XXI Simposio CEA de Control Inteligente
24-26 de junio de 2026, Salamanca

Optimización mediante algoritmos genéticos de un controlador Fuzzy PI para el control de pitch de una turbina eólica de 15 MW

Diaz-Pareja, L. A.[a,*], García-Pérez, L.[b], Santos, M.[a], Sierra-García, J.E.[c]

[a]b Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, España.
[b]Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.
[c]Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, 09004, Burgos, España.

To cite this article: Diaz-Pareja, L. A., García-Pérez, L., Santos, M., Sierra-García, J.E. 2026. Genetic Algorithm Optimization of a Fuzzy PI Pitch Controller for a 15 MW Wind Turbine. XXI Simposio CEA de Control Inteligente, Salamanca (Spain), 2026.

Resumen

La operación de aerogeneradores de gran potencia exige estrategias de control capaces de mantener la regulación de potencia y, simultáneamente, reducir las cargas mecánicas que afectan la vida útil de la turbina. En este contexto, se propone un controlador Fuzzy PI optimizado mediante algoritmos genéticos para la regulación de pitch de la turbina eólica de referencia IEA 15 MW operando en Región 3. La evaluación se realiza mediante simulaciones aeroelásticas desarrolladas en OpenFAST y MATLAB/Simulink, utilizando como referencia el controlador PI baseline y los índices de desempeño definidos en el desafío IEA Wind Task 37. El algoritmo genético se emplea para optimizar las funciones de pertenencia asociadas al error de velocidad del generador y a su derivada, con el objetivo de mejorar el compromiso entre regulación y mitigación de cargas estructurales. Los resultados muestran que el controlador propuesto alcanza una reducción del índice global de desempeño respecto al controlador de referencia, manteniendo una regulación de potencia y velocidad comparable. Asimismo, la estrategia difusa genera una acción de pitch más suave, contribuyendo a disminuir el esfuerzo de actuación y las cargas mecánicas sobre la turbina.

Palabras clave: Control difuso, Algoritmos genéticos, Control de aerogeneradores, Sistemas de energía eólica, Optimización

Genetic Algorithm Optimization of a Fuzzy PI Pitch Controller for a 15 MW Wind Turbine

Abstract

The operation of large-scale wind turbines requires control strategies capable of maintaining power regulation while simultaneously reducing the mechanical loads that affect turbine lifetime. In this context, a Fuzzy PI controller optimized through genetic algorithms is proposed for pitch regulation of the IEA 15 MW reference wind turbine operating in Region 3. The assessment is carried out using aeroelastic simulations developed in OpenFAST and MATLAB/Simulink, employing the baseline PI controller and the performance indices defined in the IEA Wind Task 37 challenge as references. The genetic algorithm is used to optimize the membership functions associated with the generator speed error and its derivative in order to improve the trade-off between regulation performance and structural load mitigation. The results show that the proposed controller achieves a reduction in the overall performance index with respect to the baseline controller while maintaining comparable power and speed regulation. In addition, the fuzzy strategy produces a smoother pitch actuation, contributing to lower control effort and reduced mechanical loads on the wind turbine.

Keywords: Intelligent control, Fuzzy control, Genetic algorithms, Wind energy systems, Optimization

*Autor para correspondencia: luzaledi@ucm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

La energía eólica se ha consolidado como una de las tecnologías de generación renovable de mayor expansión durante las últimas décadas debido al desarrollo tecnológico, la disminución de costos de producción y la creciente necesidad de reducir las emisiones contaminantes asociadas al uso de combustibles fósiles (Civelek et al., 2016). En particular, el crecimiento de las instalaciones y el incremento de la capacidad instalada han impulsado el desarrollo de aerogeneradores de gran potencia y arquitecturas cada vez más complejas. Como consecuencia, los sistemas de control han adquirido un papel fundamental para garantizar condiciones adecuadas de operación, estabilidad y seguridad en turbinas eólicas modernas de varios megavatios (Menezes et al., 2018).

El comportamiento dinámico de las turbinas eólicas está fuertemente condicionado por la naturaleza variable y aleatoria del viento. Debido a que la potencia aerodinámica extraída depende del cubo de la velocidad del viento, pequeñas variaciones en el flujo eólico pueden generar cambios significativos en la velocidad del rotor, las cargas estructurales y la potencia generada. Asimismo, los aerogeneradores están sometidos a dinámicas altamente no lineales, perturbaciones continuas y esfuerzos mecánicos variables que afectan tanto el desempeño energético como la vida útil de los componentes estructurales (Civelek et al., 2016). En consecuencia, los sistemas de control deben ser capaces no solo de maximizar la producción energética, sino también de mitigar cargas dinámicas y mantener condiciones estables de operación bajo escenarios de viento turbulento.

En aerogeneradores de velocidad y pitch variables, el control de ángulo de paso constituye una de las estrategias más empleadas para regular la potencia generada y limitar las cargas aerodinámicas presentes en las palas y la torre (Zamzoum et al., 2020). Particularmente en la región 3 de operación, cuando la velocidad del viento supera el valor nominal, el sistema de pitch ajusta continuamente el ángulo de las palas con el objetivo de mantener la velocidad del generador y la potencia dentro de sus valores nominales (Zamzoum et al., 2020). Si bien dentro de estas estrategias los controladores PI convencionales representan la metodología más ampliamente utilizada en aerogeneradores comerciales (Njiri and Söffker, 2016), diversos estudios han reportado limitaciones asociadas a su sensibilidad frente a no linealidades, incertidumbres paramétricas y variaciones del punto de operación (Zamzoum et al., 2020). En este contexto, los controladores basados en lógica difusa han recibido creciente atención debido a su capacidad para incorporar conocimiento experto mediante reglas lingüísticas y afrontar sistemas altamente no lineales sin requerir modelos matemáticos precisos, mostrando además una mayor capacidad de adaptación frente a condiciones operativas variables (Aranizadeh et al., 2025; Salem et al., 2021).

Diversos estudios han explorado la aplicación de estrategias de lógica difusa al control de sistemas eólicos con el objetivo de mejorar la estabilidad dinámica, incrementar la robustez frente a perturbaciones y optimizar el desempeño bajo condiciones de operación variables. En particular, se han propuesto controladores adaptativos basados en lógica difusa para el ajuste del ángulo de pitch, obteniéndose reducciones significativas en las fluctuaciones de potencia y mejoras en la estabilidad operativa de la turbina (Aranizadeh et al., 2025). De manera complementaria, otros trabajos han desarrollado esquemas fuzzy-PI adaptativos en los que la lógica difusa se emplea para ajustar en línea los parámetros del controlador convencional, logrando mejoras en el seguimiento de referencias y en la respuesta frente a variaciones de la velocidad del viento (Salem et al., 2021). En conjunto, estos estudios evidencian el potencial de la lógica difusa como alternativa complementaria a los controladores PI convencionales para aplicaciones de control en aerogeneradores de gran potencia.

No obstante, a pesar del creciente interés en estrategias de control basadas en lógica difusa, aún son limitados los estudios que analizan su aplicación en modelos aeroelásticos de alta fidelidad para aerogeneradores offshore de gran potencia. En este contexto, el presente trabajo propone el diseño y evaluación de un controlador Fuzzy PI optimizado mediante algoritmos genéticos para la regulación de pitch de la turbina eólica de referencia IEA de 15 MW, modelada en OpenFAST y acoplada con MATLAB/Simulink. El controlador propuesto se evalúa en la Región 3 de operación, tomando como referencia el controlador PI baseline y los índices de desempeño definidos en el Concurso de Ingeniería de Control CIC2024. Particularmente, el controlador fuzzy utiliza como entradas el error de velocidad del generador y la derivada de dicho error, mientras que el algoritmo genético se emplea para optimizar la distribución de las funciones de pertenencia de entrada con el objetivo de mejorar el compromiso entre regulación de potencia, suavidad de actuación y mitigación de cargas estructurales.

Con el fin de validar la estrategia propuesta y analizar su desempeño frente al controlador de referencia, el resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 presenta el modelo y el problema de control, la Sección 3 describe el controlador Fuzzy PI y su optimización mediante AG, la Sección 4 discute los resultados obtenidos y finalmente la Sección 5 resume las conclusiones y plantea posibles líneas de investigación futura.

2. Modelo de turbina eólica y planteamiento del problema de control

2.1. Modelo de turbina eólica

La validación de la estrategia de control propuesta se realizó empleando el modelo IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine (IEA 15 MW RWT) (Barter et al., 2026), una turbina eólica offshore de referencia ampliamente utilizada en investigaciones relacionadas con control y simulación aeroelástica. Aunque la IEA 15 MW fue desarrollada originalmente como una turbina offshore de referencia, en este trabajo se configuró bajo condiciones onshore con el propósito de simplificar el modelo y reducir el costo computacional asociado a las simulaciones, manteniendo las características aerodinámicas y estructurales relevantes para la evaluación de las estrategias de control. El aerogenerador corresponde a una configuración de accionamiento directo y tres palas, con una potencia nominal de 15 MW, un rotor de 240 m de diámetro y una altura de buje de 150 m. La velocidad nominal del rotor es de 7.56 rpm y la potencia nominal se alcanza para una velocidad de viento de aproximadamente 10.59 m/s. Debido a sus dimensiones y nivel de potencia, este modelo constituye una referencia ampliamente

utilizada para la evaluación de estrategias avanzadas de control en aerogeneradores de gran escala.

La dinámica aeroelástica del aerogenerador es representada mediante OpenFAST, plataforma de simulación de código abierto desarrollada para el análisis de turbinas eólicas de gran escala. En este estudio, OpenFAST se acopla con MATLAB/Simulink para implementar y evaluar las estrategias de control propuestas.

2.2. Problema de control

La operación de las turbinas eólicas puede dividirse en tres regiones principales definidas en función de la velocidad del viento. En la Región 1, correspondiente a velocidades inferiores a la velocidad de arranque (3 m/s para la turbina IEA 15 MW), la generación eléctrica permanece deshabilitada debido a que la energía capturada no compensa las pérdidas asociadas al funcionamiento del sistema. En la Región 2, comprendida entre la velocidad de arranque y la velocidad nominal (3 − 10,59 m/s), el objetivo del control consiste en maximizar la extracción de energía manteniendo una relación óptima de velocidad de punta, generalmente mediante el ajuste del par electromagnético y manteniendo el ángulo de pitch constante.

Finalmente, en la Región 3, cuando la velocidad del viento supera el valor nominal, la turbina entra en régimen de carga completa y el objetivo principal del sistema de control consiste en limitar la potencia generada y mantener la velocidad del generador dentro de valores seguros de operación (Menezes et al., 2018). En esta región, el control del ángulo de paso de las palas se convierte en el mecanismo principal para reducir la eficiencia aerodinámica del rotor y regular la energía extraída del viento.

El presente trabajo se enfoca específicamente en la operación de la Región 3, donde el par electromagnético del generador se mantiene constante en su valor nominal. Bajo esta condición, la potencia generada depende directamente de la velocidad angular del generador $P_g = T_{g,\text{rated}}\,\omega_g$.

Por lo tanto, para garantizar la operación a potencia nominal resulta necesario mantener la velocidad del generador cercana a su valor nominal de 7,56 rpm. En consecuencia, el sistema de control debe compensar las perturbaciones producidas por las variaciones del viento mediante el ajuste del ángulo de pitch, minimizando simultáneamente las cargas estructurales sobre el aerogenerador.

Asimismo, el actuador de pitch tiene restricciones físicas asociadas tanto al rango de movimiento angular ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$) como a la velocidad máxima de actuación ($-2^\circ/\text{s} \leq \dot{\beta} \leq 2^\circ/\text{s}$).

Estas limitaciones fueron incorporadas dentro del modelo implementado en Simulink debido a que representan las capacidades físicas reales de los actuadores de pitch y adquieren especial relevancia en aerogeneradores de gran potencia, donde la elevada inercia de las palas restringe la velocidad de respuesta del sistema.

Por otro lado, todos los perfiles de viento empleados en las simulaciones corresponden a condiciones turbulentas generadas bajo el Modelo de Turbulencia Normal clase C definido por la norma IEC 61400-1. Los perfiles consideran una intensidad de turbulencia del 12 % superpuesta a velocidades medias del viento comprendidas entre 11 m/s y 25 m/s. Cada simulación posee una duración total de 400 s; sin embargo, únicamente los últimos 300 s son utilizados para el cálculo de los índices de desempeño con el fin de evitar la influencia de los transitorios iniciales.

2.3. Índices de desempeño

El desempeño de las estrategias de control evaluadas se cuantifica mediante los seis índices normalizados definidos para la Categoría 2 del Concurso de Ingeniería de Control CIC2024 (Grupo Temático de Ingeniería de Control, Comité Español de Automática (CEA), 2024), orientados tanto al seguimiento de referencias como a la mitigación de cargas estructurales sobre la turbina eólica. En conjunto, estos índices permiten evaluar simultáneamente la capacidad de regulación de velocidad y potencia, el esfuerzo de actuación del sistema de pitch y la reducción de las principales cargas mecánicas presentes en la turbina.

$$R_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0}\int_{t_0}^{t_{fin}}(\omega_{g,rated}-\omega_g(t))^2 dt}}{0{,}5} \tag{1}$$

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

$$R_3 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0}\int_{t_0}^{t_{fin}}\dot{M}_{eje}^2 dt}}{1} \tag{3}$$

$$R_4 = \frac{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0}\int_{t_0}^{t_{fin}}\dot{\beta}_i^2 dt}}{2} \tag{4}$$

$$R_5 = \frac{\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0}\int_{t_0}^{t_{fin}}\dot{M}_{f-a}^2 dt}}{80} \tag{5}$$

$$R_6 = \frac{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\sqrt{\frac{1}{t_{fin}-t_0}\int_{t_0}^{t_{fin}}\dot{M}_{Bi}^2 dt}}{8} \tag{6}$$

Los índices R_1 y R_2 evalúan la capacidad del controlador para mantener la velocidad angular del generador y la potencia eléctrica próximas a sus valores nominales. Por su parte, R_3 cuantifica las variaciones del momento torsional en el eje del generador, mientras que R_4 representa el esfuerzo de actuación asociado al sistema de pitch mediante el valor RMS de la velocidad de cambio del ángulo de paso.

Adicionalmente, R_5 y R_6 permiten evaluar el comportamiento estructural del aerogenerador mediante las variaciones del momento frontal en la base de la torre y los momentos frontales en la base de las palas, respectivamente. De esta manera, los índices definidos permiten analizar simultáneamente el desempeño dinámico y la mitigación de cargas estructurales.

Todos los índices fueron formulados de manera adimensional utilizando factores de normalización asociados a valores máximos de referencia, permitiendo comparar directamente el desempeño relativo de cada estrategia de control. Valores menores de los índices representan un mejor comportamiento dinámico y estructural del sistema.

Finalmente, los seis índices normalizados son combinados mediante un índice global de desempeño definido como:

$$J = w_1R_1 + w_2R_2 + w_3R_3 + w_4R_4 + w_5R_5 + w_6R_6 \tag{7}$$

donde los pesos w_i corresponden a constantes positivas tales que $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1$. Cabe señalar que los pesos w_i fueron definidos por la organización del CIC2024 y no fueron proporcionados a los participantes (Grupo Temático de

Ingeniería de Control, Comité Español de Automática (CEA), 2024). El índice global J es calculado automáticamente por el entorno oficial de evaluación del concurso.

El controlador de referencia propuesto obtiene un índice global de desempeño de $J = 0{,}6967$, con valores parciales de: $R_1 = 0{,}6884$, $R_2 = 0{,}6827$, $R_3 = 0{,}2820$, $R_4 = 0{,}4318$, $R_5 = 1{,}0215$ y $R_6 = 0{,}9831$. Este resultado es utilizado como punto de referencia para evaluar las mejoras obtenidas mediante las estrategias de control propuestas.

3. Diseño del controlador Fuzzy PI

Con el objetivo de mejorar la capacidad de adaptación del sistema frente a las no linealidades y perturbaciones aerodinámicas presentes en la turbina eólica, se implementó un controlador basado en lógica difusa tipo PI (*Fuzzy PI*). A diferencia de un controlador PI convencional con ganancias constantes, la estrategia propuesta permite modificar la acción de control a partir de reglas lingüísticas y funciones de pertenencia asociadas al estado dinámico del sistema.

El controlador desarrollado utiliza como variables de entrada el error de velocidad del generador $e(t) = \omega_{g,ref} - \omega_g$ y la derivada del error $\dot{e}(t) = \frac{de(t)}{dt}$.

La implementación se realizó mediante un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani utilizando dos variables de entrada (*error* y *derror*) y dos variables de salida asociadas a las ganancias adaptativas K_p y K_i del controlador PI. La acción de control generada por el sistema difuso se implementa mediante una estrategia de control individual de pitch (IPC), permitiendo ajustar de forma independiente el ángulo de cada pala y contribuyendo a la mitigación de cargas asimétricas sobre el rotor.

Para cada variable de entrada se definieron tres funciones de pertenencia triangulares asociadas a las etiquetas lingüísticas Negativo (N), Cero (Z) y Positivo (P). De forma análoga, para las variables de salida se definieron tres niveles de actuación denominados Suave (S), Medio (M) y Fuerte (F). Los rangos utilizados para las variables del sistema difuso se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de las variables del sistema difuso

Variable	Rango
e	$[-1{,}2,\ 1{,}2]$
$\dot{e}$	$[-1{,}2,\ 1{,}2]$
K_p	$[-5{,}5,\ -4{,}5]$
K_i	$[-0{,}6,\ -0{,}4]$

La base de reglas fuzzy fue construida considerando el comportamiento dinámico deseado del sistema. En general, errores elevados generan acciones de control más agresivas, mientras que cambios rápidos en el error permiten anticipar variaciones dinámicas y ajustar la respuesta del controlador frente a perturbaciones del viento.

A diferencia de implementaciones convencionales donde las funciones de pertenencia permanecen fijas, en este trabajo se optimizaron los picos de las funciones de pertenencia de entrada mediante Algoritmos Genéticos (AG). El vector de optimización utilizado se define como:

$$x = [e_N\ e_Z\ e_P\ de_N\ de_Z\ de_P] \tag{8}$$

donde cada parámetro representa el pico correspondiente a las funciones de pertenencia triangulares asociadas al error y a la derivada del error. Los límites de búsqueda empleados durante el proceso de optimización se presentan en la Tabla 2. De esta manera, el algoritmo genético ajusta la posición de los picos de las funciones de pertenencia, modificando la sensibilidad del controlador frente a distintas condiciones de operación del aerogenerador.

Tabla 2: Límites de búsqueda de los parámetros optimizados

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
e_N	-0.9	-0.3
e_Z	-0.1	0.1
e_P	0.3	0.9
$\dot{e}_N$	-0.9	-0.3
$\dot{e}_Z$	-0.1	0.1
$\dot{e}_P$	0.3	0.9

La base de reglas utilizada para ajustar las ganancias K_p y K_i está compuesta por nueve reglas lingüísticas, resumidas en la Tabla 3. El objetivo de estas reglas es modificar la intensidad de la acción de control en función del error de velocidad del generador y de su derivada, proporcionando una respuesta más flexible frente a las perturbaciones aerodinámicas presentes durante la operación de la turbina.

Tabla 3: Base de reglas del controlador Fuzzy PI

$e\backslash\dot{e}$	N	Z	P
N	(F,S)	(F,M)	(M,M)
Z	(M,M)	(M,M)	(M,M)
P	(M,M)	(F,M)	(F,S)

donde el primer término corresponde a la acción aplicada sobre K_p y el segundo a la acción aplicada sobre K_i, siendo F: Fuerte, M: Medio y S: Suave.

La evaluación de cada individuo del algoritmo genético se realizó utilizando el índice global de desempeño J, calculado a partir de simulaciones aeroelásticas desarrolladas en MATLAB/OpenFAST. Debido al elevado costo computacional asociado a cada simulación (aproximadamente 6 horaS), se empleó una configuración conservadora del algoritmo genético, utilizando una población de 8 individuos y un máximo de 4 generaciones para la optimización de los seis parámetros asociados a las funciones de pertenencia de entrada. Asimismo, se deshabilitó la ejecución en paralelo y se utilizaron los operadores genéticos por defecto proporcionados por MATLAB.

La estructura implementada del controlador Fuzzy PI se presenta en la Figura 1. En ella se observa el bloque de inferencia difusa encargado de generar las ganancias adaptativas del controlador a partir del error de velocidad y su derivada. Asimismo, se incorporaron bloques de saturación y limitadores de velocidad con el propósito de representar las restricciones físicas de los actuadores de pitch.

4. Resultados y discusión

La Tabla 4 presenta la comparación entre el controlador PI baseline propuesto en el desafío CIC2024 y el controlador

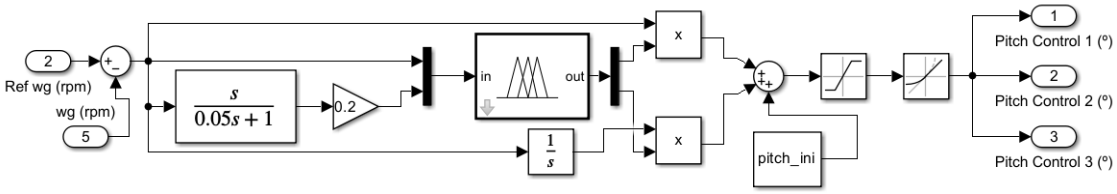


Figura 1: Estructura del controlador Fuzzy PI implementado en Simulink

Tabla 4: 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
Fuzzy PI + GA	0.7492	0.7430	0.2881	0.3697	0.9466	0.9421	0.6901

Fuzzy PI optimizado mediante algoritmos genéticos. El controlador de referencia obtuvo un índice global de desempeño de $J = 0{,}6967$, mientras que la estrategia Fuzzy PI alcanzó un valor de $J = 0{,}6901$, correspondiente a una reducción aproximada del 0.95 %.

Aunque los índices asociados al seguimiento de velocidad y potencia (R_1 y R_2) presentan un ligero incremento respecto al controlador de referencia, se observa una reducción de los índices relacionados con el esfuerzo de control y las cargas estructurales (R_4, R_5 y R_6). En particular, la disminución del índice R_4 evidencia una menor variación de la señal de pitch, indicando una actuación más suave del controlador difuso. Aunque la reducción del índice global es moderada, los resultados sugieren que se redistribuye más eficientemente el compromiso entre regulación y mitigación de cargas mecánicas.

Los parámetros óptimos obtenidos por el algoritmo genético para las funciones de pertenencia de entrada fueron:

$$[-0{,}3257,\ 0{,}0919,\ 0{,}7459,\ -0{,}3000,\ 0{,}0123,\ 0{,}3000] \quad (9)$$

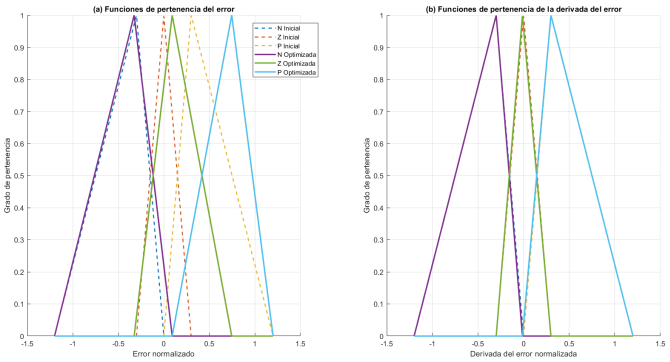


Figura 2: Comparación entre las funciones de pertenencia iniciales y optimizadas para las variables de entrada del controlador Fuzzy PI.

La Figura 2 muestra la comparación entre las funciones de pertenencia iniciales y las obtenidas tras el proceso de optimización mediante algoritmo genético. Puede observarse que las mayores modificaciones se produjeron en las funciones asociadas al error de velocidad del generador, mientras que las correspondientes a la derivada del error permanecieron prácticamente inalteradas. En particular, la optimización desplazó la función de pertenencia central hacia valores positivos y amplió la región asociada a errores positivos, modificando la sensibilidad del controlador alrededor del punto de operación nominal. Esto sugiere que la mejora obtenida se debe principalmente a un reajuste de la sensibilidad del controlador frente a desviaciones sostenidas de velocidad alrededor del punto de operación nominal.

Las Figuras 3 y 4 permiten analizar el comportamiento temporal de ambas estrategias. En la Figura 3 se observa que ambas estrategias mantienen la potencia generada alrededor del valor nominal de 15 MW y presentan respuestas similares en la velocidad angular del generador y el momento de torsión del eje, en concordancia con los valores cercanos de R_1, R_2 y R_3.

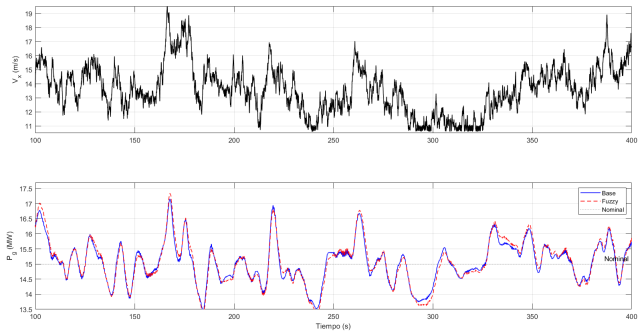
Por otro lado, la Figura 4 presenta las variables relacionadas con las cargas estructurales de la turbina y el esfuerzo de control. Se aprecia que el controlador reduce algunos de los picos presentes en el ángulo de pitch y presenta una respuesta más uniforme a lo largo de la simulación. Asimismo, se observan ligeras reducciones en las variaciones del momento frontal de torre y del momento frontal de pala, en concordancia con los menores valores obtenidos en los índices R_5 y R_6.

En conjunto, los resultados indican que la mejora del controlador Fuzzy PI no proviene de una reducción significativa de los errores de seguimiento, sino de una redistribución más favorable del compromiso entre regulación, esfuerzo de actuación y mitigación de cargas estructurales. Aunque la reducción absoluta de J es moderada, la estrategia propuesta mantiene una regulación comparable de potencia y velocidad, al mismo tiempo que reduce la exigencia sobre el sistema de pitch. Por tanto, la principal ventaja de la estrategia propuesta radica en obtener un mejor compromiso entre desempeño dinámico, mitigación de cargas estructurales y suavidad de actuación del sistema de control.

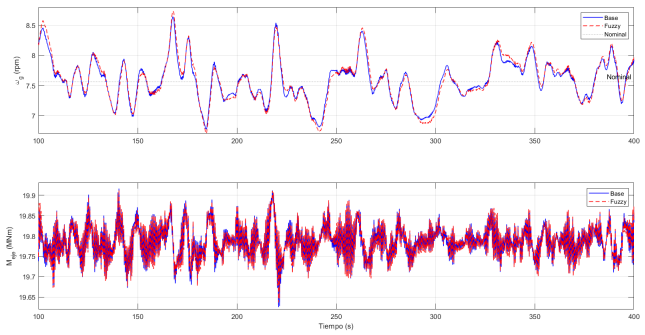
5. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un controlador Fuzzy PI optimizado mediante algoritmos genéticos para la regulación de pitch de la turbina eólica de referencia IEA 15 MW operando en Región 3. La evaluación se realizó mediante simulaciones aeroelásticas desarrolladas en OpenFAST y MATLAB/Simulink, utilizando como referencia el controlador PI baseline propuesto en el desafío CIC2024.

Los resultados obtenidos muestran que el controlador Fuzzy PI optimizado alcanzó una reducción aproximada del 0.95 % en

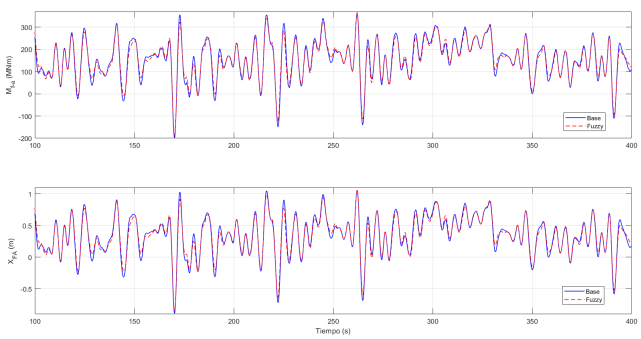


(a) Velocidad del viento y potencia generada

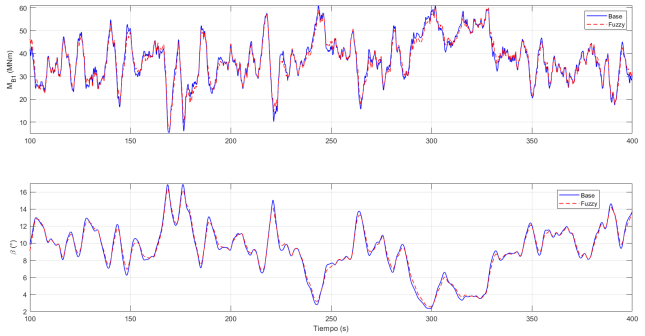


(b) Velocidad angular del generador y momento de torsión del eje

Figura 3: Comparación del desempeño dinámico entre el controlador PI baseline y el controlador Fuzzy PI+GA bajo condiciones de viento turbulento.



(a) Momento frontal y desplazamiento de torre



(b) Momento frontal de pala y ángulo de pitch

Figura 4: Comparación de las variables asociadas a cargas estructurales y esfuerzo de control para el controlador PI baseline y el controlador Fuzzy PI+GA.

el índice global de desempeño respecto al controlador de referencia. Aunque las diferencias observadas en los índices asociados al seguimiento de velocidad y potencia fueron reducidas, se obtuvieron mejoras en los índices relacionados con el esfuerzo de control y las cargas estructurales de la turbina.

El análisis de las funciones de pertenencia optimizadas evidenció que las principales modificaciones se concentraron en las regiones asociadas al error de velocidad del generador, mientras que las funciones correspondientes a la derivada del error permanecieron prácticamente inalteradas. Este resultado sugiere que la mejora alcanzada se debe principalmente a un reajuste de la sensibilidad del controlador alrededor del punto de operación nominal.

Asimismo, el controlador difuso mantuvo una regulación de potencia y velocidad comparable a la del controlador baseline, generando simultáneamente una acción de pitch más suave. Desde el punto de vista práctico, este comportamiento resulta especialmente atractivo debido a que una menor actividad del actuador puede contribuir a reducir su desgaste mecánico y favorecer la operación a largo plazo del aerogenerador.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar el proceso de optimización incrementando el tamaño de la población y el número de generaciones del algoritmo genético, así como extender la optimización a la base completa de reglas difusas y evaluar el comportamiento del controlador bajo diferentes escenarios de turbulencia y condiciones de operación offshore.

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

Aranizadeh, A., Mirmozaffari, M., Khalatabadi Farahani, B., 2025. Maximizing wind turbine power generation through adaptive fuzzy logic control for optimal efficiency and performance. Wind 5 (1), 4.

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., lssraman, Mar. 2026. Ieawindsystems/iea-15-240-rwt: v1.1.18. URL: `https://doi.org/10.5281/zenodo.18909964` DOI: `10.5281/zenodo.18909964`

Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E., Barışçı, N., 2016. Control of pitch angle of wind turbine by fuzzy pid controller. Intelligent Automation & Soft Computing 22 (3), 463–471.

Grupo Temático de Ingeniería de Control, Comité Español de Automática (CEA), 2024. Concurso en ingeniería de control 2024: Control de una turbina eólica de gran potencia ii. descripción del concurso. Documento oficial del Concurso de Ingeniería de Control CIC2024.

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.

Salem, A. A., Aldin, N. A. N., Azmy, A. M., Abdellatif, W. S., 2021. Implementation and validation of an adaptive fuzzy logic controller for mppt of pmsg-based wind turbines. IEEE Access 9, 165690–165707.

Zamzoum, O., Derouich, A., Motahhir, S., El Mourabit, Y., El Ghzizal, A., 2020. Performance analysis of a robust adaptive fuzzy logic controller for wind turbine power limitation. Journal of cleaner production 265, 121659.