FOWT híbrido de ondas de viento propuesto, centrándose en el ángulo de inclinación de la plataforma y la flexión longitudinal de la torre. Este modelo matemático incorpora la presión y las contrafuerzas de los OWC para analizar su impacto en las cargas hidrodinámicas opuestas que actúan sobre la plataforma. Los OWC están controlados por un sistema de control de flujo de aire, que monitorea la inclinación de la plataforma. El error de paso de la plataforma sirve como entrada para los controladores GA-ANFIS, cuyas salidas regulan las señales de control de las válvulas. Como resultado, los controladores GA-ANFIS ajustan la presión dentro de las cámaras para mitigar el ángulo de inclinación de la plataforma y los movimientos longitudinales de la torre.

Los resultados obtenidos indican que el modelo GA-ANFIS entrenado proporciona un rendimiento excelente y revelaron mejoras significativas al comparar los sistemas propuestos con el FOWT estándar. El OWC-FOWT con control GA-ANFIS reduce eficazmente las vibraciones de inclinación de la plataforma.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado en parte por el Gobierno Vasco a través del proyecto IT1555-22, a través de las ayudas PID2021-123543OBC21 y PID2021-123543OB-C22 financiadas por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE. y la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) a través de la beca María Zambrano MAZAM22/15 financiada por UPV-EHU/MIU/Next Generation, EU.

## Referencias

- Aboutalebi, P., Garrido, A.J., Garrido, I., Nguyen, D.T. and Gao, Z. 2024. Hydrostatic stability and hydrodynamics of a floating wind turbine platform integrated with oscillating water columns: A design study. *Renewable Energy* 221, 119824. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119824
- Aboutalebi, P., M'zoughi, F., Garrido, I. and Garrido, A.J. 2023. A control technique for hybrid floating offshore wind turbines using oscillating water columns for generated power fluctuation reduction. *Journal of Computational Design and Engineering* 10(1), 250-265. DOI: 10.1093/jcde/qwac137
- Ahmad, I., M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, I. and Garrido, A.J. 2023. A regressive machine-learning approach to the non-linear complex FAST model for hybrid floating offshore wind turbines with integrated oscillating water columns. *Scientific Reports* 13(1), 1499. DOI: 10.1038/s41598-023-28703-z
- Ahmad, I., M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, I. and Garrido, A. 2022. A Machine-Learning Approach for the Development of a FOWT Model Integrated with Four OWCs. In *2022 26th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*. pp. 72-76. Crete, Greece. IEEE. DOI: 10.1109/CSCC55931.2022.00023
- Bagheri Rouch, T., Fakharian, A. 2022. Robust control of islanded DC microgrid for voltage regulation based on polytopic model and load sharing. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* 46(1), 171-186. DOI: 10.1007/s40998-021-00462-5
- Hu, J., Zhou, B., Vogel, C., Liu, P., Willden, R., Sun, K., Zang, J., Geng, J., Jin, P., Cui, L. and Jiang, B. 2020. Optimal design and performance analysis of a hybrid system combining a floating wind platform and wave energy converters. *Applied energy* 269, 114998. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114998
- Hu, Y. and He, E. 2017. Active structural control of a floating wind turbine with a stroke-limited hybrid mass damper. *Journal of Sound and Vibration* 410, 447-472. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.08.050
- Hu, Y., Wang, J., Chen, M.Z., Li, Z. and Sun, Y. 2018. Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control. *Engineering Structures* 177, 198-209. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.09.063
- Jonkman, J., 2008, January. Influence of control on the pitch damping of a floating wind turbine. In *46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*. pp. 1-15, Reno, NV, USA. DOI: 10.2514/6.2008-1306
- Jonkman, J.M., 2007. *Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine*. Doctoral's Dissertation, Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Colorado, USA.
- Kaldellis, J.K., Kapsali, M. 2013. Shifting towards offshore wind energy-Recent activity and future development. *Energy policy* 53, 136-148. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.10.032
- Kamarlouei, M., Gaspar, J.F., Calvario, M., Hallak, T.S., Mendes, M.J., Thiebaut, F., Soares, C.G., 2020. Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform. *Renewable Energy* 152, 1171-1185. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.078
- Kluger, J.M., Slocum, A.H. and Sapsis, T.P. 2017. A first-order dynamics and cost comparison of wave energy converters combined with floating wind turbines. In *27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA. ISBN: 978-1-880653-97-5
- Lackner, M.A. and Rotea, M.A. 2011. Structural control of floating wind turbines. *Mechatronics*, 21(4), 704-719. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2010.11.007
- M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Ahmad, I., Garrido, I. and Garrido, A.J., 2022, July. Dual Airflow Control Strategy for Floating Offshore Wind Turbine Stabilization Using Oscillating Water Columns. In *APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing*. 428-438. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-10047-5\_38
- M'zoughi, F., Aboutalebi, P., Garrido, I., Garrido, A.J. and De La Sen, M. 2021. Complementary airflow control of oscillating water columns for floating offshore wind turbine stabilization. *Mathematics* 9(12), 1364. DOI: 10.3390/math9121364
- M'zoughi, F., Garrido, I. and Garrido, A.J. 2020. Symmetry-breaking for airflow control optimization of an oscillating-water-column system. *Symmetry* 12(6), 895. DOI: 10.3390/sym12060895
- M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A.J. and De La Sen, M. 2023. Fuzzy airflow-based active structural control of integrated oscillating water columns for the enhancement of floating offshore wind turbine stabilization. *International Journal of Energy Research*, 2023. DOI: 10.1155/2023/4938451
- M'zoughi, F., Garrido, A.J., Garrido, I., Bouallègue, S. and Ayadi, M., 2018, June. 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)*. pp. 1263-1270. Amalfi, Italy. IEEE. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445229
- Pérez-Collazo, C., Greaves, D., Iglesias, G. 2015. A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews* 42, 141-153. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.032
- Slocum, A., Kluger, J. and Mannai, S. 2019, July. Energy harvesting and storage system stabilized offshore wind turbines. In *2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)*. pp. 1-6. BREST, France. IEEE. DOI: 10.1109/OSES.2019.8867345
- Stewart, G. and Lackner, M. 2013. Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21(4), 1090-1104. DOI: 10.1109/TCST.2013.2260825
- Vijfhuizen, W.J.M.J., 2006. Design of a Wind and Wave Power Barge. Master's Dissertation, Department of Naval Architecture and Mechanical Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, Scotland.