

Jornadas de Automática

Control de velocidad por paso de pala en aerogenerador didáctico

Francisco Vázquez*, Manuel Lara, M^a Luisa Delgado, Antonio Ruiz, Juan Garrido

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14014, Córdoba, España.

To cite this article: Vázquez, F., Lara, M., Delgado, M.L., Ruiz, A., Garrido, J., 2026. PLC implementation of blade-pitch-based rotor speed control in a didactic wind turbine. *Jornadas de Automática*, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13662>

Resumen

La reproducción realista del comportamiento de un aerogenerador comercial en un entorno de laboratorio constituye un desafío prácticamente inabordable. Las alternativas experimentales disponibles en laboratorio suelen centrarse únicamente en algún aspecto de los equipos reales —como la respuesta estructural, la producción de energía, su inyección en la red, el control del par o del pitch—, pero rara vez permiten abordar todos estos elementos de forma integrada y, además, operan a potencias muy inferiores a las comerciales. Este trabajo se desarrolla utilizando uno de estos aerogeneradores didácticos, asumiendo sus limitaciones inherentes. El estudio se centra en una variable de especial interés: el sistema de control de velocidad del rotor mediante la manipulación del paso de pala. Se propone una arquitectura de control en cascada, implementada en un PLC y supervisada a través de un sistema SCADA. Paralelamente, se presenta un modelo simplificado capaz de reproducir la dinámica del sistema real en determinados puntos de operación, facilitando así el análisis y la validación del esquema de control propuesto.

Palabras clave: Control de procesos, diseño de sistemas de control, validación de modelos, rechazo de perturbaciones, programación de controladores, enseñanza de control utilizando equipos de laboratorio.

PLC implementation of blade-pitch-based rotor speed control in a didactic wind turbine

Abstract

Achieving a realistic reproduction of the behavior of a commercial wind turbine in a laboratory environment is an almost unattainable challenge. The experimental alternatives available in laboratories typically focus on only a subset of the phenomena present in real installations—such as structural response, energy production, grid injection, torque or pitch control— but they rarely allow all these aspects to be addressed simultaneously and operate at power levels far below those of commercial wind turbines. This work is carried out using one of these didactic wind turbines, acknowledging its inherent limitations. The study focuses on a particularly relevant variable: the rotor speed control system through blade pitch manipulation. A cascaded control architecture is proposed, implemented on a PLC and supervised through a SCADA. In parallel, a simplified model is presented that reproduces the dynamics of the real system at specific operating points, thereby facilitating the analysis and validation of the proposed control scheme.

Keywords: Process control, control system design, model validation, disturbance rejection, programmable logic controllers, control education using laboratory equipment.

1. Introducción

El calentamiento global y el cambio climático son dos de las mayores preocupaciones de nuestro siglo que está implicando un gran esfuerzo en la reducción de gases de efecto invernadero. Ya que la generación de energía produce

aproximadamente el 30% de estas emisiones, la energía eólica es un elemento clave en este intento de reducción (Njiri, 2016). En 2021, la capacidad eólica mundial alcanzó los 837 GW, correspondiendo el 72% a países como Estados Unidos, China, India, Alemania y España. Sin embargo, la Agencia Internacional de la Energía pronostica que para 2030 la

capacidad eólica debe alcanzar los 3200 GW para limitar el aumento de temperatura a 1.5 °C (Lee, 2022).

El incremento de la generación de energía proveniente del viento, no solo se asocia a un aumento de la capacidad instalada, sino también a una mejora de su rendimiento. Una de las tecnologías más consolidadas se basa en la instalación de aerogeneradores de velocidad variable, con los que se consigue extraer la máxima energía eléctrica posible a bajas velocidades del viento y mantenerla en sus valores nominales cuando se presentan fuertes vientos. Esto aporta muchos beneficios con respecto a los aerogeneradores de velocidad fija, como mejor calidad en la energía eléctrica producida, mayor rendimiento y una considerable reducción en las vibraciones y esfuerzos mecánicos, tanto en la turbina, como en el generador eléctrico (Rodríguez, 2003). Junto a la velocidad variable, la capacidad de modificación del ángulo de paso de pala aporta mayor flexibilidad y controlabilidad al aerogenerador permitiendo aplicar estrategias de control más complejas, mejorando así el rendimiento (Boukhezzar, 2007), (González, 2010), (Haque, 2010), (Bianchi, 2007).

La complejidad y dimensiones de este tipo de aerogeneradores impide disponer en laboratorio de equipos que reproduzcan con fiabilidad su problemática de operación. Desde el punto de vista de su control, el desarrollo de nuevas estrategias se realiza habitualmente utilizando herramientas de simulación certificadas, en las que encontramos modelos de aerogeneradores comerciales, tanto onshore como offshore. Entre este software, destaca OpenFAST bajo cuyo entorno los autores de este trabajo han realizado varias contribuciones (Lara, 2024, 2025a, 2025b), (Garrido, 2026).

Pero, cuando se trata de motivar a los alumnos de ingenierías en las técnicas básicas de control habituales en energía eólica, utilizando plantas experimentales no basadas en simulación, es difícil encontrar un sistema que pueda reproducir toda la problemática de los aerogeneradores de gran potencia. En (Lara, 2022), los autores presentaron algunas experiencias en un equipo experimental en el que se simulaba la generación de viento y la aerodinámica de las palas mediante motores de arrastre que accionaban máquinas trifásicas (DFIG) reales, mostrando al estudiante el control de la producción de energía eléctrica, su caracterización o el procedimiento de inyección en red. Por otro lado, sistemas como el presentado en (Fragoso, 2013a, 2013b, 2014) muestran otro equipo didáctico centrado en el control del paso de pala, aunque la producción de energía se realice con un pequeño generador CC, más alejado de los grandes sistemas comerciales. Ambos equipos pueden ser complementarios, aunque con las limitaciones indicadas. Este trabajo se realiza con el segundo de los indicados. En este contexto, el objetivo de este trabajo es mostrar la implementación práctica de un control de velocidad mediante pitch en un aerogenerador didáctico, utilizando un PLC Siemens S7-1212 y un sistema SCADA. La contribución principal es la validación experimental de un esquema de control en cascada y la obtención de un modelo simplificado que reproduce la dinámica observada.

El documento está estructurado como se indica a continuación. En la sección 2 se describe el funcionamiento del aerogenerador y la problemática de control en las diferentes regiones de operación. En la sección 3 se muestra

el equipo experimental y sus características principales, así como el sistema de adquisición y control utilizado. En la sección 4 se analiza el lazo de control de velocidad partiendo de la identificación de la planta y terminando con la presentación de varios resultados. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros.

2. Funcionamiento de la turbina

El objetivo de todo aerogenerador consiste en la conversión de la energía mecánica producida por el viento en energía eléctrica, distinguiendo distintas zonas de operación en función de la intensidad de éste. En la Figura 1 se diferencian tres de ellas (Boukhezzar, 2007). Una vez superado una velocidad de viento umbral, el objetivo consiste en funcionar a carga parcial (región I) para tratar de transformar toda la energía mecánica posible. En esta zona intervienen controladores de par que llevan al aerogenerador a lo largo de la curva potencia-viento. Cuando se supera la potencia nominal de la turbina, nos encontramos en la región III, o de plena carga, en la que el controlador de paso de pala (pitch) entra en juego, de forma que se limita la velocidad de giro, así como la producción de energía eléctrica, modificando la aerodinámica del equipo, al modificar este paso de pala.

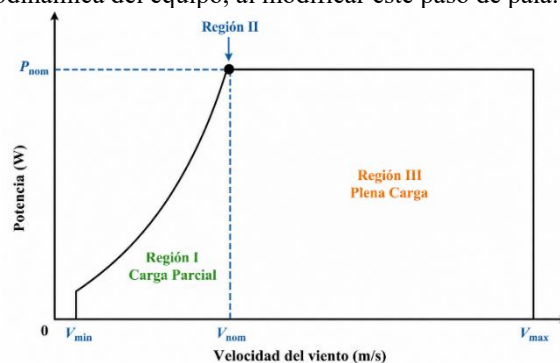


Figura 1: Regiones de operación en función de la velocidad del viento.

El descrito en el siguiente apartado es un equipo didáctico preparado principalmente para mostrar cómo trabajan los aerogeneradores en esta Región III, en la que el control de velocidad mediante el paso de pala evita que se superen las condiciones de operación nominales.

3. Descripción de la turbina

3.1. El aerogenerador

El equipo didáctico utilizado consiste en un aerogenerador de pequeña potencia, de velocidad y pitch variable, Figura 2, modelo EOLICC del fabricante Astrianne Didact (Fragoso, 2013). Aunque el generador es de corriente continua, con menor similitud a los equipos comerciales de alta potencia, sí que dispone de un mecanismo de control de pitch, que se utiliza para mantener la velocidad y la potencia en sus valores nominales frente a cambios de viento o en la carga.

El equipo dispone de un ventilador asociado a un motor asíncrono trifásico de 1.1 kW, cuya velocidad puede modificarse mediante un variador de velocidad, con lo que pueden emularse diferentes condiciones de viento. Estas se miden mediante un anemómetro, Figura 3. El equipo dispone de dos palas, con paso modificable (pitch colectivo, es decir,

ambas el mismo), acopladas a un generador de corriente continua de imanes permanentes sin caja multiplicadora, Figura 4. El dispositivo de giro de las palas se realiza mediante un motor de corriente continua accionado mediante un driver BMD-20DIN. La posición del ángulo de las palas, el pitch, se mide mediante un potenciómetro, y la velocidad de giro del aerogenerador, mediante un encoder.



Figura 2: Imagen del aerogenerador.



Figura 3: Anemómetro de copelas y display de velocidad del viento.



Figura 4: Detalle del generador CC y de las palas de paso variable.

3.2 Sistema de adquisición y control

Como se observa en la Figura 2, la gestión eléctrica del equipo se realiza en dos cuadros. En uno de ellos se encuentra alojado un PLC Siemens, modelo S7-1212, Figura 5, que se encarga de adquirir las diferentes variables anteriormente citadas (velocidades de viento, velocidad de giro, ángulo de pitch), así como de generar la señal de actuación para el paso de pala, la gestión del aerogenerador y de transferir los datos al SCADA, realizado en WINCC, que incluye un script para la grabación de datos cada 0.5 s.

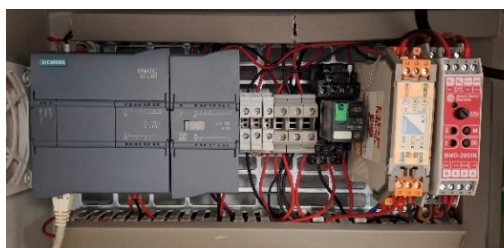


Figura 5: Detalle del cuadro del PLC.

4. Control de velocidad

El esquema de control que se ha implementado en el PLC sigue el esquema de la Figura 6, donde se requiere el diseño de un lazo de control de velocidad en cascada. En esta sección se aborda la identificación y diseño del lazo de velocidad y se presentan los primeros resultados del control, considerando un planteamiento donde solo se efectúa el control sobre la velocidad de giro, manipulando el pitch. Esta planta, como se ha indicado, no permite modificar el par del generador.

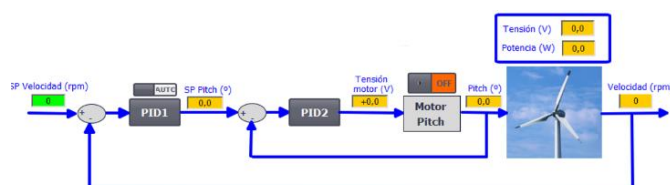


Figura 6: Esquema de control completo.

El viento se puede modificar también desde el SCADA asociado al PLC, como se muestra en la Figura 7, indicando tanto la frecuencia del variador de velocidad como la velocidad del viento indicada por el anemómetro.



Figura 7: Gestión del viento.

4.1. Manipulación del pitch en lazo abierto

De cara a caracterizar el lazo de pitch, se pueden poner en lazo abierto los dos PID del esquema de la Figura 6. Cada lazo de control dispone de dos modos de operación, manual o automático, seleccionables en el propio PID desde el SCADA. En el modo manual, desaparecen los dos lazos de realimentación, quedando como la Figura 8.

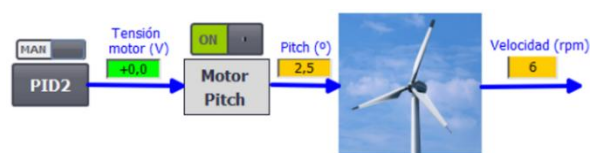


Figura 8: Esquema de control de pitch en lazo abierto (modo manual).

El control del pitch se realiza modificando la tensión que llega a un motor CC que mueve las palas mediante un driver BMD-20DIN (Smart Motor Devices, www.smd.ee). Un potenciómetro mide el ángulo de giro. El motor se comporta como un integrador puro, es decir que, al introducir una tensión, el motor se empieza a mover indefinidamente en un sentido u otro, hasta que se introduce una tensión 0 V o hasta que llega a su fin de carrera, en la que un relé lo desconecta, permitiendo ya solo el giro en sentido contrario. Tensiones positivas hasta 10 V hacen que gire en un sentido, y negativas, en el opuesto. En ambos casos, cuanto mayor sea el valor absoluto de la tensión, más rápido se moverá el motor y, por tanto, el pitch. Su valor puede llegar desde un valor próximo a los -3° hasta los $+23^\circ$. Esta variación se puede registrar en el SCADA como se muestra en la captura de la Figura 9, donde se muestra el pitch ante cambios en la tensión de mando.

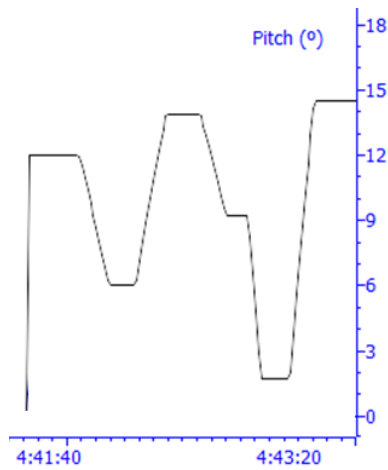


Figura 9: Pitch ante cambios en la tensión de alimentación del motor.

4.2. Cerrando el lazo de pitch

En este apartado se describe cómo se cierra el lazo interno, es decir, el que controla el pitch. En el SCADA se puede poner una consigna de pitch en el campo de edición de la izquierda (SP Pitch). El PID2 comparará el pitch de referencia con el real y procederá a mandar de forma automática una tensión al motor que ahora no se puede modificar a mano (el color del campo cambia a amarillo), Figura 10. El sistema sigue referencias, dando diversos valores al SP_Pitch entre sus valores permitidos.

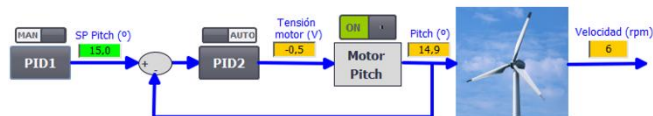


Figura 10: Esquema de control de Pitch en lazo cerrado (modo automático).

Como el motor tiene una dinámica integradora, el seguimiento de referencias se puede realizar con un simple controlador proporcional. La ganancia proporcional K_p configurada por defecto es de -6 y el tiempo integral T_i de 99 s (para prácticamente anularlo). Se pueden modificar estos valores a través de una ventana emergente que aparece al pulsar sobre el icono del PID2. Este PID interno (realmente PI), se ha programado utilizando una función de bloque, FB, Figura 11, con su DB de instancia asociado y mediante un lenguaje de alto nivel, cuyo detalle parcial se muestra en la Figura 12.

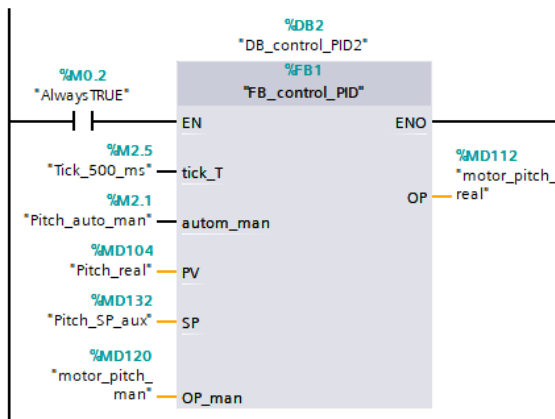


Figura 11: FB del lazo interno.

```
IF #tick T & NOT (#autom man) THEN
  // Calculamos los parámetros para el control discreto
  #Kpi := #Kp * #T / (2 * #Ti);
  //Histéresis del PID
  #error := (#SP - #PV);
  // #Enable_hist := 1;
  IF #Enable_hist & ABS(#error) < #umbral THEN
    #errorp := #SP - #PV;
    #error_l := - #error;
  ELSE
    #errorp := #SP - #PV;
    #error_l := #SP_l - #PV_l;
  END_IF;
  #P := #Kp * #errorp;
  #I := #I_l + #Kpi * (#error + #error_l);
  // Salida interna del controlador
  #OP := #P + #I;
  // Saturación y AntiWindup
  IF #OP > #OP_max THEN
    #I := #I_l;
    #OP := #OP_max;
  ELSIF #OP < #OP_min THEN
    #I := #I_l;
    #OP := #OP_min;
  END_IF;
```

Figura 12: Detalle del código del controlador PI.

En la Figura 13 se observa cómo el pitch sigue a su referencia. En la parte inferior se observa un cambio de parámetros del PID, haciendo que la dinámica cambie a partir de ese momento.

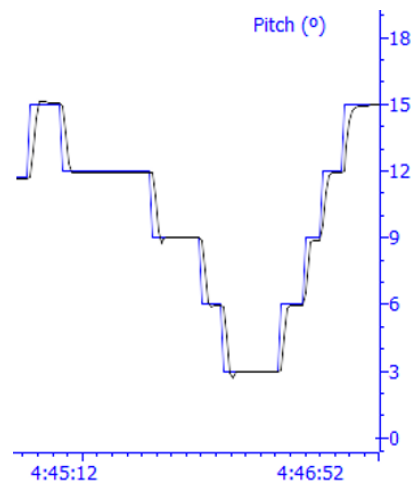


Figura 13: Lazo de Pitch en lazo cerrado.

4.3. Velocidad en lazo abierto

En este apartado se describe la influencia del pitch en la velocidad del aerogenerador. Una vez alcanzado el estado estacionario, se han realizado saltos escalón en el SP de pitch, alternando entre 12° y 18° de forma sucesiva, como se muestra en la Figura 14, obteniendo los cambios en la velocidad que se muestran en la Figura 15. La planta permite también analizar la influencia de la carga en la velocidad, modificando el valor de la carga, la resistencia conectada a la salida del aerogenerador. En la Figura 16 se muestra cómo se mantiene fijo el SP de pitch a un valor de 12° y se modifica dicha resistencia.

Con los datos obtenidos en lazo abierto, con las experiencias descritas en los apartados anteriores, es posible obtener un modelo que reproduce la dinámica de los dos lazos, uno puramente integrador para la dinámica del motor que mueve el pitch, y otro de primer orden para la dinámica de la

velocidad en el lazo externo. En la Figura 17, se muestra el modelo que se proporciona también a los estudiantes.

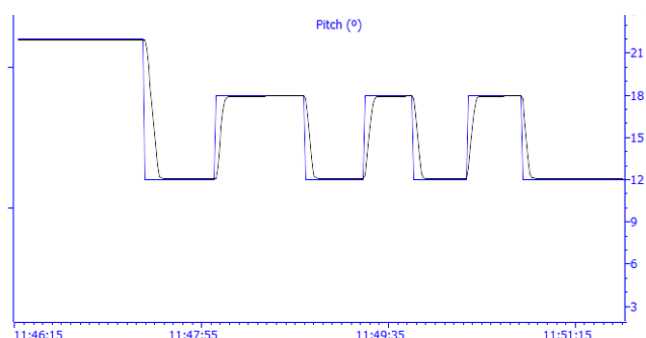


Figura 14: Salto en el SP del Pitch.

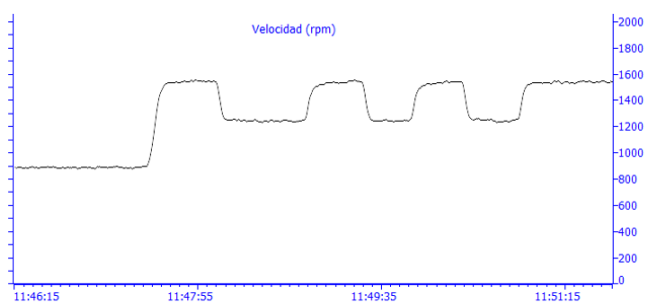


Figura 15: Cambios en la velocidad.

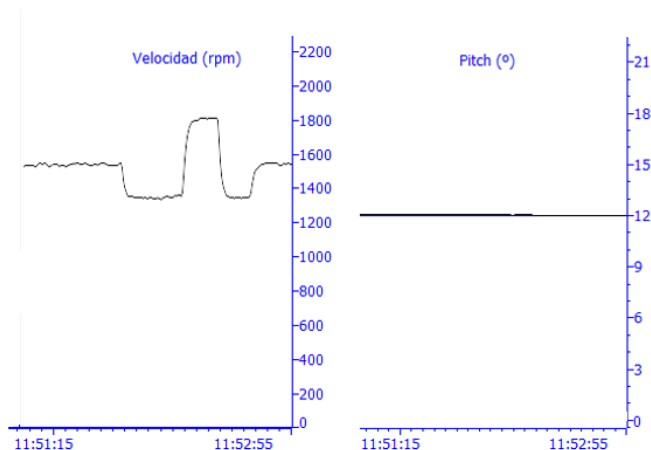


Figura 16: Cambios en la velocidad ante cambios en la carga.

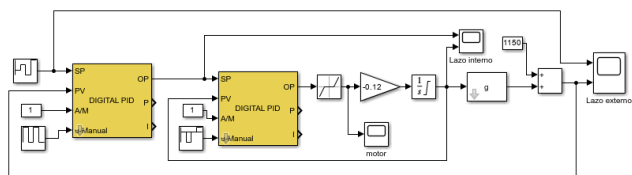


Figura 17: Modelo Simulink para el control de velocidad.

4.4. Control de velocidad en lazo cerrado

Como se ha indicado en la introducción, en un aerogenerador real uno de los objetivos es el de mantener la velocidad angular necesaria para generar una potencia nominal, cuando el viento es el nominal o superior trabajando en la región III, Figura 1. En esta región, es el pitch del aerogenerador el que actúa como variable manipulada. En este apartado se describe cómo se han cerrado los dos lazos,

incluyendo el lazo de velocidad, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 6. Ahora se ha añadido un lazo externo a la estrategia, con un nuevo PID, programado de la misma forma que el interno, con una FB escrita en SCL, Figura 18.

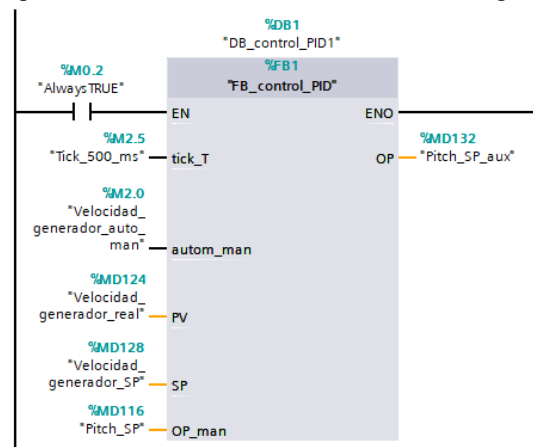


Figura 18: PID1, del lazo externo para el control de la velocidad.

Como se observa en la Figura 6, en esta estrategia de control en cascada, el lazo exterior es el de la variable principal, la velocidad del aerogenerador. La salida del controlador PID1 no actúa sobre ningún actuador directamente, sino que proporciona la referencia para el controlador PID2 interior, cuya salida sí actúa sobre un actuador, el motor de pitch, descrito en el apartado 4.2. Al cerrar los dos lazos, se modifican los valores del SP de velocidad, obteniendo la evolución temporal mostrada en la Figura 19, donde se observa cómo la velocidad sigue a su referencia en el lazo exterior. En la Figura 20 se muestra el lazo interior, donde se aprecia cómo tanto la referencia de pitch (salida del PID1) como éste van cambiando.

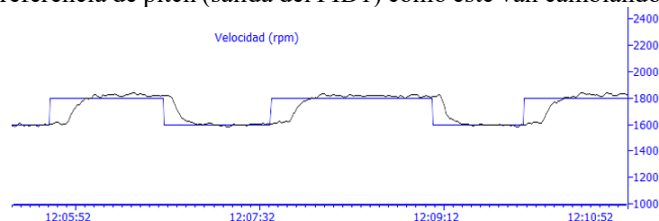


Figura 19: Cambios en la velocidad ante cambios en su SP.

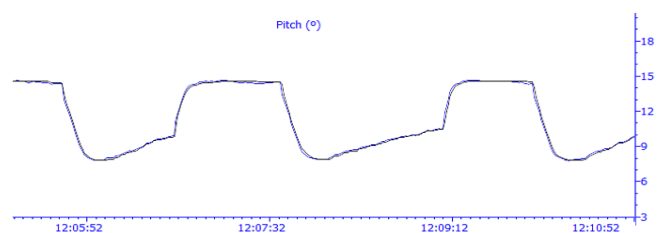


Figura 20: Cambios del Pitch en el lazo interno.

Finalmente, se muestra cómo el sistema de control de velocidad rechaza posibles perturbaciones. La planta permite realizar modificaciones en dos tipos de perturbaciones:

- Cambio del viento: el sistema tiene que poder mantener la velocidad frente a cambios en el viento, que en esta planta se puede modificar cambiando la velocidad del ventilador.
- Cambio de la carga: con la velocidad en equilibrio, se producen modificaciones de la resistencia de carga conectada al generador. Estas se realizan mediante un

conmutador que permite seleccionar diferentes resistencias.

La Figura 21, en su primera mitad, muestra cómo la velocidad del rotor se mantiene en su SP ante cambios de viento (producido al cambiar la velocidad del ventilador) y, en su segunda mitad, ante cambios en la resistencia de carga. En la Figura 22, se muestra cómo cambia el pitch del lazo interno para conseguir rechazar la perturbación en ambos casos.

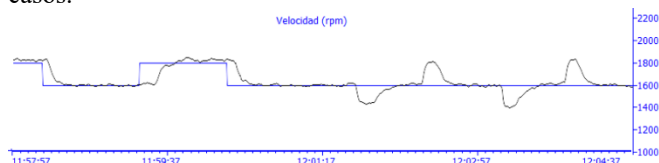


Figura 21: Rechazo de perturbaciones ante cambios en el viento (mitad inicial) y ante cambios en la resistencia de carga (mitad final).

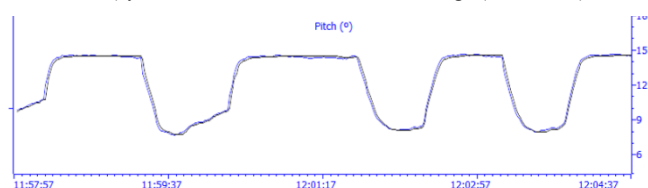


Figura 22: Modificación del lazo interno (pitch) para rechazar perturbaciones en el lazo externo (velocidad).

5. Conclusiones

En este trabajo se muestra cómo implementar un lazo de control de velocidad de giro de un aerogenerador, manipulando el pitch en una maqueta experimental didáctica, para la que se ha diseñado una práctica. Esta se ha puesto a punto durante el curso 25/26 para su incorporación en el siguiente dentro de la asignatura “Tecnologías de Automatización y de Control” de primer curso del Máster de Ingeniería Industrial, a la que acceden alumnos muy heterogéneos ya que lo hacen desde diversos grados de la rama industrial. Los objetivos de la asignatura incluyen mostrar una visión global de las tecnologías implicadas de la automatización de los procesos industriales, siempre desde un punto de vista muy aplicado. Dentro de los contenidos prácticos, se incluyen ocho plantas experimentales de distintos tipos por las que los alumnos rotan a lo largo de las diferentes sesiones, siendo la presentada en este trabajo una de ellas.

La planta y la práctica diseñada cubren muchos de los aspectos considerados dentro de la asignatura, integrando conceptos como la programación de PLC con funciones de librería, utilizando lenguajes de alto nivel (SCL), tipos de instrumentación, sintonía de controladores, control en cascada, saturación de actuadores, programación de estructuras de PID con su problemática (antiwindup, cambios manual/automático, ejecución cada periodo de muestreo) que se explican adecuadamente en el guion, para que la práctica se pueda realizar en dos horas.

Además de los objetivos relacionados con el control, la maqueta permite poner de relieve otros conceptos relacionados con el control de aerogeneradores como son el control de pitch, la gestión de la carga eléctrica, la fuerte no

linealidad del proceso o la variabilidad del viento que no han sido vistos en ningún otro momento de su proceso formativo.

Las experiencias incluidas en el guion a desarrollar por los estudiantes incluyen una identificación, la obtención de un modelo, el diseño de controladores, la implementación de estos en un PLC y la prueba del rendimiento del conjunto, analizando cómo se siguen referencias de velocidad y cómo se rechazan posibles perturbaciones tanto de intensidad del viento como de cambios en la carga.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2023-149181OB-I00/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referencias

- Bianchi, F., D. Battista, H. et al. 2007. Wind Turbine Control Systems Principles: Modelling and Gain Scheduling Design. Germany, Springer.
- Boukhezzer, B., Lupu L., et al. 2007. “Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbine”. Renewable Energy, 32, 1273-1287. DOI: 10.1016/j.renene.2006.06.010
- Fragoso, S., Vázquez, F., Morilla, F. 2013a. Control de velocidad mediante paso de pala para un aerogenerador experimental de pequeña potencia. XXXIV Jornadas de Automática. Tarrasa, 2013.
- Fragoso, S., Vázquez, F., Morilla, F. 2013b. Control multivariable descentralizado de un aerogenerador experimental de pequeña potencia. XXXIV Jornadas de Automática. Tarrasa, 2013.
- Fragoso, S., Garrido, J., Vázquez, F., Morilla, F. 2014. Comparative analysis of decoupling control methodologies and H_∞ multivariable robust control for a VS-VP wind turbines. 6th International Renewable Energy Congress, Sousse, Túnez, 2014.
- Garrido, J., Lara, M., Vázquez, F., Ruz, M. 2026. Limitation of actuator effort in individual pitch control of wind turbines. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. DOI: 10.4995/riai.2026.25395
- González, M., Vázquez, F., Morilla, F. 2010. Control multivariable centralizado con desacoplo para aerogeneradores de velocidad variable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 7(4), 53-64. DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70060-1
- Haque, M., Negnevitsky, M. 2010. A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbines with a Permanent Magnet Synchronous Generator. IEEE Transactions on Industry Applications, 46(1), 331-339. DOI: 10.1109/TIA.2009.2036550
- Lara, M., Garrido, J., Delgado, M. L., Vázquez, F., Ruz, M. L., Morilla, F. 2022. Control descentralizado de un emulador de aerogenerador VS-VP con DFIG real. XLIII Jornadas de Automática, 376-383. DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0376
- Lara, M., Mulders, S.P., van Wingerden, J.W., Vázquez, F., Garrido, J. 2024. Analysis of adaptive individual pitch control schemes for blade fatigue load reduction on a 15 MW wind turbine. Applied Sciences, 14. DOI: 10.3390/app14010183
- Lara, M., Ruz, M.L., Mulders, S.P., Vázquez, F., Garrido, J. 2025a. Individual pitch controller with static inverted decoupling for periodic blade load reduction on monopile offshore wind turbines. Ocean Engineering, 334. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.121608
- Lara, M., Ruz, M.L., Vázquez, F., Garrido, J. 2025b. Enfoque anticipativo de control de paso individual en turbinas eólicas. Jornadas de Automática. DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12058
- Lee, J., Zhao, F. (2022). GWEC Global Wind Report; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2022; pp. 75.
- Njiri, J.G., Soffker, D. 2016. State-of-the-Art in Wind Turbine Control: Trends and Challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 377-393. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.110
- Rodríguez, J.L., Burgos, J.C., et al. 2003. Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica. Editorial Rueda