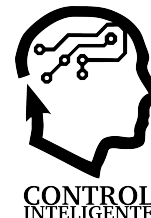




XVII Simposio CEA de Control Inteligente

27-29 de junio de 2022, León



Sintonización heurística mediante algoritmos genéticos del control de un prototipo de un aerogenerador

Andrade, G.^{a,*}, Esteban, S.^b, Santos, M.^c, García, L.^b

^a Facultad de Ciencias Físicas, UCM, 28040, Madrid, España.

^b Departamento de Arquitectura de Computadores y Control, Facultad de Ciencias Físicas, UCM, 28040 Madrid, España.

^c Instituto de Tecnología del Conocimiento, UCM, 28040 Madrid, España.

To cite this article: Andrade, G., Esteban, S., Santos, M., García, L., 2022. Intelligent Control Tuning using Genetic Algorithms in Wind Turbine Scale Model. XVII Simposio CEA de Control Inteligente.

Resumen

La gran madurez de las energías renovables permite la búsqueda de métodos de control más sofisticados de la mano de la mejora computacional propiciada por los avances tecnológicos. Como resultado, se ha obtenido una mejora en cuanto a especificaciones de las turbinas eólicas y eficiencia en los últimos años. En el presente artículo se diseña un modelo a escala de un aerogenerador el cual incluye dos lazos de control para la estabilización de la potencia extraída; el lazo externo se encarga de controlar la carga eléctrica del generador, mientras que el lazo interno controla el ángulo de pitch de las palas de la turbina. El objetivo principal del prototipo es la obtención de un comportamiento análogo al de un aerogenerador convencional, respetando las regiones de operación correspondientes. Partiendo de una sintonización experimental, se optimizan los parámetros del control con ayuda de algoritmos genéticos, dotando de una mayor inteligencia al sistema con la capacidad de adaptarse a distintas condiciones. Finalmente, se obtiene un modelo de turbina eólica capaz de realizar pruebas de algoritmos de control y sirviendo como base para prototipos de aerogeneradores flotantes (FOWT).

Palabras clave: Turbina eólica, Control PID, Algoritmos Genéticos, Sintonía, Réplica.

Heuristic Tuning using Genetic Algorithms of the Control of a Wind Turbine Scale Model

Abstract

The reached maturity of renewable energies allows the application of more sophisticated and efficient control methods due to the computational advances made by the technology. As a result, an improvement in wind turbine specifications and efficiency has been obtained in recent years. In this paper, a wind turbine scale model is designed which includes two control loops for the stabilization of output power: the external loop is responsible of the control of the electrical load of the generator, while the inner loop controls the pitch angle of the turbine blades. The main objective of the prototype is to obtain a behavior analogous to that of a conventional wind turbine, with the corresponding operating regions. Starting from an experimental tuning, the control parameters are used using genetic algorithms, giving the system greater intelligence and the ability to adapt to different conditions. Finally, a wind turbine model able to testing control algorithms is obtained, serving as a base for floating offshore wind turbine prototypes (FOWT).

Keywords: Wind Turbine, PID Control, Genetic Algorithms, Tuning, Replica.

1. Introducción

En la actualidad, la energía eólica experimenta un desarrollo sin precedentes a nivel mundial. La reciente aparición de turbinas flotantes ha incrementado las expectativas en producción de energía. No obstante, esto ha

hecho aparecen nuevos desafíos de control [1]. Los algoritmos de control adquieren un mayor nivel de sofisticación con el fin de abordar estos problemas de mayor complejidad y aumentar la eficiencia y estabilidad de las turbinas [2]. El diseño de los controles más avanzados e inteligentes son usualmente diseñados y desarrollados en

simulación, lo que no considera algunos factores que afectan al control en las turbinas reales. Un paso intermedio, antes de probar el control en las turbinas, es testear los algoritmos de control en prototipos a escala. Además, estos modelos físicos a baja escala son un paso previo que facilita a la industria y a las compañías la incorporación de nuevas técnicas de control en sus sistemas.

Con este propósito, en el presente artículo se describe un modelo a escala de un aerogenerador real. Este prototipo, que incluye significantes mejoras con respecto al modelo inicial [3], es equipado con diferentes subsistemas que permiten probar distintos algoritmos de control. El modelo físico finalmente obtenido es mostrado en la Figura 1. Este incluye hardware en los lazos de control y en las dinámicas del sistema, escalados apropiadamente.

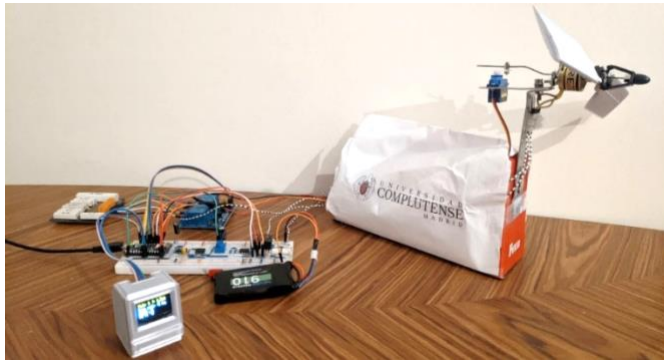


Figura 1: Modelo a escala de aerogenerador.

Dicho prototipo ha permitido observar los problemas que aparecen al trabajar con sistemas reales y los cuales no se llegan a manifestar en las simulaciones. La validación de diferentes soluciones de control en el modelo a escala facilitará la implementación de las mismas en modelos de molinos a escala media o en dispositivos de viento reales [4].

La estructura del artículo es la siguiente. La sección 2 presenta el modelo de aerogenerador. En la sección 3, el modelo es descrito, explicando la composición de cada subsistema. Los resultados experimentales son mostrados en la sección 4. Finalmente, se incluyen las conclusiones y el trabajo futuro al final del artículo.

2. Modelado de aerogenerador

2.1. Modelo aerodinámico

El rendimiento aerodinámico de un aerogenerador es clave para entender cómo mejorar la extracción de energía de las turbinas [5]. La potencia del viento a la entrada de la turbina es dada por la siguiente expresión:

$$P_{in} = 0.5\rho AU^3 [W] \quad (1)$$

Donde $\rho [kg/m^3]$ representa la densidad del viento, $A [m^2]$ es el área barrida por las palas, y $U [m/s]$, el promedio de la velocidad del viento. Teniendo en cuenta el límite de Betz, la relación entre la potencia de entrada P_{in} con la potencia de salida de la turbina P_{out} es denominado

coeficiente de potencia C_p (2). Dicho coeficiente depende del ángulo de pitch de las palas, $\theta [^\circ]$, y del Tip Speed Ratio (TSR) λ .

$$C_p(\lambda, \theta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

El TSR es un coeficiente adimensional, el cual relaciona la velocidad tangencial de las puntas de las palas y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{r w_t}{U} \quad (3)$$

Donde $r [m]$ y $w_t [rad/s]$ son el radio y la velocidad angular de la turbina del aerogenerador, respectivamente. Cuando el ángulo de pitch de las palas se incrementa, el coeficiente de potencia disminuye, y en consecuencia, la potencia de salida de la turbina [6]. Incluso aumentando el valor del TSR, existe un punto de inflexión que limita la extracción de potencia, resultado de la excesiva aceleración de la turbina. Este es el motivo por el cual los aerogeneradores no son capaces de alcanzar el límite establecido por Betz.

Es más, en el propio modelo a escala es necesario trabajar con elevados ángulos de pitch para compensar la baja velocidad del viento empleado en pruebas de laboratorio. Sin embargo, el efecto del coeficiente de potencia es replicado correctamente gracias a la acción del control de pitch.

2.2. Regiones de operación del aerogenerador

En función de la velocidad del viento que llega al rotor, (Figura 2), se diferencian hasta cuatro regiones de trabajo:

- Región I: La velocidad del viento no es lo suficientemente alta como para que la turbina comience a generar potencia. El sistema permanece estático hasta que la velocidad de conexión es alcanzada.
- Región II: Una vez que la turbina comienza su arranque, la extracción de potencia es maximizada hasta que se alcanza la potencia nominal.
- Región III: Con el fin de estabilizar la potencia extraída frente a las variaciones del viento, se aplica el control de pitch.
- Región IV: En caso de superar la velocidad máxima de trabajo, se ejecutan los protocolos de emergencia pertinentes.

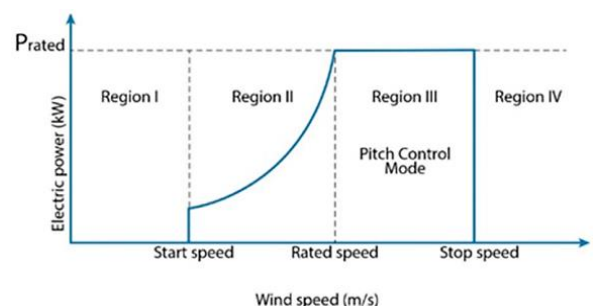


Figura 2: Regiones de operación de un aerogenerador [7].

3. Modelo a Escala de Aerogenerador

El prototipo forma parte de una réplica (escala $\approx 1/100$) de un aerogenerador terrestre. Al igual que un aerogenerador real, incluye dos lazos de control: uno interno que controla el ángulo de pitch de las palas, y otro externo que controla la carga eléctrica del generador. En la Figura 3 se muestran los principales componentes que incorpora el sistema completo.

La turbina está formada por unas palas hechas a medida instaladas sobre un mecanismo de paso variable, y ancladas a un motor de radio-control brushless a modo de generador eléctrico. Se incluye un *circuito adaptador de señal* para poder tratar la señal trifásica del generador sin poner en riesgo la electrónica. El *microcontrolador* es capaz de obtener la frecuencia de la señal, y con ella, las revoluciones de la turbina a través de la FFT. Una vez se obtienen las rpm de la turbina, se ejecutan los algoritmos de control pertinentes sobre los *actuadores* de carga y de pitch.

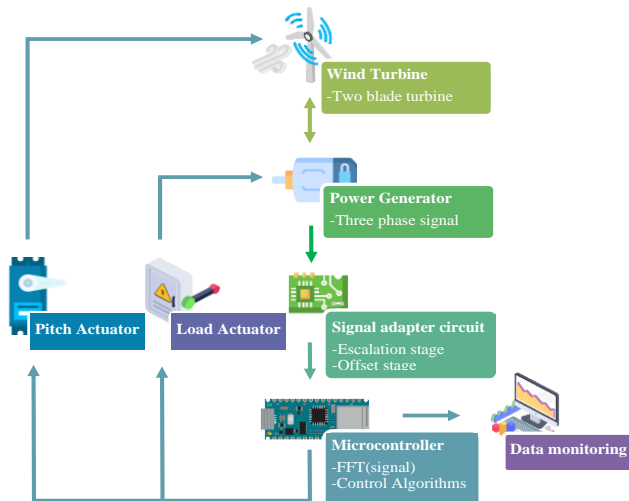


Figura 3: Subconjunto de sistemas del modelo a escala de aerogenerador

3.1. Palas y mecanismo de pitch

Para emular correctamente el funcionamiento de un aerogenerador, se han diseñado y construido palas específicas con ayuda de una impresora 3D. Con un perfil aerodinámico simétrico, el NACA0012 (de la National Advisory Committee for Aeronautics) supone una solución eficaz para una mayor captura de potencia. Estas palas tienen mayor inercia que las palas de radiocontrol comerciales, añadiendo un mayor realismo al funcionamiento del prototipo. A modo de actuador, se emplea un servomotor SG90 RC junto al mecanismo de paso variable de dos palas (ver Figura 4).



Figura 4: Perfil NACA 0012 y actuador del ángulo de pitch variable (gobernado por el servomotor)

Con esta configuración, se han llevado a cabo un conjunto de experimentos en lazo abierto para caracterizar el coeficiente C_p sobre un ángulo de pitch óptimo.

3.2. Generador eléctrico y actuador de carga

El aerogenerador eléctrico es emulado con un motor brushless de radiocontrol, el cual provee de una señal trifásica. La frecuencia de la señal eléctrica es directamente proporcional a la velocidad angular (rpm) del rotor, y depende del número de pares de polos del estátor.

$$w_s = \frac{60f_g}{N} [rpm] \quad (4)$$

Siendo w_s la velocidad de sincronismo, $f_g [Hz]$, la frecuencia de la señal trifásica, y N , el número de pares de polos.

Este generador contiene seis pares de devanados enfrentados en el estátor, obteniendo una velocidad de sincronismo diez veces mayor a la frecuencia de la señal. Se diseñó un mecanismo actuador capaz de aumentar la potencia extraída para una misma señal trifásica, y en consecuencia, el par electromagnético. Por este motivo, la carga resistiva entre los terminales del generador se modifica por medio de un banco de cargas (Figura 5). Dicho dispositivo es usado para garantizar una disipación de potencia adecuada. Usando un relé de cuatro canales, se logra alternar entre los resistores en paralelo, obteniendo hasta dieciséis estados posibles.

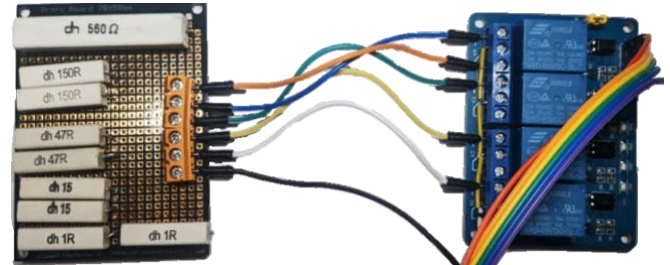


Figura 5: Actuador de carga (banco de cargas con resistencias cerámicas y relé de cuatro canales).

3.3. Sistema de medida

En el sistema completo, el modelo a escala de aerogenerador incluye un circuito adaptador para poder procesar la señal de forma segura (Figura 6). El microcontrolador se encarga de leer la señal trifásica para obtener las revoluciones de la turbina y calcular la potencia generada.

El circuito adaptador de señal es responsable de limitar la señal trifásica al rango de lectura del convertidor analógico digital del microcontrolador. En primer lugar se incorporan optoacopladores capaces de aislar eléctricamente la salida del generador al circuito de medida. Seguidamente, se incluyen amplificadores operacionales en configuración de amplificador inversor para regular la amplitud de la señal en función del valor de las resistencias incorporadas.

Sin embargo, al trabajar con señales centradas en cero, es necesario incluir una etapa de offset para centrar la señal en el rango de lectura. Para ello, se incorpora un amplificador

operacional en configuración de amplificador no inversor, el cual suma señal continua a partir del terminal intermedio de un potenciómetro en configuración de divisor de tensión entre alimentación y tierra. Finalmente, se obtiene una impedancia de entrada muy alta la cual limita la potencia disipada en el sistema de medida.

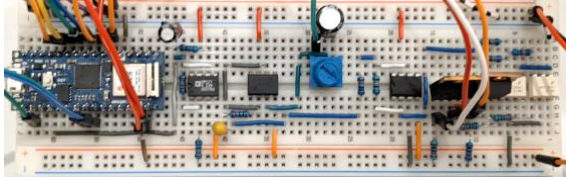


Figura 6: Sistema de medida con circuito adaptador de señal (etapa de escalado y etapa de offset)

3.4. Microcontrolador

Se ha seleccionado el Arduino Nano 33 IOT [8] para cómputo y procesamiento de la señal eléctrica. Dicho microcontrolador incorpora hasta ocho entradas analógicas, ofreciendo un sistema completamente modular con la posibilidad de añadir multitud de sensores y periféricos. A su vez, incorpora un módulo IMU capaz de calcular la posición del sistema, una funcionalidad muy útil para implementaciones futuras en aerogeneradores flotantes.

La señal adaptada es leída por el microcontrolador, empleando uno de los conversores analógico digital. La señal digital es procesada en tiempo real usando la FFT. De este modo, es posible calcular la frecuencia y la amplitud de la señal, y con ello, la velocidad angular y la potencia de salida de la turbina.

La información recogida del sistema consta de: la posición, la velocidad angular, el ángulo de pitch de las palas, la carga y la potencia eléctrica. Los datos son enviados de forma simultánea a través de conexión puerto serie y de una dirección IP seleccionada gracias a una conexión Wifi-UDP. Para la representación de los datos mencionados se emplea el software de Matlab® Simulink. Para dotar de una mayor independencia al sistema, la información es mostrada sobre una pequeña pantalla LCD.

3.5. Sistema de control de carga

Para controlar la velocidad de rotación del aerogenerador es necesario controlar el torque electromagnético del generador.

$$\tau_g = P_g / (\eta_g \eta_m \omega_g) [Nm] \quad (5)$$

Donde $P_g [W]$ es la potencia extraída del generador, η_g la eficiencia del generador, η_m la eficiencia del mecanismo, y $\omega_g [rad/s]$ la velocidad de rotación del generador, en este caso, igual a velocidad de la turbina. El mencionado torque se opone al torque generado por el viento sobre las palas, ralentizando la turbina.

El microcontrolador maneja el cambio entre los diferentes estados posibles hasta que el torque electromagnético sea capaz de controlar la velocidad del rotor, en función del estado de la turbina. En las regiones de operación correspondientes (Figura 2), se aplica un control PD para

estabilizar la potencia extraída. La acción proporcional es capaz de reducir el error a la salida, mientras que la acción diferencial es la responsable de compensar la inercia del sistema.

$$G_{PD}(s) = K_{PL} + K_{DL} s \quad (6)$$

3.6. Sistema de control de pitch

El control de pitch es implementado mediante un regulador PID, el cual además de reducir el error en el estado transitorio, elimina el error en el estado estacionario. El control de pitch es lo suficientemente preciso como para estabilizar la turbina del aerogenerador dentro de un rango restringido en torno a pocos cientos de rpm.

El algoritmo de control de pitch sigue la siguiente expresión con las ganancias correspondientes:

$$\phi(s) = K_{P\phi} + K_{I\phi} / s + K_{D\phi} s \quad (7)$$

Al mismo tiempo, el actuador de pitch puede usarse para ejecutar el modo de parada de emergencia en caso de ser necesario.

3.5. Arquitectura del software

Mediante una correcta codificación secuencial es posible solucionar la ausencia de hilos de ejecución del procesador mononúcleo. El archivo main.c incluye: las cabeceras de los demás ficheros, el arranque de los subsistemas, la lectura de la señal, la aplicación de los algoritmos de control y la transmisión de datos.

Una vez se realiza la lectura de la señal, se calcula la frecuencia, la potencia generada y, de ser necesario, se ajusta la ganancia de entrada. Con la frecuencia obtenida se calcula la velocidad del rotor y seguidamente se detecta la región de operación en la que se encuentra el sistema. Los algoritmos de control permiten manejar los actuadores necesarios para regular las rpm. Finalmente, la información es transmitida por los diferentes canales de comunicación.

En la Figura 7 se muestran las estructura del software implementada en la placa (disponible en [9]).

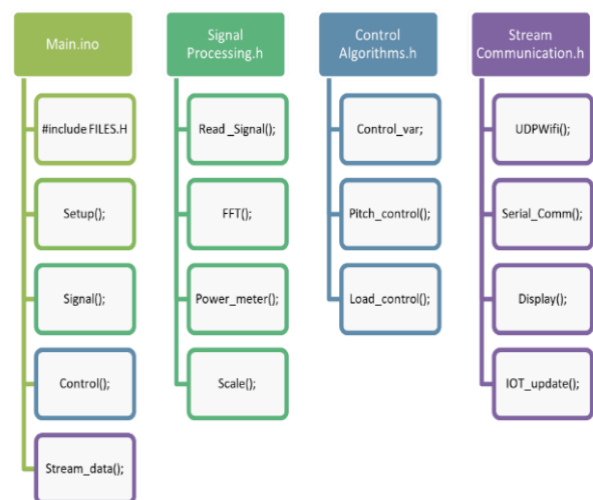


Figura 7: Estructura de código incluido en el microcontrolador.

4. Resultados Experimentales

El primer paso para llevar a cabo las pruebas experimentales es ajustar el sistema en torno al ángulo óptimo de pitch, donde se alcanza el mayor coeficiente de potencia. Gracias a la simplicidad de los controladores PD y PID, es posible sintonizar el sistema mediante prueba y error (sintonización manual).

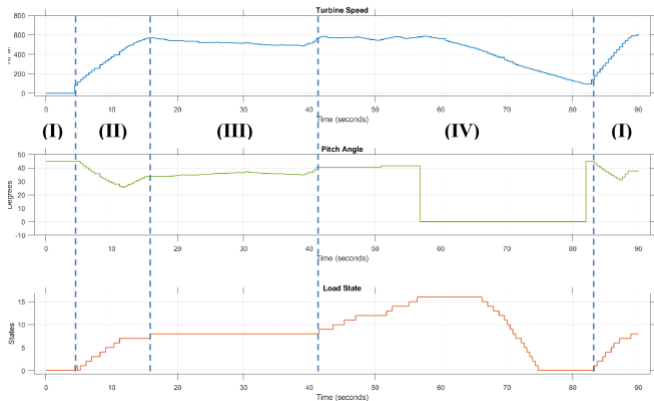


Figura 8: Velocidad angular (rpm) (gráfica azul), ángulo de pitch (grados) (gráfica verde) y estado de la carga eléctrica (gráfica naranja) para una velocidad del viento variable.

En la anterior figura se muestra el funcionamiento que sigue el modelo a escala de aerogenerador para una frecuencia objetivo de 500 rpm. Se puede observar como los valores de los actuadores se adaptan para alcanzar el valor objetivo (gráfico superior, línea azul), usando los dos lazos de control independientes (control de cabeceo, línea verde, y control de carga, línea roja) para hacer frente a las variaciones de la velocidad del viento. Las regiones de funcionamiento de una turbina eólica típica son mostradas en la Figura 8 y son las siguientes:

- Región I: La turbina permanece parada hasta que la velocidad de arranque supera la velocidad de conexión. Se colocan las palas con el mayor ángulo de pitch posible para disminuir el par mecánico estático. Del mismo modo, se aplica el mejor torque electromagnético colocando la mayor resistencia disponible (estado de la carga 0).
- Región II: Una vez el rotor comienza a girar, el aerogenerador empieza a disminuir exponencialmente el ángulo de pitch hacia el óptimo. Al mismo tiempo, se incrementa el estado de la carga para maximizar la potencia extraída y reducir la inercia del sistema hasta llegar a alcanzar la velocidad nominal. En esta región solo se aplica el control de carga.
- Región III: El control de pitch es activado para estabilizar la potencia de salida de la turbina. El control de carga eléctrica es desactivado mientras la velocidad angular se mantenga dentro del rango de trabajo.
- Región IV: En caso de sobrepasar el rango de trabajo (tanto por encima como por debajo), se activa de nuevo el control de carga eléctrica, manteniendo constante el valor del ángulo de pitch. Si el control de carga eléctrica no es capaz de limitar la velocidad de la turbina, se activa el protocolo de parada de

emergencia, colocando las palas de forma perpendicular a la velocidad del viento.

5. Sintonización Óptima mediante Algoritmos Genéticos

El ingeniero debe proveer al sistema de una configuración óptima de control para distintas condiciones. La puesta a punto del control del sistema se realiza con la toolbox de optimización de Matlab. Los algoritmos genéticos se aplican en base a la preservación de los mejores individuos (elitismo), la mutación de genes y el cruce de los individuos para la búsqueda de los mejores resultados [10]. Las ganancias del controlador $[k_p, k_i, k_d]$, se seleccionan como variables de optimización. Se genera una población inicial de treinta individuos con una distribución uniforme. Las variables de optimización se han limitado a un rango cercano al objetivo en el estudio inicial. A lo largo de cien generaciones, se evalúa la función objetivo para cada posible solución.

La integral del tiempo multiplicada por el valor absoluto del error (ITAE) es usada como función de coste para una entrada escalón. El tiempo de asentamiento de la sintonización experimental es usado como referencia para el intervalo de integración. De este modo, es posible considerar las posibles soluciones que devuelvan el menor error en el estacionario en cada simulación.

$$ITAE = \int_0^{t_s} t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (8)$$

En cada generación, el 5% de los mejores individuos sobreviven y pasan directamente a la siguiente generación. Se emplea un método de torneo para la selección de los progenitores que llevarán a cabo el cruce de un grupo. El 80% de la siguiente población se genera empleando este operador. A su vez se aplica una pequeña probabilidad de mutación en cada descendiente, ciñéndose a los valores de restricción. En la Figura 9 se muestra la evolución de los mejores individuos con respecto al criterio ITAE.

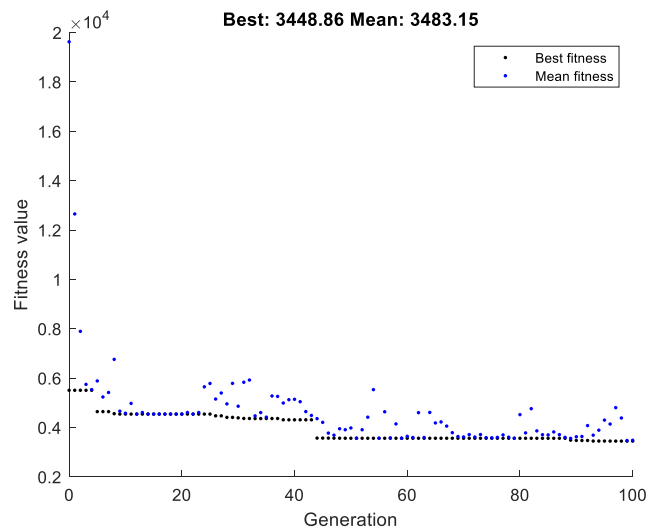


Figura 9: Evolución de las posibles soluciones para los parámetros de sintonía del control PID mediante algoritmos genéticos.

Una vez se alcanza el número máximo de generaciones, el algoritmo obtiene los valores óptimos del control PID: $K_p = 0.3$, $K_i = 0.0038$, $K_d = -0.0434$. Las ganancias obtenidas del controlador discreto sintonizado por prueba y error son: $K_p' = 0.03$, $K_i' = 0.01$, and $K_d' = -0.01$.

En la Figura 10 se muestra la respuesta del sistema, en el cual se observa un menor tiempo de asentamiento para el controlador sintonizado por algoritmos genéticos (línea roja). Además, la salida no presenta apenas sobreelongación en comparación al control PID sintonizado experimentalmente (línea azul).

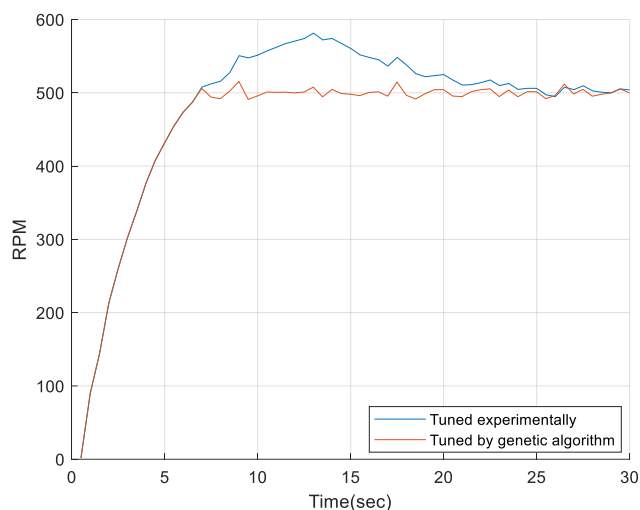


Figura 10: Respuesta del control PID del aerogenerador con diferentes métodos de sintonía.

El aerogenerador real posee cierta inercia que ralentiza la respuesta respecto a la señal de entrada. Además, el sistema debe superar una resistencia inicial de arranque. El incremento de las acciones de los controladores en el sistema real podría causar una respuesta menos estable. A su vez, el microcontrolador requiere de al menos un periodo de muestreo de 0.5 segundos para realizar la medidas de las rpm y la ejecución de los algoritmos de control.

Incluso obteniendo respuestas similares, la optimización del controlador a través de algoritmos genéticos ha conseguido reducir la sobreelongación del sistema junto a la reducción del tiempo de asentamiento.

6. Conclusiones y Trabajo Futuros

En este trabajo se ha descrito el diseño de un prototipo de aerogenerador a escala de laboratorio. El modelo se ha enfocado en la implementación de la electrónica y mecánica necesaria para poder llevar a cabo pruebas de control de lazo cerrado de un aerogenerador. Se han implementado dos lazos de control, uno externo que controla la carga eléctrica y uno interno que controla el paso de las palas. En las pruebas experimentales, el modelo cambia entre los modos de operación típicos de un aerogenerador con una respuesta consistente.

El aerogenerador a escala se ha identificado con el suficiente detalle como para ajustar los controladores mediante algoritmos genéticos. Se ha demostrado cómo los

controladores sintonizados por la técnica heurística de los algoritmos genéticos dan una mejor respuesta del sistema que los ajustados experimentalmente en base al conocimiento del ingeniero.

Por lo tanto, el prototipo se puede emplear para testear algoritmos de control más complejos. Además, como el modelo a escala de aerogenerador es capaz de registrar la posición de la estructura, puede ser usado para replicar aerogeneradores flotantes con una configuración que integre el movimiento de las olas [11]. Esto forma parte de los trabajos futuros junto a la mejora en la comunicación inalámbrica y la evaluación de otras técnicas de optimización para el ajuste de control [12]. El objetivo final es desarrollar una réplica de aerogenerador totalmente autónoma, con recogida de datos subida a la nube, que puede ser controlado telemáticamente por el administrador de la red.

Agradecimientos

Esta publicación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España bajo el proyecto MCI/AEI/FEDER número RTI2018-094902-B-C21.

Referencias

1. Sierra-García, J.E., and Santos, M.: Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18.4 (2021): 327-335.
2. Sierra-García, J. E., Santos, M.: Performance analysis of a wind turbine pitch neurocontroller with unsupervised learning, 2020, *Complexity*, 2020.
3. Andrade, G.A., Esteban, S.: Modelo a escala de aerogenerador para control. In: Aitor J. Garrido et al. (eds.), *Innovation and Lecture Notes In Control Engineering For Clean Energy Generation*, pp 53-58. Universidad del País Vasco, Bilbao (2021).
4. López, R., Santos, M., Polo, O., Esteban, S.: Experimenting a fuzzy controller on a fast ferry. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Control Applications CCA*, 2002, vol. 2, pp. 1082- 1087. IEEE.
5. Alzayed, M., Chaoui, H., & Farajpour, Y. (2021). Maximum power tracking for a wind energy conversion system using cascade-forward neural networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(4), 2367-2377.
6. Sierra-García, J. E., Santos, M.: Lookup table and neural network hybrid strategy for wind turbine pitch control. *Sustainability*, 2021, 13(6), 3235.
7. Chavero-Navarrete, E., Trejo-Perea, M., Jáuregui-Correa, J.C., Carrillo-Serrano, R.V., Ronquillo-Lomeli, G., Ríos-Moreno, J.G.: Hierarchical pitch control for small wind turbines based on fuzzy logic and anticipated wind speed measurement. *Applied Sciences* 2020, 10(13):4592.
8. ARDUINO Store, <http://store.arduino.cc/products/arduino-nano-33-iot>, last accessed 2022/02/25
9. GITHUB, https://github.com/GGiordy/TFG_Giordy_Alexander.git, last accessed 2022/02/25
10. Zotes, F. A., & Penas, M. S. (2010). Multi-criteria genetic optimisation of the manoeuvres of a two-stage launcher. *Information Sciences*, 180(6), 896-910.
11. Viloslada, D., Santos, M., & Tomás-Rodríguez, M. (2021). General methodology for the identification of reduced dynamic models of barge-type floating wind turbines. *Energies*, 14(13), 3902.
12. Torralba-Morales, L. M., Reynoso-Meza, G., & Carrillo-Ahumada, J. (2020). Tuning and comparison of design concepts applying Pareto optimality. a case study of cholette bioreactor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(2), 190-201.