

Jornadas de Automática

Comparación de estrategias CPC e IPC basadas en controladores PI/PID para una turbina eólica de 15 MW

Díaz-Pareja, L. A.^{a,*}, García-Pérez, L.^b, Santos, M.^a, Sierra-García, J.E.^c

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

^bDepartamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

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

To cite this article: Díaz-Pareja, L.A., García-Pérez, L., Santos, M., Sierra-García, J.E. 2026. Comparison of CPC and IPC Strategies Based on PI/PID Controllers for a 15 MW Wind Turbine. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13879>

Resumen

Los aerogeneradores de gran potencia requieren estrategias de control capaces de garantizar la regulación de potencia y mitigar las cargas estructurales. En este trabajo se evaluaron distintas estrategias de control de pitch aplicadas al modelo de referencia IEA 15 MW operando en la Región 3. Se consideraron controladores PI y PID bajo esquemas de control de pitch colectivo (CPC) e individual (IPC), cuyos parámetros fueron optimizados mediante algoritmos genéticos utilizando como función objetivo el índice global de desempeño del problema de referencia. La evaluación se realizó mediante simulaciones aeroelásticas en OpenFAST acoplado con MATLAB/Simulink bajo condiciones de viento turbulento. Los resultados mostraron que todas las estrategias optimizadas mejoraron el desempeño global respecto al controlador baseline. La estrategia PI+GA+IPC obtuvo el menor valor del índice global, logrando el mejor compromiso entre regulación y mitigación de cargas estructurales, mientras que la incorporación de la acción derivativa no produjo mejoras significativas respecto a las estrategias basadas en controladores PI.

Palabras clave: Potencia eólica, Control de pitch, Control PID, Optimización paramétrica, Algoritmos bioinspirados y control basado en optimización, Control de centrales de generación, Control y gestión de sistemas energéticos, Mitigación de cargas

Comparison of CPC and IPC Strategies Based on PI/PID Controllers for a 15 MW Wind Turbine

Abstract

Large-scale wind turbines require control strategies capable of ensuring power regulation while mitigating structural loads. This work evaluates different pitch control strategies applied to the IEA 15 MW reference wind turbine operating in Region 3. PI and PID controllers were considered under both Collective Pitch Control (CPC) and Individual Pitch Control (IPC) schemes, whose parameters were optimized using genetic algorithms with the benchmark global performance index as the objective function. The evaluation was carried out through aeroelastic simulations in OpenFAST coupled with MATLAB/Simulink under turbulent wind conditions. The results showed that all optimized strategies improved the overall performance with respect to the baseline controller. Among them, the PI+GA+IPC strategy achieved the lowest value of the global performance index, providing the best trade-off between regulation and structural load mitigation, whereas the incorporation of derivative action did not yield significant improvements over the optimized PI-based strategies.

Keywords: Wind power, Pitch control, PID control, Parametric optimization, Bio-inspired algorithms and optimization-based control, Power plant control, Control and management of energy systems, Load mitigation

*Autor para correspondencia: luzaledi@ucm.es

1. Introducción

La energía eólica se ha convertido en una de las fuentes de energía renovable de más rápido crecimiento a nivel mundial debido a la reducción de costos, los avances tecnológicos y el creciente interés por las energías limpias (Civelek et al., 2016). Es así que, la preocupación por el medio ambiente y el incremento de la demanda energética global han impulsado el desarrollo de aerogeneradores de mayor capacidad y diseños cada vez más sofisticados. Actualmente estas máquinas constituyen sofisticadas unidades de generación de varios megavatios cuya complejidad genera que los sistemas de control desempeñen un papel fundamental para garantizar una operación segura, eficiente y confiable (Menezes et al., 2018).

Las turbinas eólicas operan bajo condiciones altamente variables al ser el flujo del viento un proceso altamente aleatorio, tanto en el tiempo como en el espacio. Esta variabilidad dificulta la conversión energética al generar recursos transitorios, cargas mecánicas fluctuantes y dinámicas no lineales, por lo que los sistemas de control resultan esenciales para maximizar la producción de energía, mitigar cargas estructurales y garantizar un suministro eléctrico confiable conforme a los requisitos de la red (Menezes et al., 2018).

El control de paso colectivo (CPC) constituye la estrategia de control de pitch más ampliamente utilizada en turbinas eólicas comerciales (Njiri and Söffker, 2016), donde una misma señal de control se aplica simultáneamente a las tres palas. Generalmente, el CPC se implementa mediante un controlador PID (proporcional-integral-derivativo) simple, utilizando como señal de error la variación de la velocidad del rotor.

Por su parte, el control individual de paso (IPC) ha despertado un creciente interés en la investigación, aunque su implementación en turbinas comerciales aún es limitada. A diferencia del CPC, el IPC genera comandos de paso independientes para cada pala, convirtiendo el sistema de control en una arquitectura de múltiples entradas y múltiples salidas.

A pesar del amplio número de investigaciones relacionadas con el control de paso en turbinas eólicas, aún son limitados los estudios que comparan sistemáticamente distintas arquitecturas de control en turbinas de gran potencia mediante controladores PI/PID optimizados con algoritmos genéticos para estrategias CPC e IPC. En este contexto, el presente trabajo evalúa cuatro configuraciones de control de paso aplicadas a la turbina eólica de referencia IEA de 15 MW, modelada en OpenFAST y acoplada con MATLAB/Simulink. El desempeño se analiza utilizando el benchmark propuesto en el Concurso en Ingeniería de Control (CIC2024) (Garrido et al., 2024), a partir de distintos índices basados en los valores cuadráticos medios (RMS), entre los que se incluyen el error en la velocidad del rotor, el error en la potencia generada, las variaciones del momento torsional del eje del generador, del momento frontal en la base de la torre y el promedio de los momentos frontales en la base de cada pala.

2. Modelo de turbina eólica y problema de control

2.1. Modelo de Turbina Eólica

El presente estudio utiliza la configuración onshore del modelo de referencia IEA 15-Megawatt Reference Wind Turbine (IEA 15 MW RWT) implementado en OpenFAST (Bar-

ter et al., 2026). Esta configuración, empleada también en el problema de referencia del Concurso en Ingeniería de Control (CIC2024) (Garrido et al., 2024), permite comparar distintas estrategias de control de pitch sobre un modelo de referencia de aerogeneradores de gran potencia.

El comportamiento aeroelástico de la turbina se representa mediante OpenFAST, acoplado con MATLAB/Simulink para la ejecución de simulaciones conjuntas. El aerogenerador posee una potencia nominal de 15 MW, un rotor de tres palas de 240 m de diámetro y una altura de buje de 150 m. La velocidad nominal del rotor es de 7.56 rpm, la velocidad nominal del viento es de 10.59 m/s y el tren motriz de accionamiento directo presenta un par nominal del generador de 19.79 MNm y una eficiencia eléctrica del 95.76 %.

2.2. Problema de Control

Las turbinas eólicas operan en tres regiones definidas por la velocidad del viento. Este trabajo se centra en la Región 3, correspondiente a velocidades superiores a la nominal, donde la potencia generada debe mantenerse constante mediante la regulación del ángulo de paso de las palas (Menezes et al., 2018).

En esta región, el par electromagnético T_{em} se mantiene constante en su valor nominal, por lo que la potencia generada depende directamente de la velocidad del generador ω_g :

$$P_g = T_{g, rated} \cdot \omega_g \quad (1)$$

El objetivo del sistema de control consiste en mantener la velocidad del generador próxima a su valor nominal (7.56 rpm) mediante el ajuste del ángulo de paso, compensando las perturbaciones del viento y limitando simultáneamente las cargas estructurales. El actuador de pitch está sujeto a las restricciones físicas $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ y $-2^\circ/s \leq \dot{\beta} \leq 2^\circ/s$, incorporadas al modelo de Simulink.

Los perfiles de viento corresponden al Modelo de Turbulencia Normal clase C definido en la norma IEC 61400-1, con una intensidad de turbulencia del 12 % y velocidades medias entre 11 y 25 m/s. Cada simulación tiene una duración de 400 s, considerando únicamente los últimos 300 s para el cálculo de los índices de desempeño.

2.3. Índices de rendimiento

El rendimiento del controlador se evalúa mediante seis índices normalizados que cuantifican el desempeño del seguimiento y la mitigación de cargas estructurales.

$$R_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} (\omega_{g, rated} - \omega_g(t))^2 dt}}{0.5} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} (P_{g, rated} - P_g(t))^2 dt}}{1} \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} \dot{M}_{eje}^2 dt}}{1} \quad (4)$$

$$R_4 = \frac{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} \dot{\beta}_i^2 dt}}{2} \quad (5)$$

$$R_5 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} \dot{M}_{f-a}^2 dt}}{80} \quad (6)$$

$$R_6 = \frac{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0} \int_{t_0}^{t_{fin}} M_{Bi}^2 dt}}{8} \quad (7)$$

Los índices R_1 y R_2 evalúan la capacidad del controlador para mantener la velocidad del generador y la potencia eléctrica próximas a sus valores nominales, correspondiendo al error cuadrático medio normalizado de ambas variables, respectivamente.

El índice R_3 evalúa la variación temporal del momento torsional del eje del generador, mientras que R_4 cuantifica el esfuerzo del sistema de pitch mediante el promedio del valor RMS de la velocidad de cambio del ángulo de paso de las tres palas.

Los índices R_5 y R_6 cuantifican, respectivamente, la variación del momento frontal en la base de la torre y el promedio del RMS de los momentos frontales en la base de las palas, permitiendo evaluar la mitigación de cargas estructurales.

Los denominadores utilizados corresponden a valores máximos de referencia, de modo que todos los índices sean adimensionales y comparables entre sí. Valores menores indican un mejor desempeño del controlador.

Los seis índices normalizados se combinan en un único índice global de rendimiento:

$$J = w_1 R_1 + w_2 R_2 + w_3 R_3 + w_4 R_4 + w_5 R_5 + w_6 R_6 \quad (8)$$

donde los pesos w_i son constantes positivas tales que $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1$. En este trabajo, el índice global J corresponde al criterio de evaluación del problema de referencia del Concurso en Ingeniería de Control (CIC2024) (Garrido et al., 2024). Aunque puede expresarse como una combinación lineal ponderada de los índices R_1 – R_6 , los coeficientes de ponderación son fijos y no se hacen públicos a los participantes. En consecuencia, J integra simultáneamente el seguimiento de velocidad y potencia, el esfuerzo del actuador y la mitigación de cargas estructurales, utilizándose como función objetivo durante la optimización y como criterio de comparación entre las estrategias de control.

El controlador de referencia del concurso obtiene un índice global $J = 0,6967$, con: $R_1 = 0,6884$, $R_2 = 0,6827$, $R_3 = 0,2820$, $R_4 = 0,4318$, $R_5 = 1,0215$ y $R_6 = 0,9831$. Este resultado se toma como punto de referencia para evaluar mejoras en el desempeño del controlador desarrollado.

3. Diseño de controladores

3.1. Controlador PI

Se implementó un controlador Proporcional-Integral (PI), ampliamente utilizado en turbinas eólicas por su simplicidad y buen desempeño. Su ley de control se expresa como:

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) e(s) \quad (9)$$

donde $e(s) = \omega_{g,ref} - \omega_g$ representa el error entre la velocidad de referencia y la velocidad medida del generador. La acción proporcional proporciona una respuesta rápida frente a variaciones de velocidad, mientras que la acción integral permite reducir el error en régimen permanente ante perturbaciones producidas por la variabilidad del viento.

Inicialmente, el controlador PI se implementó bajo una estrategia CPC, aplicando la misma señal de control a las tres palas. En esta configuración, las variables de diseño fueron las ganancias proporcional e integral, K_p y K_i . Asimismo, se incorporó un limitador de velocidad en la señal de pitch para representar las restricciones físicas del actuador.

Posteriormente, se implementó una estrategia simplificada IPC, basada en la desviación del momento de cada pala respecto al momento promedio:

$$M_{avg} = \frac{M_{b1} + M_{b2} + M_{b3}}{3} \quad (10)$$

$$\Delta M_i = M_{avg} - M_{bi} \quad (11)$$

Las desviaciones obtenidas fueron multiplicadas por ganancias independientes y sumadas a la señal colectiva del controlador PI para generar acciones de pitch diferenciadas en cada pala. En esta configuración, las variables de diseño fueron K_p , K_i del controlador PI, junto con las ganancias individuales $K_{ipc,1}$, $K_{ipc,2}$ y $K_{ipc,3}$.

La estrategia IPC implementada en este trabajo se inspira en los enfoques iniciales propuestos por Bossanyi (Bossanyi, 2003). A diferencia de los esquemas convencionales de IPC que emplean transformaciones de coordenadas múltiples (MBC), esta metodología adopta una estructura descentralizada basada en la desviación del momento flector de cada pala respecto al promedio, generando una acción correctiva proporcional para cada actuador. Esta aproximación fue seleccionada por su sencillez de implementación e integración con el controlador de paso colectivo existente. Ello permite evaluar de manera aislada el efecto de incorporar acciones individuales de control, proporcionando una base homogénea para comparar el desempeño de las arquitecturas PI y PID bajo las mismas condiciones de evaluación y estableciendo un marco de referencia para futuras comparaciones con estrategias IPC más avanzadas. En este sentido, la estrategia propuesta debe interpretarse como una implementación simplificada orientada a facilitar la comparación entre arquitecturas de control, y no como un sustituto de los esquemas IPC avanzados basados en transformaciones MBC utilizados en aplicaciones industriales.

La Figura 1 muestra la estructura implementada para el controlador PI+IPC en MATLAB/Simulink, incluyendo los bloques de saturación y los limitadores de velocidad del actuador.

3.2. Controlador PID

El controlador PID incorpora una acción derivativa adicional con el objetivo de mejorar el rechazo de perturbaciones y la respuesta dinámica del sistema. Este término proporciona una acción anticipativa frente a variaciones rápidas del error, favoreciendo la respuesta transitoria del controlador. Sin embargo, también presenta una elevada sensibilidad al ruido presente en las señales medidas, especialmente en aerogeneradores de gran escala.

Para reducir este efecto, se incorporó un filtro paso bajo de primer orden en el término derivativo. La función de transferencia del controlador PID filtrado utilizada en este trabajo se expresa como:

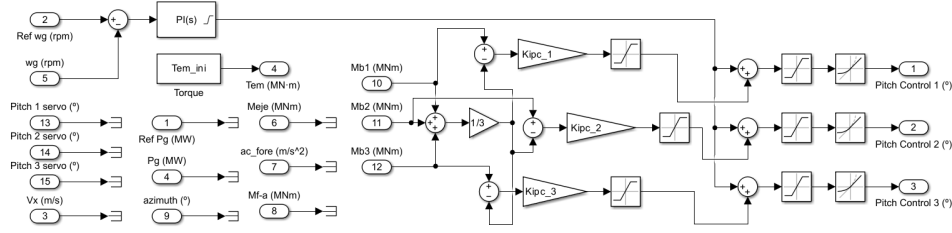


Figura 1: Estructura general del controlador PI+IPC implementado en MATLAB/Simulink.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d N s}{s + N} \quad (12)$$

donde N representa el coeficiente del filtro derivativo. Valores elevados de N preservan una respuesta derivativa más rápida, aunque con mayor sensibilidad al ruido, mientras que valores menores mejoran el filtrado a costa de introducir un mayor retardo dinámico. En este trabajo se adoptó un valor fijo de $N = 10$, correspondiente a un compromiso entre ambos efectos. En consecuencia, únicamente las ganancias K_p , K_i y K_d fueron consideradas variables de diseño durante la optimización, con el fin de limitar la dimensión del problema.

Al igual que para el controlador PI, se implementaron estrategias de control de paso colectivo (CPC) e individual (IPC). En la configuración CPC se optimizaron las ganancias K_p , K_i y K_d , mientras que en la estrategia PID+IPC se empleó la misma estructura de control individual descrita en la Sección 3.1, incorporando además las ganancias $K_{ipc,1}$, $K_{ipc,2}$ y $K_{ipc,3}$ como variables de diseño.

3.3. Optimización mediante algoritmos genéticos

Los parámetros de los controladores fueron ajustados mediante el algoritmo genético (*ga*) del *Global Optimization Toolbox* de MATLAB, utilizando como función objetivo el índice global de rendimiento J . En este procedimiento, cada individuo representa un conjunto de parámetros del controlador, cuya aptitud se evalúa mediante una simulación aerelástica completa del modelo implementado en OpenFAST y acoplado con MATLAB/Simulink. Cada simulación tiene una duración de 400 s y el índice J se calcula considerando únicamente los últimos 300 s de respuesta.

Debido al elevado costo computacional asociado a la evaluación de cada individuo, que requirió aproximadamente 2 min 44 s de tiempo de cómputo en un ordenador con un procesador Intel Core i5-11400H y 16 GB de memoria RAM, el aumento del tamaño de la población y del número máximo de generaciones se realizó únicamente para la estrategia que obtuvo el mejor desempeño, con el fin de verificar que un mayor esfuerzo de búsqueda no producía mejoras significativas en la solución obtenida. Para las estrategias PI+GA y PID+GA se utilizaron poblaciones de 10 individuos y un máximo de 5 generaciones. Para las estrategias PI+GA+IPC y PID+GA+IPC se emplearon poblaciones de 12 individuos y un máximo de 6 generaciones. En el caso de la estrategia PI+GA+IPC, la optimización se repitió utilizando inicialmente una población de 20 individuos y un máximo de 10 generaciones. Posteriormente, se realizó una nueva optimización con una población de 30 individuos y un máximo de 15 generaciones, la cual requirió

aproximadamente 29 h de ejecución, sin obtener mejoras adicionales en el valor del índice global J .

En una primera fase exploratoria inicial se realizaron varias optimizaciones preliminares destinadas a identificar regiones prometedoras del espacio de búsqueda para cada arquitectura de control. A partir de estos resultados se definieron los intervalos finales de búsqueda empleados durante la optimización, los cuales se resumen en la Tabla 1.

En todos los casos se utilizaron las opciones predeterminadas del algoritmo genético de MATLAB, modificando únicamente el tamaño de la población y el número máximo de generaciones. La inicialización de la población se realizó mediante el procedimiento aleatorio estándar de MATLAB y la optimización finalizó al alcanzarse el número máximo de generaciones establecido para cada caso.

4. Resultados y discusión

La Tabla 2 resume el rendimiento de todos los controladores descritos anteriormente. Todas las configuraciones fueron evaluadas bajo el mismo perfil de viento turbulento definido en el problema de referencia, con el fin de garantizar una comparación directa entre las distintas estrategias de control. De esta manera es posible observar que el controlador PI baseline utilizado como caso de referencia obtuvo un índice global $J = 0,6967$ empleando $K_p = -6$ y $K_i = -0,6$.

Para el controlador PI optimizado bajo estrategia CPC, el algoritmo genético convergió hacia $K_p = -4,9795$ y $K_i = -0,3961$, alcanzando un índice global $J = 0,6923$. Este resultado representa una mejora respecto al caso baseline, principalmente asociada a la reducción de los índices R_4 , R_5 y R_6 .

Al incorporar la estrategia IPC al controlador PI optimizado, se obtuvieron los parámetros $K_p = -5,2384$, $K_i = -0,4412$, junto con las ganancias IPC $K_{ipc,1} = -0,0163$, $K_{ipc,2} = -0,0415$ y $K_{ipc,3} = -0,1000$. Esta configuración alcanzó el menor valor global de la comparación, con $J = 0,6905$. Aunque los índices de seguimiento R_1 y R_2 resultaron ligeramente superiores a los del controlador baseline, la estrategia PI+GA+IPC redujo el índice asociado a la actividad del actuador (R_4) en aproximadamente un 15.3 %, así como los índices relacionados con las cargas estructurales de la torre (R_5) y de las palas (R_6) en un 6.9 % y un 4.6 %, respectivamente. Estas mejoras permitieron reducir el índice global J en un 0.9 %.

En el caso del controlador PID optimizado bajo estrategia CPC, los parámetros obtenidos fueron $K_p = -4,8764$, $K_i = -0,4412$ y $K_d = -6,4586 \times 10^{-4}$, alcanzando un índice global $J = 0,6923$. Aunque este valor mejora respecto al baseline, no supera el desempeño del controlador PI+GA+IPC.

Tabla 1: Intervalos finales de búsqueda utilizados durante la optimización mediante algoritmos genéticos.

Estrategia	K_p	K_i	K_d	K_{IPC}
PI + GA (CPC)	$[-5, -4,45]$	$[-0,42, -0,36]$	–	–
PI + GA (IPC)	$[-5,35, -5,10]$	$[-0,48, -0,40]$	–	$[-0,10, 0,05]$
PID + GA (CPC)	$[-4,90, -4,70]$	$[-0,465, -0,435]$	$[-0,0025, 0,0008]$	–
PID + GA (IPC)	$[-4,98, -4,88]$	$[-0,450, -0,440]$	$[-0,005, -0,003]$	$[-0,053, -0,046]$

Tabla 2: Resultados de desempeño de los controladores evaluados

Controller	R1	R2	R3	R4	R5	R6	J
PI baseline	0.6884	0.6827	0.2820	0.4318	1.0215	0.9831	0.6967
PI + GA (CPC)	0.7803	0.7738	0.2892	0.3475	0.9289	0.9285	0.6923
PI + GA (IPC)	0.7529	0.7466	0.2873	0.3657	0.9514	0.9381	0.6905
PID + GA (CPC)	0.7825	0.7760	0.2896	0.3463	0.9248	0.9283	0.6923
PID + GA (IPC)	0.7745	0.7681	0.2889	0.3515	0.9318	0.9298	0.6916

Finalmente, para el controlador PID con estrategia IPC, el algoritmo genético obtuvo $K_p = -4,9723$, $K_i = -0,4419$, $K_d = -0,0039$, junto con las ganancias individuales $K_{ipc,1} = -0,0465$, $K_{ipc,2} = -0,0493$ y $K_{ipc,3} = -0,0519$, alcanzando un índice global $J = 0,6916$. Este resultado confirma que la incorporación de la estrategia IPC mejora ligeramente el desempeño respecto al PID+CPC; sin embargo, la mejora no fue suficiente para superar al controlador PI+GA+IPC.

En conjunto, los resultados muestran que todas las estrategias reducen el índice global J respecto al controlador baseline, siendo la estrategia PI+GA+IPC la que obtuvo el mejor desempeño, con una reducción aproximada del 0,9 %. Aunque esta mejora es inferior al 1 %, se obtiene sobre un controlador de referencia ya optimizado y utilizando un criterio de evaluación que integra simultáneamente la regulación de la velocidad y la potencia, la actividad del actuador y la mitigación de cargas estructurales. En este contexto, pequeñas reducciones del índice global representan mejoras relevantes dentro del benchmark, ya que reflejan un mejor compromiso entre dichos objetivos sin degradar significativamente la capacidad de regulación.

La estrategia PI+GA+IPC obtuvo el menor valor del índice global J , representando el mejor compromiso entre regulación, actividad del actuador y mitigación de cargas estructurales. Por este motivo, únicamente se compara en detalle con el controlador baseline mediante la evolución temporal de variables representativas del comportamiento operativo y estructural del aerogenerador bajo un mismo perfil de viento turbulento.

La Figura 2(a) muestra el perfil de velocidad del viento empleado durante la simulación y la respuesta de la potencia generada. A pesar de las variaciones turbulentas del recurso eólico, ambas estrategias mantienen la potencia cerca del valor nominal de 15 MW. No obstante, el controlador PI+GA+IPC presenta una respuesta ligeramente más amortiguada en algunos intervalos transitorios, reduciendo parcialmente determinadas desviaciones respecto al valor de referencia.

La Figura 2(b) presenta la velocidad del generador y el torque electromagnético. Se observa que ambas configuraciones conservan una regulación adecuada de la velocidad alrededor de su valor nominal de 7.56 rpm, manteniendo simultáneamente el torque prácticamente invariable en torno a su valor nominal. Las diferencias entre ambos controladores son reducidas, lo que indica que la incorporación de la estrategia IPC

no compromete el desempeño de regulación alcanzado por el controlador baseline.

Por su parte, la Figura 3(a) compara la evolución temporal del momento en la raíz de la pala 1 y el ángulo de pitch correspondiente. Los resultados muestran que el controlador PI+GA+IPC consigue ligeras reducciones en algunos picos de carga aerodinámica, manteniendo una actividad del actuador de pitch similar a la observada en el controlador baseline. Este comportamiento resulta consistente con la reducción de los índices asociados a cargas estructurales obtenida durante la optimización.

Finalmente, la Figura 3(b) presenta el momento fore-aft y el desplazamiento fore-aft de la torre. Aunque ambas estrategias exhiben respuestas similares, el controlador optimizado muestra una ligera atenuación de ciertas oscilaciones dinámicas, especialmente durante cambios bruscos en la velocidad del viento, contribuyendo a disminuir los esfuerzos estructurales en la torre y explica parcialmente la mejora observada en los índices relacionados con la mitigación de cargas.

En conjunto, los resultados confirman que la estrategia PI+GA+IPC mantiene una capacidad de regulación equivalente a la del controlador baseline mientras consigue una reducción moderada de determinadas cargas estructurales. Estos resultados son coherentes con la disminución del índice global J obtenida durante el proceso de optimización. No obstante, estas conclusiones corresponden al perfil de viento turbulento considerado en el problema de referencia, por lo que su generalización a otras condiciones de operación requerirá aún evaluaciones adicionales.

5. Conclusiones

En este trabajo se implementaron y evaluaron diferentes estrategias de control de pitch para un aerogenerador de gran escala utilizando el modelo IEA 15 MW desarrollado en MATLAB/Simulink y OpenFAST. Se analizaron controladores PI y PID bajo estrategias CPC e IPC, cuyos parámetros fueron optimizados mediante algoritmos genéticos utilizando como función objetivo el índice global J .

Los resultados mostraron que todas las estrategias optimizadas redujeron el índice global respecto al controlador baseline. La estrategia PI+GA+IPC obtuvo el menor valor de J , logrando el mejor compromiso entre regulación, actividad del actuador y mitigación de cargas estructurales. Por otro lado,

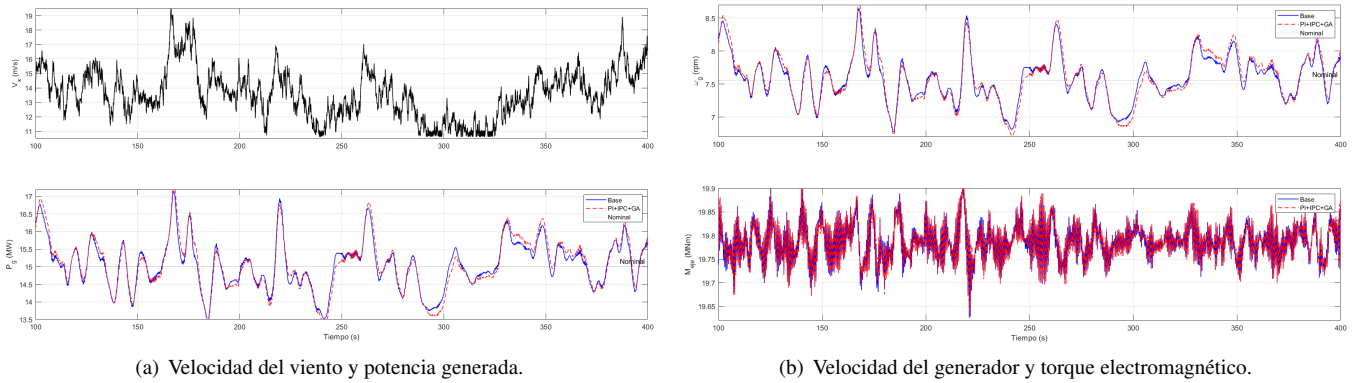


Figura 2: Comparación del desempeño dinámico entre el controlador baseline y el controlador PI+GA+IPC bajo condiciones de viento turbulento.

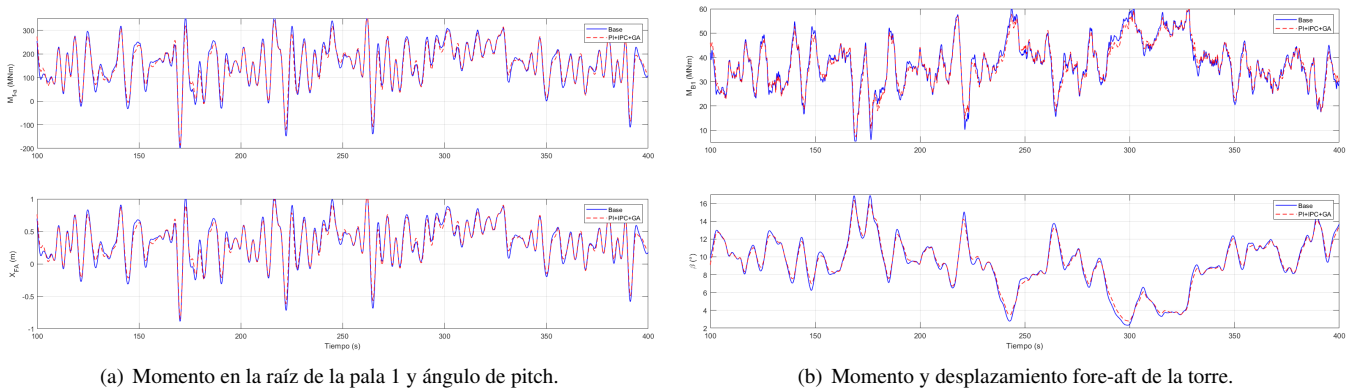


Figura 3: Comparación de las cargas estructurales entre el controlador baseline y el controlador PI+GA+IPC bajo condiciones de viento turbulento.

la incorporación de la acción derivativa en los controladores PID no produjo mejoras significativas respecto a las estrategias PI, ya que sus valores óptimos obtenido fueron reducidos, indicando una contribución limitada de este término bajo las condiciones evaluadas. Este comportamiento sugiere que la dinámica dominante del sistema en la Región 3 está asociada principalmente a componentes relativamente lentas, mientras que el ruido de medida, la turbulencia del viento y el filtrado aplicado al término derivativo reducen el beneficio potencial de la acción derivativa. Cabe señalar que estos resultados corresponden a una configuración en la que el parámetro del filtro derivativo N se mantuvo fijo durante el proceso de optimización, por lo que no puede descartarse que una optimización conjunta de este parámetro con las ganancias del controlador PID permita un ajuste más adecuado de la acción derivativa.

Finalmente, el uso de algoritmos genéticos permitió identificar configuraciones de control capaces de mejorar el desempeño global del sistema. Asimismo, el incremento del tamaño de la población y del número de generaciones para la estrategia PI+GA+IPC no produjo mejoras adicionales en el índice global J , respaldando la estabilidad de la solución obtenida. Los resultados corresponden a la condición de viento turbulento definida en el problema de referencia empleado, utilizada para garantizar una comparación objetiva entre las estrategias evaluadas. Como trabajo futuro se propone evaluar las estrategias desarrolladas bajo diferentes escenarios y realizaciones de viento turbulento, optimizar conjuntamente el parámetro del filtro derivativo N y estudiar estrategias avanzadas de control adaptativo para aerogeneradores de gran po-

tencia.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del MCIN/AEI/10.13039/501100011033 a través del proyecto PID2024-155653OB-C21. Luz Alexandra Díaz Pareja agradece el apoyo financiero a través del contrato predoctoral FPI PREP2024-003103 asociado a dicho proyecto.

Referencias

- Barter, G., Bortolotti, P., Gaertner, E., Rinker, J., Abbas, N. J., dzalkind, Zahle, F., Wainwright, T., Wang, L., Chetan, M., Branlard, E., Oisin, Padrón, L. A., Hall, M., Issraman, Mar. 2026. Ieawindsystems/iea-15-240-rwt: v1.1.18. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18909964> DOI: 10.5281/zenodo.18909964
- Bossanyi, E. A., 2003. Individual blade pitch control for load reduction. Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology 6 (2), 119–128.
- Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E., Barışçi, N., 2016. Control of pitch angle of wind turbine by fuzzy pid controller. Intelligent Automation & Soft Computing 22 (3), 463–471.
- Garrido, J., Lara, M., Ruz, M. L., Vázquez, F., Aug. 2024. Conjunto de datos del concurso en ingeniería de control 2024 (cic2024) de cea. URL: <https://doi.org/10.17632/tdj78btsn5.1> DOI: 10.17632/tdj78btsn5.1
- Menezes, E. J. N., Araújo, A. M., Da Silva, N. S. B., 2018. A review on wind turbine control and its associated methods. Journal of cleaner production 174, 945–953.
- Njiri, J. G., Söffker, D., 2016. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 60, 377–393.