

Jornadas de Automática

Sistema de orientación de un aerogenerador empleando Fuzzy Logic Controller

D. Barrio, Roberto.^{a,*}, Santos Peñas, Matilde.^b, Armenta Déu, Carlos.^c

^aFacultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, C/ Profesor G^a Santesteban 9, 28040-Madrid.

^bInstituto de Tecnología del Conocimiento, Facultad de Informática, UCM, C/ Profesor G^a Santesteban 9, 28040-Madrid

^cFacultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de las Ciencias s/n, 28040-Madrid.

To cite this article: D. Barrio, Roberto., Santos Peñas, Matilde., Armenta Déu, Carlos. 2024. Fuzzy Logic controlled wind turbine yaw system.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10825>

Resumen

A la hora de generar energía eléctrica empleando aerogeneradores para aprovechar la fuerza del viento, hay que tener en cuenta que estos han de orientarse de forma correcta respecto al mismo; ya que de no hacerlo, no serán capaces de aprovechar la energía disponible, e incluso podrán producirse cargas y efectos anómalos que pueden perjudicar el conjunto de la máquina de forma estructural. En este trabajo se pretende obtener, empleando un controlador con lógica borrosa (Fuzzy Logic Controller, FLC), un sistema que mantenga la orientación correcta del aparato. Para ello, se presentará un modelo de planta adecuado, para a continuación comentar la lógica que ha de seguir el control debido a las características del modelo. Al final, se validará todo mediante simulaciones en las que el modelo obtenido tendrá que mantener la orientación ante distintas casuísticas, y por último se comentarán las conclusiones extraídas de la realización del trabajo.

Palabras clave: Control Inteligente, Lógica Borrosa Multiobjetivo, Energía Renovable, Aerogenerador, Orientación.

Fuzzy Logic controlled wind turbine yaw system

Abstract

A wind turbine uses the wind in order to translate its action into electric power, so an accurate direction tracking system is required in order to provide an effective power conversion and minimize irregular loads which could be harmful for the whole machine. In this work, a Fuzzy Logic Controller (FLC) is designed in order to keep the correct orientation. For the purpose of fulfill the requirements, a model will be presented, then the control logic will be developed. After that, the approach will be validated using simulations in which the model and the control are validated against different kind of scenarios. At the end the conclusions will be exposed.

Keywords: Intelligent Control, Multi-objective Fuzzy Logic, Renewable Energy, Wind Turbine, Yaw.

1. Introducción

En los últimos años, varios factores como la creciente preocupación por el medioambiente, las crisis energéticas causadas por conflictos políticos, y la búsqueda de fuentes de energía independientes, han hecho que la proliferación de energías renovables, y su crecimiento y peso dentro del sistema eléctrico haya sido notable; alcanzando en 2019 los 651 GW instalados a nivel mundial, incrementando ese año un

10 % respecto a 2018 (Global Wind Energy Council, 2020). En España, la energía eléctrica generada para la red en 2022, provino en un 42.2 % de fuentes de energía renovables, en los que se registraron en su momento los máximos históricos de generación de energía eólica y solar fotovoltaica (Red Eléctrica Española, 2023).

El funcionamiento de los aerogeneradores depende completamente del viento, teniendo este unas características únicas dependientes de la zona en la que está emplazado y siendo

*Autor para correspondencia: robdia03@ucm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

un fenómeno estocástico que cambia sus características a lo largo del tiempo (Burton, 2021). La tipología de máquina más común hoy en día en el mercado, es de tripala con eje horizontal, y para llevar a cabo su instalación, se llevan a cabo estudios del recurso como los propuestos en (Cetinay et al., 2017), en los que se analiza la viabilidad del recurso así como su dirección preferente. No obstante, como la orientación es cambiante, las máquinas han de ser capaces de seguir la trayectoria con el fin de asegurar una producción óptima, así como evitar efectos aerodinámicos no deseados (Burton, 2021) (IEC, 2019).

Estos aparatos pueden tener una configuración upwind, que se enfrentan de cara al viento, o una downwind, que siguen su dirección. En ambos casos para obtener información se sitúa un equipo de medición en la góndola que permite conocer las características del viento. No obstante, el carácter de este hace que esta componente sea fuertemente filtrada, especialmente en las máquinas upwind, ya que la rotación de las palas puede crear interferencias en las medidas (Burton, 2021). A pesar de que en los últimos años se han diseñado nuevos sensores como el LiDAR, que permiten una medición del fenómeno mucho más precisa y con menos interferencias, esta componente sigue filtrándose debido a su propia naturaleza (Simley and Pao, 2012).

1.1. Importancia y consideraciones sobre el control de orientación

En el control de orientación, existen tres objetivos principales (Yang et al., 2021). El primero, como ya se mencionó, es optimizar la captura de energía de un aerogenerador individual. El segundo, es reducir lo máximo posible las cargas de fatiga que se producen en la operación. El tercero, sería encontrar un equilibrio entre los dos primeros en la operación en un parque en el que coexisten varias turbinas, ya que las perturbaciones producidas por las estelas que producen unas que reciben el viento en una primera instancia, pueden afectar a otras que se encuentran a continuación. En este último caso, tal y como se demuestra en (Sun et al., 2020), una coordinación en la orientación, puede reducir las cargas dentro del parque en su conjunto, así como incrementar la captura de energía.

Existen múltiples alternativas para alcanzar el objetivo deseado de tener la máquina lo mejor orientada posible, algunos se basan en controladores lógicos como el Hill-Climbing (Piao and Wang, 2008), otros en algoritmos PID (Bu et al., 2009), y los hay que se basan en un control híbrido con aplicación de la lógica borrosa (Wu et al., 1993). No obstante, algunos autores, debido al cambio rápido que tiene la dirección del viento a diferencia de la velocidad a la que se puede o recomienda ejecutar la orientación, recomiendan utilizar la estimación del viento como referencia para la orientación (Kragh and Hansen, 2015). Esta última estrategia tiene un trasfondo semejante al adoptado por (Farret et al., 2000), en la que se emplean tácticas de orientación sin sensor, en las que utilizando la diferencia de potencia que se está obteniendo en ese momento y la ideal del MPPT, se busca inferir la dirección del viento. De forma similar, (Mesemanolis and Mademlis, 2014) utilizan la velocidad de la máquina en comparación con la ideal. Sin embargo, debido a la gran inercia que presenta el sistema, la presencia de partes en movimiento, y la carga que supondría para los servomotores el mover una masa tan grande de forma

constante, se suele emplear una estrategia sencilla de aplicar un par mínimo y optar por aceptar una leve desorientación durante un cierto tiempo siempre y cuando esta no sea nociva para el funcionamiento de la máquina, ya que a la larga esta maniobra será más provechosa en términos de vida útil y mantenimiento que una orientación perfecta en todo momento (Burton, 2021).

En este trabajo se desarrollará una estrategia de control empleando un FLC con múltiples entradas y que estará diseñada para mantener la orientación dentro de un error tolerable al mismo tiempo que se intenta minimizar el esfuerzo aplicado para ello. Pudiendo tener entonces esta estrategia beneficios tanto en aprovechamiento de la energía, como en la reducción del mantenimiento, y en una mayor vida útil de los equipos que se encargan de la rotación. Para ello, en la Sección 2 se propondrá un modelo de la planta a controlar, a continuación en la Sección 3 se tratará el diseño del controlador; en la Sección 4 se presentarán simulaciones bajo los preceptos expuestos anteriormente para, finalmente, en la Sección 5 comentar las conclusiones extraídas de las mismas.

2. Modelado del movimiento de la góndola

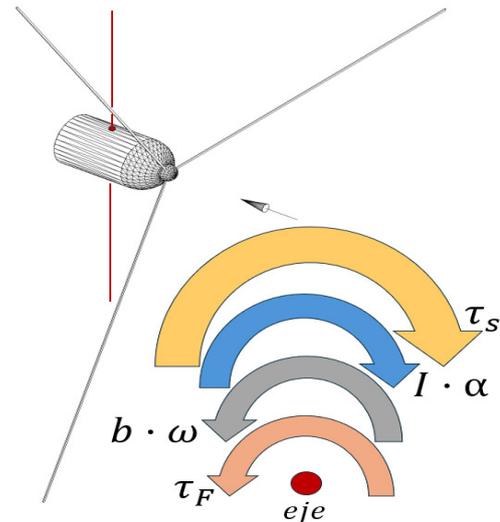


Figura 1: Diagrama de los momentos que se aplican a la góndola.

La góndola es la parte móvil de un aerogenerador que soporta las palas y que tiene en su interior el generador y otros elementos que permiten transformar la energía mecánica en eléctrica, como el tren de transmisión, convertidores, transformadores, etc. (Burton, 2021). Esta pivota sobre un poste situado a gran altura para recibir la acción del viento. Relativo al centro de este eje de giro, se puede obtener un momento de inercia I definido por la propia góndola y todos los elementos que contiene. El movimiento de rotación, estará provocado por uno o varios servomotores que desplazarán la masa en una dirección u otra con un par τ_S . Es muy común que exista un sistema de frenado que esté actuando de forma permanente, incluso cuando se pretende orientar la máquina, para evitar que los efectos del viento y del par transmitido por la rotación del rotor desplacen la máquina de forma indeseada (Burton, 2021), por lo que se considerará un par de frenado permanente

τ_F . Cuando el dispositivo está en movimiento, aparecerá también un par que se opone al mismo en forma de rozamiento dinámico, que se puede representar en forma de un coeficiente constante b por su velocidad angular ω . Si se desprecian los momentos que inducen las partes móviles, y los efectos de empuje del viento, se puede entonces dibujar un diagrama de momentos que se indica en la Figura 1.

En este diagrama el par aplicado por los servos en una dirección (flecha amarilla), provocará una aceleración angular α , a la que se opondrán el par de frenado y el rozamiento anteriormente descritos. Por lo tanto, aplicando el principio de conservación de la energía, se puede obtener la ecuación:

$$\alpha(t)I = \tau_S(t) - \tau_F - b\omega(t) \tag{1}$$

De la que poniendo la aceleración y la velocidad en función del ángulo, y aplicando la transformada de Laplace, se puede extraer la función de transferencia del desplazamiento:

$$\theta(s) = \frac{\tau_S(s) - \tau_F}{s^2I + sb} \tag{2}$$

3. Diseño del control

Como se especificó anteriormente, debido a que el conjunto de la góndola y los elementos que esta aloja es muy pesado, y por lo tanto tiene una componente inercial muy fuerte (Burton, 2021), en este trabajo se diseñará el control con la intención de cumplir los siguientes objetivos principales.

El primero será que el movimiento del aparato sea lento, ya que debido a que consta de partes móviles que no se detienen durante la operación, no sería recomendable un movimiento brusco para no interferir en el funcionamiento de las mismas; teniendo en cuenta además que va montado sobre una estructura muy esbelta sobre la que se están modificando las masas en el proceso de orientación.

El segundo objetivo será minimizar lo máximo posible la utilización del servomotor. Por el carácter del viento y las posibles perturbaciones en las medidas, es probable que una lectura se esté modificando de forma continua. Si se intentara orientar siguiendo la referencia en todo momento, esto provocaría una utilización continua del servomotor que provocaría que en poco tiempo este tuviese que ser reemplazado debido al gran esfuerzo.

Por último, se procura que la actuación sea proporcional al tiempo de desalineamiento. En la normativa (IEC, 2019), se pueden ver varios casos de estudio propuestos para las cargas que se inducen en un aerogenerador. En estos, se permite cierta desalineación, viendo que entra dentro de la recomendación trabajar con un error de $\pm 8^\circ$, y con algún error mayor durante un corto espacio de tiempo. Por lo tanto, está permitida la operación en cierto rango de desalineamiento, lo que no puede es mantenerse durante mucho tiempo, de lo que se deduce que no sólo la magnitud es importante, sino que el tiempo en el que esta se está manteniendo también lo es. Se intentará pues, tener una respuesta proporcional no sólo al grado de desorientación, sino también al tiempo que se está en un error no aceptable.

3.1. Fuzzy Logic Controller

Para cumplir estos objetivos, se va a diseñar un control con lógica borrosa. En él, para intentar que el movimiento sea lento, se dimensionará la salida de forma que la alimentación del servomotor sea acorde a las necesidades. Para minimizar la utilización del aparato, se incluirán varias entradas que dependan no sólo del error, sino del tiempo y de la actuación anterior del equipo para, de esta forma, crear una lógica que se dispare cuando la relación error-tiempo alcance un cierto peso y, una vez que el sistema está en movimiento, no detenerlo hasta que este tenga un error muy pequeño respecto a la referencia.

Por lo tanto se tendrá un FLC de tipo Mamdani con 3 entradas y una salida. Las entradas serán: el error de la orientación, el tiempo de desalineación, y el estado anterior de trabajo. Mientras que la salida será el par de referencia que aplicará en una dirección u otra, tal y como puede verse en la Figura 2.

Si bien en las entradas los valores de error y tiempo se diseñan como funciones con varios miembros, la función del estado anterior, o estado de trabajo, se podría tomar como un valor binario en el que es un sí o un no. Para ello se utilizará una función de pertenencia de tipo escalón, lo que equivaldría a poner dos controladores borrosos de forma paralela en el que uno trabaja en ciertas condiciones (máquina parada) y el otro en las contrarias (máquina en movimiento).

En el estado de error, habrá múltiples funciones de pertenencia. En el diseño se han tomado 6 funciones triangulares que se corresponderán con un error que podrá variar entre 0° y 180° y, cada una de ellas, describirá el grado de este, yendo desde un error nulo hasta un error muy grande. El error nulo irá desde 0° hasta 1° con un mínimo solapamiento con un error muy pequeño. Luego habrá 5 errores más, equiespaciados en un intervalo que va hasta 50° , error a partir del cual se considerará un error muy grande, por lo que la última función de pertenencia estará definida por el tipo lineal-S.

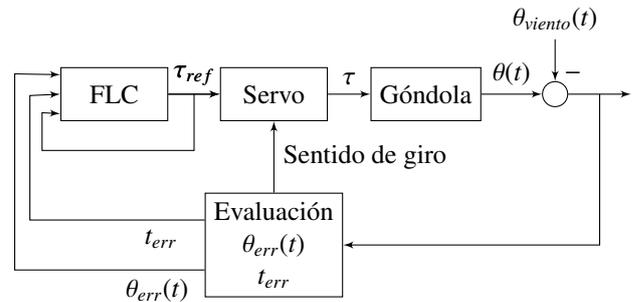


Figura 2: Esquema del sistema de control.

La entrada del tiempo, de forma similar al error, estará compuesta de 5 funciones de pertenencia triangulares. Los tiempos de las funciones irán solapados desde uno muy corto, hasta uno muy largo. El muy corto empieza en 0s, estando el resto equiespaciados hasta el muy largo, que comienza en 40s y se mantiene hasta que el aparato está alineado, por lo que de la misma forma que ocurría en el error, esta función estará definida por una función de pertenencia del tipo lineal-S. La forma de actuar más efectiva dependiendo del error, se comentará en la Sección 3.2.

Además, tal y como se podrá ver en las simulaciones, los valores que se elijan en la función de salida respecto a la de

tiempo y la de error, pueden llegar a reemplazar total o parcialmente el comportamiento del filtro paso bajo (Low Pass Filter, LPF), ya que al decidir actuar o no se podrá establecer un valor mínimo de tiempo que tiene que permanecer el aparato en error antes de entrar en acción.

La salida, tendrá 5 funciones de pertenencia en un rango que va desde -0.2 a 1. Estas irán desde no entregar potencia, a entregar el total disponible en el servomotor. El rango negativo de potencias, responderá a una estrategia de reposo, mientras que el rango que es mayor que 0, será el que obedece a una estrategia de trabajo. La evaluación de esta salida se comentará con más detalle en la Sección 3.4.

En las Tablas 1 y 2, se puede ver la salida en función de las diferentes entradas para cuando el control está en estado de reposo o en estado de trabajo respectivamente, marcando las columnas el error de desalineación y las filas el tiempo desalineado. Estas reglas estarán descritas de la forma **IF** $\theta_{err}(t)$ **AND** t_{err} **AND** τ_{ref} **THEN** τ_{ref} . No se exponen las posibilidades de que el error sea nulo, ya que la salida siempre será sin potencia.

3.1.1. Estado de espera

Cuando la máquina se encuentra en reposo (la entrada de ciclo de trabajo o estado anterior < 0), se pretende que esta filtre o soporte los errores durante un tiempo determinado imitando el comportamiento de un LPF. Para ello, se crean reglas para que, cuando el tiempo de desorientación sea pequeño, se ignore cualquier tipo de perturbación, dando igual lo grande que esta sea por si se tratara de un error de medida o una ráfaga esporádica, permitiendo la desalineación si esta es muy pequeña. A medida que el tiempo se incrementa, este se hará más sensible al error, de forma que cuanto más tiempo permanezca el equipo desalineado, menos error hará falta para diparar el mecanismo de trabajo. Se puede apreciar este comportamiento en la Tabla 1.

3.1.2. Estado de trabajo

Cuando la máquina se encuentra en un ciclo de trabajo (la entrada de ciclo de trabajo o estado anterior > 0), se pretende que esta se aproxime de una forma suave a su orientación óptima. Durante este periodo, si el error es grande se pondrá en consonancia con el tiempo para intentar obtener en todos los casos una pendiente que reduzca el error de forma proporcionada. Este estado permanecerá activo hasta que el control ofrezca una salida negativa, lo que significará que la máquina se ha orientado de una forma correcta. Los valores de las reglas de salida se pueden ver en la Tabla 2, siendo las columnas la cantidad de error, y las filas el tiempo que se incurre en el mismo. Al igual que en el caso de reposo, se obvian los casos en los que no hay error, en los que la salida será de no potencia.

3.2. Lógica del error

Como el error se trata de una coordenada polar, podrá resolverse en dos direcciones, una será en el sentido horario, y otro en el sentido antihorario. Con el afán de emplear el mínimo de energía, se crea una lógica que identifica la desorientación en valor absoluto y decide el sentido más óptimo para reducir este a cero. La salida que proporciona el control de

orientación se podrá aplicar entonces en cualquiera de las dos direcciones, y para el FLC será indiferente uno u otro, ya que se le proporcionará el valor absoluto del error. Por lo tanto, el valor empleado en el controlador se tomará como:

$$\theta_{err}(t) = \min(|\theta_{gondola}(t) - \theta_{viento}(t)|, |360 - (\theta_{gondola}(t) - \theta_{viento}(t))|) \quad (3)$$

3.3. Tiempo que se pasa en error

Para evaluar el tiempo que se pasa en error, habrá que tener en cuenta la varianza del viento. Por lo tanto, cada vez que el error descrito en el apartado anterior sea mayor que 0, teniendo en cuenta un pequeño umbral para el error numérico de computación, se creará un contador en el que cada vez que esta diferencia sea mayor que 0, el control comenzará a almacenar un tiempo en el que el sistema se encuentra desalineado. Este tiempo se le proporcionará al FLC de forma que este sea capaz de, según lo descrito en los apartados anteriores, proporcionar una salida acorde al error y a este mismo.

Según (Burton, 2021), en la mayoría de casos se emplea un LPF con un ancho de banda muy pequeño para bajas frecuencias para compensar los efectos del viento. En este caso, se hará una comparativa entre la respuesta del control sin ningún tipo de filtro, y la respuesta del control ante un LPF, pero con una mayor frecuencia de corte.

3.4. Lógica de elección del estado de trabajo

Como se comentó anteriormente, cuando la salida del controlador sea > 0 , se considerará que el controlador se encuentra en una situación de trabajo; mientras que si esta salida es < 0 , se considerará que está en estado de reposo o espera.

4. Simulación

Para validar lo anteriormente expuesto, se llevará a cabo una simulación empleando el software de Simulink. En él, se introducirán los distintos modelos descritos en las secciones 2 y 3 para validar el controlador según los criterios seleccionados.

La simulación será de 120 segundos. En ella la orientación inicial de la góndola y del viento será de 90° o norte para facilitar la lectura de los datos. Dentro de la misma se introducirán diversos efectos de forma premeditada para comprobar diferentes situaciones.

El primero será un escalón de $+10^\circ$ en la dirección de viento en el segundo 15. Con este se pretende simular un fenómeno de cambio súbito al que la máquina ha de hacer frente pasado un tiempo.

El segundo será una rampa que comienza en el segundo 50 y finaliza en el 70. Esta irá desde 100° a 85° . Esta casuística pretende simular el cambio de viento en una situación normal, ya que si bien este suele tener un comportamiento errático tal y cómo se ha descrito con anterioridad, los cambios en su valor medio suelen tener un comportamiento que se ajusta más a una rampa que a un escalón.

El tercero será una ráfaga anómala o un error de medida de $+30^\circ$ que durará desde el segundo 110 al segundo 112. Analizando el comportamiento ante este evento, se pretende evaluar la resistencia al cambio del control ante efectos atípicos.

Tabla 1: Valores de referencia en reposo. (Columnas: Error, Filas:Tiempo)

	Muy Pequeño	Pequeño	Medio	Grande	Muy Grande
Muy Corto	Sin Potencia	Sin Potencia	Sin Potencia	Sin Potencia	Sin Potencia
Corto	Sin Potencia	Sin Potencia	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Baja
Medio	Sin Potencia	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Media	Potencia Alta
Grande	Sin Potencia	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Alta	Potencia Máxima
Muy Grande	Sin Potencia	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Alta	Potencia Máxima

Tabla 2: Valores de referencia en ciclo de trabajo. (Columnas: Error, Filas:Tiempo)

	Muy Pequeño	Pequeño	Medio	Grande	Muy Grande
Muy Corto	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Baja
Corto	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Media
Medio	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Media	Potencia Alta
Grande	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Alta	Potencia Máxima
Muy Grande	Potencia Baja	Potencia Baja	Potencia Media	Potencia Máxima	Potencia Máxima

Entonces el modelo que representa la planta y la orientación del viento se conectarán y se enlazarán con la lógica del error expuesta en la sección 3.2. Con este error se alimentará tanto el FLC, como el bloque que implementa el proceso descrito en 3.3; sirviendo este último como entrada a su vez al bloque de control del FLC. De la salida del FLC, se pasará a la identificación del estado de trabajo, que se realimentará al mismo, y al escalado del par para alimentar la planta tal y como se describe en el apartado 3.4.

El viento, se modelará como una constante, obviando los cambios anteriormente descritos, a la que se suma una variable aleatoria que representa su varianza en todo momento.

Cabe destacar de todas formas, que el viento no suele variar de la forma en la que se presenta en la simulación, ya que suele tardar mucho más tiempo en cambiar su orientación, como por ejemplo en el estudio de caso de carga de la norma (IEC, 2019) DLC 6.2, en el que se estudia el cambio de 180° en 6 horas, lo que sería un cambio de 0.5°/minuto. No obstante se presenta de esta forma para obtener un modelo más legible y poder realizar unas simulaciones más ligeras, siendo estas más desfavorables de lo que serían en su caso real.

4.1. Resultados

Los resultados de la simulación, reflejan un comportamiento que se ajusta a lo esperado. En la Figura 3, se puede ver la evolución de la orientación de la góndola respecto a la dirección del viento, ambas en grados. Se realizan dos simulaciones, una sin filtro y otra con él, siendo la primera representada por las líneas azul y verde que representan orientación y viento respectivamente; mientras que las líneas fucsia y roja representan los resultados ante las mismas condiciones pero empleando un LPF con una frecuencia de corte de 1/3 Hz.

Se puede observar que tanto en el escalón, como en la rampa, el sistema tarda un cierto tiempo en actuar de casi 20s, ya que se pretende dejar un margen para ver si el viento vuelve a cambiar su orientación nuevamente. Después, se aplica un par suave que provoca que la orientación varíe en una pendiente de +0.4°/s en el primero de los casos, y de -0.6°/s en el segundo; en ambos casos sería una referencia perfectamente

asumible dentro del comportamiento de poca agresividad deseado. Por último, se puede ver que en el caso del evento de ráfaga, la orientación permanece constante, ya que el control no alcanza el tiempo suficiente para activar la orientación.

Los ciclos de trabajo que sigue la planta y la referencia se pueden ver en la Figura 4 para la primera simulación, siendo los primeros la línea azul y la segunda la línea verde. Como se observa, el ciclo de trabajo se activa de forma interna en sólo dos ocasiones, que son las que se producen los cambios previstos, ignorando el efecto de la ráfaga final y la variabilidad constante del viento.

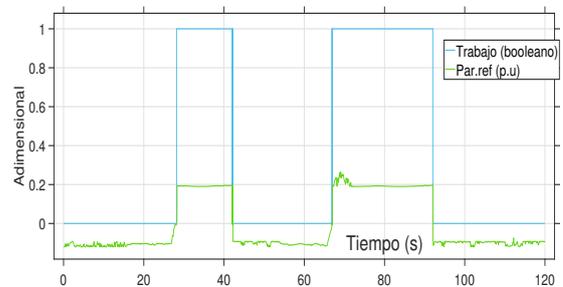


Figura 4: Lógica de trabajo (azul), y referencia de par (verde).

5. Conclusiones

De este trabajo se pueden extraer varias conclusiones. La primera de ellas es que el tipo de control elegido para afrontar el problema es perfectamente válido. La versatilidad de la lógica borrosa hace que en este caso se puedan satisfacer simultáneamente varios objetivos tales como ofrecer una respuesta moderada en todo momento; actuar de forma proporcional al tiempo y sólo una vez este ha dejado pasar un umbral; e identificar las ocasiones en las que hay que orientar o no entrando en ciclos de trabajo, reduciendo así al mínimo las actuaciones y por lo tanto reduciendo carga al servomotor.

Se puede ver que además un filtro, si bien mejora el comportamiento del control, no es imprescindible para que funcione correctamente, lo que hace que esto ofrezca una ventaja

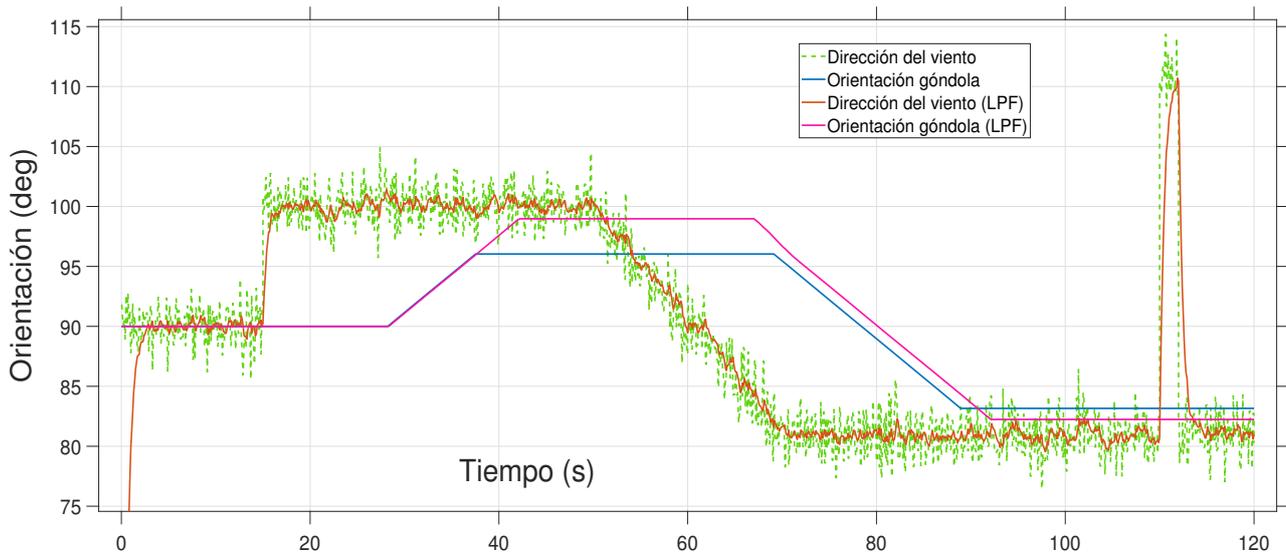


Figura 3: Resultados de simulación. Viento no filtrado (verde), Viento filtrado (rojo), Orientación sin filtro (azul), Orientación con filtro (fucsia)

respecto a otros controles como los basados en PI, en los cuales el funcionamiento sin algún tipo de filtrado sería inviable. Añadiendo que, con un correcto diseño del filtro, se puede alcanzar una respuesta sin apenas retardo debido al mismo y una orientación.

Respecto a otros controladores, como referencias proporcionales al error u otros algoritmos lógicos, este aporta una mayor finura a la hora de extraer una referencia, así como una lógica ya embebida para tratar los tiempos de desalineamiento, accesorio que en los otros controles habría que tener en cuenta aparte.

El inconveniente principal es el grado de complejidad adicional que añade al diseño de un control que se suele tomar como muy simple. Sin embargo, la proliferación de máquinas que cada vez son de mayor potencia y tamaño, así como el desarrollo de la energía eólica marina, hacen necesario desarrollar estrategias de control cada vez más cuidadosas que permitan operar estas de forma segura y aumentar su fiabilidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto PID2021-123543OB-C21, del MICIU/AEI y FEDER Una manera de hacer Europa.

Referencias

- Bu, F., Huang, W., Hu, Y., Xu, Y., Shi, K., Wang, Q., 2009. Study and implementation of a control algorithm for wind turbine yaw control system. In: 2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. pp. 1–5.
DOI: 10.1109/WNWEC.2009.5335830
- Burton, T., 2021. Wind Energy Handbook. 3ed. John Wiley & Sons.
- Cetinay, H., Kuipers, F. A., Guven, A. N., 2017. Optimal siting and sizing of wind farms. *Renewable Energy* 101, 51–58.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307091>

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.008>
- Farret, F., Pfischer, L., Bernardon, D., 2000. Active yaw control with sensorless wind speed and direction measurements for horizontal axis wind turbines. In: Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474). pp. I25/1–I25/6.
DOI: 10.1109/ICCDSCS.2000.869856
- Global Wind Energy Council, 2020. Global wind energy council. global wind 2019 report annual market update. Report.
- IEC, 2019. Iec-61400-1. 4ed. Tech. rep., IEC.
- Kragh, K. A., Hansen, M. H., 2015. Potential of power gain with improved yaw alignment. *Wind Energy* 18 (6), 979–989.
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.1739>
DOI: <https://doi.org/10.1002/we.1739>
- Mesemanolis, A., Mademlis, C., 2014. Combined maximum power point and yaw control strategy for a horizontal axis wind turbine. In: 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). pp. 1704–1710.
DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960412
- Piao, H., Wang, Z., 08 2008. A new control algorithm for yaw control system of wind turbine. *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica* 29, 1028–1033.
- Red Eléctrica Española, 2023. Informe del sistema eléctrico 2022. Report.
- Simley, E., Pao, L. Y., 7 2012. Lidar wind speed measurements of evolving wind fields.
URL: <https://www.osti.gov/biblio/1047935>
DOI: 10.2172/1047935
- Sun, H., Qiu, C., Lu, L., Gao, X., Chen, J., Yang, H., 2020. Wind turbine power modelling and optimization using artificial neural network with wind field experimental data. *Applied Energy* 280, 115880.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920313519>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115880>
- Wu, K. C., Joseph, R., Thupili, N., 1993. Evaluation of classical and fuzzy logic controllers for wind turbine yaw control. In: Proceedings. The First IEEE Regional Conference on Aerospace Control Systems., pp. 254–258.
DOI: 10.1109/AER0CS.1993.720937
- Yang, J., Fang, L., Song, D., Su, M., Yang, X., Huang, L., Joo, Y. H., 2021. Review of control strategy of large horizontal-axis wind turbines yaw system. *Wind Energy* 24 (2), 97–115.
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.2564>
DOI: <https://doi.org/10.1002/we.2564>