XXI Simposio CEA de Control Inteligente

24-26 de junio de 2026, Salamanca

Sintonía fuzzy adaptativa de reguladores PI, PD y PID aplicados a aerogeneradores

Fallo, L.[a, *], Santos, M.[b], Visioli, A.[c]

[a] *Universidad de Brescia, Italia.*
[b] *Instituto de Tecnología, Universidad Complutense de Madrid, 28040-Madrid, España.*
[c] *Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad de Brescia, 25123 Brescia, Italia.*

To cite this article: Fallo, L., Santos, M., Visioli, A. 2026. Adaptive fuzzy tuning of PI, PD and PID controllers applied to wind turbines. XXI Simposio CEA de Control Inteligente, Salamanca (Spain), 2026.

Resumen

El control de paso (*pitch*) o del ángulo de las palas es un elemento esencial en aerogeneradores de gran escala que operan por encima de la velocidad nominal del viento, donde mantener una potencia de salida estable limitando al mismo tiempo las cargas estructurales representa un desafío crítico. Este trabajo aborda este problema mediante la comparación de tres configuraciones basadas en lógica difusa con método de inferencia Mamdani que, en función del error de velocidad del generador y su derivada temporal, ajustan dinámicamente las ganancias de controladores proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) y proporcional-integral-derivativo (PID), aplicados a la regulación colectiva del ángulo de paso (CPC) de una turbina eólica IEA 15 MW, operando en la Región 3 (velocidad de viento nominal). El modelo aeroelástico de la turbina se implementa en el software de referencia de NREL OpenFAST en co-simulación con MATLAB/Simulink. Cada configuración se evalúa mediante cuatro índices normalizados que capturan la precisión en el seguimiento de velocidad, la calidad de regulación de potencia, las cargas torsionales del eje y el esfuerzo del actuador de paso, combinados en una función de coste global.

Palabras clave: Control de paso, Control inteligente, Aerogeneradores, Controladores PID/PI/PD, Lógica difusa.

Fuzzy PI, PD and PID controllers applied to wind turbines

Abstract

Pitch control, or blade angle control, is essential in large-scale wind turbines operating above nominal wind speeds, where maintaining stable power output while limiting structural loads presents a critical challenge. This work addresses this problem by comparing three fuzzy logic-based configurations using the Mamdani inference method. These configurations, based on the generator speed error and its time derivative, dynamically adjust the gains of proportional-derivative (PD), proportional-integral (PI), and proportional-integral-derivative (PID) controllers applied to the collective pitch control (CPC) of an IEA 15 MW wind turbine operating in Region 3 (nominal wind speed). The turbine's aeroelastic model is implemented in the NREL OpenFAST reference software in co-simulation with MATLAB/Simulink. Each configuration is evaluated using four standardized indices that capture speed tracking accuracy, power regulation quality, shaft torsional loads, and step actuator effort, combined into an overall cost function.

Keywords: Pitch control, Intelligent control, wind turbines, PID/PI/PD controllers, Fuzzy logic.

1. Introducción

El control de aerogeneradores de gran escala constituye uno de los retos más relevantes en el ámbito de la ingeniería de sistemas de energía renovable (Zafar et al., 2026). A medida que la potencia nominal de las turbinas aumenta, la complejidad de los sistemas de control crece de forma proporcional, ya que las no linealidades aerodinámicas, las variaciones del perfil de viento y las restricciones mecánicas imponen exigencias cada vez más estrictas sobre los algoritmos de regulación (Muñoz-Palomeque et al., 2024, Hassan et al., 2025).

En la Región 3 de operación, donde la velocidad del viento supera el valor nominal, el objetivo principal del control no es solo maximizar la extracción energética, sino también proteger la turbina y mantener la potencia generada en su valor de referencia. Esto se logra mediante la variación del ángulo de

*Autor para correspondencia: fallolaur@gmail.com
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

paso de las palas, conocido como control de paso colectivo, que reduce la eficiencia aerodinámica del rotor cuando el viento es excesivo (Serrano et al., 2022).

Los controladores proporcional-integral-derivativos (PID) representan actualmente el estándar industrial para numerosas aplicaciones industriales (Gambier et al., 2021), entre ellas los conversores de energía eólica, gracias a su simplicidad y robustez. Sin embargo, presentan limitaciones inherentes frente a la naturaleza no lineal del punto de operación. En respuesta a esta limitación, la lógica difusa ha emergido como una alternativa flexible y eficaz, al permitir trabajar con variables no lineales de una forma suave y continua (Santos et al., 1996).

Diversos trabajos han abordado el control adaptativo de aerogeneradores mediante estructuras PID y sus variantes. Safwan Hamoodi et al. (2020) propusieron un controlador fuzzy-PID adaptativo para el control del ángulo de paso, demostrando mediante simulación que la adaptación en línea de las ganancias reduce el error en régimen estacionario respecto al PID convencional. Bashetty (2020) diseñó un controlador adaptativo robusto para el control combinado de paso y par en turbinas de 2 MW y 5 MW bajo condiciones de viento turbulento, modelando la velocidad del viento y validando la propuesta en MATLAB/Simulink. Lara et al. (2021) desarrollaron una estructura de control adaptativa basada en un regulador PI con planificación de ganancias y compensación feedforward del viento, cuya sintonía se formuló como un problema de optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos. Más recientemente, Ibrahim y Shneen (2025) analizaron el comportamiento de un controlador PI adaptativo para el ángulo de paso, estudiando la influencia del coeficiente de potencia C_p y del parámetro de velocidad específica λ sobre el rendimiento del sistema.

El presente trabajo compara tres arquitecturas de control clásico, reguladores proporcional-derivativo, PD, proporcional-integral PI y proporcional-integral-derivativo PID, aplicadas al control de paso (pitch) colectivo (CPC) de una turbina eólica IEA 15 MW (NREL, 2020), operando en la Región 3 (velocidad de viento nominal), simulada mediante el software de alta fidelidad de NREL OpenFAST, en co-simulación con MATLAB/Simulink, donde las ganancias de los reguladores varían dinámicamente en función del estado actual del sistema, dado por su error y derivada del error.

La evaluación se realiza a través de cuatro índices normalizados de rendimiento, combinados en una función de coste global (Garrido et al., 2024). Estos índices miden la precisión en el seguimiento de velocidad, la calidad de regulación de potencia, las cargas torsionales del eje y el esfuerzo del actuador de paso.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe el modelo de la turbina y el problema de control; la Sección 3 presenta el diseño de los controladores; la Sección 4 expone y discute los resultados obtenidos; la Sección 5 recoge las conclusiones y futuros trabajos.

2. Modelo de la turbina eólica y problema de control

2.1. Descripción del modelo y del control

El modelo utilizado en este estudio corresponde al aerogenerador de referencia IEA Wind Turbine (NREL, 2020), una turbina de eje horizontal con tres palas en configuración a barlovento, cuya potencia nominal es de 15 MW (Fig. 1). Aunque el diseño original contempla una instalación offshore, en este trabajo se ha configurado como instalación onshore por razones computacionales, siguiendo a Garrido et al. (Garrido et al., 2024). La dinámica aerolástica de la turbina se modela mediante el software de alta fidelidad OpenFAST, un entorno de simulación de código abierto desarrollado por el NREL, el cual se co-simula con MATLAB/Simulink para la implementación de los algoritmos de control. Las principales especificaciones del modelo se recogen en la Tabla 1.

Desde el punto de vista del control, el sistema intercambia señales con el bloque de la turbina en tiempo real. Las variables medidas son: la velocidad del viento frontal V_x [m/s], la potencia eléctrica generada P_g [MW], la velocidad angular del generador ω_g [rpm], el momento torsor de eje M_{eje} [MNm] y el ángulo del servo de paso β [°].

Las señales de control enviadas a la turbina son el ángulo de paso colectivo β [°] y el par electromagnético T_{em} [MNm], el cual se mantiene fijo en su valor nominal, de modo que β constituye la única variable manipulada.



Figura 1: Aerogeneradores en tierra

Tabla 1: Especificaciones del aerogenerador IEA 15 MW (NREL, 2020)

Parámetro	Valor
Potencia nominal	15 MW
Configuración del rotor	A barlovento, 3 palas
Velocidad nominal del rotor	7,6 rpm
Velocidad de viento de arranque/ nominal/ corte	3/ 10.59/ 25 m/s
Par electromagnético nominal	19.787 MNm
Diámetro del rotor	240 m
Altura del buje	150 m

2.2. Regiones de operación y objetivo de control

El comportamiento de un aerogenerador de velocidad variable puede dividirse en tres regiones de operación en función de la velocidad del viento. En la primera Región 1, la velocidad del viento es insuficiente para activar la turbina. En la Región 2, comprendida entre la velocidad de arranque y la nominal, el objetivo es maximizar la extracción de energía manteniendo el ángulo de paso fijo en su valor óptimo y

regulando el par electromagnético. Es en la Región 3, cuando el viento supera la velocidad nominal (en esta turbina de 10.59 m/s), donde se centra este trabajo. En esta región hay un doble objetivo, producir la máxima energía y evitar el exceso de carga mecánica para reducir la fatiga de la estructura. El control de paso actúa entonces como mecanismo de protección, reduciendo la eficiencia aerodinámica del rotor al aumentar el ángulo de incidencia de las palas (control de pitch). Mantener la velocidad del generador ω_g en torno a su valor nominal de 7.56 rpm es la condición necesaria para estabilizar la potencia, dado que, con par constante, ambas magnitudes están directamente relacionadas mediante la ecuación:

$$P_g = T_{g,rated}\ \omega_g \tag{1}$$

El actuador de paso opera bajo restricciones físicas estrictas impuestas por los servomotores:

$$0^{\circ} \leq \beta \leq 90^{\circ} \quad -2^{\circ}/s \leq \dot{\beta} \leq 2^{\circ}/s \tag{2}$$

Los perfiles de viento utilizados en las simulaciones son de naturaleza turbulenta, generados según el modelo de turbulencia normal clase C de la norma IEC 61400-1, con una intensidad de turbulencia del 12% sobre una velocidad media comprendida en el intervalo [11, 25] m/s.

2.3. Índices de rendimiento

Para cuantificar el rendimiento de cada configuración de control de forma objetiva y comparable, se definen cuatro índices normalizados R_1, R_2, R_3 y R_4. Los dos primeros, $R_1 = \frac{NRMSE\ (\omega_g)}{0.5}$ y $R_2 = NRMSE\ (P_g)$, miden la precisión en el seguimiento de la velocidad y la potencia generada, constituyendo los indicadores más relevantes desde el punto de vista del objetivo de control. $R_3 = NRMSE\ (\dot{M_{eje}})$ evalúa las oscilaciones del momento torsor del eje, siendo un indicador indirecto que cuantifica el estrés estructural al que se somete la transmisión. Finalmente, $R_4 = \frac{NRMSE\ (\dot{\beta})}{2}$ cuantifica el esfuerzo del actuador de paso, penalizando los movimientos bruscos o frecuentes de las palas. Estos cuatro índices se ponderan en una función de coste global J:

$$J = w_1 R_1 + w_2 R_2 + w_3 R_3 + w_4 R_4 \tag{3}$$

Los pesos w_i son positivos, suman la unidad y permanecen desconocidos.

Como referencia, en Garrido et al. (Garrido et al., 2024) se propone un controlador PI que servirá como base para las comparaciones. Con este controlador PI sintonizado de forma óptima se alcanza un índice global J = 0.5206, con los valores desglosados de los cuatro índices: $R_1 = 0.6884$, $R_2 = 0.6827$, $R_3 = 0.2820$, $R_4 = 0.4318$, valores que constituye el punto de base a mejorar.

3. Diseño de los controladores

Las tres configuraciones de control propuestas comparten una estructura común (Figura 2).

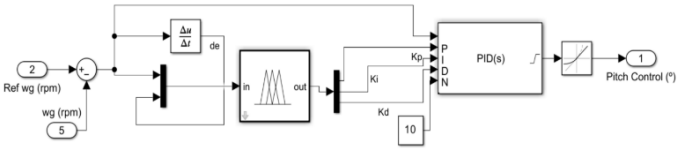


Fig. 2: Esquema de bloques del controlador Fuzzy PID

El sistema de inferencia fuzzy recibe como entradas el error de velocidad del generador $e = \omega_{g,rated} - \omega_g$ y su derivada temporal $\dot{e}$, y producen como salida uno o más de los parámetros de los controladores clásicos.

Esta arquitectura permite al sistema adaptar el comportamiento del sistema de control en tiempo real en función del estado actual del error, sin necesidad de reprogramar los parámetros del controlador.

Todos los sistemas difusos siguen una inferencia de tipo Mamdani, reconocida por su interpretabilidad y su capacidad para producir salidas suaves mediante el método de defuzzificacion del centroide. Las variables de entrada están descritas por cinco funciones de pertenencia triangulares simétricas, etiquetadas como Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (Z), Positivo Pequeño (PP) y Positivo Grande (PG), definidas en el intervalo normalizado [-1, 1].

La base de reglas está compuesta por 25 reglas if-then organizadas en una tabla 5x5, construidas bajo el principio de que errores grandes requieren ganancias elevadas para una respuesta rápida, mientras que errores pequeños se gestionan con ganancias reducidas para evitar oscilaciones.

3.1. Controlador PD con sintonía fuzzy

La primera configuración ensayada fue con el controlador PD (Proportional–Derivativo), con dos parámetros de sintonía: la ganancia proporcional dinámica $K_{p,dyn}$ y la ganancia derivativa dinámica $K_{d,dyn}$. La ley de control es:

$$u(t) = K_{p,dyn}(t)\ e(t) + K_{d,dyn}(t)\dot{e}(t) \tag{4}$$

donde la acción derivativa incorpora un filtro de primer orden con N = 10 para atenuar el ruido de alta frecuencia. Sin embargo, esta configuración presentó una limitación estructural que la hace inviable para esta aplicación. En la Región 3, la turbina requiere mantener un ángulo de paso estacionario significativamente superior al inicial para contrarrestar el exceso de viento de forma continua. Un controlador PD puro, al carecer de acción integral, no es capaz de generar ni mantener este valor estacionario: el error de velocidad persiste indefinidamente y la turbina entra en sobre velocidad. Por este motivo, la configuración fue descartada y no se incluyen resultados de ajuste iterativo.

3.2. Controlador PI con sintonía fuzzy

A diferencia del PD, en el regulador PI (Proporcional – Integral) se adapta dinámicamente tanto la ganancia proporcional como la integral, eliminando esta restricción y permitiendo una respuesta más flexible ante variaciones del perfil de viento. Las dos salidas del sistema de sintonía fuzzy

son la ganancia proporcional dinámica $K_{p,dyn}$ y la ganancia integral dinámica $K_{i,dyn}$ y la ley de control es:

$$u(t) = K_{p,dyn}(t)\, e(t) + K_{i,dyn}(t) \int e(t) \qquad (5)$$

Una característica relevante de esta arquitectura es que, al no incluir acción derivativa, no requiere ningún filtro de derivada, lo que simplifica tanto la implementación como el proceso de ajuste. Los rangos de salida se afinaron de forma iterativa, reduciendo progresivamente el intervalo de búsqueda hasta la convergencia, tal como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Ajuste iterativo de los rangos de los parámetros del PI

Intento	Rango K_p	Rango K_i	J
1	[-10 ,-5]	[-1, -0.2]	0.7600
2	[-8, -6]	[-0.8, -0.2]	0.5599
3	[-7.5, -6.5]	[-0.6, -0.3]	0.5263
4	[-7.2, -6.8]	[-0.55, -0.4]	**0.5230**

La configuración final alcanzó un valor de la función objetivo de J = 0.5230, con valores de los índices $R_1 = 0.6579$, $R_2 = 0.6524$, $R_3 = 0.2826$, $R_4 = 0.5014$.

3.3. Controlador PID con sintonía fuzzy

La configuración más completa incorpora una tercera acción de control con su correspondiente ganancia derivativa $K_{d,dyn}$, extendiendo la ley de control a:

$$u(t) = K_{p,dyn}(t)\, e(t) + K_{i,dyn}(t) \int e(t) + K_{d,dyn}(t)\, \dot{e} \qquad (6)$$

La acción derivativa permite anticipar variaciones bruscas del error y reaccionar con mayor rapidez ante ráfagas de viento intensas. Sin embargo, al ser sensible al ruido de medida, requiere la aplicación de un filtro paso bajo de primer orden con coeficiente N en el canal derivativo. El proceso de ajuste iterativo de los rangos de salida se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3: Ajuste iterativo de los rangos de los parámetros del PID

Intento	Rango K_p	Rango K_i	Rango K_d	J
1	[-10 ,-5]	[-1, -0.2]	[-20, -1]	1.3525
2	[-8, -6]	[-0.8, -0.2]	[-8, -1]	1.0019
3	[-7.5, -6.5]	[-0.6, -0.3]	[-6, -2]	0.8153
4	[-7.2, -6.8]	[-0.55, -0.4]	[-6, -4]	0.7151
5	[-7.3, -6.7]	[-0.52, -0.48]	[-5.2, -4.7]	**0.5027**

La configuración final alcanzó un valor de la función objetivo de J = 0.5027, con valores de los índices $R_1 = 0.6142$, $R_2 = 0.6091$, $R_3 = 0.2692$, $R_4 = 0.5215$.

La Figura 2 muestra el esquema de bloques implementado en MATLAB/Simulink para este tipo de sistema de control, el PID sintonizado con el sistema de inferencia fuzzy. El error de velocidad e y su derivada ė alimentan el sistema de inferencia difusa, cuyas salidas, las ganancias dinámicas $K_{p,dyn}$, $K_{i,dyn}$ y $K_{d,dyn}$, se actualizan en cada instante de simulación y se transfieren al bloque PID junto con el coeficiente de filtro fijo N = 10.

4. Resultados y discusión

Los índices de rendimiento obtenidos por los cuatro controladores evaluados se recogen en la Tabla 4. Se han marcado en negrita los mejores valores obtenidos para cada índice y para la función de coste global.

Tabla 4: Índices de rendimiento normalizados para todos los controladores

Contr.	R_1	R_2	R_3	R_4	J
PI_{ref}	0.6884	0.6827	0.2820	0.4318	0.5206
PD	0.7892	0.7245	0.2956	0.5251	0.5612
PI	0.6579	0.6524	0.2826	**0.5014**	0.5230
PID	**0.6142**	**0.6091**	**0.2692**	0.5215	**0.5027**

Las figuras 3 y 4 ilustran el comportamiento del controlador PID con sintonía fuzzy durante la simulación, al ser este el que ha obtenido mejores valores en general.

La Fig. 3 muestra la evolución temporal de las ganancias dinámicas: los tres coeficientes varían de forma continua en respuesta al error de velocidad y su derivada, confirmando el carácter adaptativo del sistema de inferencia difusa. Los rangos de variación son reducidos, consecuencia del ajuste iterativo descrito en la Tabla 3, pero suficientes para mejorar el seguimiento respecto al controlador de línea base.

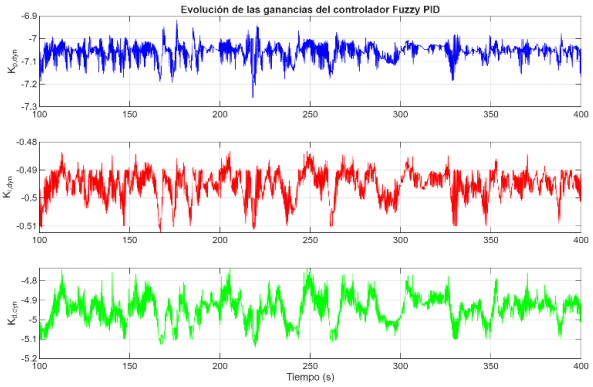


Figura 3: Evolución temporal de las ganancias dinámicas K_p, K_i y K_d del controlador PID con sintonía fuzzy durante la simulación

La Fig. 4 muestra la potencia generada, que oscila en torno al valor de referencia de 15 MW a lo largo de toda la simulación, demostrando que el controlador mantiene la regulación de potencia bajo condiciones de viento turbulento.

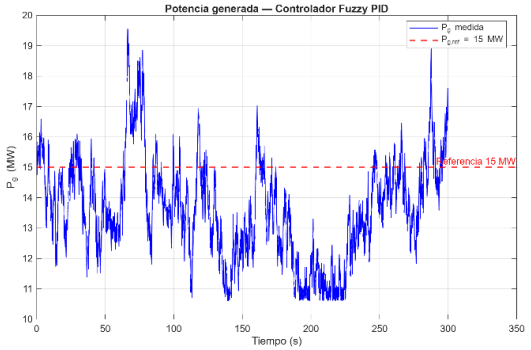


Figura 4: Evolución temporal de la potencia generada P_g para el controlador PID con sintonía fuzzy.

El controlador PD con sintonía fuzzy presentó una limitación estructural a causa de la ausencia de acción integral, que impide al controlador mantener el ángulo de paso estacionario requerido en Región 3, provocando una sobre velocidad persistente del generador que se traduce en valores de R_1 y R_2 demasiado altos. Esta observación confirma que, para esta aplicación, el PD no es la mejor opción para el presente estudio.

Sin embargo, tanto el controlador PI como el PID con sintonía adaptativa sí superan al controlador de base PI con parámetros fijos, aunque con perfiles de rendimiento claramente diferenciados. En términos de seguimiento de velocidad y potencia, que son los objetivos primarios del control, el PID ofrece los mejores resultados, con reducciones de R_1 y R_2 de cerca el 10% respecto a la línea base. Esta mejora se atribuye a la acción derivativa dinámica, que anticipa las variaciones bruscas del error y permite una respuesta más agresiva durante los transitorios de viento, reduciendo simultáneamente las ganancias en régimen estacionario para evitar oscilaciones innecesarias.

El controlador PI adaptativo, por su parte, alcanza mejoras comparables en R_1 y R_2, con reducciones de 4.4%, pero con un valor de R_4 notablemente inferior (0.5014 frente a 0.5215 del PID), lo que refleja una menor exigencia sobre el actuador de paso. Este comportamiento es una consecuencia directa de la ausencia de canal derivativo: al no disponer de un mecanismo de anticipación, el controlador genera movimientos de pala menos frecuentes y más suaves, lo que puede resultar ventajoso desde el punto de vista del desgaste mecánico del sistema de paso.

El índice R_3, asociado al momento de torque del eje, permanece prácticamente invariante en todos los casos (entre 0.2692 y 0.2826), confirmando que su comportamiento está determinado principalmente por la condición de par electromagnético constante, y por la estrategia de control de paso adoptada.

En conjunto, la elección entre el controlador PI y el PID adaptativo depende de las prioridades de diseño: si el objetivo prioritario es minimizar el error de seguimiento, el PID es la opción más adecuada; si en cambio se desea reducir el esfuerzo del actuador preservando una mejora significativa en el seguimiento, el PI representa una alternativa más equilibrada y de menor complejidad de implementación.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Los resultados obtenidos demuestran que la lógica difusa constituye una alternativa viable y eficaz para mejorar el control de pitch de aerogeneradores de gran escala, siempre que la arquitectura del controlador incluya acción integral. Entre las configuraciones evaluadas, el PID adaptativo destaca como la más robusta gracias a su capacidad de adaptación simultánea de los tres coeficientes de control, mientras que el PI ofrece un equilibrio atractivo entre rendimiento y simplicidad de implementación, especialmente relevante en aplicaciones donde la vida útil del actuador es un factor crítico.

Desde un punto de vista práctico, estos resultados sugieren que la sustitución de controladores PI de ganancia fija por esquemas difusos adaptativos podría mejorar el seguimiento de velocidad y potencia en condiciones de viento turbulento sin incrementar significativamente la complejidad del sistema.

Como trabajo futuro, se plantea la optimización automática de la base de reglas, la incorporación de filtros para la reducción de cargas estructurales, la extensión al control de paso individual (IPC) y la validación en plataformas hardware-in-the-loop (Bossanyi, 2003).

Agradecimientos

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

Referencias

Bashetty S., Guillamon J., Mutnuri S., Ozcelik S. (2020). Design of a Robust Adaptive Controller for the Pitch and Torque Control of Wind Turbines. *Energies*, 13(5), 1195. DOI: https://doi.org/10.3390/en13051195

Bossanyi, E.A (2003) Individual Blade Pitch Control for load reduction. Wind Energ., 6: 119-128. DOI: https://doi.org/10.1002/we.76

Gambier, A. (2021). Pitch control of three bladed large wind energy converters – A Review. Energies, 14(23), 8083. DOI: https://doi.org/10.3390/en14238083

Garrido, Juan; Lara, Manuel; Ruz, Mario L.; Vázquez, Francisco (2024), "Conjunto de datos del Concurso en Ingeniería de Control 2024 (CIC2024) de CEA", Mendeley Data, V1, DOI: 10.17632/tdj78btsn5.1

Hassan, A., Ahmad, G., Shafiullah, M., Islam, A., & Alam, M. S. (2025). Review of the intelligent frameworks for pitch angle control in wind turbines. IEEE Access. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3540367

Ibrahim, L. G., & Shneen, S. W. (2025). Study and Analysis of Adaptive PI Control for Pitch Angle on Wind Turbine System. International Journal of Robotics & Control Systems, 5(2). DOI: https://doi.org/10.31763/ijrcs.v5i2.1850

Lara, M., Garrido, J., Ruz, M. L., & Vázquez, F. (2021). Adaptive Pitch Controller of a Large-Scale Wind Turbine Using Multi-Objective Optimization. *Applied Sciences*, 11(6), 2844. DOI: https://doi.org/10.3390/app11062844

Muñoz-Palomeque, E., Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2024). Intelligent control techniques for maximum power point tracking in wind turbines. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 21(3), 193-204. DOI: https://doi.org/10.4995/riai.2024.21097

NREL. (2020). Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind. National Renewable Energy Laboratory. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf

Safwan A. Hamoodi, Farah I. Hameed , and Ali N. Hamoodi (2020) Pitch Angle Control of Wind Turbine Using Adaptive Fuzzy-PID Controller. In: EAI Endorsed Transactions. DOI : https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.165500

Santos, M., Dormido, S., & de la Cruz, J. M. (1996, September). Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers. In Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems (Vol. 3, pp. 1598-1604). IEEE. DOI: https://doi.org/10.1109/FUZZY.1996.552571

Serrano, C., Sierra-Garcia, J. E., & Santos, M. (2022). Hybrid optimized fuzzy pitch controller of a floating wind turbine with fatigue analysis. Journal of Marine Science and Engineering, 10(11), 1769. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse10111769

Zafar, H., Bakunić, E., Hoxha, B., Agrebi, H. Z., Menezes, E., Sher F., ... & Xydis, G. (2026). Wind turbine technologies. In Renewable Energy Technologies (pp. 315-340). Elsevier.