

Optimización Bi-Objetivo de la Sintonía de un Control del Paso Individual de Aerogeneradores Flotantes para la Reducción de Carga

Ren, L.^a, Santos, M.^{b,*}, Cai X.^a, Sierra-García, J.E.^c, L. Alexandra Díaz-Pareja^b

^a Colegio de Mecánica y Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Hohai, 211100, Nanjing, China.

^b Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.

^c Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09004, Burgos, España.

Resumen

Mitigar las cargas cíclicas en las palas es fundamental para extender la vida útil de los aerogeneradores marinos flotantes (FOWTs, por sus siglas en inglés). Si bien el Control de Paso Individual (Individual Pitch control, IPC) es eficaz para mejorar la eficiencia energética y la reducción de cargas, el aumento de la actividad de los actuadores puede comprometer la fiabilidad. Este trabajo propone un marco de optimización bi-objetivo orientado a disminuir la fatiga estructural para el ajuste de sistemas IPC que equilibra explícitamente la reducción de carga en el buje y el esfuerzo del actuador. El diseño de un controlador PI (proporcional-integral) se formula como un problema de optimización bi-objetivo en el que se ajustan las ganancias para minimizar las fluctuaciones de carga en la raíz de la pala, al tiempo que se limita el uso del actuador. Se emplea el Algoritmo Genético de Clasificación No-Dominada II (NSGA-II) para determinar el conjunto de ganancias de Pareto-óptimas. Las simulaciones en el dominio del tiempo de un modelo de referencia de la FOWT muestran que las estrategias IPC optimizadas superan significativamente al control de paso colectivo (CPC) convencional, logrando una reducción de hasta el 39.9% en las fluctuaciones de carga en la raíz de la pala, mientras se mantiene una actividad moderada del actuador. Los resultados demuestran que se puede lograr una mitigación sustancial de la fatiga sin un esfuerzo de control excesivo, proporcionando una metodología de ajuste orientada a la fiabilidad para sistemas IPC en FOWTs.

Palabras clave: Aerogeneradores Marinos Flotantes, Control de Paso Individual, Mitigación de Carga, Optimización Bi-Objetivo, Ciclo de Trabajo del Actuador, PI, Algoritmo Genético.

Bi-Objective PI Gain Optimization of Individual Pitch Control for Load-Alleviation in Floating Offshore Wind Turbines

Abstract

Mitigating cyclic blade loads is critical to extending the structural lifetime of floating offshore wind turbines (FOWTs). While Individual Pitch Control (IPC) is effective for load alleviation, increased actuator activity may compromise reliability. This work proposes a fatigue-oriented bi-objective optimization framework for IPC tuning that explicitly balances blade root load reduction and pitch actuator duty. The controller design is formulated as a bi-objective optimization problem in which proportional–integral (PI) gains are adjusted to minimize blade root load fluctuations while constraining actuator usage. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is employed to determine the Pareto-optimal gain set. Time-domain simulations of a reference FOWT model show that the optimized IPC strategies significantly outperform conventional collective pitch control, achieving up to 39.9% reduction in blade root load fluctuations while maintaining moderate actuator activity. The results demonstrate that substantial fatigue mitigation can be achieved without excessive control effort, providing a reliability-oriented tuning methodology for IPC systems in FOWTs.

Keywords: Floating Offshore Wind Turbines, Individual Pitch Control, Load Mitigation, Bi-Objective Optimization, Actuator Duty Cycle, PI, Genetic Algorithm

1. Introducción

En los sistemas de control de aerogeneradores modernos, el control de paso o del ángulo de las palas juega un papel fundamental en la eficiencia de la producción de energía y la mitigación de cargas estructurales. El control de paso colectivo (CPC) tradicional ajusta todas las palas simultáneamente basándose en el error de velocidad del rotor, utilizando típicamente controladores Proporcionales-Integrales (PI) con

ganancia programada para manejar las no linealidades del sistema (Njiri and Söffker, 2016). Si bien el CPC es efectivo para regular la velocidad del generador y mantener la potencia nominal en condiciones de viento por encima de la nominal, asume cargas aerodinámicas uniformes en todas las palas, una condición que rara vez se cumple en entornos reales debido a la naturaleza cortante del viento, las turbulencias, y la falta de homogeneidad atmosférica. Esta limitación conduce a desequilibrios en las cargas del rotor, aumento de la fatiga y

*Autor para correspondencia: msantos@ucm.es

posibles fallos estructurales, especialmente en turbinas de gran escala.

Los desafíos del CPC se vuelven más pronunciados en los aerogeneradores marinos flotantes (FOWTs), donde complejidades adicionales como los movimientos de la plataforma, las vibraciones inducidas por las olas y el acoplamiento viento-ola exacerban las asimetrías de carga y la dinámica del sistema. Por ejemplo, las FOWTs de tipo semi-sumergible experimentan vibraciones significativas de baja frecuencia y oscilaciones a la frecuencia de rotación del rotor (1P) en el momento flector de la raíz de la pala, que el CPC no puede abordar eficazmente debido a su diseño inherente (Bai et al., 2025). La arquitectura CPC clásica y más ampliamente implementada consiste en controladores PI separados para los momentos de cabeceo y guiñada, que se derivan de los momentos flectores en la raíz de la pala mediante una transformación de coordenadas multi-pala (MBC).

Para superar estas limitaciones, el control de paso individual (IPC) ha surgido como una solución avanzada. A diferencia del CPC, el IPC ajusta de forma independiente el ángulo de paso de cada pala basándose en mediciones de carga localizadas, permitiendo una mitigación específica de cargas asimétricas y vibraciones inducidas por la plataforma. Los estudios demuestran que el IPC reduce significativamente las cargas periódicas en componentes clave como las palas, la torre y el buje. Namik et al. (Namik and Stol, 2010) mostraron, mediante simulaciones de alta fidelidad que el IPC puede lograr reducciones del 44% en la fluctuación de potencia, del 39% en el balanceo de la plataforma y del 43% en el cabeceo en comparación con el CPC.

A pesar de sus beneficios probados, el rendimiento de esta estructura IPC estándar depende en gran medida del ajuste preciso de los parámetros de su controlador PI (K_p y K_i). Unas ganancias subóptimas pueden conducir a un uso excesivo del actuador de paso o incluso inestabilidad del sistema por desbalanceo. Por lo tanto, persiste la necesidad de mejorar el bucle de control PI del IPC. Una sintonía robusta y optimizada del PI puede ofrecer beneficios de rendimiento sustanciales. La optimización de las ganancias del IPC es inherentemente un problema multi-objetivo, que busca, entre otros posibles objetivos, maximizar simultáneamente la reducción de carga y minimizar la actividad del actuador de paso. Para resolver dichos problemas, en el campo de la energía eólica se han usado diversos algoritmos metaheurísticos, incluyendo métodos basados en inteligencia de enjambre como MOPSO (Optimización Multi-Objetivo por Enjambre de Partículas) (Eskandari et al., 2023) y otros algoritmos inspirados en la física como el Algoritmo de Optimización de Arquímedes (AOA) (Jiang et al., 2023). El Algoritmo Genético de Clasificación No-Dominada II (NSGA-II) es un algoritmo evolutivo multi-objetivo frecuentemente empleado en estudios de energía eólica para tareas que van desde la disposición de turbinas hasta el diseño aerodinámico (Li and Chen, 2025; Xiaoqing et al., 2019). Su selección para este trabajo se justifica por su capacidad probada para mantener la diversidad de soluciones y generar frentes de Pareto bien distribuidos, lo cual es esencial para explorar eficazmente las compensaciones entre objetivos de control contrapuestos. Por lo tanto, este trabajo se centra en la optimización de las ganancias del controlador PI (K_p y K_i) para IPC utilizando NSGA-II, con el

objetivo de mejorar el rendimiento de la reducción de carga en las FOWTs.

2. Metodología

2.1. Modelo de Referencia del Aerogenerador y la Plataforma

Se va a trabajar con el aerogenerador marino de referencia de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) de 15 MW y plataforma semi-sumergible VoltturnUS-S (Allen et al., 2020). La Tabla 1 proporciona las especificaciones principales del aerogenerador. Las palas del aerogenerador se tratan como rígidas, mientras que se tiene en cuenta la flexibilidad de la torre.

Tabla 1: Características del aerogenerador

Parámetro	Valor
Tipo de rotor	Barlovento, 3 palas
Diámetro del rotor	240 m
Altura del buje	150 m
Velocidad de viento de arranque	3 m/s
Velocidad de viento nominal	10.59 m/s
Velocidad de viento de desconexión	25 m/s
Velocidad mínima del rotor	5.0 m/s
Velocidad máxima del rotor	7.56 m/s

2.2. Diseño del Control de Paso Individual

En aerogeneradores grandes de tres palas, la distribución no uniforme de las cargas aerodinámicas—particularmente las cargas armónicas 1P inducidas por factores como el cortante del viento y los efectos de sombra de torre—es clave para analizar el daño por fatiga en las palas. Para mitigar dichas cargas, el Control de Paso Individual (IPC) logra un equilibrio dinámico de cargas aplicando ángulos de paso diferenciados a cada pala. Sin embargo, la dinámica de las palas en el sistema de coordenadas giratorio presenta un fuerte acoplamiento y características de variación periódica en el tiempo, lo que hace que el diseño directo del controlador sea altamente complejo. Por lo tanto, se emplea la Transformación de Coordenadas Multi-Pala (MBC) (Selvam et al., 2009) para convertir la dinámica del marco giratorio a un sistema de coordenadas fijo con fines de linealización, proporcionando un marco de control adecuado para el IPC.

La MBC es una transformación matemática basada en los ángulos de azimut de la pala ψ_i . Con ella, las cargas (momentos flectores) de las palas en el sistema de coordenadas giratorio se convierten en dos componentes en el sistema de coordenadas no giratorio: el momento de cabeceo $M_t(t)$ y el momento de guiñada $M_y(t)$. En la transformación MBC dirigida al armónico 1P, los momentos flectores fuera del plano (OoP) de las tres palas forman un vector $M(t) = [M_1(t) \ M_2(t) \ M_3(t)]^T$. Este vector se introduce en la matriz de transformación MBC directa $T(\psi)$ para calcular los componentes de momento independientes del azimut $M_t(t)$ y $M_y(t)$ en el sistema de coordenadas fijo. Su relación se expresa como:

$$\begin{bmatrix} M_t(t) \\ M_y(t) \end{bmatrix} = T(\psi)M(t) \quad (1)$$

donde el vector de tres elementos ψ contiene los ángulos de azimut de cada pala (definiendo la posición vertical ascendente de la pala como 0 grados). La matriz de transformación directa viene dada por:

$$T(\psi) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi_1) & \cos(\psi_2) & \cos(\psi_3) \\ \sin(\psi_1) & \sin(\psi_2) & \sin(\psi_3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Posteriormente, para suprimir los componentes M_t y M_y , los correspondientes ángulos de paso de cabeceo $\beta_i(t)$ y de guiñada $\beta_y(t)$ se calculan dentro mediante un control descentralizado. Luego, estas dos señales en el sistema de coordenadas fijo se convierten de nuevo al sistema de coordenadas giratorio a través de la transformación MBC inversa para obtener los componentes IPC en el sistema de coordenadas giratorio:

$$\begin{bmatrix} \beta_{IPC1}(t) \\ \beta_{IPC2}(t) \\ \beta_{IPC3}(t) \end{bmatrix} = T^{-1}(\psi + \psi_0) \begin{bmatrix} \beta_i(t) \\ \beta_y(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz de transformación inversa $T^{-1}(\psi)$ es:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_1 + \psi_0) & \sin(\psi_1 + \psi_0) \\ \cos(\psi_2 + \psi_0) & \sin(\psi_2 + \psi_0) \\ \cos(\psi_3 + \psi_0) & \sin(\psi_3 + \psi_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

El parámetro ψ_0 es el desplazamiento de azimut. Finalmente, los componentes IPC para cada pala $\beta_{IPC,i}(t)$ se superponen con la señal del Control de Paso Colectivo (CPC) $\beta_{CPC}(t)$ para calcular el valor de comando de paso $\beta_i(t)$ para cada pala.

$$\beta_i(t) = \beta_{CPC}(t) + \beta_{IPC,i}(t) \quad (5)$$

donde $\beta_{CPC}(t)$ se genera basándose en la velocidad media del viento, con el objetivo de mantener la potencia nominal. Por contraste, $\beta_{IPC,i}(t)$ busca suprimir las cargas desequilibradas periódicas inducidas por efectos del viento y las sombra.

El ángulo $\beta_{CPC}(t)$ se obtiene mediante un PI dado por:

$$\beta_{CPC}(t) = K_{p,cpc} e_{CPC}(t) + K_{i,cpc} \int e_{CPC}(t) dt \quad (6)$$

donde $e_{CPC}(t)$ es la desviación de la velocidad del rotor de su valor nominal, y $K_{p,cpc}$ y $K_{i,cpc}$ son las ganancias proporcional e integral del controlador CPC, respectivamente, las cuales son ajustadas mediante gain scheduling (programación de ganancias) en OpenFAST.

En el sistema de coordenadas fijo, se diseñan dos controladores PI separados para suprimir el momento de cabeceo $M_t(t)$ y el momento de guiñada $M_y(t)$, produciendo $\beta_i(t)$ y $\beta_y(t)$. Para el canal de cabeceo, la ley de control es un PI donde el error es $e_t(t) = M_{t,ref}(t) - M_t(t)$ y el punto de consigna es $M_{t,ref}(t) = 0$ para la minimización de carga. Para la guiñada $\beta_y(t)$ se sigue la ley de control PI con los mismos parámetros escalares K_p y K_i , dado que la dinámica de ambos canales es simétrica por la geometría axial del rotor. y su propia señal de error $e_y(t) = M_{y,ref}(t) - M_y(t)$, donde $M_{y,ref}(t) = 0$.

Los ángulos de paso en el marco fijo $\beta_i(t)$ y $\beta_y(t)$ se transforman al sistema giratorio mediante la transformación MBC inversa (Ecs. (3) y (4)), produciendo los tres componentes del IPC $[\beta_{IPC,1}(t), \beta_{IPC,2}(t), \beta_{IPC,3}(t)]$.

2.3. Formulación del problema de optimización multi-objetivo

El problema de optimización multi-objetivo de la sintonía del controlador PI del IPC se formula para minimizar simultáneamente dos métricas de rendimiento en conflicto. Las variables a optimizar son las ganancias del PI para la componente de carga 1P:

$$x = [K_p \ K_i]^T \quad (7)$$

donde el espacio de búsqueda está restringido por límites determinados mediante un análisis de sensibilidad previo:

$$\begin{aligned} K_p &\in [1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-8}] \\ K_i &\in [1 \times 10^{-11}, 1 \times 10^{-9}] \end{aligned} \quad (8)$$

Se definen dos funciones objetivo para ser minimizadas:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= DEL_{rootMOoP1} \\ f_2(x) &= \sigma_{pitch_rate} \end{aligned} \quad (9)$$

El DEL (Damage Estimation Load) del momento flector fuera del plano en la raíz de la pala se calcula utilizando el recuento de ciclos de lluvia (rainflow counting) (Serrano et al., 2022) para extraer los ciclos de carga de los datos de la serie temporal. Se deriva de acuerdo con la regla de acumulación de daño lineal de Palmgren-Miner (Todinov, 2001):

$$DEL = \left(\frac{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot S_i)}{N_{eq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

donde n_i es el número de ciclos en el rango de tensión S_i obtenido del recuento de lluvia, m es el exponente de la curva de Wöhler (S-N) y N_{eq} es el número de referencia de ciclos. La desviación estándar de la velocidad de paso de la pala σ_{pitch_rate} se minimiza para cuantificar y reducir el uso del actuador y el desgaste mecánico. Es decir, la optimización busca la compensación entre la mitigación de la carga estructural y la preservación del actuador.

2.4. Marco de optimización NSGA-II

La optimización multi-objetivo (Alonso Zotes and Santos Peñas, 2010; Ren et al., 2025) se realizó utilizando el algoritmo NSGA-II a través de la función *gamultiobj* de MATLAB. El proceso de optimización sigue un proceso iterativo (Fig. 1).

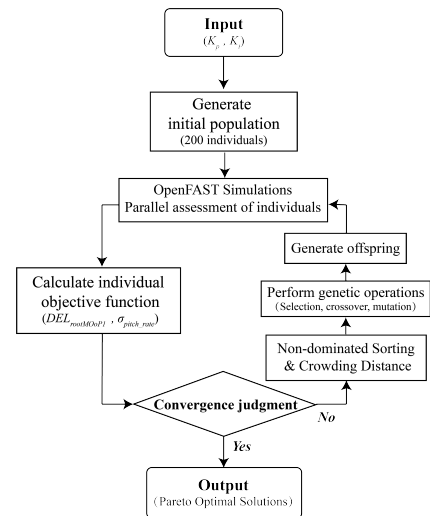


Figura 1: Diagrama de flujo del marco de optimización NSGA-II para el ajuste de parámetros PI del IPC.

Se inicializa aleatoriamente una población de 200 individuos, representando cada uno una solución candidata (K_p , K_i). Para cada generación, se evaluó toda la población ejecutando simulaciones mediante computación paralela con el software OpenFAST para calcular las dos funciones objetivo (Eq. 10). Tras la evaluación, el algoritmo realizó una clasificación no-dominada de las soluciones y calculó la distancia de aglomeración (crowding distance) para preservar la diversidad a lo largo del frente de Pareto. Se aplicó selección de padres por torneo con tamaño 4, cruce intermedio ($P_c = 0.8$) y mutación adaptativa. Al algoritmo se ejecuta hasta un máximo de 120 generaciones, o hasta que la optimización se estancó durante 30 generaciones, o el cambio en las funciones objetivo cayó por debajo de una tolerancia de 5×10^{-4} , momento en el que se generó el conjunto final de soluciones óptimas de Pareto.

3. Resultados y discusión

Se examina el frente de Pareto obtenido de la optimización con NSGA-II y se realiza una comparación del rendimiento entre las estrategias óptimas seleccionadas y el CPC de referencia, evaluando métricas que incluyen cargas en las palas, movimiento de la plataforma y actividad del actuador.

3.1 Análisis del Frente de Pareto

El frente de Pareto obtenido de la optimización con NSGA-II ilustra la compensación entre los dos objetivos en conflicto: la reducción de carga en la raíz de la pala (DEL) y la preservación del actuador (σ_{pitch_rate}) (Fig. 2).

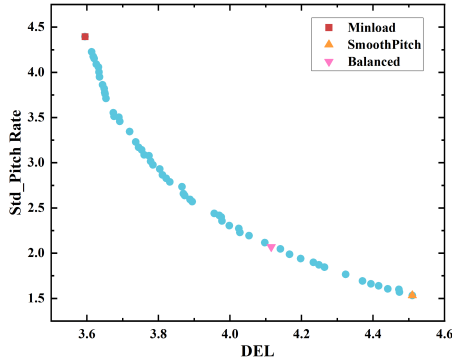


Figura 2: Frente de Pareto (velocidad de paso vs. $DEL_{rootMOOP}$).

Para facilitar el análisis concreto, se extrajeron tres soluciones óptimas representativas del frente utilizando distintas estrategias de selección. Se identificó una solución equilibrada seleccionando el punto con la distancia euclidiana normalizada mínima al punto de ideal. Las dos soluciones extremas se eligieron minimizando individualmente cada función objetivo: la solución óptima para carga (minimizando DEL) y la solución óptima para el actuador (minimizando σ_{pitch_rate}). Las ganancias óptimas del controlador PI correspondientes a estas tres soluciones seleccionadas se resumen en la Tabla 2. Una conclusión directa es la clara correlación entre la magnitud de las ganancias y el objetivo de control: la solución de carga mínima se caracteriza por las ganancias de controlador más grandes, que permiten una respuesta rápida y agresiva a las perturbaciones, mientras que la solución de actuador suave emplea las ganancias más pequeñas para lograr una acción de control limitada. La

solución equilibrada adopta un conjunto intermedio de ganancias, reflejando su posición de compromiso.

Tabla 2: Soluciones óptimas de Pareto seleccionadas

Tipo de solución	Parámetros	
	K_p	K_i
Equilibrada	1.95×10^{-9}	1.03×10^{-11}
Carga Mínima (MinLoad)	9.85×10^{-9}	1.18×10^{-10}
Paso Suave (SmoothPitch)	1.27×10^{-10}	1.02×10^{-11}

3.2 Comparación de rendimiento

Basándose en la simulación durante 300 segundos, un análisis comparativo entre el CPC de referencia y las tres estrategias IPC optimizadas muestra cómo las distintas prioridades de optimización conducen a perfiles operativos diferentes para el aerogenerador marino flotante (Fig. 3 a la Fig. 6).

La actividad de paso de la pala (Fig. 3), sirve como el indicador principal del esfuerzo del controlador. El CPC de referencia muestra una variabilidad moderada (desviación estándar $\sigma = 1.985^\circ$). En contraste, el controlador de Carga Mínima presenta ajustes más frecuentes y pronunciados, con una desviación estándar de velocidad de paso más alta ($\sigma = 2.278^\circ$). Por el contrario, la estrategia de ángulo de pitch suave produce una señal visiblemente más suave, con variabilidad solo marginalmente por encima de la referencia ($\sigma = 2.075^\circ$). La estrategia equilibrada genera un perfil intermedio, posicionado entre los otros dos métodos IPC.

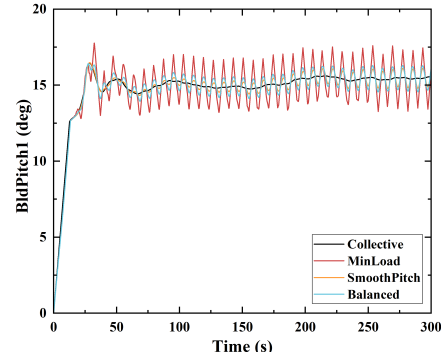


Figura 3: Comparación de los ángulos de paso de la pala bajo diferentes estrategias de control.

El impacto directo de estos patrones de actuación se observa en las historias de carga de la raíz de la pala de la Fig. 4. El CPC de referencia produce los momentos fuera del plano en la raíz de la pala más altos y fluctuantes ($\sigma = 8356.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$). La estrategia de Carga Mínima logra la supresión de carga más pronunciada, reduciendo la desviación estándar de la carga en un 39.9%, a $5024.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$ —un resultado claramente visible en su traza de momento notablemente más baja y menos variable. La estrategia de Paso Suave ofrece una reducción más moderada pero aún significativa del 14.4% en la variabilidad de la carga, mientras que el enfoque Equilibrado logra una reducción del 24.3%, posicionándose entre las otras dos estrategias IPC. Estas reducciones de carga son una consecuencia directa del nivel de actividad de paso de cada estrategia: ganancias más altas (Carga Mínima) permiten una contraprestación de carga más agresiva, mientras que ganancias más bajas (Paso Suave) favorecen la suavidad del actuador a expensas de la mitigación de carga.

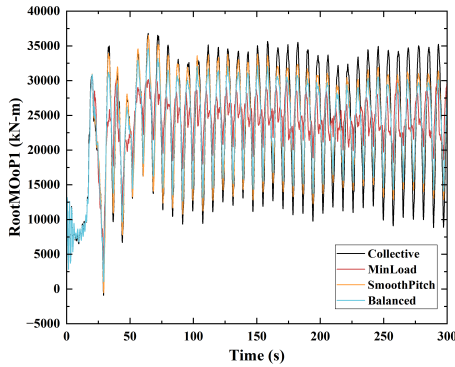


Figura 4: Respuestas del momento flector fuera del plano en la raíz de la pala bajo diferentes estrategias de control.

Las respuestas del cabeceo de la plataforma, representadas en la Fig. 5, muestran un beneficio secundario del IPC. El CPC produce un cabeceo medio de 1.739° con una oscilación considerable, mientras que todas las estrategias IPC optimizadas reducen este ángulo. La reducción más significativa (10.3%) se logra con la estrategia de Carga Mínima, ya que su compensación activa de las cargas asimétricas del rotor contrarresta más eficazmente los momentos perturbadores. Las estrategias Equilibrada y de Paso Suave ofrecen mejoras menores pero aún relevantes (4.2% y 2.1%, respectivamente) en la estabilización de la plataforma. Además, la actividad de paso restringida de la estrategia de Paso Suave beneficia inherentemente la longevidad del actuador.

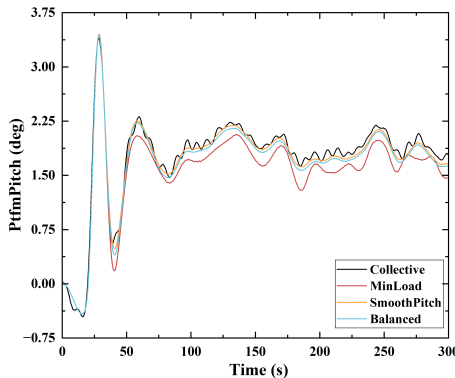


Figura 5: Historia temporal del movimiento de cabeceo de la plataforma bajo diferentes estrategias de control.

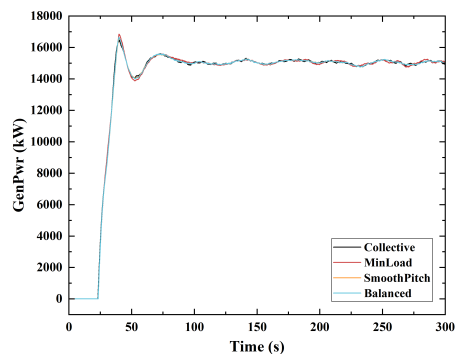


Figura 6: Producción de potencia del generador bajo diferentes estrategias de control.

Finalmente, la Fig. 6 confirma que todas las estrategias mantienen perfiles de potencia del generador casi idénticos, con desviaciones estándar que difieren en menos del 0.3% de la referencia ($\sigma \approx 4264-4276$ kW). Esta coherencia visual y

numérica valida que la optimización multi-objetivo desacopló exitosamente la potencia del equilibrio entre carga y actuación, permitiendo que las ganancias del controlador se ajustaran exclusivamente para los objetivos estructurales y de actuación.

En resumen, los resultados delinean un espectro claro de soluciones definidas por las ganancias del controlador seleccionadas. La estrategia de Carga Mínima se encuentra en un extremo, ofreciendo la máxima reducción de carga y movimiento de la plataforma a costa de un alto esfuerzo del actuador. Por el contrario, la estrategia de Paso Suave prioriza la minimización del esfuerzo del actuador de paso, mejorando así la longevidad del componente, al tiempo que aún proporciona mejoras perceptibles en la mitigación de carga y la estabilidad de la plataforma en comparación con el CPC. La estrategia Equilibrada representa un compromiso óptimo de Pareto dentro de este espacio de equilibrio, asegurando mejoras sustanciales de rendimiento con un aumento relativamente modesto en el esfuerzo de control. En general, los hallazgos confirman que un sistema IPC, cuando se ajusta adecuadamente, permite al operador priorizar objetivos operativos específicos, demostrando cada configuración optimizada un rendimiento superior al control de paso colectivo convencional.

3.3 Análisis de rendimiento bajo condiciones de viento variables

Para evaluar más a fondo la robustez de las estrategias IPC optimizadas bajo diferentes condiciones de operación, se realizaron simulaciones a cuatro velocidades medias de viento (12, 15, 18 y 21 m/s) utilizando las ganancias IPC equilibradas ($K_p = 1.95 \times 10^{-9}$, $K_i = 1.03 \times 10^{-11}$). La Fig. 7 presenta un gráfico de barras apiladas que compara las estadísticas de respuesta entre CPC e IPC. Para el cabeceo de la plataforma, el momento en la base de la torre (dirección fore-aft) y el momento fuera del plano en la raíz de la pala, la métrica utilizada es la desviación estándar. Para la potencia del generador se muestra el valor medio, ya que la principal preocupación es si el IPC afecta la producción de energía. En cada barra apilada, el segmento inferior representa el valor del IPC, mientras que el segmento superior denota la cantidad en que el valor del CPC excede al valor del IPC. La reducción porcentual lograda por el IPC se anota encima de cada barra.

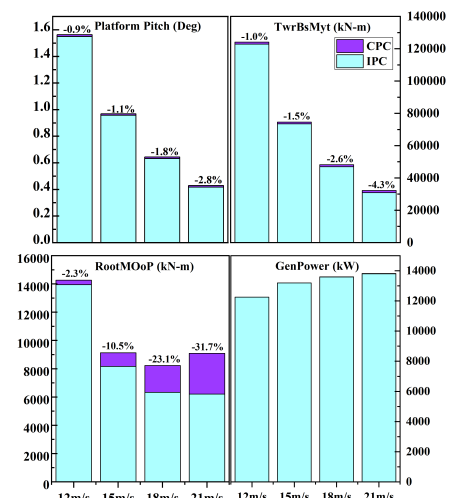


Figura 7: Estadísticas de las respuestas de CPC e IPC en función de la velocidad del viento obtenidas con la solución Equilibrada

Como se puede observar en la Fig. 7, el IPC supera consistentemente al CPC en todas las velocidades de viento para el cabeceo de la plataforma, el momento en la base de la torre y el momento en la raíz de la pala. Notablemente, la reducción en el momento fuera del plano en la raíz de la pala aumenta con la velocidad del viento, desde un 2.28% a 12 m/s hasta un 31.73% a 21 m/s, demostrando la creciente efectividad del IPC para mitigar cargas aerodinámicas asimétricas en condiciones de viento más alto. De manera similar, el cabeceo de la plataforma y el momento en la base de la torre también exhiben mejoras crecientes a velocidades de viento más altas, alcanzando reducciones de hasta el 2.78% y el 4.34%, respectivamente. Sin embargo, la potencia del generador permanece prácticamente sin cambios (diferencias por debajo del 0.15%), confirmando que el IPC optimizado no compromete la producción de energía. Estos resultados validan que el ajuste IPC propuesto, derivado de una única condición de viento, mantiene su rendimiento superior al CPC en un amplio rango de puntos de operación, mostrando por lo tanto una gran robustez.

4. Conclusiones

Este estudio presentó una estrategia de optimización orientada a la fatiga para el ajuste del Control de Paso Individual en aerogeneradores marinos flotantes, prestando especial atención al esfuerzo del actuador como una restricción de diseño. Al formular el proceso de ajuste del controlador como un problema bi-objetivo, los parámetros proporcionales-integrales del PI se identificaron sistemáticamente mediante una búsqueda evolutiva basada en Pareto, lo que permitió una evaluación transparente de la compensación entre la reducción de la carga estructural y la actividad de control.

Los resultados de la simulación demuestran que las configuraciones IPC optimizadas proporcionan una atenuación sustancial de los componentes de carga relevantes para la fatiga en comparación con la regulación de paso colectivo convencional. La variabilidad del momento flector fuera del plano en la raíz de la pala se redujo entre un 14.4% y un 39.9%, lo que indica una disminución marcada de la excitación estructural cíclica. Al mismo tiempo, el uso del actuador se mantuvo dentro de niveles moderados, confirmando que se puede lograr una mitigación significativa de la carga sin una demanda de control excesiva. Las mejoras en la respuesta de cabeceo de la plataforma respaldan aún más la efectividad de la metodología de ajuste propuesta para configuraciones flotantes.

La evaluación en múltiples condiciones de velocidad del viento reveló reducciones consistentes en las métricas de fluctuación de carga, con beneficios cada vez más pronunciados en regímenes de viento más altos. La preservación de la producción media de energía confirma que priorizar la mitigación de la fatiga no compromete el rendimiento de captura de energía.

En general, los resultados subrayan la importancia de incorporar explícitamente consideraciones del actuador en el

diseño de ganancias del IPC y demuestran que un marco de optimización bi-objetivo dirigido puede mejorar la fiabilidad estructural en aerogeneradores marinos flotantes. Investigaciones futuras extenderán el análisis a entornos más realistas de viento y olas combinados, e investigarán estrategias adaptativas o de ganancia programada para mantener el rendimiento en condiciones operativas variables.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España bajo los proyectos MCI/AEI/FEDER números PID2021-123543OB-C21 y PID2024-155653OB-C21.

Referencias

- Allen, C., Viscelli, A., Dagher, H., Goupee, A., Gaertner, E., Abbas, N., Hall, M., Barter, G., 2020. Definition of the UMaine VoltturnUS-S reference platform developed for the IEA wind 15-megawatt offshore reference wind turbine. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); Univ. of <https://doi.org/10.2172/1660012>
- Alonso Zotes, F., Santos Peñas, M., 2010. Multi-criteria genetic optimisation of the manoeuvres of a two-stage launcher. *Inf. Sci., Special Issue on Modelling Uncertainty* 180, 896–910. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.11.001>
- Bai, D., Wang, B., Li, Y., Wang, W., 2025. Study on load reduction and vibration control strategies for semi-submersible offshore wind turbines. *Sci. Rep.* 15, 1148. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85476-3>
- Eskandari, A., Vatankhah, R., Azadi, E., 2023. Optimization of wind energy extraction for variable speed wind turbines using fuzzy backstepping sliding mode control based on multi objective PSO. *Ocean Eng.* 285, 115378. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115378>
- Jiang, S.-J., Chu, S.-C., Zou, F.-M., Shan, J., Zheng, S.-G., Pan, J.-S., 2023. A parallel Archimedes optimization algorithm based on Taguchi method for application in the control of variable pitch wind turbine. *Math. Comput. Simul.* 203, 306–327. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.06.027>
- Li, G., Chen, T.-C., 2025. Multi-objective mathematical model for optimal wind turbine placement in wind farm under uncertainty. *J. Eng. Res.* 13, 3249–3259. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.09.014>
- Namik, H., Stol, K., 2010. Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines. *Wind Energy* 13, 74–85. <https://doi.org/10.1002/we.332>
- Njiri, J.G., Söffker, D., 2016. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 377–393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.110>
- Ren, L., Wang, H., Cai, X., Xie, J., Lv, Z., Wang, Y., Xu, B., 2025. Mitigation of vibrations and its optimization in a large floating wind turbine across different typhoon stages. *Ocean Eng.* 330, 121287. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121287>
- Selvam, K., Kanev, S., van Wingerden, J.W., van Engelen, T., Verhaegen, M., 2009. Feedback–feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction. *Int. J. Robust Nonlinear Control* 19, 72–91. <https://doi.org/10.1002/rnc.1324>
- Serrano, C., Sierra-García, J.-E., Santos, M., 2022. Hybrid Optimized Fuzzy Pitch Controller of a Floating Wind Turbine with Fatigue Analysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1769. <https://doi.org/10.3390/jmse10111769>
- Todinov, M.T., 2001. Necessary and sufficient condition for additivity in the sense of the Palmgren–Miner rule. *Comput. Mater. Sci.* 21, 101–110. [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(00\)00221-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(00)00221-4)
- Xiaoqing, L., Haiying, D., Hongwei, L., Mingxue, L., Zhiqiang, S., 2019. Optimization Control of Front-End Speed Regulation (FESR) Wind Turbine Based on Improved NSGA-II. *IEEE Access* 7, 45583–45593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908995>