



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| **uma.es**

Inteligencia artificial para mejorar el rendimiento de aerogeneradores eólicos en plataformas semisumergibles

J. Jesús Fernández Lozano

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad de Málaga

Conferencias de Posgrado – Facultad de Informática - Universidad Complutense de Madrid
29 de abril, 2021



Contenido

- ¿Por qué plataformas eólicas flotantes?
- Control inteligente
- Conclusiones
- Referencias

Grupo Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad de Málaga

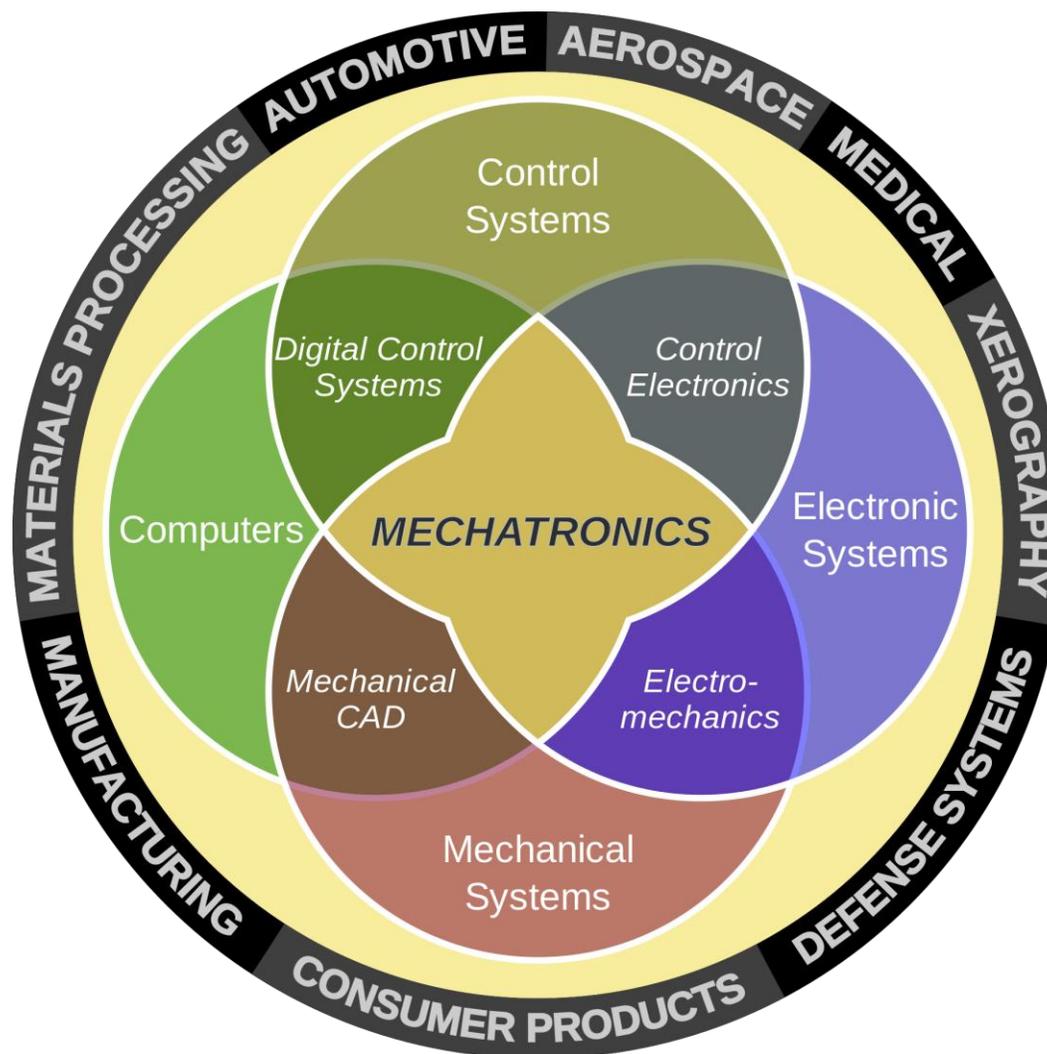
<https://www.uma.es/robotics-and-mechatronics/>



Líneas de Investigación:

- Sistemas de control para vehículos aéreos y terrestres.
- Sistemas de control inteligente: sistemas borrosos, redes neuronales.
- Vehículos eléctricos y tecnologías para la movilidad sostenible.
- Automatización de sistemas logísticos e infraestructuras.
- Automatización de sistemas de fabricación.

Robótica, Mecatrónica y Control



Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecha_workaround.svg

This file is licensed under the [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/) license.

EnerOcean SL - Company Profile

- Empresa de base tecnológica fundada en 2007 en Málaga y con sedes en Andalucía y Canarias.
- Está especializada en energías marinas:
 - Valoración del recurso energético, de viabilidad y explotación comercial.
- Asume el liderazgo de la solución W2Power desde 2012 del que posee la totalidad de la propiedad intelectual.





Fuente: EnerOcean, S.L.

| © 2021 EnerOcean. All rights reserved. Not public-domain information.



Fuente: EnerOcean, S.L.
https://youtu.be/wa71xt_5rbA

| © 2021 EnerOcean. All rights reserved. Not public-domain information.

- El sistema que se busca controlar está compuesto de dos aerogeneradores sobre una plataforma semisumergible, con convertidores de oleaje integrados: concepto W2Power desarrollado por EnerOcean.
- Permite una potencia nominal de 12 MW en una única plataforma flotante, utilizando dos turbinas eólicas comerciales en alta mar disponibles en el mercado hoy.
- Es la primera plataforma eólica flotante en aguas españolas (desde la primavera de 2019), y también la primera solución flotante multiturbina en pruebas en mar abierto a nivel mundial, llegando a un TRL6 (Technology Readiness Level).
- EnerOcean comenzó a colaborar con los desarrolladores originales de la solución W2Power en 2010, y se convirtió en su desarrollador líder en 2012. Durante las primeras campañas de optimización y pruebas en tanques de oleaje, se alcanzó un TFL5 para todos los subsistemas principales mediante ensayos en Flowave (Universidad de Edimburgo), como culminación de 8 campañas de ensayos en 4 laboratorios de 3 países diferentes.
- Las pruebas de mar en PLOCAN han permitido demostrar la funcionalidad, estabilidad y capacidad de supervivencia de la solución W2Power.
- EnerOcean posee toda la propiedad intelectual relacionada con el concepto, incluyendo todas las patentes que cubren las principales innovaciones de la solución.

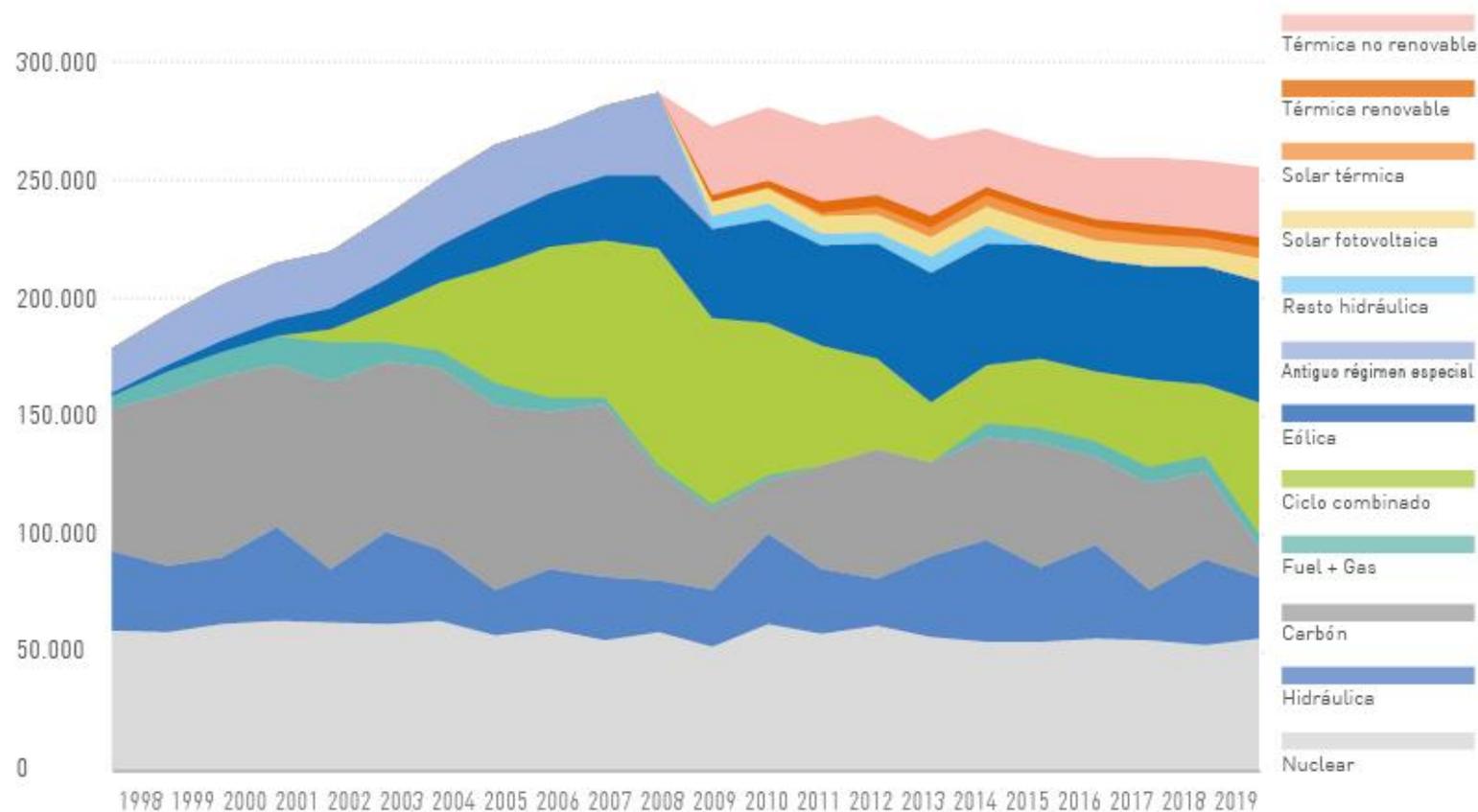


1. ¿Por qué plataformas eólicas flotantes?

Antecedentes

GENERACIÓN ANUAL POR TECNOLOGÍAS (EN GWh)

Fuente: REE

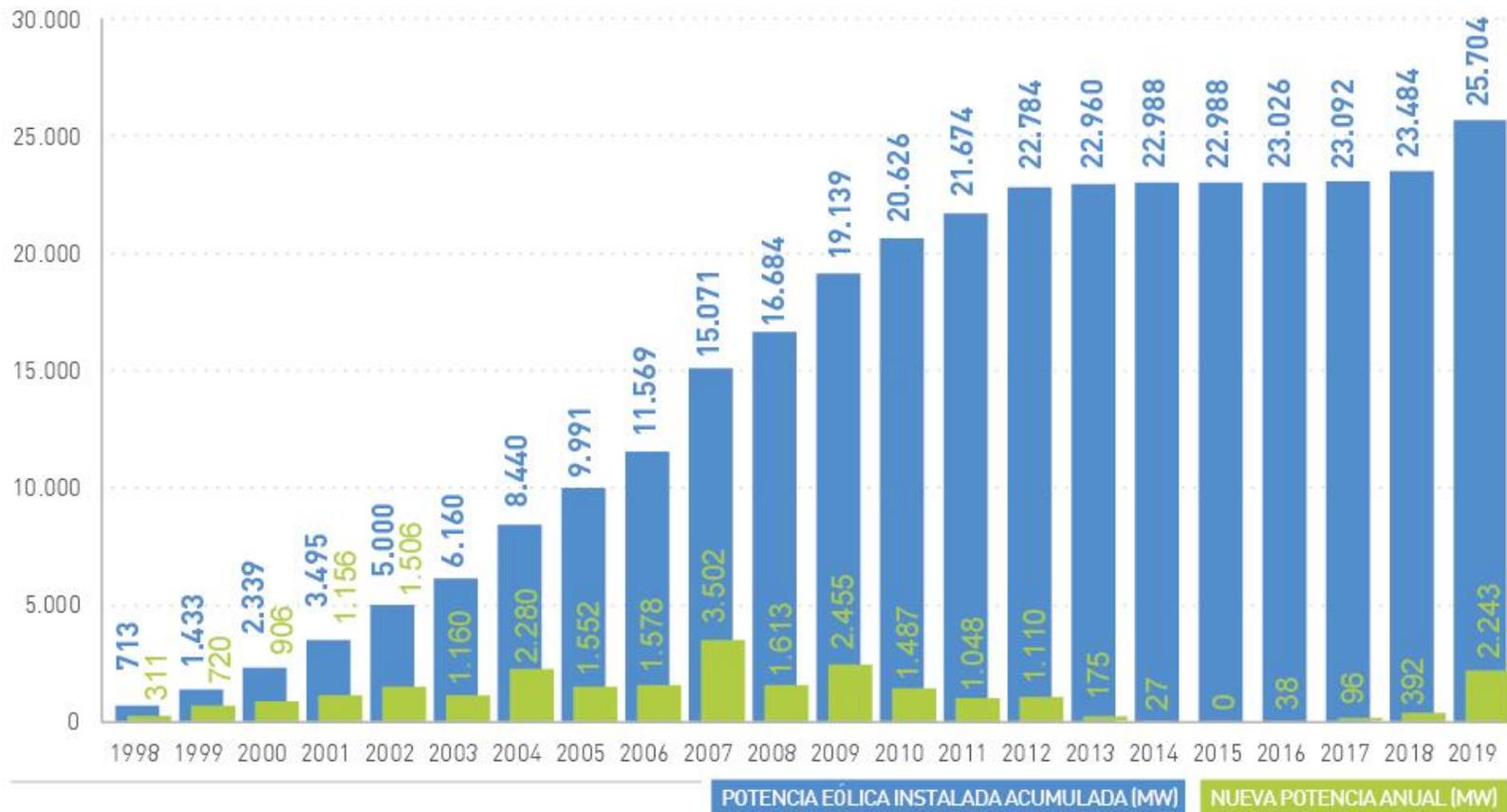


Fuente: <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/potencia-instalada-y-generacion>

Antecedentes

EVOLUCIÓN ANUAL Y ACUMULADA DE LA POTENCIA INSTALADA EN ESPAÑA

Fuente: AEE



Fuente: <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/potencia-instalada-y-generacion>

Antecedentes

- Tendencia hacia incrementar la generación de energía mediante fuentes renovables.
- Eólica: madurez, posibilidad de explotación económica e implantación a gran escala en los sistemas eléctricos (Leung and Yang 2012; Sahin 2004).
- Parques eólicos marinos (eólica *offshore*) frente a los parques terrestres (eólica *onshore*): limitación del impacto ambiental y mejor potencia obtenida.
- Espacios adecuados en la plataforma continental limitados: opción de situar los aerogeneradores mar adentro.

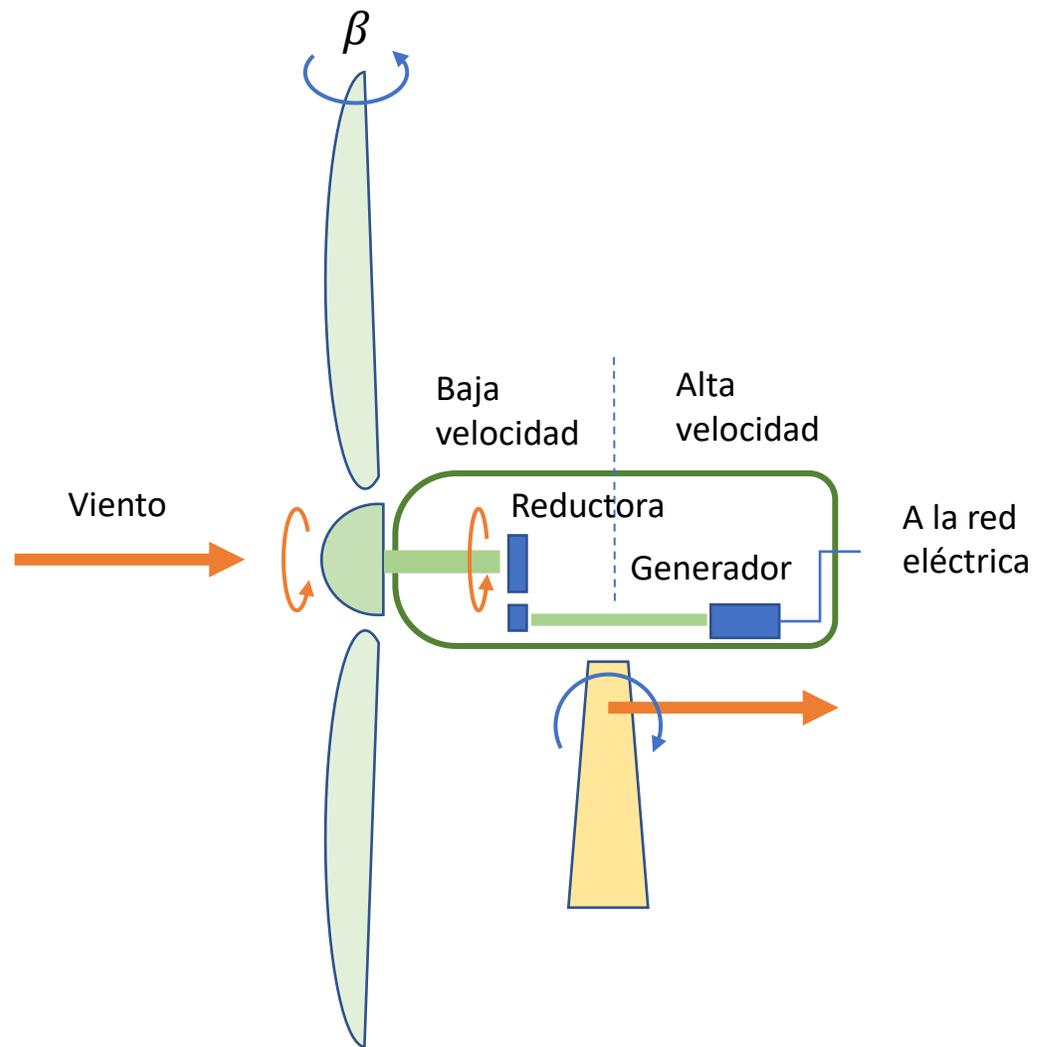
Antecedentes

- Alternativa: instalación en plataformas semisumergibles (Castro-Santos et al. 2016), que pueden además aprovecharse para otros fines como la acuicultura o la energía mareomotriz.
- Las oscilaciones de la plataforma pueden afectar al rendimiento en la generación eléctrica, al cambiar las condiciones aerodinámicas en las que se captura el viento.
- Estas oscilaciones también pueden afectar a las cargas en la base del aerogenerador, modificando las condiciones en las que aparece la fatiga.
- Es necesario disponer de controladores que regulen la potencia eléctrica instantánea que se genera en este tipo de instalaciones, al objeto de aumentar la rentabilidad de la inversión y de no perjudicar el funcionamiento del sistema eléctrico que alimentan.

Antecedentes



Control de aerogeneradores

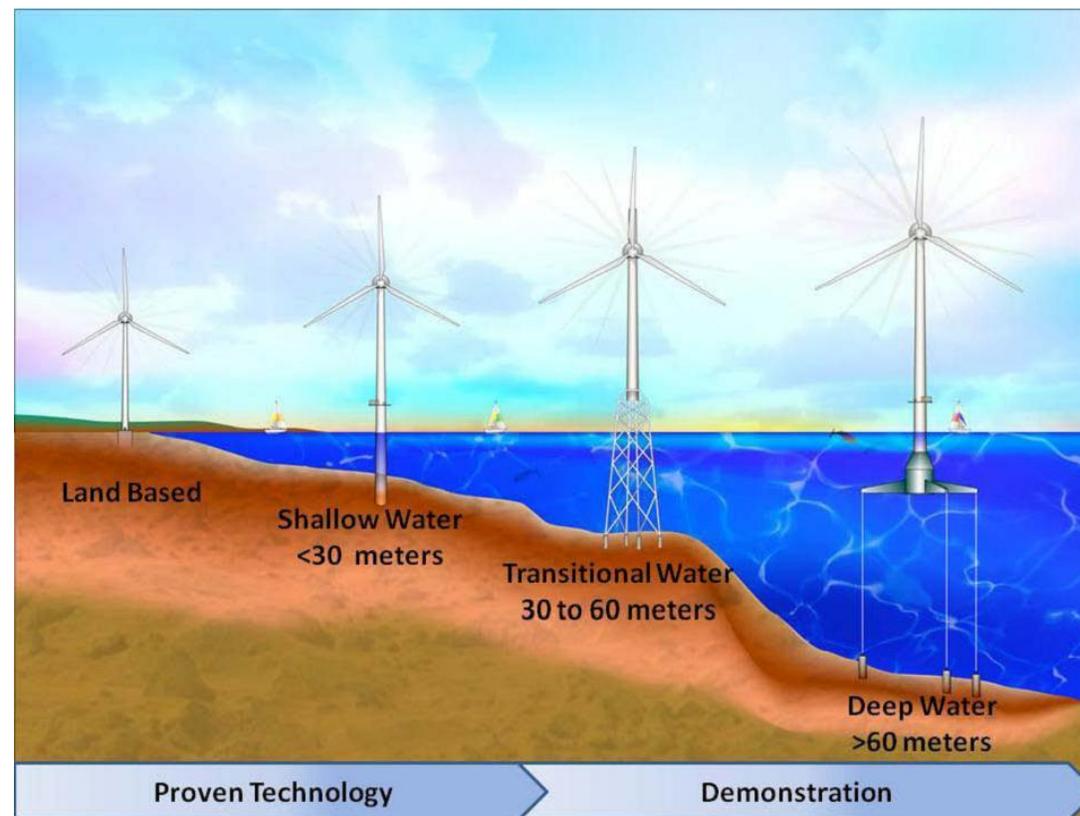


Control de aerogeneradores

- El principal método de control empleado actualmente:
 - Control de par mediante algoritmos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).
 - Control del ángulo de ataque de las palas o *pitch*.
- Ambos métodos de control funcionan simultáneamente.
- Mientras que el primero se encuentra asentado, en el segundo la comunidad investigadora no ha alcanzado un consenso y existen variedad de propuestas.
- En (Abdullah et al. 2012; Cheng and Zhu 2014) se dividen en cuatro tipos las técnicas de control:
 - búsqueda del TSR (*Tip to Speed Ratio*) óptimo,
 - control en lazo cerrado de potencia,
 - control mediante búsqueda ascendente, y
 - control inteligente.

Estado del arte: cimentación

- Emplazamientos:
 - Cimentación fija hasta 60 m.
 - Cimentación flotante a partir de 60 m.

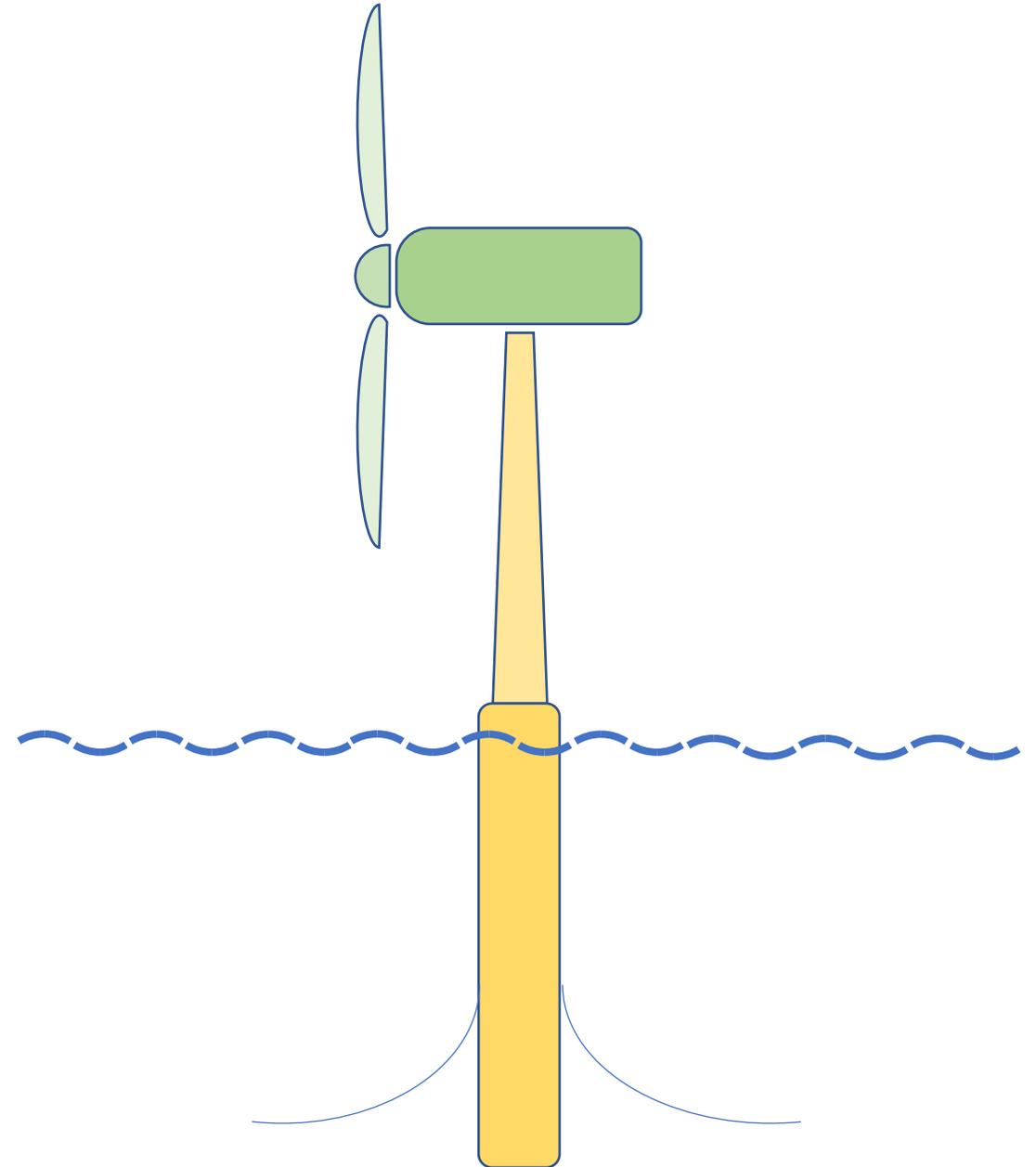


Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foundations_NREL.jpg.

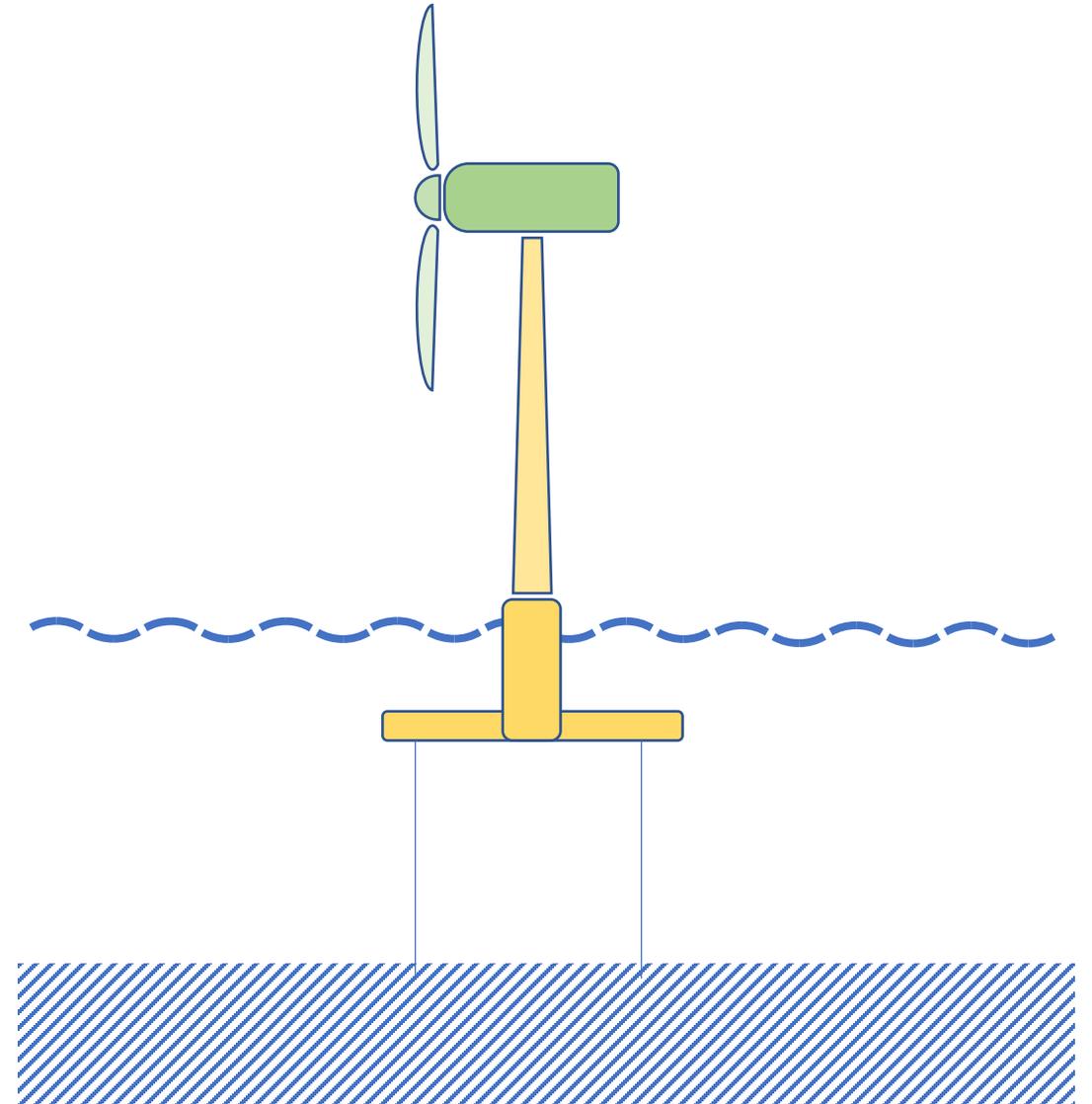
This file is licensed under the [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

- Cimentación flotante:
 - Spar.
 - Plataforma semisumergible.
 - TLP (*Tension-Leg Platform*).

- Cimentación flotante:
 - **Spar.**
 - Plataforma semisumergible.
 - TLP (*Tension-Leg Platform*).

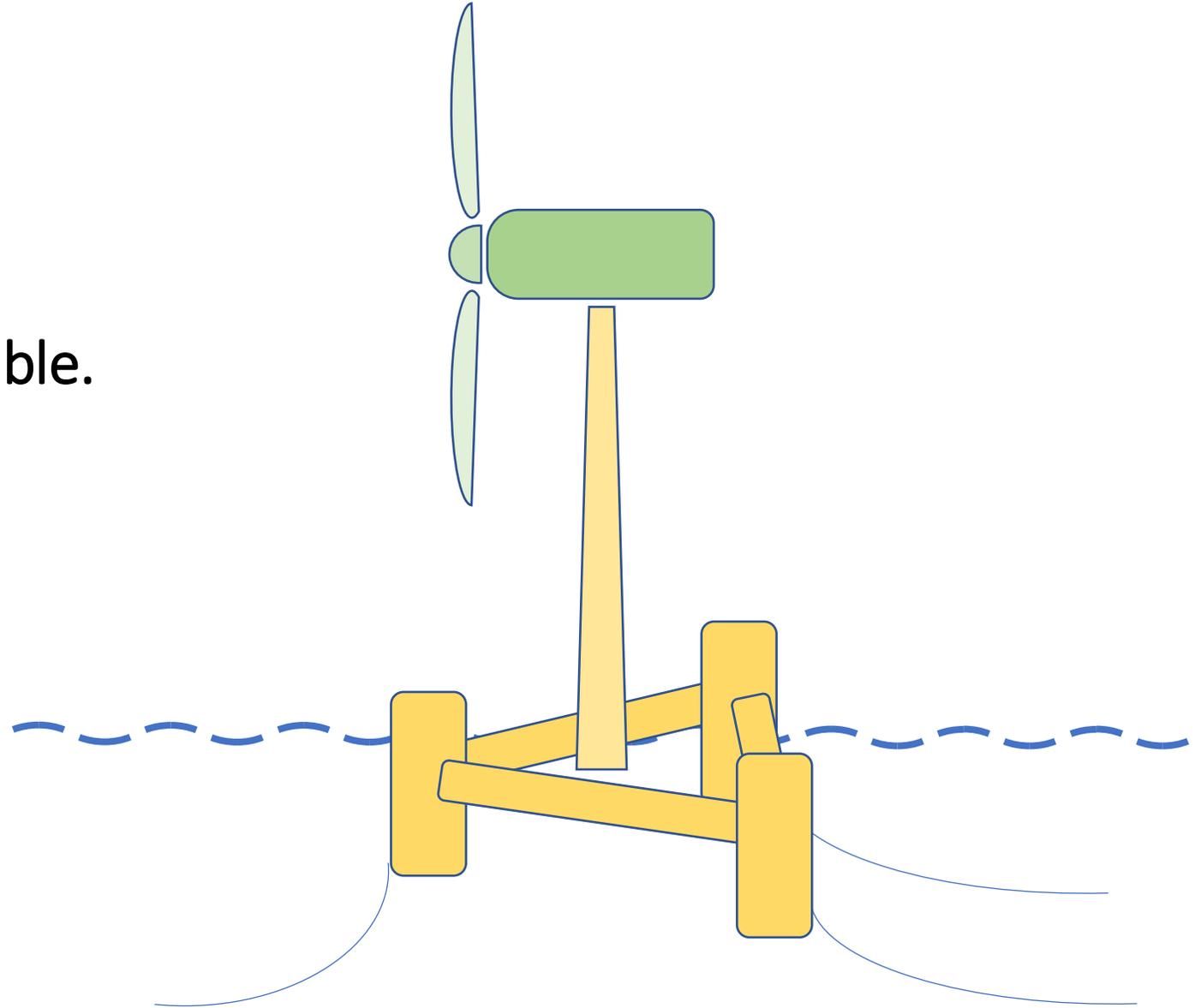


- Cimentación flotante:
 - Spar.
 - Plataforma semisumergible.
 - **TLP (*Tension-Leg Platform*)**.

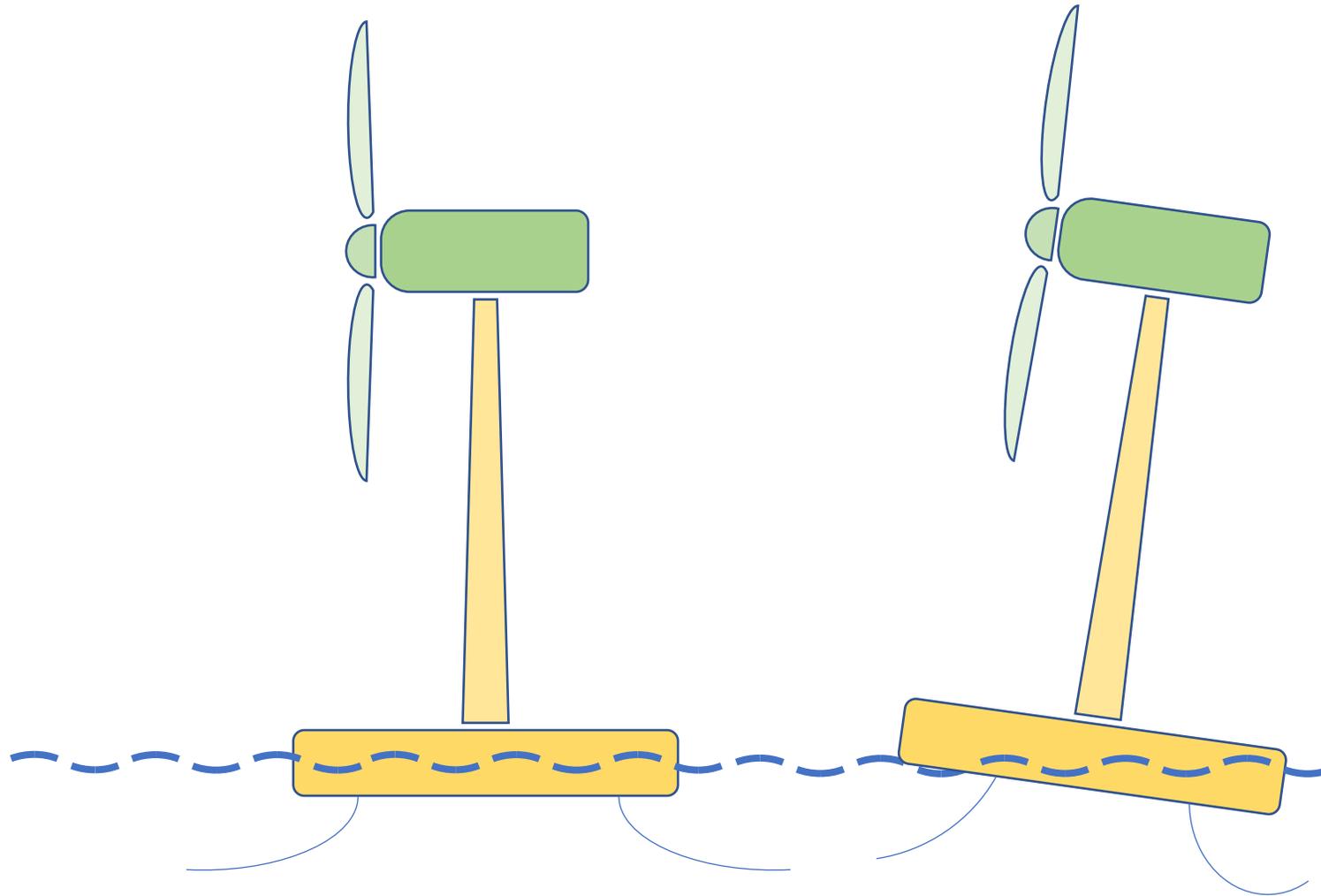


Estado del arte: cimentación

- Cimentación flotante:
 - Spar.
 - **Plataforma semisumergible.**
 - TLP (*Tension-Leg Platform*).



Nuevos retos para los controladores



Nuevos retos para los controladores

1. Lograr mayor rentabilidad de las instalaciones mediante el alargamiento de la vida útil.
2. Permitir una mayor cantidad de energía generada a lo largo de la vida útil, es decir, mayor beneficio económico.
3. Dotar de la capacidad de cumplir los requisitos impuestos por los operadores de los sistemas eléctricos.



2. Control inteligente

Nuevos retos para los controladores

1. La planta tiene un comportamiento complejo, muldi-dominio, difícil de modelar: hidrodinámica, aerodinámica, estructuras, integración eléctrica.
2. Los objetivos de control son cambiantes: condiciones de viento y oleaje, mercado eléctrico.

En estas condiciones, el control inteligente es una alternativa que hay que valorar.

Son condiciones exigentes: al control inteligente a veces se le exigen resultados cuando otras técnicas no los dan.

Control inteligente

- La técnica de control inteligente elegida para desarrollar el controlador ha sido la lógica borrosa (en (Santos 2011) pueden verse diferentes aplicaciones del control inteligente).
- Las características de la lógica borrosa que han decantado esta elección han sido:
 - El sistema a controlar es altamente complejo y no lineal. En particular, las ecuaciones que rigen el comportamiento completo del sistema no tienen solución analítica exacta.
 - El diseño del controlador no es trivial pero sí más sencillo que otro tipo de técnicas.
 - Admite datos imprecisos o con ruido, lo que la hace muy robusta.
 - Puede cooperar con otras técnicas clásicas de control, especialmente con el PI de referencia.
 - Permite la integración del conocimiento experto.
 - Es flexible: es fácil transformar un sistema borroso añadiendo o eliminando reglas sin tener que empezar desde cero. Esta característica es particularmente útil de cara a escalar el controlador para tener en cuenta otros efectos.

Control inteligente

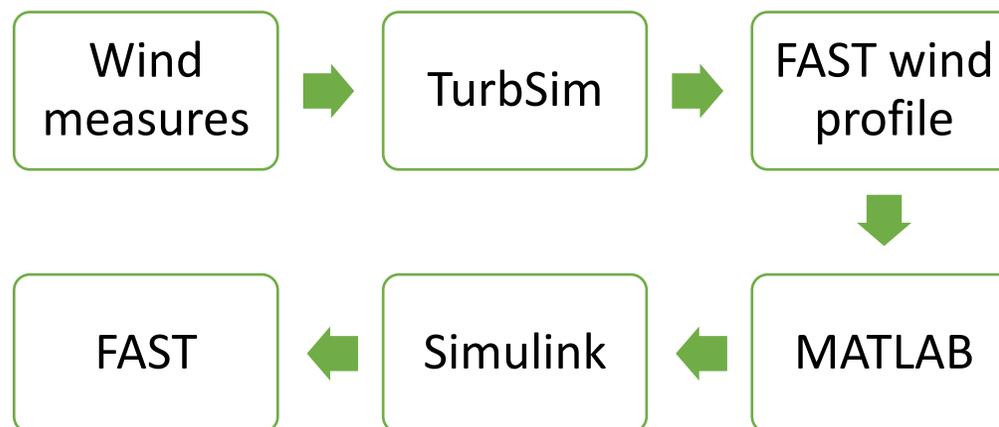
- En lo que sigue, este trabajo muestra el desarrollo y simulación de un controlador inteligente para una plataforma semisumergible de energía eólica *offshore*, sustituyendo o supervisando al controlador convencional.
- Tiene una capacidad de ampliación modular mediante la adición de nuevas reglas, como por ejemplo realimentarlo con los resultados de la interacción entre el control del aerogenerador y el oleaje, o con valoraciones expertas de aspectos ajenos como el estado del *pool* o mercado eléctrico.
- Se han desarrollado dos controladores borrosos, con dos configuraciones diferentes respecto al controlador original del sistema.
- Se han integrado diversas plataformas de simulación para poder validar los controladores.



2. 1. Sistema de referencia: OC4 con aerogenerador NREL 5 MW

Sistema de referencia

- El modelo correspondiente a dicho sistema es extremadamente complejo: efectos aerodinámicos, estructurales, hidrodinámicos, eléctricos.
- Para diseñar controladores el proceso que se ha seguido ha consistido en diseñar primero un controlador inteligente sobre un modelo de referencia, de NREL, empleando los programas FAST, TurbSim y MATLAB/Simulink.



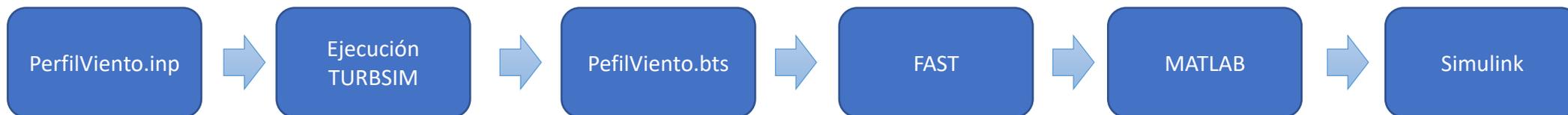
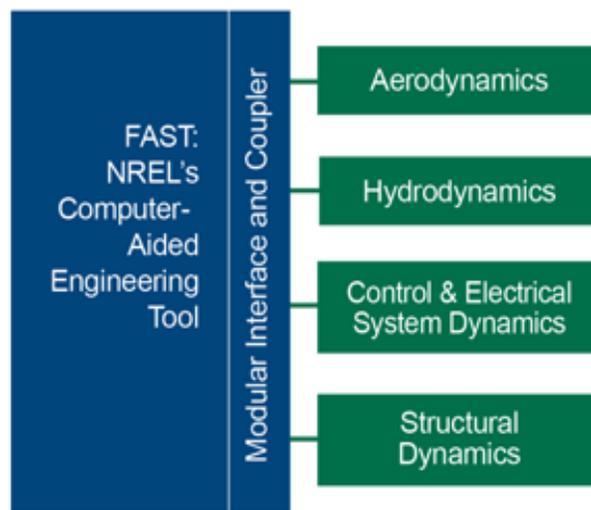
Sistema de referencia

- Por tanto, el modelo de aerogenerador que se toma como referencia es el NREL (National Renewable Energy Laboratory) de 5 MW sobre una plataforma semisumergible OC4 (Jonkman et al. 2009).
- Este aerogenerador es un modelo representativo de los aerogeneradores actualmente en desarrollo para eólica offshore.
- Posee un conjunto de especificaciones que permiten realizar diferentes estudios sobre él en las fases iniciales del desarrollo de nuevos diseños offshore. Basado en el modelo comercial REpower 5M.
- Así mismo, también puede ser utilizado como modelo en el que estudiar técnicas de control.

Principales parámetros del NREL 5 MW.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	5 MW
Orientación del rotor, número de palas	Contra el viento, 3
Control	Velocidad variable, pitch colectivo
Tren motriz	Alta velocidad, caja de cambios multietapa
Diámetro del rotor, diámetro del hub	126 y 3 m, respectivamente
Altura del hub	90 metros
Viento cut-in, nominal y cut-out	3, 11.4 y 25 m/s, respectivamente
Inercia del tren motriz, alta velocidad	4653.4 kgm ²

Software de implantación



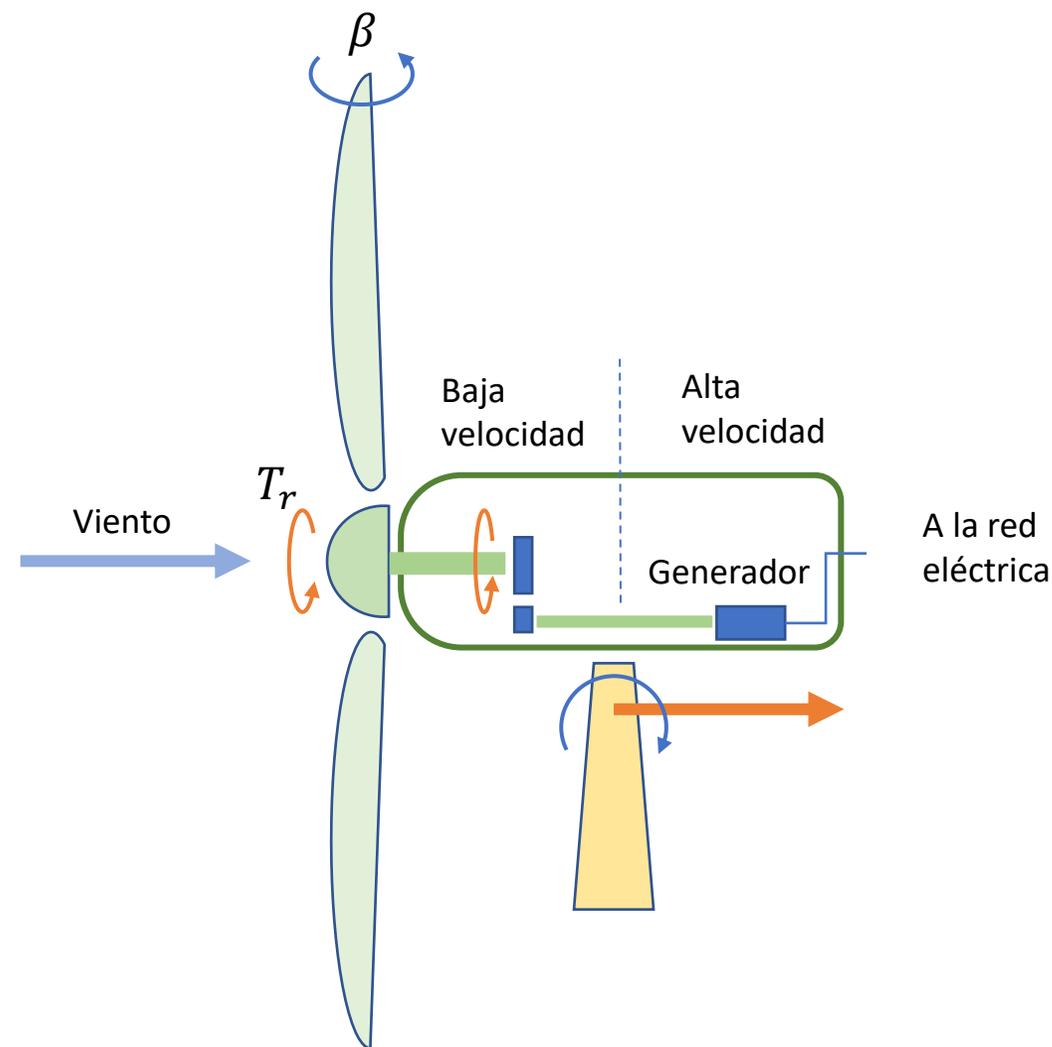
Integración de las herramientas software

1. Modificación de archivos de entrada a FAST para que la simulación se ejecute desde MATLAB/SIMULINK.
2. Enrutado de archivos adicionales para realizar simulaciones en condiciones distintas a las predefinidas.
3. Elaboración del código MATLAB necesario y de los modelos de bloques de SIMULINK. La herramienta de simulación estará lista para probar técnicas de control.

Aerogeneradores

- La energía eólica es la energía cinética que posee el aire en movimiento, que al incidir sobre las palas del aerogenerador hace que gire el rotor.
- Este movimiento de rotación se traslada a un generador eléctrico ubicado en el interior de la góndola, produciéndose una conversión de energía cinética a rotacional y posteriormente a eléctrica mediante efectos electromagnéticos en el generador.
- La cantidad de potencia que se puede captar del viento depende del tamaño del aerogenerador y de la longitud de sus palas.
- Esta cantidad de potencia capturada se expresa como la potencia del viento que afecta al área de barrido del aerogenerador multiplicada por un coeficiente C_p :

$$C_p = \frac{P_{\text{capturada}}}{P_{\text{viento}}}$$



Aerogeneradores

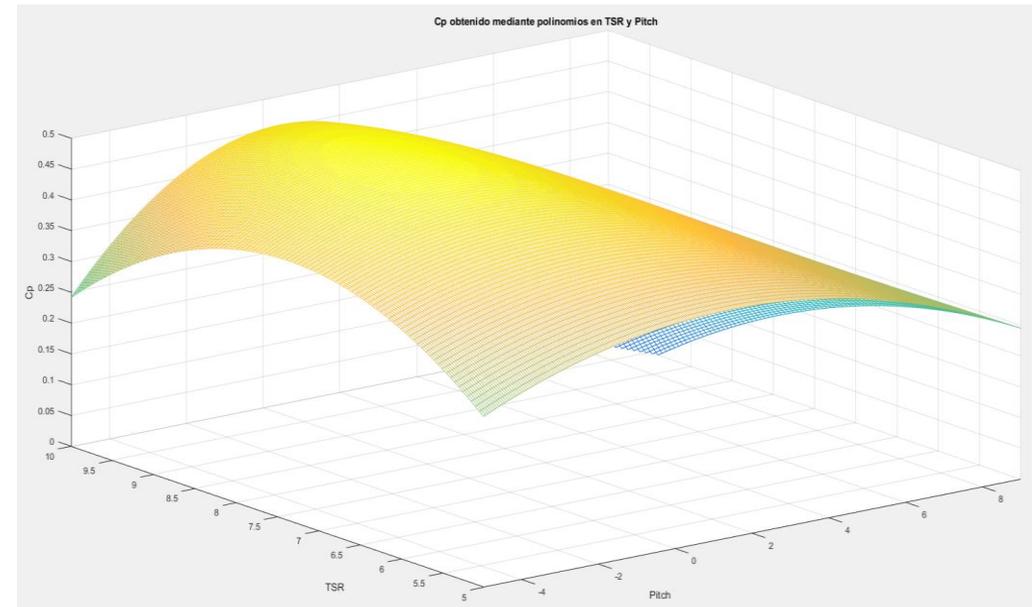
$$C_p = \frac{P_{capturada}}{P_{viento}}$$

- Este coeficiente tiene una dependencia no lineal con el TSR (*Tip to Speed Ratio*, normalmente notado como λ) y con el pitch (β), además de implicar nueve constantes del aerogenerador que generalmente sólo conoce el fabricante.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3\beta - C_4\beta^2 - C_5 \right) e^{-\frac{C_6}{\lambda_1 + C_7\lambda}}$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \left(\frac{1}{\lambda - C_8\beta} - \frac{C_9}{\beta^3 - 1} \right)$$

- Para el modelo estudiado se ha obtenido una superficie que representa el valor de C_p a partir de una expresión del mismo basada en polinomios de segundo grado para el *pitch* y el TSR.
- Se ha comprobado que esta superficie tiene gran exactitud respecto de familias de curvas con TSR o pitch constante realizadas por los creadores del modelo NREL 5 MW.



- Tanto el C_p como el TSR son magnitudes fundamentales en el control de aerogeneradores.

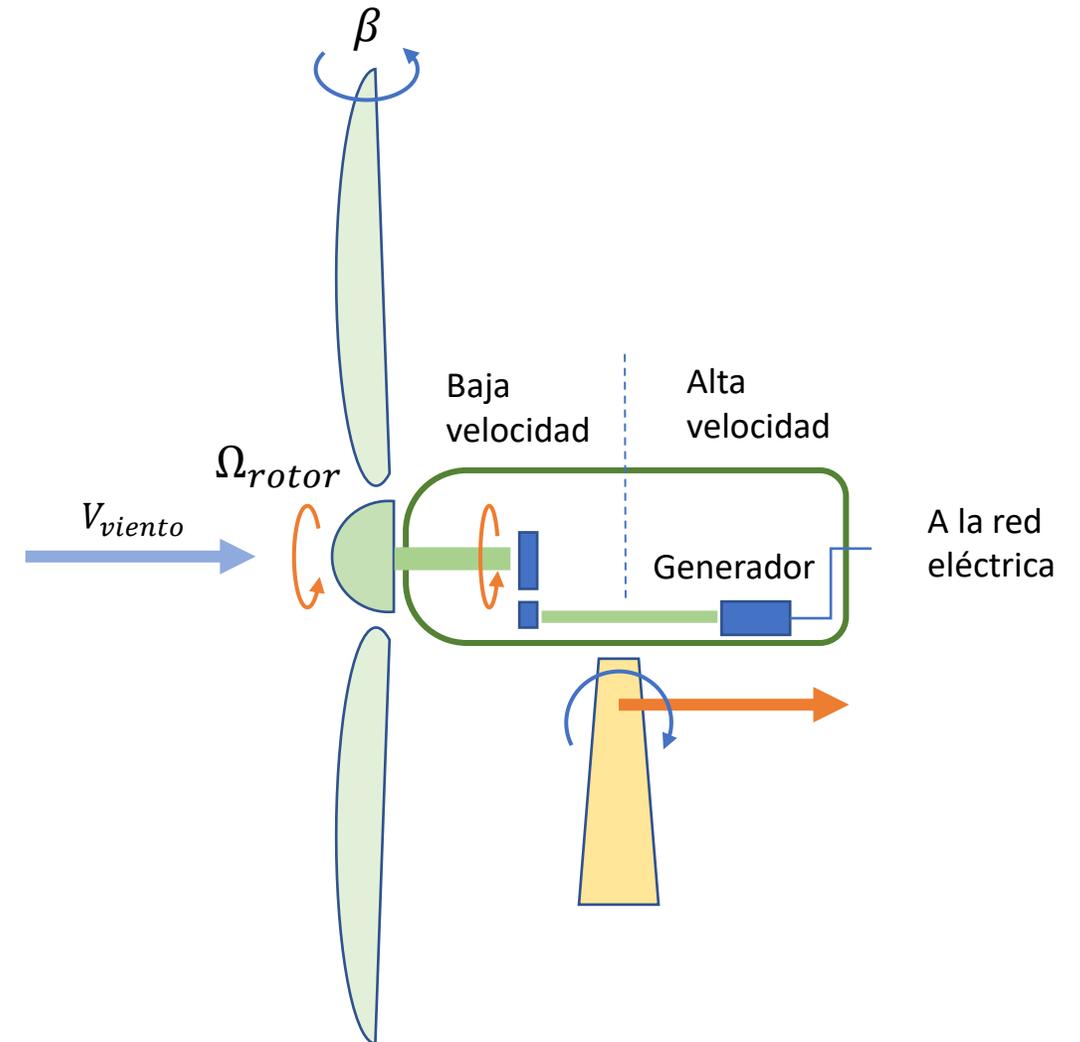
- El TSR se define como la relación entre la velocidad lineal en la punta de las palas y la del viento:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{viento}} = \frac{\Omega_{rotor} \cdot R}{V_{viento}}$$

- Como se ha visto anteriormente, la potencia eólica captada por las palas del aerogenerador depende del TSR y del *pitch* β :

$$C_p = f(\lambda, \beta)$$

- Por lo que el operador del sistema puede cambiar la energía capturada por el aerogenerador:
 - Mayor aprovechamiento del recurso eólico.
 - Menor pérdida de vida útil de los equipos.



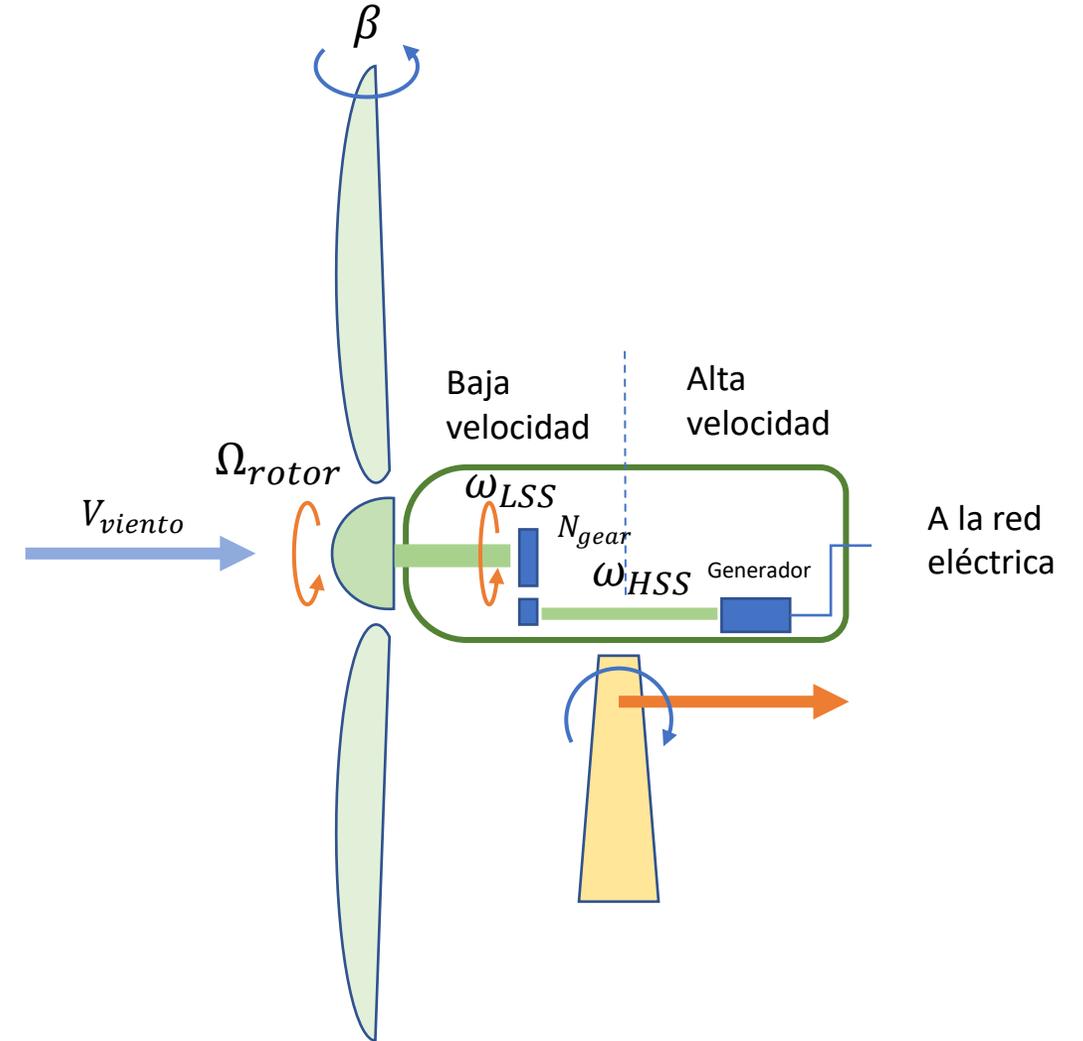
Aerogeneradores

- La potencia del viento se estima mediante:

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{aire}} A_{\text{rotor}} V_{\text{viento}}^3$$

- Es decir, la potencia capturada del viento depende del cuadrado del radio del rotor, lo que hace que se busquen aerogeneradores de mayor tamaño.
- Conociendo la potencia capturada y la velocidad de giro del eje de baja velocidad (calculado como la del eje de alta velocidad, ω_{HSS} , entre la relación de multiplicación de la caja de cambios, N_{gear}), se puede hallar el par del rotor y del eje de baja velocidad (ω_{LSS}) producido por el viento, normalmente llamado T_{Aero} .

$$T_{Aero} = \frac{P_{\text{capturada}}}{\omega_{LSS}} = \frac{P_{\text{viento}} \cdot C_p}{\frac{\omega_{HSS}}{N_{gear}}}$$

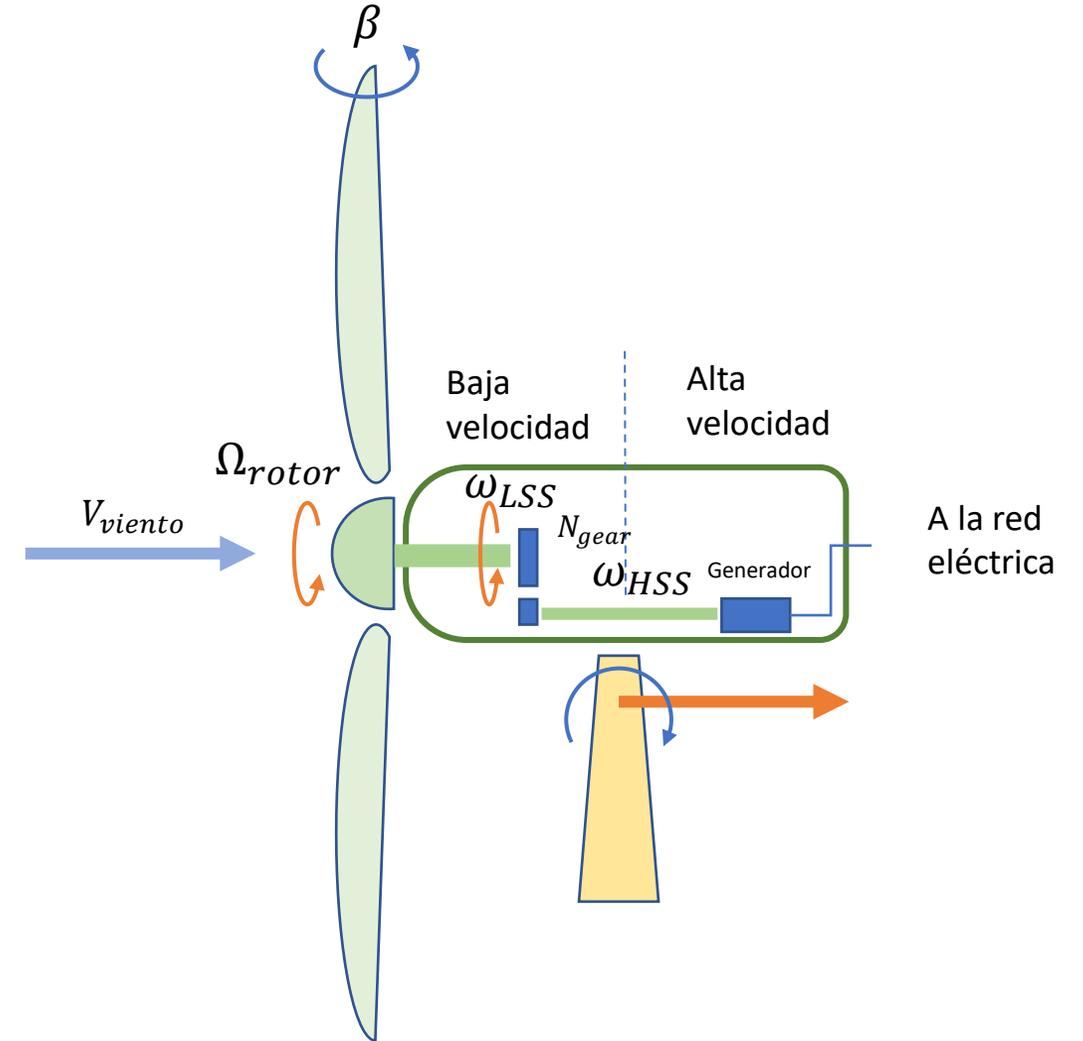


Aerogeneradores

- Por otra parte, se tiene el par del generador o par de control. Esta es una variable que el operador del aerogenerador controla. En el funcionamiento nominal del aerogenerador suele asumir un valor constante e igual al par nominal.

$$T_{\text{Generador}}^{\text{HSS}} = \frac{P_{\text{capturada}}}{\omega_{\text{HSS}}} = \frac{P_{\text{viento}} \cdot C_p}{\omega_{\text{LSS}} \cdot N_{\text{gear}}}$$

- Por tanto, si se plantea el equilibrio sobre el eje de baja velocidad, en el estado nominal se obtiene el resultado ideal de que este gira a velocidad constante.



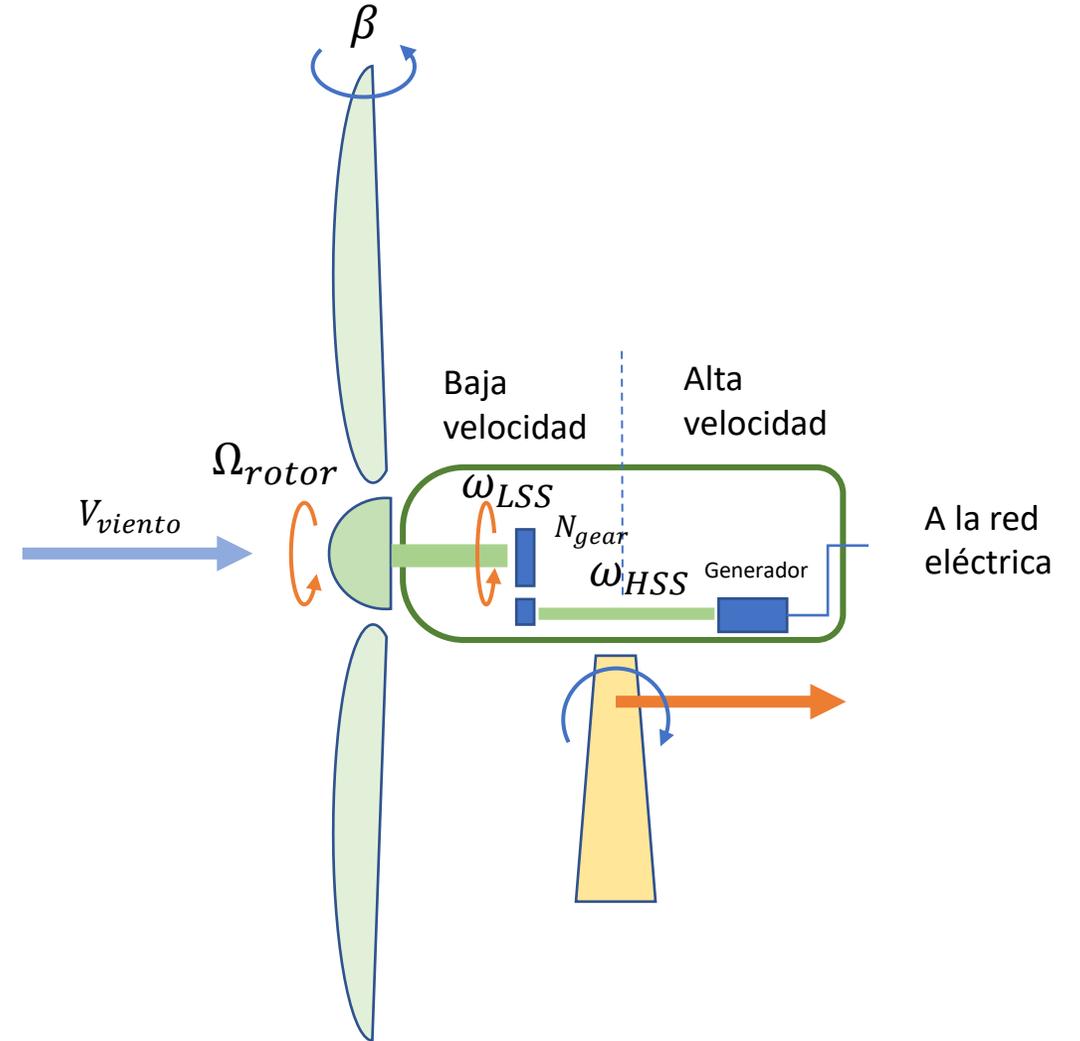
Aerogeneradores

- Ha de tenerse en cuenta que el par del generador está definido respecto de la inercia del eje de alta y que el del viento lo hace respecto del de baja.

$$T_{Aero} - T_{Generador}^{LSS} = I_{Drivetrain} \cdot \alpha$$

$$T_{Generador}^{LSS} = \frac{T_{Generador}^{HSS}}{N_{gear}}$$

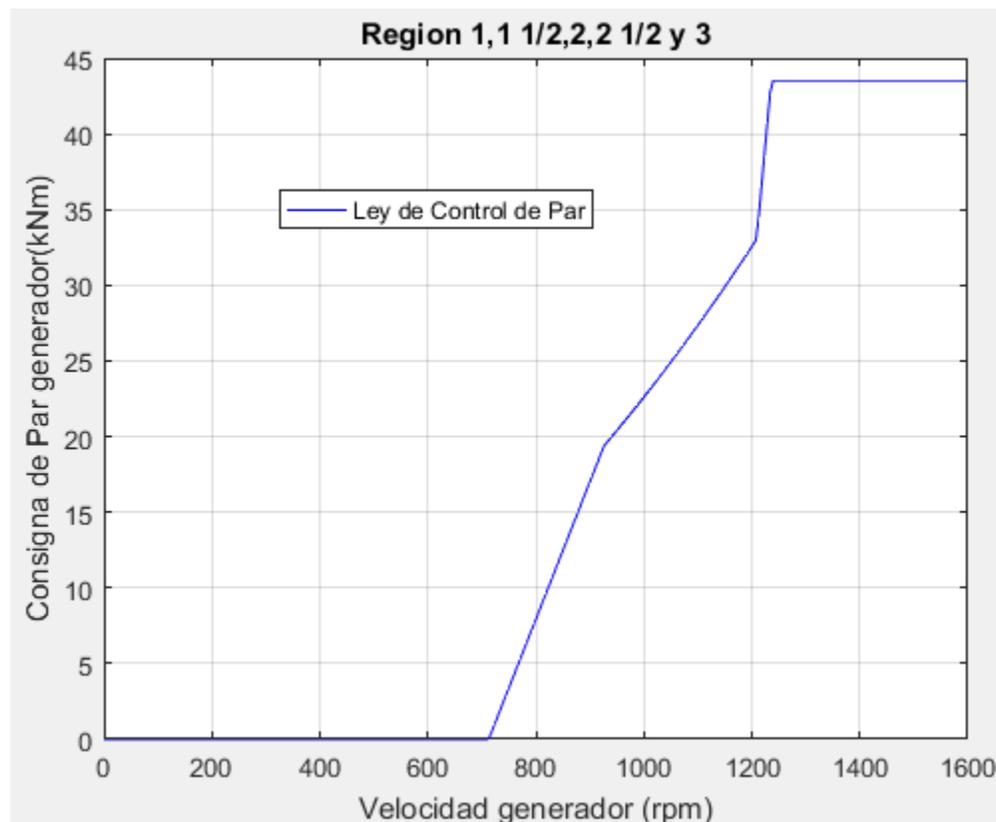
- Donde:
 - $I_{Drivetrain}$ es la inercia referenciada al eje de baja velocidad, ya que los dos pares también están calculados respecto de esa referencia.
 - α representa la aceleración angular de los ejes, cuya variación es común a ambos.
- Por tanto, actuando bajo las variables de control $T_{Generador}^{HSS}$ y β (*pitch*) se puede regular el comportamiento del aerogenerador en cuanto a potencia extraída, velocidad, par provocado por el viento, etc.



Sistema de control

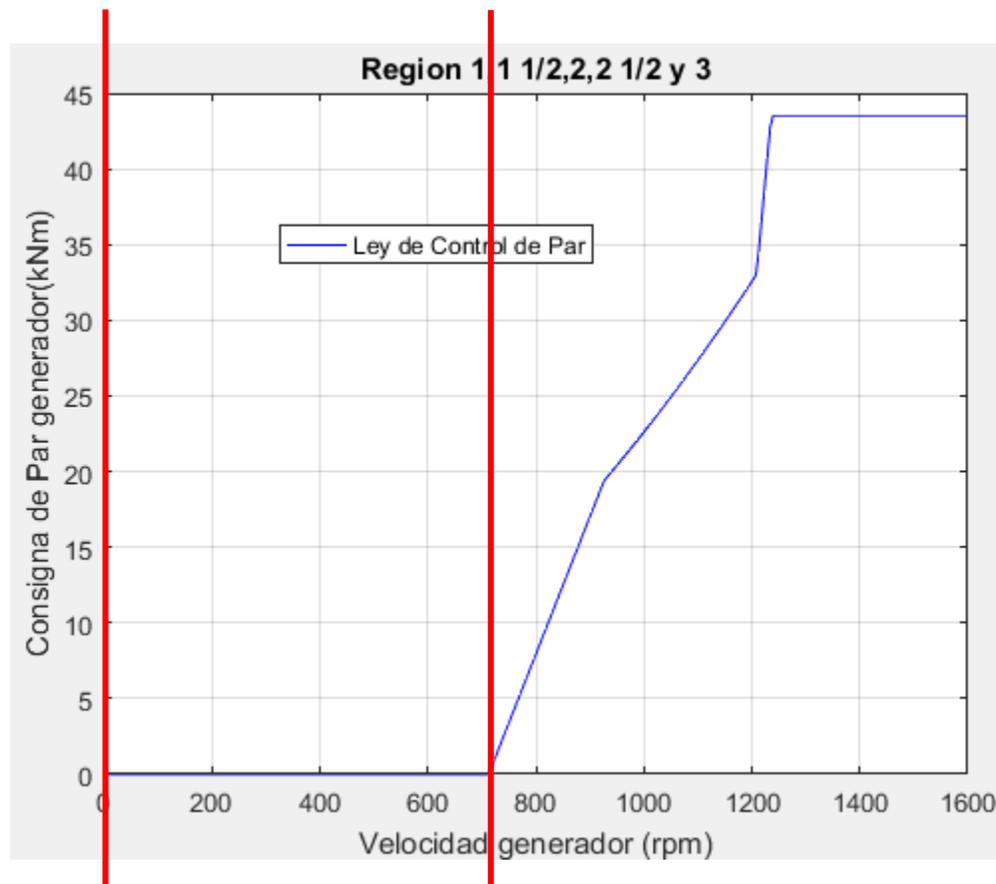
- A partir del sistema de referencia basado en NREL 5MW, se ha usado MATLAB/Simulink y FAST para implementar el controlador PI de referencia que propone NREL, y para desarrollar sistemas de control mediante lógica borrosa.
- El sistema de control contemplado como referencia se basa en dos subsistemas: control del par del generador y control sincronizado del *pitch* de las palas.
- Estos dos sistemas están pensados para funcionar de forma prácticamente independiente, ya que el primero actúa cuando la velocidad del viento está por debajo de la nominal y el segundo cuando está por encima.
- Asimismo, el objetivo del primero es capturar la máxima potencia posible del viento siguiendo un algoritmo MPPT, mientras que el del segundo es regular la velocidad del generador cuando se opera por encima del viento nominal.
- Este segundo sistema de control descrito se utilizará como referencia de comparación con los controladores desarrollados.

Sistema de control de par



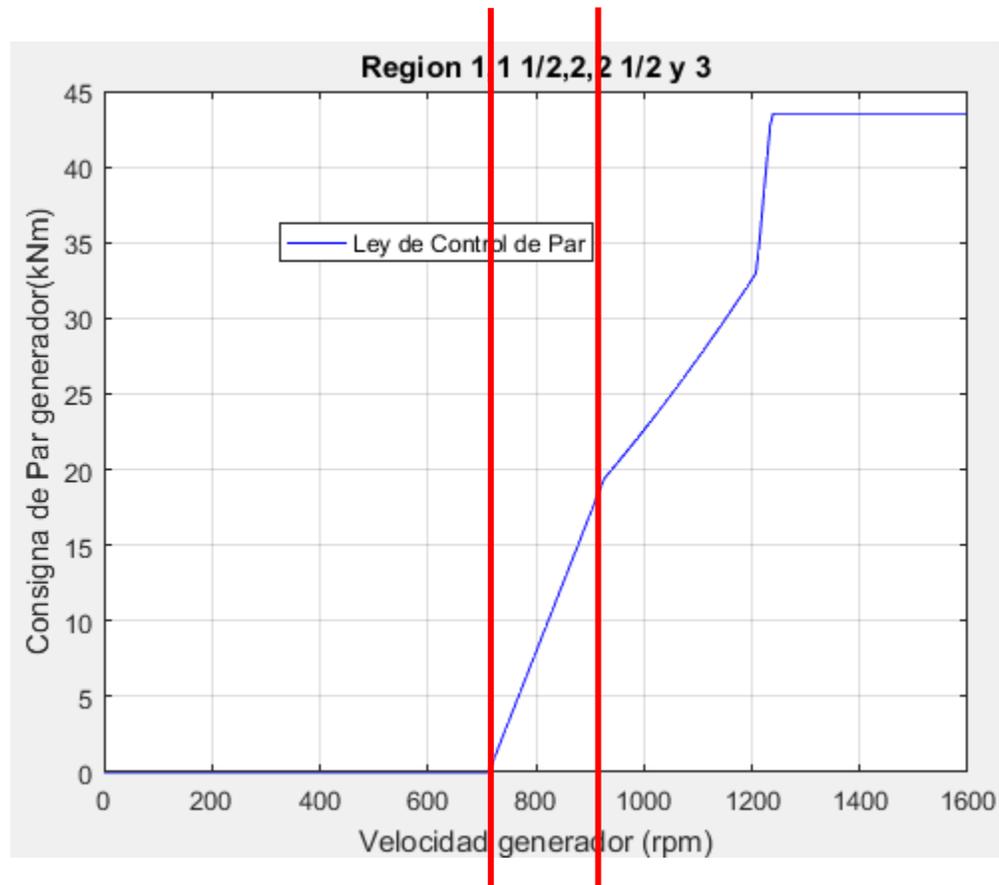
- El par del generador se regula mediante una función determinista, definida a trozos en función de la velocidad del generador filtrada.
- Dicha función, de carácter teórico, se compone de cinco regiones de control, denominadas 1, 1 ½, 2, 2 ½ y 3.
- Estas regiones definen diferentes comportamientos.

Sistema de control de par



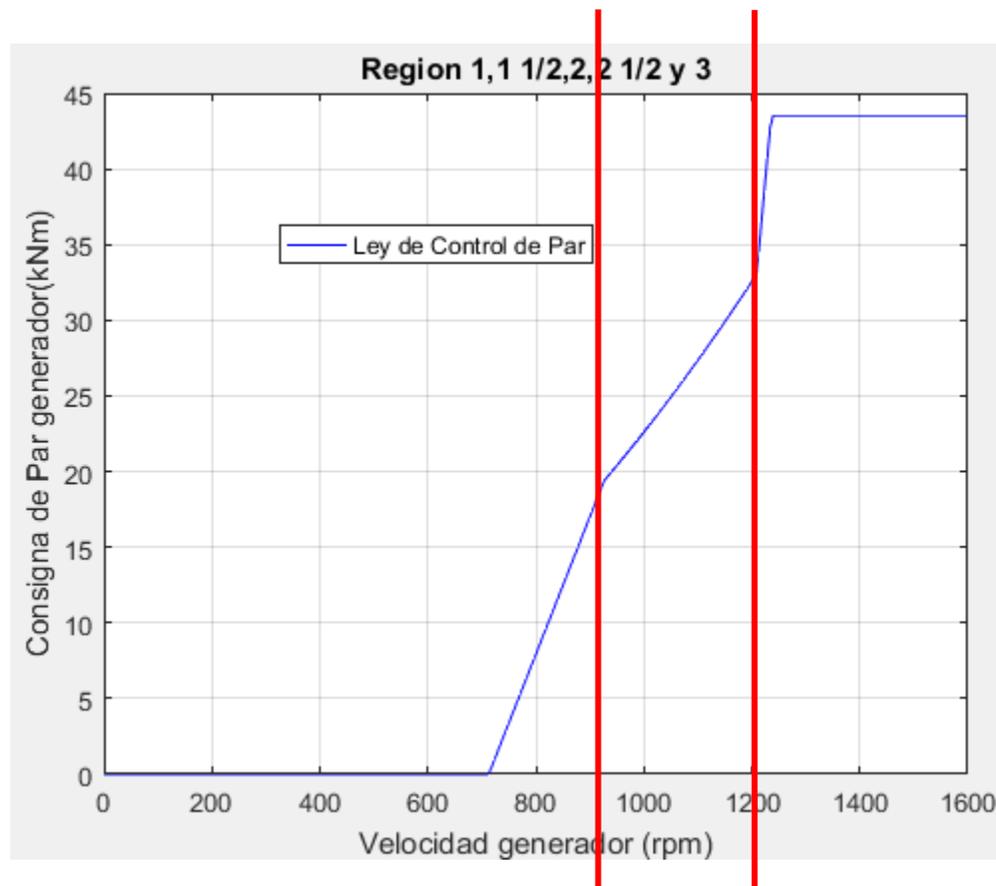
- La región 1 abarca hasta que el viento alcanza la velocidad de *cut-in* (punto en que el aerogenerador comienza a suministrar potencia).
- El par se mantiene a cero y, por tanto, no se extrae potencia del aerogenerador. La potencia eólica capturada se utiliza para acelerar el rotor.

Sistema de control de par



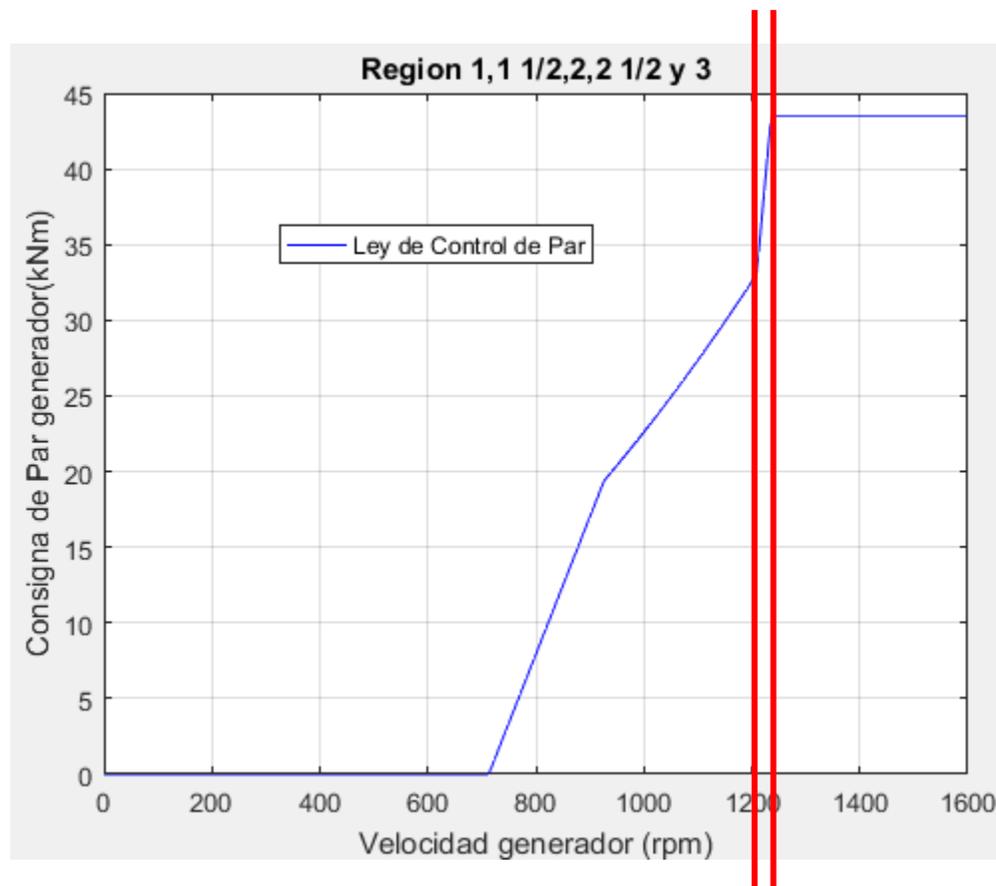
- La región 1 ½ es de arranque, siendo una transición lineal entre la 1 y la 2.

Sistema de control de par



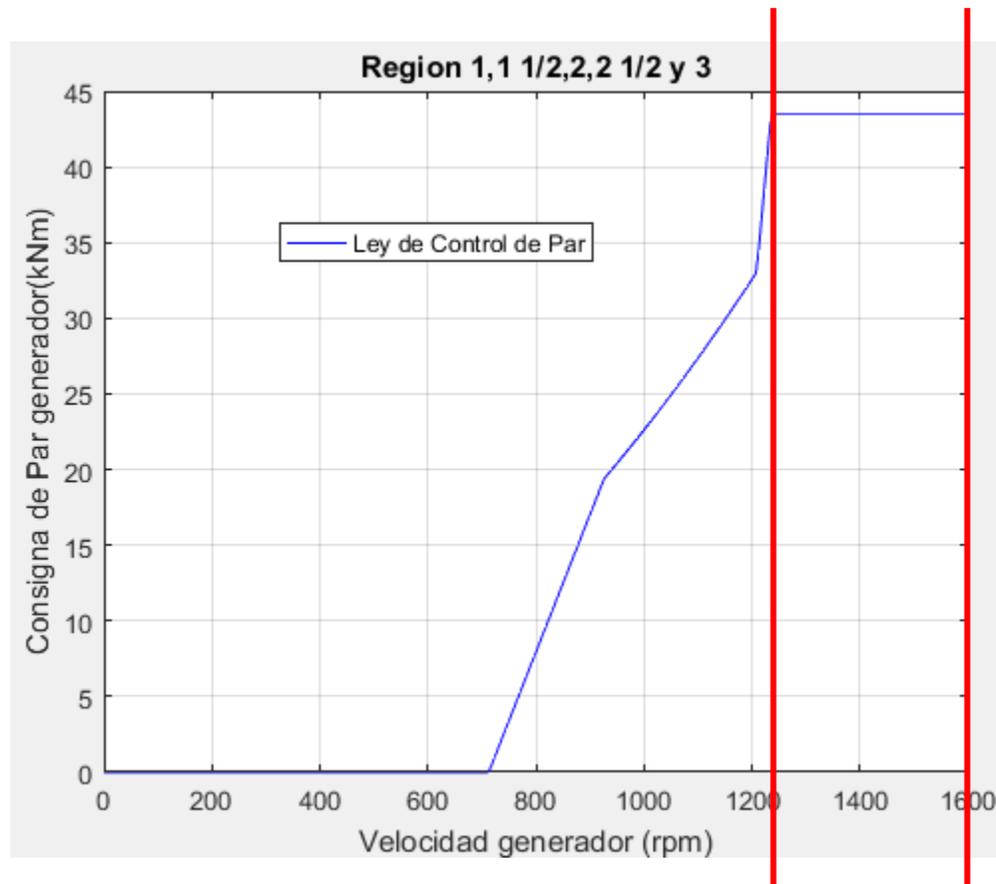
- La región 2 busca el punto de máxima potencia para un determinado viento (MPPT).
- El par es proporcional al cuadrado de la velocidad del generador para mantener el (TSR) constante e igual al valor óptimo.

Sistema de control de par



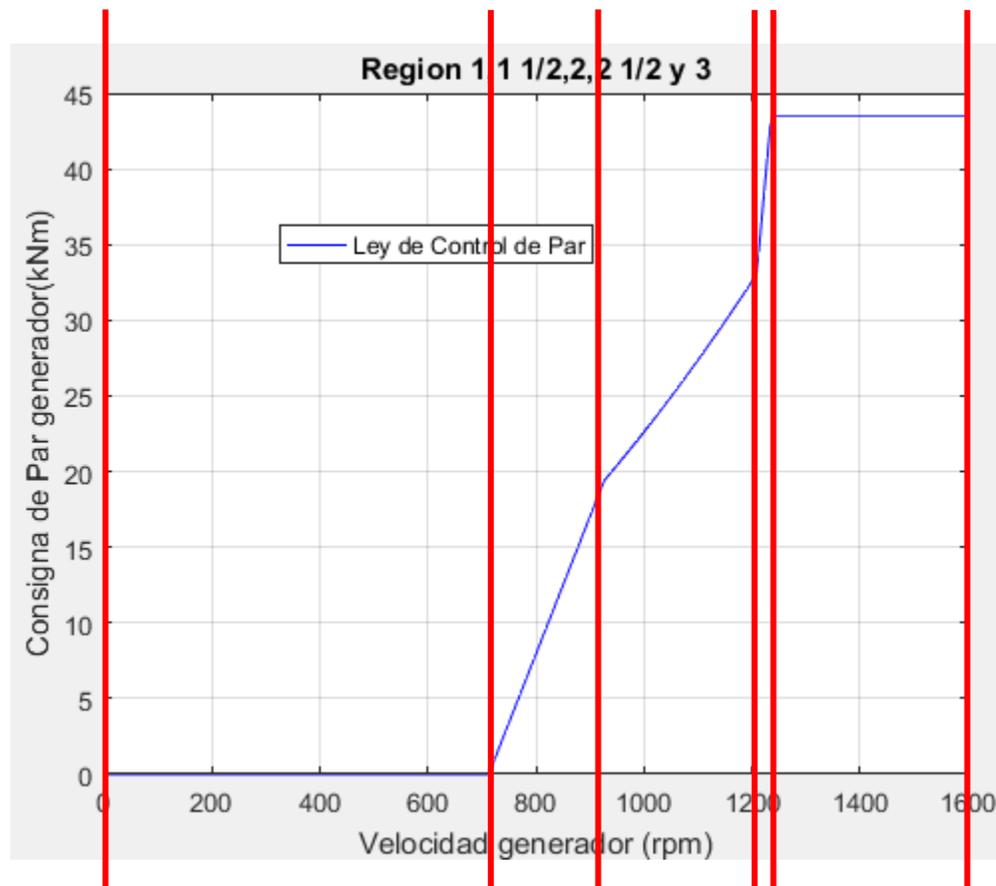
- La región 2 ½ es necesaria para limitar el ruido cuando se alcanza la potencia nominal.
- Además, permite una transición lineal entre la 2 y la 3, con un incremento del par directamente proporcional a la que posee el generador eléctrico.

Sistema de control de par



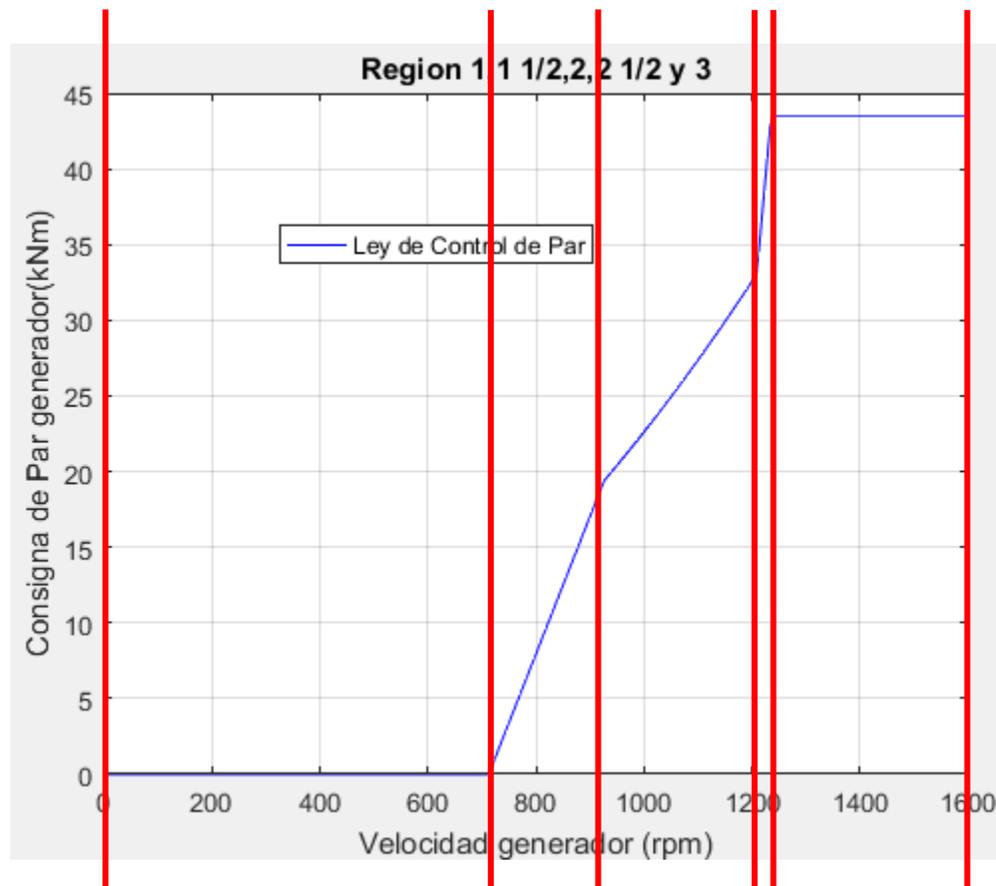
- La región 3 comprende el funcionamiento cuando el aerogenerador está produciendo potencia nominal, por lo que el par es constante e igual a su valor nominal.

Sistema de control de par



- Para poder caracterizar numéricamente las regiones, NREL buscó la potencia máxima en función del TSR y del pitch realizando simulaciones con diferentes valores de los mismos, encontrando que el coeficiente de potencia máximo $C_{p_{opt}}$ es de 0.482; con TSR_{opt} de 7.55 y pitch (β_{opt}) de cero.
- A partir de estos valores se definen las constantes que delimitan las regiones y que dan el valor de par correspondiente en cada una de ellas.

Sistema de control de par



- Por otra parte, el par se ha limitado a, como máximo, un 10% por encima del valor nominal y se ha limitado su máximo valor de cambio. Esto corresponde a 47402.91 N·m y 15000 N·m/s en valor absoluto, respectivamente.
- Estas limitaciones, en la práctica, suavizan las transiciones entre las regiones de par de la ley de control teórica.

Sistema de control de pitch

- En la región 3 del control de par anteriormente descrita actúa un PI en base al error, calculado como velocidad del generador filtrada menos la nominal del mismo.
- Dicho PI calcula la consigna de *pitch* que debe seguir el aerogenerador a partir del error y de ganancias proporcional e integral que se ven modificadas por una función del valor actual de *pitch* de las palas (*gain-scheduling*).
- NREL diseñó el PI considerando como único grado de libertad la rotación del eje, describiendo el problema mediante:

$$T_{Aero} - N_{gear}T_{Gen} = (I_{Rotor} + I_{Gene}N_{gear}^2) \frac{d}{dt} (\Omega_0 + \Delta\Omega) = I_{DT}\Delta\dot{\Omega}$$

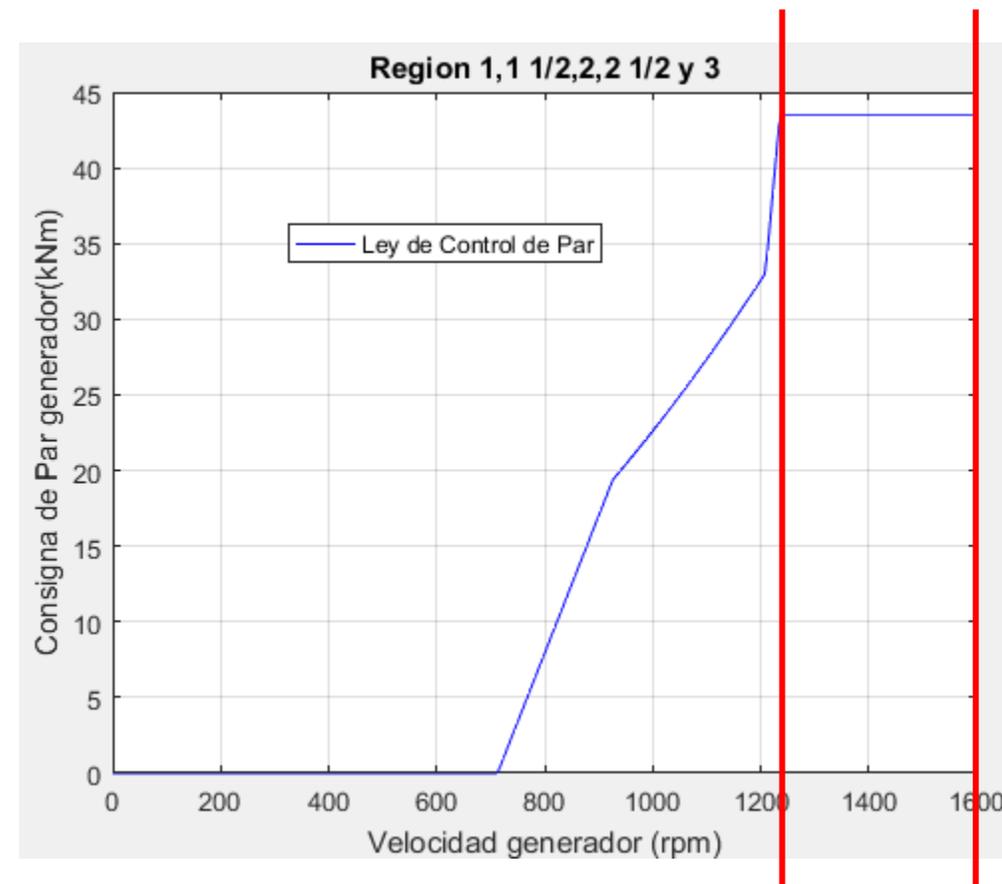
- En la región 3 el par del generador es constante:

$$T_{Gen} = \frac{P_0}{N_{gear}\Omega}$$

- Se puede asumir que el valor del par aerodinámico sólo depende del *pitch*:

$$T_{Aero}(\theta) = \frac{P(\theta, \Omega_0)}{\Omega_0}$$

- Desarrollando la ecuación se obtienen los valores de las ganancias integral y proporcional que formarán el PI. Estos valores corresponden a la situación en que el *pitch* del aerogenerador es nulo.



Sistema de control de pitch

- Para que el PI funcione correctamente, NREL proporciona una ley de ganancias o *gain-scheduling* para modificar los valores de K_I y K_P , según:

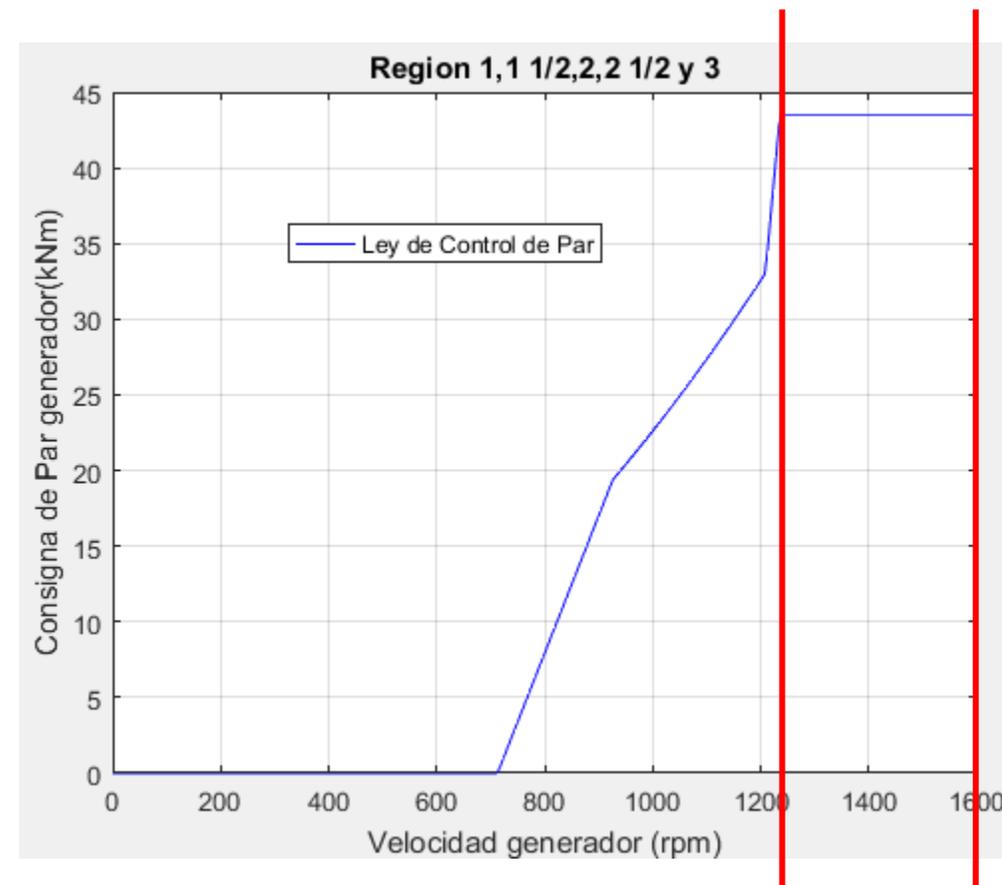
$$GK(\theta) = \frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_k}}$$

- Donde θ_k representa cómo a medida que se aumenta el *pitch* se reduce la potencia capturada del viento (sensibilidad que posee la potencia aerodinámica respecto del pitch).
- De esta forma, la ecuación representativa del PI que NREL diseñó para el NREL 5 MW, asumiendo que se calcula el *pitch* $\theta_{PID}(t + \Delta t)$ utilizando el *pitch* $\theta_{PID}(t)$ dado por el controlador en la iteración anterior para calcular el valor de GK es:

$$\theta_{PID}(t+\Delta t) = GK(\theta(t)) \cdot K_I(\theta = 0) \cdot \int e(t) + GK(\theta(t)) \cdot K_P(\theta = 0) \cdot e(t)$$

- Donde el error de velocidad se calcula como:

$$e(t) = V_{gen} - V_{nom}$$





2.2. Controlador borroso



Desarrollo de controladores borrosos

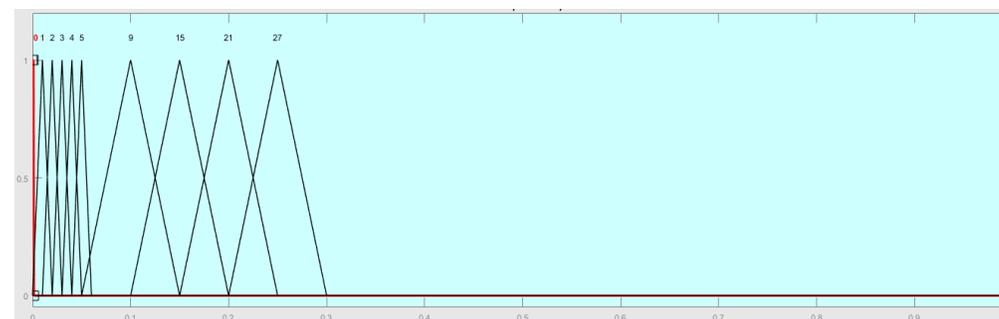
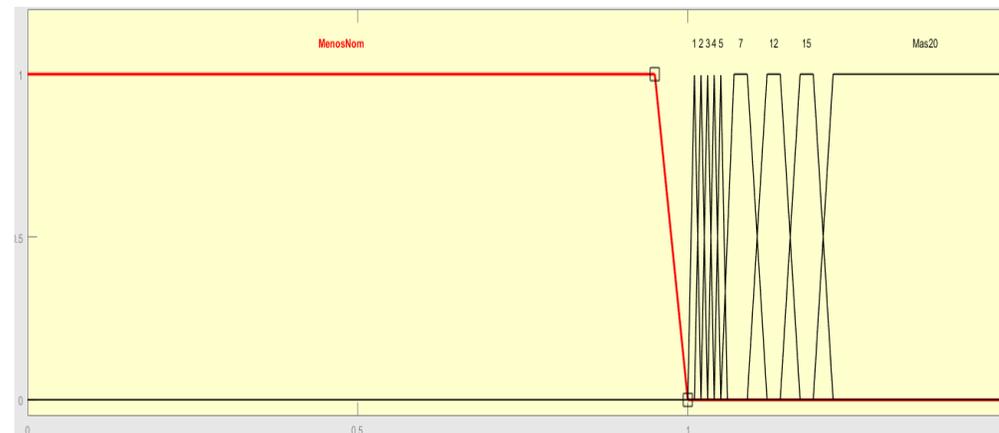
- Desconocimiento previo del tipo de controlador borroso idóneo para el sistema. Exploración de las principales alternativas de topología de controlador:
 - Controlador borroso independiente (tipo B).
 - Controlador borroso que modifica las ganancias del PI de referencia (tipo C).
- Validación y ajuste de los controladores mediante simulaciones con viento perfectamente uniforme.

Desarrollo de controladores borrosos

- El controlador borroso recibirá únicamente la velocidad instantánea del generador filtrada, normalizada según la velocidad nominal, y producirá una consigna final de *pitch*, normalizada según el *pitch* máximo del aerogenerador.
- Se ha validado este diseño comparándolo con el PI de referencia en simulaciones bajo perfiles de viento de turbulencia despreciable y velocidad constante.
- El controlador es de tipo Mamdani, y utiliza los operadores *min* para AND, *max* para OR, *min* para la inferencia y *max* para la agregación.
- El método de desborrosificación es el método del centroide.

Desarrollo de controladores borrosos

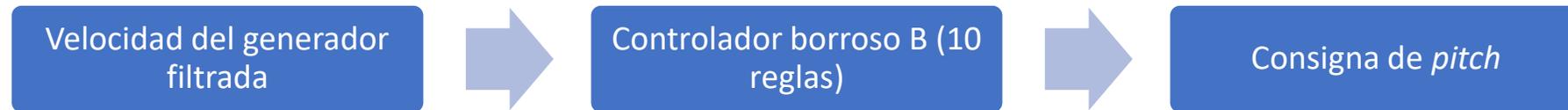
- La definición de las funciones de entrada se ha basado en establecer diferentes valores clave de velocidad por encima de la nominal.
- Las funciones de salida han seguido un proceso similar, estableciéndose diferentes valores clave de *pitch*.
- El conjunto de reglas se ha diseñado basándose en la integración del conocimiento experto adquirido por EnerOcean, asociando niveles clave de *pitch* a diferentes valores de velocidad del generador utilizando las funciones de pertenencia definidas anteriormente.
- Dichos niveles de *pitch* han requerido ajuste fino, partiendo de valores recomendados en base a prognosis.



```

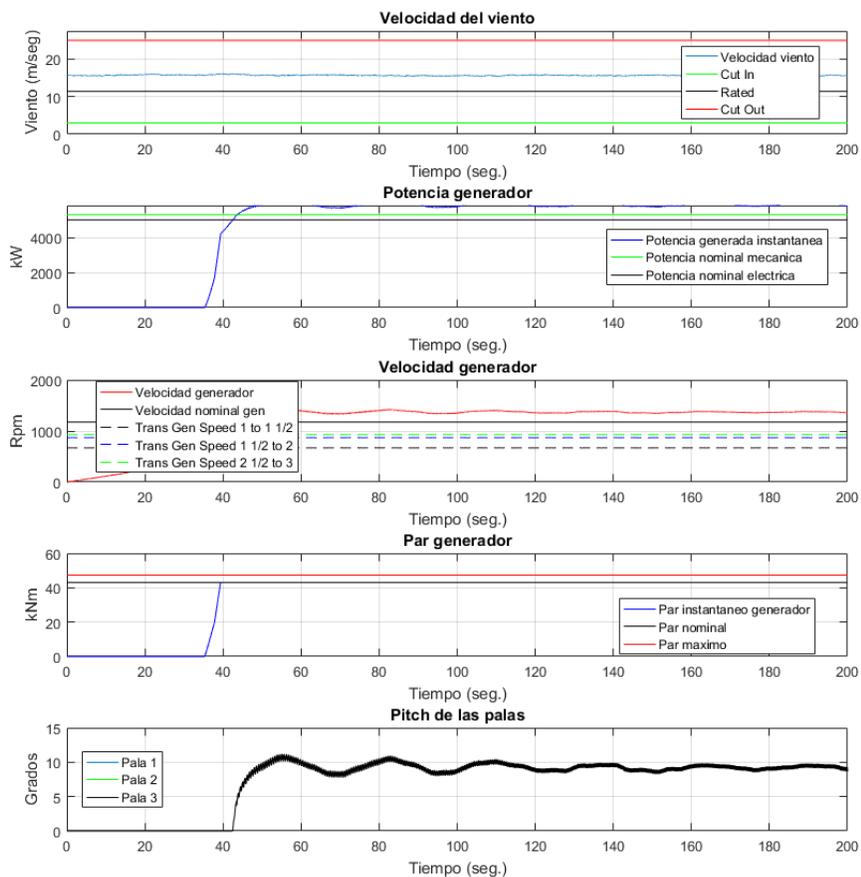
1. If (GenSpeed is UWn) then (PitchFuzzy is Cero) (1)
2. If (GenSpeed is A1) then (PitchFuzzy is 1) (1)
3. If (GenSpeed is A2) then (PitchFuzzy is 2) (1)
4. If (GenSpeed is A3) then (PitchFuzzy is 3) (1)
5. If (GenSpeed is A4) then (PitchFuzzy is 4) (1)
6. If (GenSpeed is A5) then (PitchFuzzy is 5) (1)
7. If (GenSpeed is A7) then (PitchFuzzy is 9) (1)
8. If (GenSpeed is A12) then (PitchFuzzy is 15) (1)
9. If (GenSpeed is A15) then (PitchFuzzy is 21) (1)
10. If (GenSpeed is A20) then (PitchFuzzy is 27) (1)
  
```

Controlador borroso independiente (tipo B)

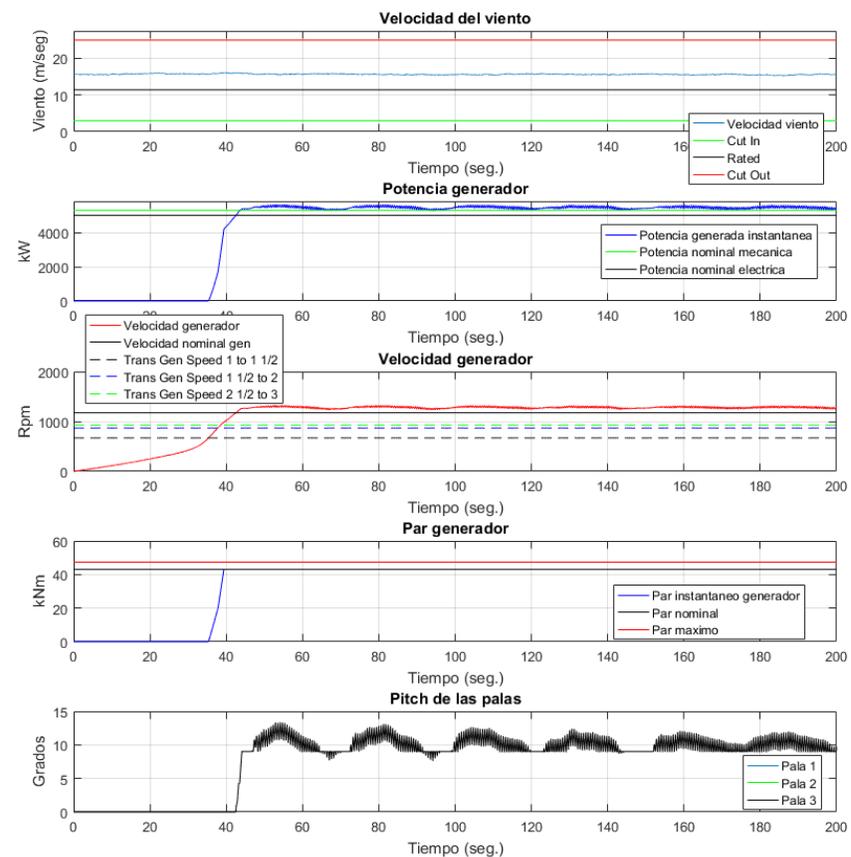


Controlador tipo B: validación

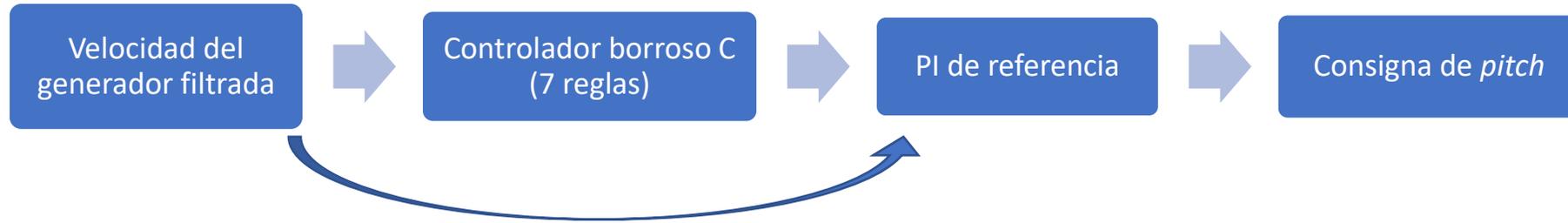
PI de referencia



Borroso B

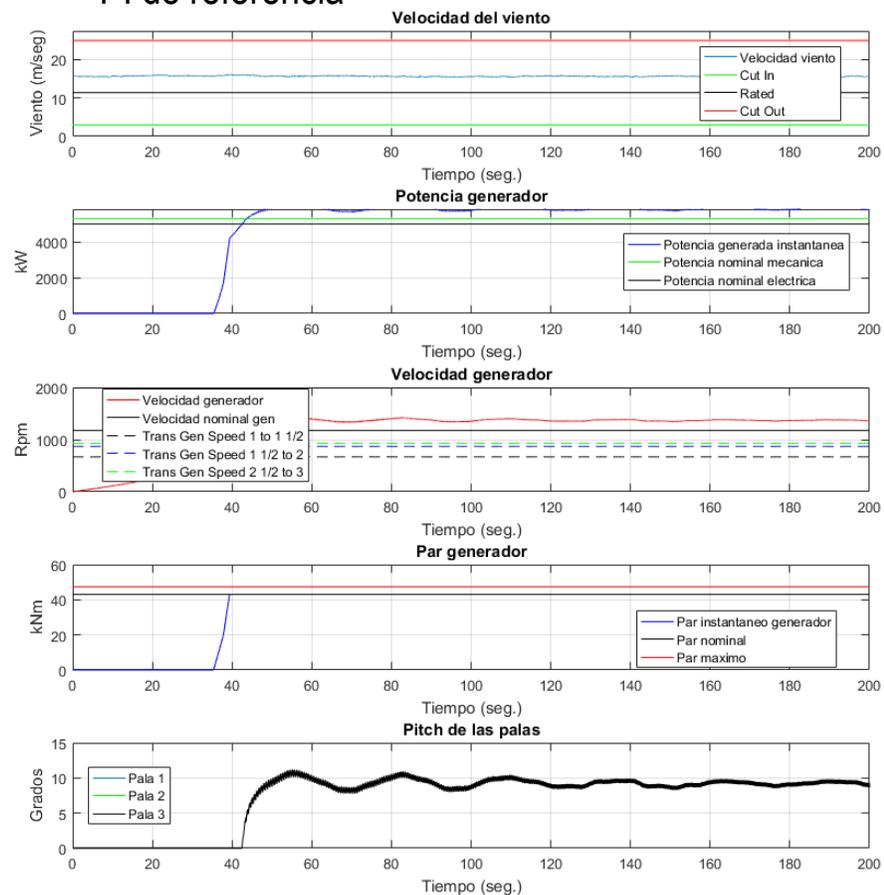


Controlador borroso supervisor del PI (tipo C)

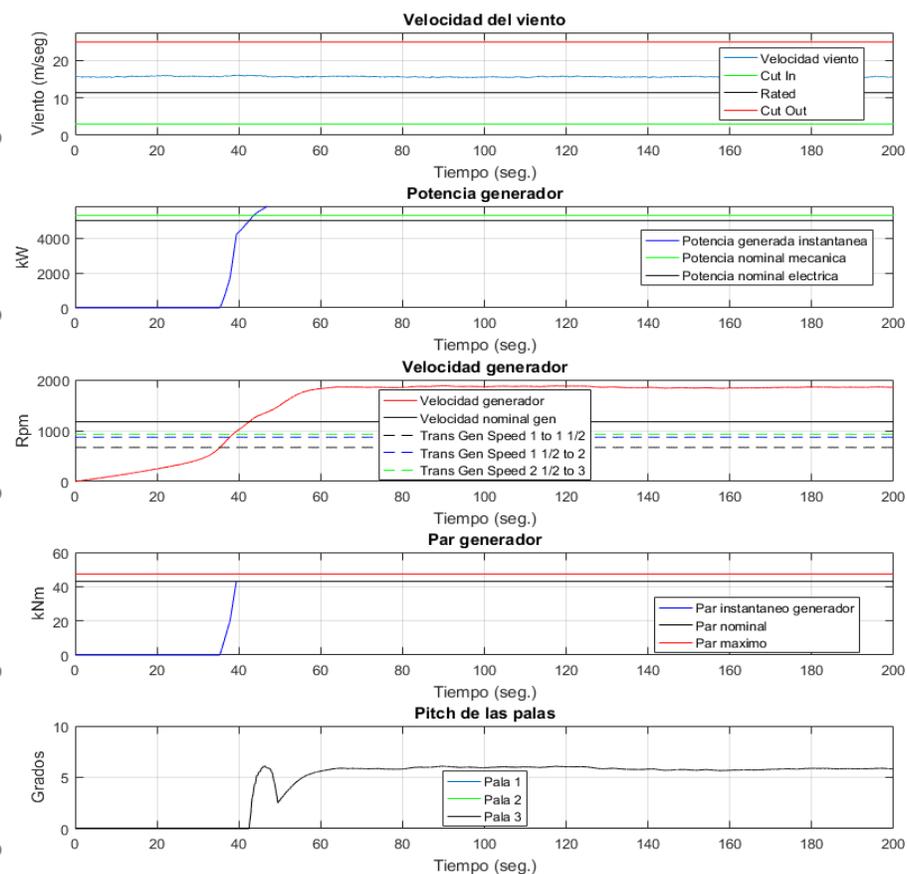


Controlador tipo C: validación

PI de referencia



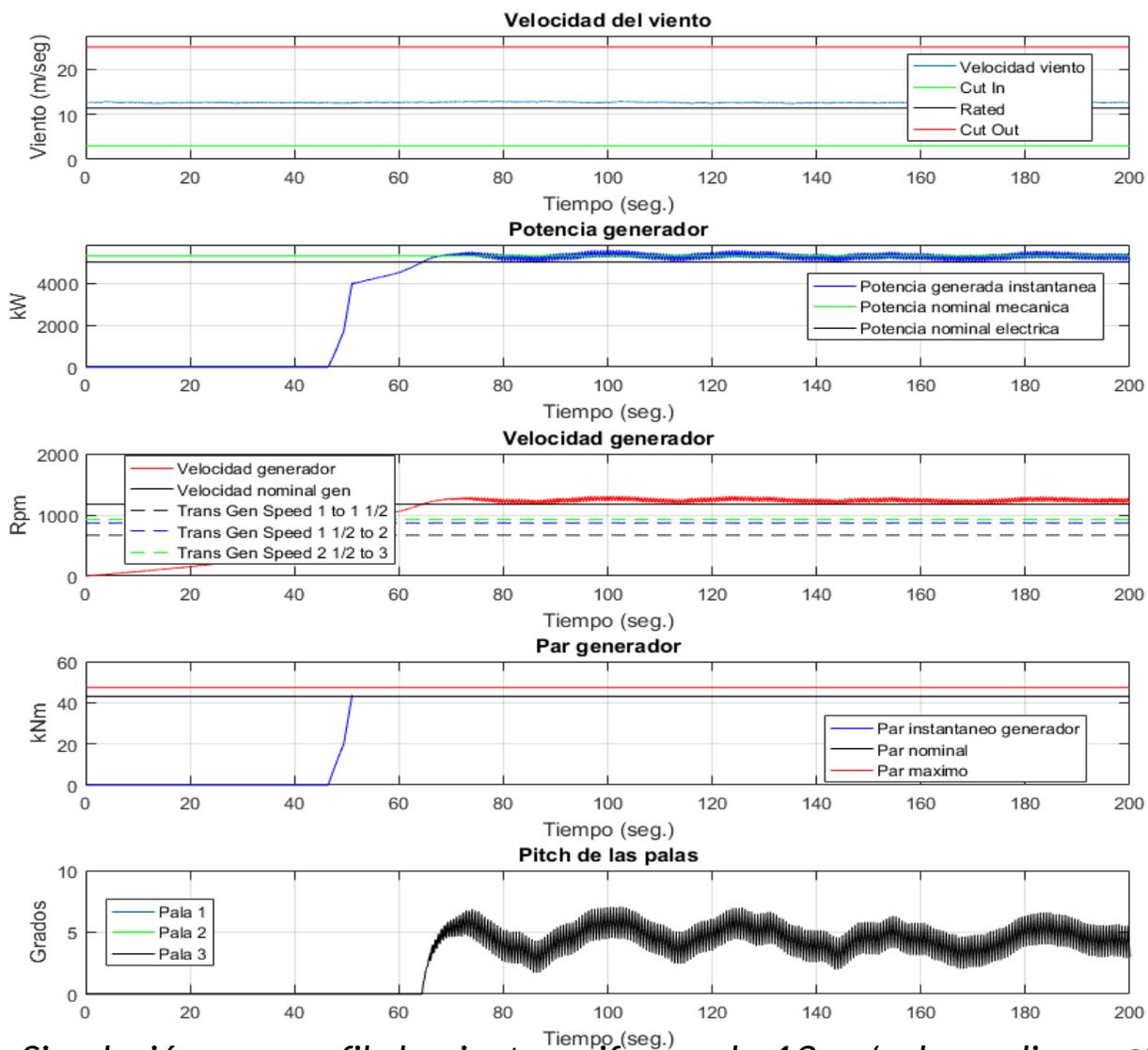
Borroso C



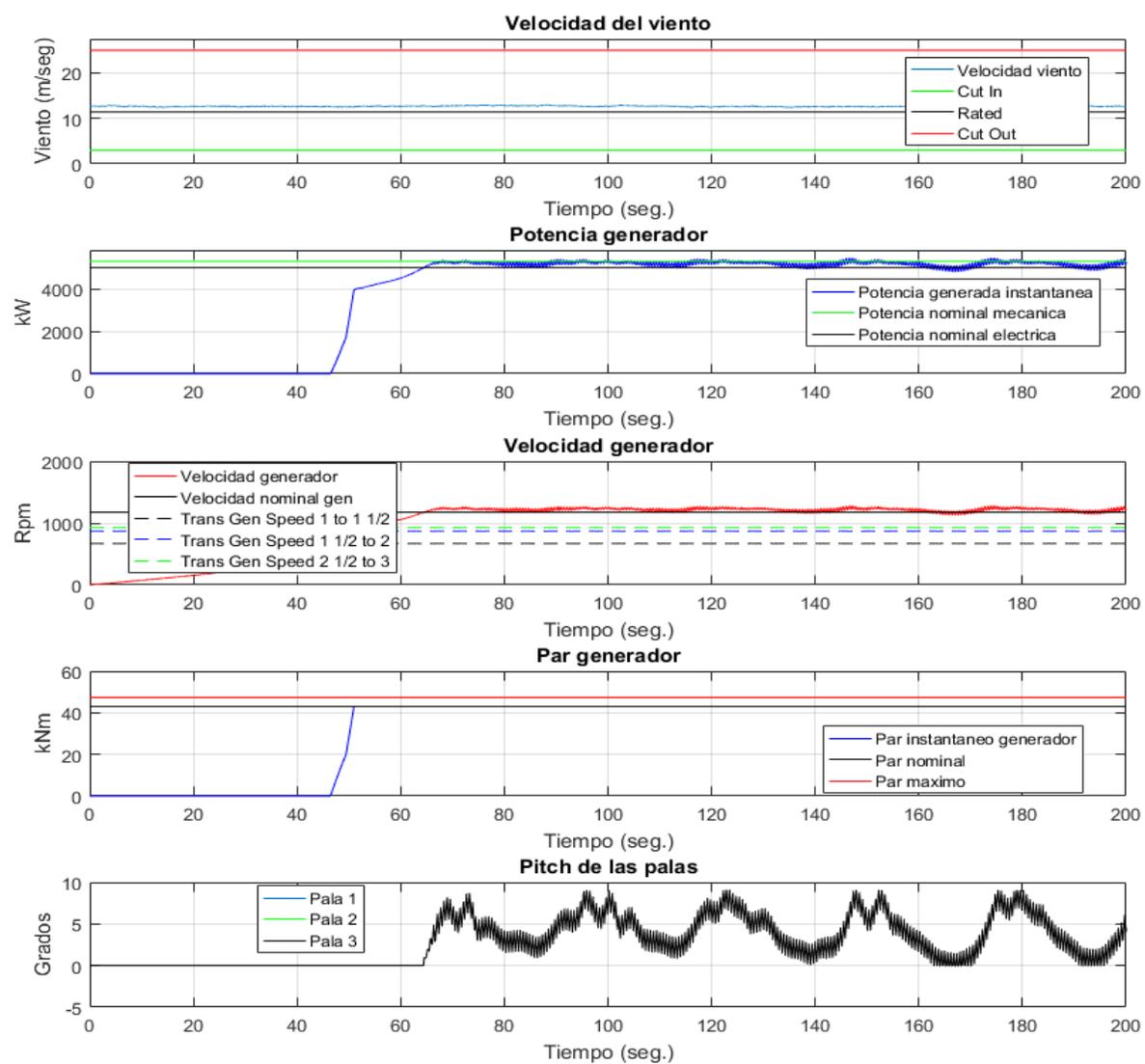
Validación

- Para ajustar los controladores se han realizado simulaciones con viento constante de diferentes velocidades medias.
- Estos son casos sencillos que han permitido ajustar el controlador adecuadamente.
- Se observa como el controlador borroso produce un buen comportamiento, especialmente en cuanto a mantener la velocidad del generador próxima a su valor nominal, confirmando el buen comportamiento las demás magnitudes.
- Esto se observa para todas las velocidades de viento, pero sobre todo para aquellas mayores que la nominal.
- Por tanto, el controlador borroso mejora la operación en regímenes de viento superiores al nominal comparado el PI de referencia de NREL.

Validación



Simulación con perfil de viento uniforme de 13 m/s de media, control con PI de referencia.

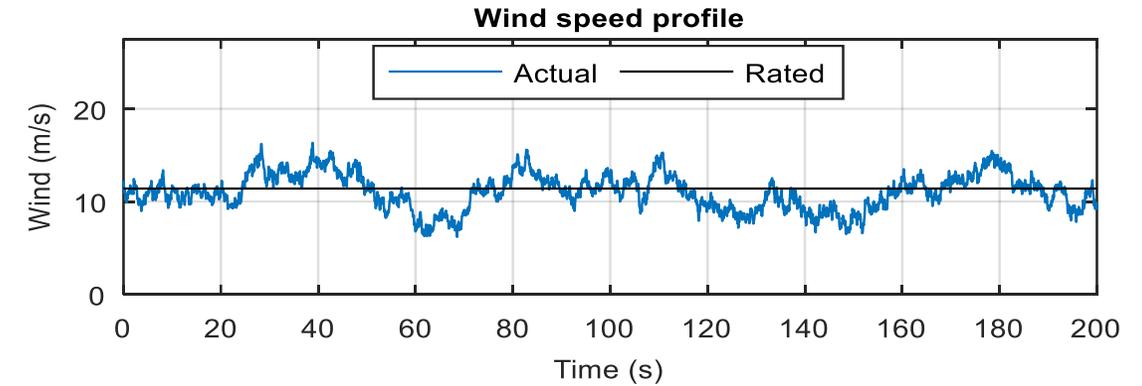


Simulación con perfil de viento uniforme de 13 m/s de media, control mediante el controlador borroso independiente.

Resultados en simulación (NREL 5MW)

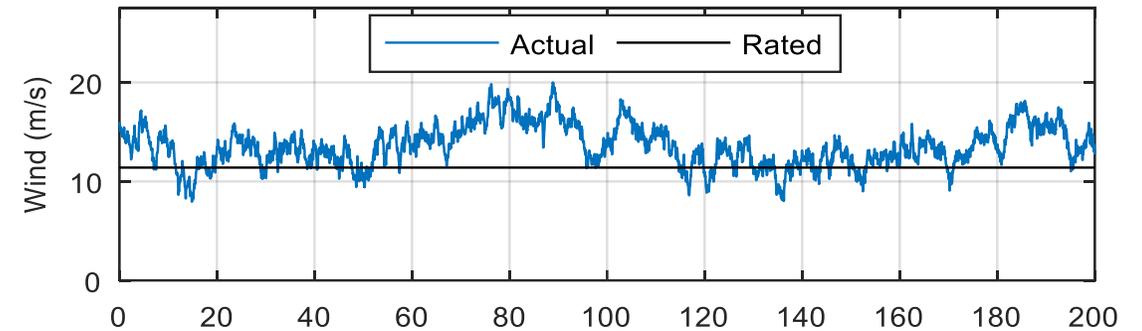
Escenario 1: 12 m/s, turbulencia A

Comportamiento en torno al punto de operación nominal (11.3 m/s).



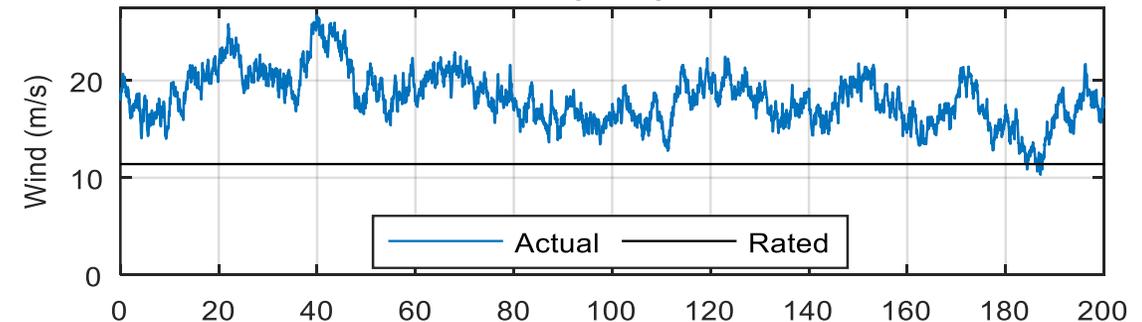
Escenario 2: 15 m/s, turbulencia A

Comportamiento por encima del nominal, pero por debajo de la velocidad máxima del viento. Perfil de viento intermedio.



Escenario 3: 18 m/s, turbulencia A

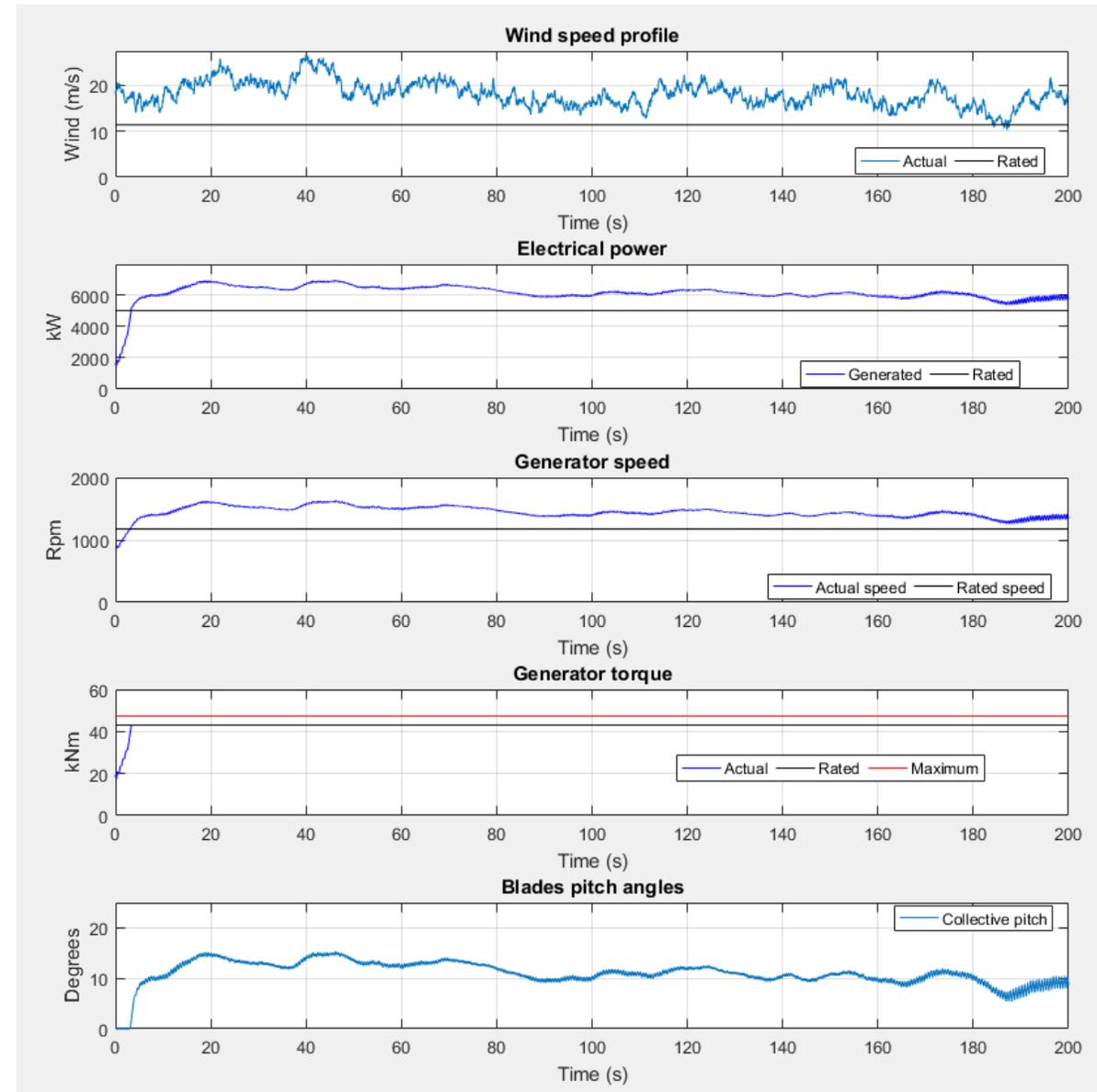
Comportamiento por encima de la velocidad de viento máxima (25 m/s).



Resultados en simulación (NREL 5MW)

Controlador PI de referencia

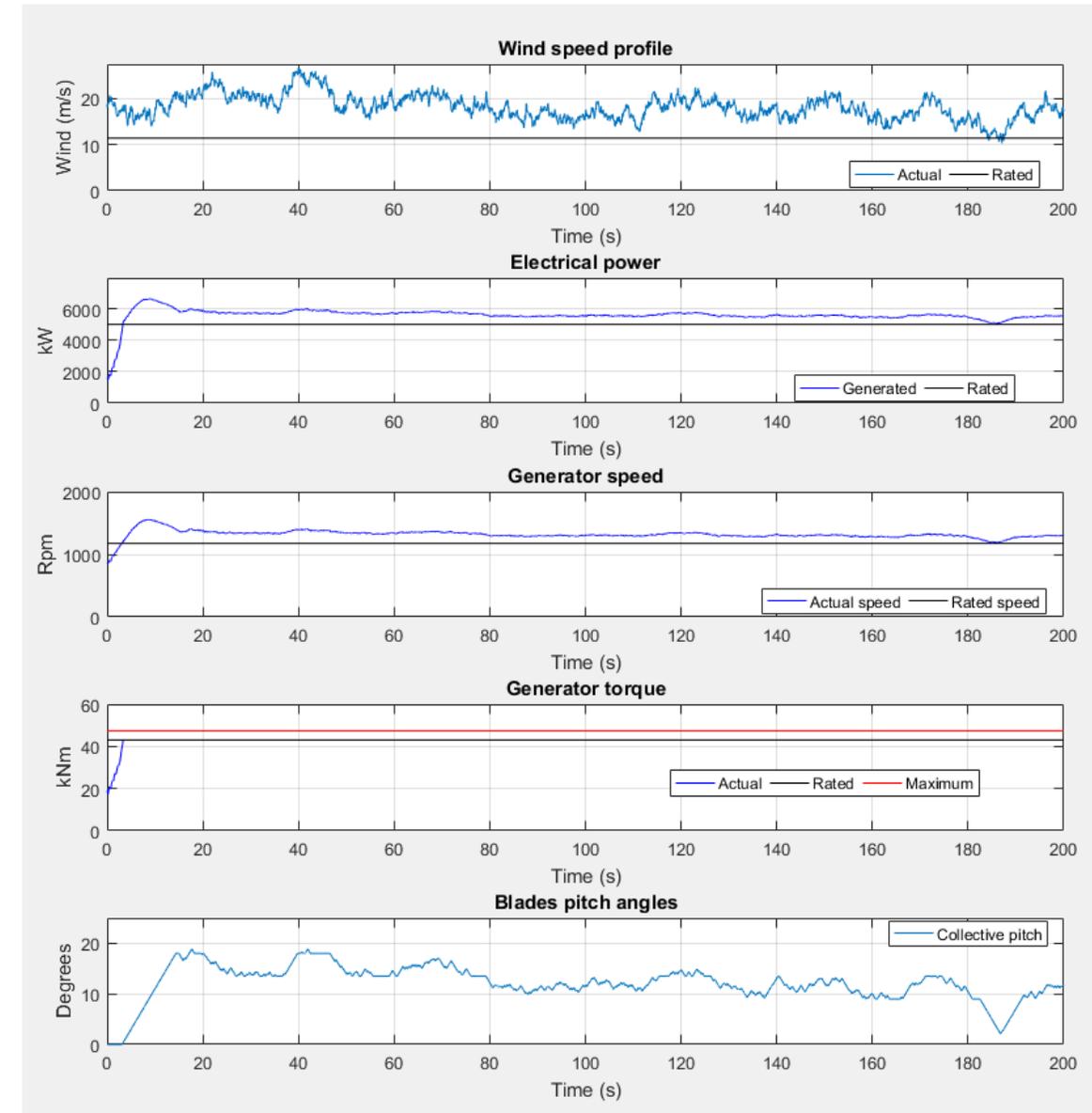
- El PI de referencia muestra sus limitaciones.
- Velocidad del generador inestable.
- Notable error en seguimiento de velocidad.



Resultados en simulación (NREL 5MW)

Controlador borroso independiente

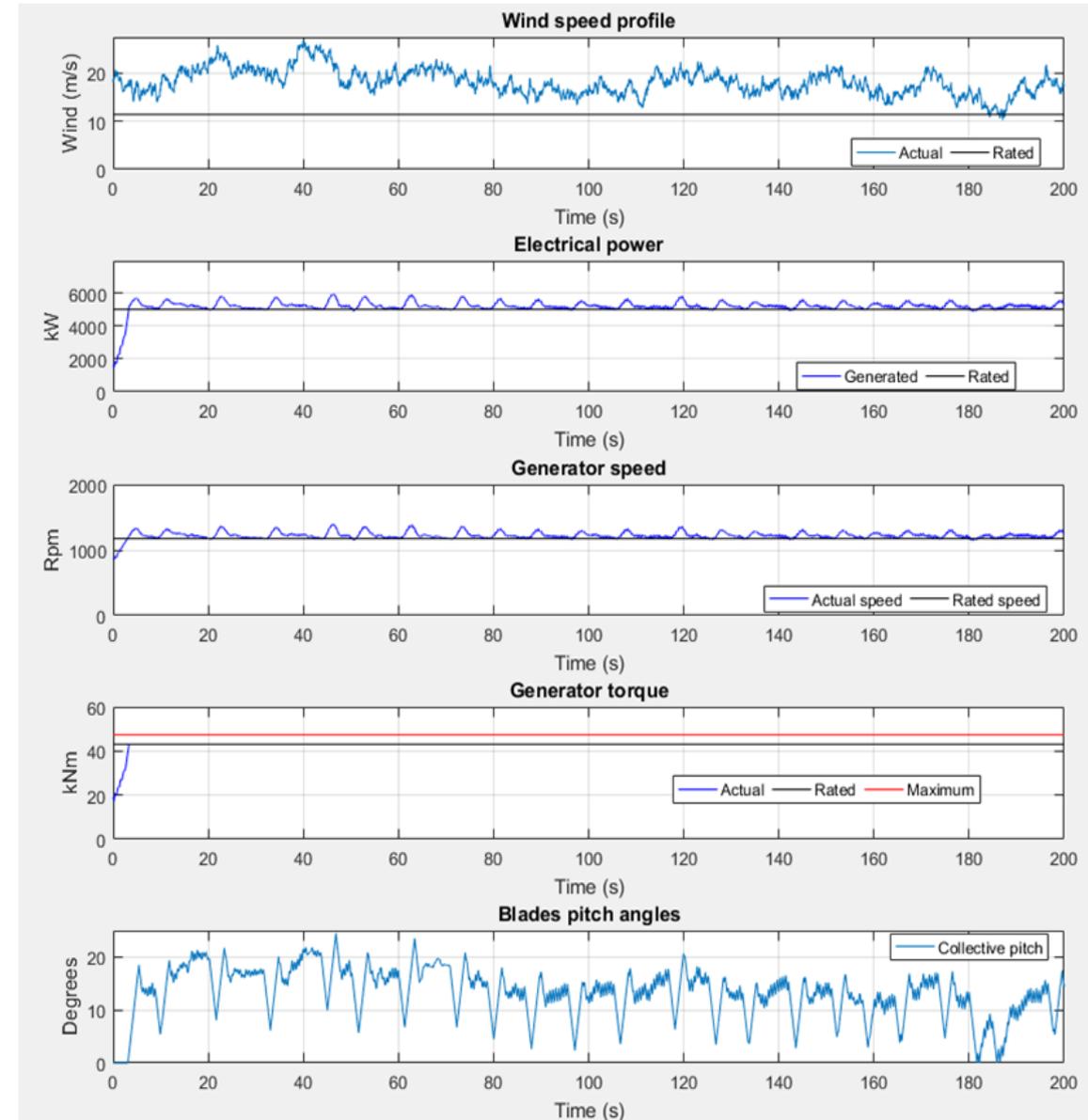
- Respuesta estable.
- Potencial de escalado/ampliación.



Resultados en simulación (NREL 5MW)

Controlador borroso supervisor del PI

- Mejor respuesta respecto al error en velocidad.
- Suficientemente rápido como para que la velocidad del generador se mantenga con pocos cambios.



Resultados: índices de mérito

- Para facilitar la evaluación de los resultados, se han elaborado tres índices de rendimiento.
- Estos índices muestran en qué medida el comportamiento del controlador se refleja en las cargas en la estructura, en el rendimiento en la generación de energía eléctrica y en el funcionamiento del aerogenerador frente a la operación nominal.
- Respectivamente, los índices que se proponen son los siguientes:
 - El índice estructural, IE.
 - El índice de generación, IG.
 - El índice de velocidad, IV.

Índices de mérito

- El índice estructural, IE: estima como afecta a la vida útil de la plataforma el comportamiento del controlador. Se supone que el aerogenerador está empotrado y se calcula a partir del momento de reacción en la base del mismo.

$$IE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i, \text{ para } N \text{ pasos de tiempo}$$

- El índice de generación, IG: mide la diferencia en MW entre la potencia eléctrica generada respecto de la nominal. Se calcula como la media de dicha diferencia en cada paso de tiempo en valor absoluto.

$$IG = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{nominal} - P_i|, \text{ para } N \text{ pasos de tiempo}$$

- El índice de velocidad, IV: mide en la diferencia entre la velocidad del generador eléctrico y su velocidad nominal. Se calcula como la media de dicha diferencia en cada paso de tiempo en valor absoluto.

$$IV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\omega_{nominal} - \omega_i|, \text{ para } N \text{ pasos de tiempo}$$

Resultados: índices de mérito (NREL 5MW)

Wind profile mean speed		12 m/s	15 m/s	18 m/s
Reference PI	Mechanical Index (MN·m)	76.4479	71.6635	60.0260
	Generation Index (MW)	0.7871	0.5132	1.1988
	Speed Index (rpm)	53.5189	103.3224	275.4546
Independent Fuzzy Logic Controller	Mechanical Index (MN·m)	76.6939	70.0338	55.9004
	Generation Index (MW)	0.7813	0.3318	0.6653
	Speed Index (rpm)	51.2965	61.9664	150.2268
Supervisory Fuzzy Logic Controller	Mechanical Index (MN·m)	76.1020	69.2329	53.3247
	Generation Index (MW)	0.7829	0.2271	0.2614
	Speed Index (rpm)	47.7927	36.4260	55.4029



3. Conclusiones

Conclusiones

- Una alternativa para aumentar la capacidad de generación de energía a partir de fuentes renovables la constituyen las plataformas semisumergibles.
- Este tipo de plataforma puede desplegarse en localizaciones *offshore*, donde hay menos perturbaciones en el viento, y menos impacto ambiental.
- Sin embargo, se producen interacciones entre la plataforma y los aerogeneradores, que dificultan el desarrollo de los sistemas de control, encargados de mejorar el rendimiento en la extracción de energía.



Conclusiones

- El control inteligente es una alternativa para este tipo de sistemas, en los que no es fácil obtener una expresión analítica del comportamiento del sistema completo.
- Los controladores borrosos en particular permiten incorporar el conocimiento experto en la operación de este tipo de sistemas, y además posibilitan un desarrollo incremental, de manera que puedan considerarse paulatinamente los efectos de las interacciones entre los elementos de la plataforma híbrida.
- Pueden añadirse además reglas que tengan en cuenta consideraciones acerca de la fatiga de los materiales, o la rentabilidad económica de la producción energética en un determinado instante.

Conclusiones

- Se ha presentado el desarrollo de un sistema de control borroso para un aerogenerador montado en una plataforma semisumergible. Se ha tomado como referencia el modelo OC4 con NREL 5 MW, que es el que presenta mayor similitud con la plataforma W2Power. El controlador se ha desarrollado en MATLAB/Simulink y FAST, y se ha comparado con los resultados obtenidos por el PI que propone NREL como referencia para el controlador de este tipo de aerogeneradores.
- El rendimiento obtenido es claramente superior, particularmente para vientos por encima del valor nominal.
- Esto abre la puerta a aplicaciones de control avanzadas en las que se tomen mayor cantidad de entradas, como por ejemplo considerar efectos provocados por las interacciones con el movimiento de la plataforma.

- Esta presentación se basa en los artículos:
 - Mayorga Rubio, P., Fernandez Quijano, J., Zambrana Lopez, P., Fernandez Lozano, J.J., Garcia Cerezo, A. and Ortega Casanova, J., 2019. Intelligent control for improving the efficiency of a hybrid semi-submersible platform with wind turbine and wave energy converters: fuzzy control system for the wind turbine. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(4), pp.480-491.
 - Pablo Zambrana-Lopez, Javier Fernández-Quijano, J. Jesus Fernandez-Lozano, A. Garcia-Cerezo, Pedro M. Mayorga Rubio. “Fuzzy Logic Tuning of a PI Controller to Improve the Performance of a Wind Turbine on a Semisubmersible Platform under Different Wind Scenarios”. Proceedings of the International Federation of Automatic Control, IFAC 2020.
- Muestra trabajos realizados dentro de los proyectos ORPHEO y NEREO.



PROYECTO-ORPHEO

CONVOCATORIA RETOS-COLABORACIÓN 2016

INICIO

OBJETIVOS

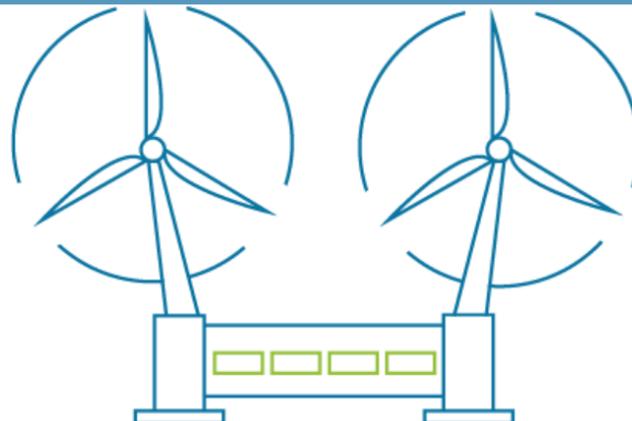
SOCIOS

DIFUSIÓN

RESULTADOS

CONTACTO

PRIVACIDAD Y COOKIES



OPTIMIZACIÓN
RENTABILIDAD
PLATAFORMAS
HÍBRIDAS
ENERGÍA EÓLICA
OLAS

En el proyecto ORPHEO se estudiarán las técnicas que permitan la optimización mediante control avanzado e inteligente de la rentabilidad económica que se puede obtener de una Plataforma Híbrida flotante integrada que incluye generación a partir de energía eólica y undimotriz (de las olas) conectada a la red eléctrica formando parte de un parque de energía renovable en el mar.

SOCIOS



Proyecto para promover el desarrollo tecnológico, la innovación y una investigación de calidad, co-financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y la Unión Europea.



"Una manera de hacer Europa"

<http://proyecto-orpheo.es/>



OPTIMIZACIÓN
RENTABILIDAD
PLATAFORMAS
HÍBRIDAS
ENERGÍA EÓLICA
OLAS

Convocatoria:

Retos - Colaboración 2016

Duración:

Julio 2016 - Junio 2019

Presupuesto financiero:

478.464,03€



Proyecto NEREO

NEREO (desarrollo de controladores NEuroborrosos para la optimización del REndimiento de aerogeneradores en plataformas semisumergibles Off-shore).

Proyecto incluido en el Proyecto Singular de Actuaciones de Transferencia del Conocimiento “Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. Ecosistema Innovador con Inteligencia Artificial para Andalucía 2025”.

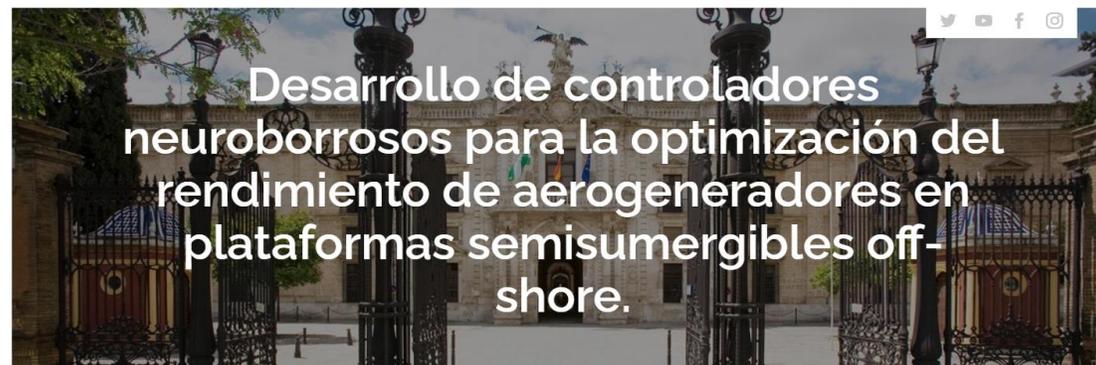
Entidades financiadoras: Junta de Andalucía y Fondos FEDER.



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional
“Una manera de hacer Europa”

<https://andaluciatech.org/ecosistema-innovador/proyectos-singulares/energias-renovables-eficiencia-energetica-y-2>



Inicio > Proyectos singulares

Desarrollo de controladores neuroborrosos para la optimización del rendimiento de aerogeneradores en plataformas semisumergibles off-shore.

El aprovechamiento de la energía eólica marina está limitado por la saturación de los emplazamientos viables en tierra o aguas poco profundas.

Investigador principal

Juan Jesús Fernández Lozano

Sede:

UMA

Tecnología

Maching Learning

Agentes agregados

EnerOcean, S.L.

Últimas publicaciones



Encuentros Sectoriales: "Los miércoles conectados con Inteligencia Artificial"

22/04/2021



Una aplicación para hacer triajes y desbloquear la sanidad

18/02/2021



Lanzamiento Oficial del Proyecto Ecosistema Innovador con Inteligencia Artificial para Andalucía 2025

06/03/2020



Andalucía Tech consigue la máxima puntuación y recibe 2 millones para la implantación de un programa de inteligencia artificial

28/01/2020

<https://andaluciatech.org/ecosistema-innovador/proyectos-singulares/energias-renovables-eficiencia-energetica-y-2>

Créditos

- Todas las figuras son de elaboración propia, salvo las indicadas expresamente:

Diapositiva 3: Grupo de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga

Diapositiva 4: Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mecha_workaround.svg. Licencia [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](#).

Diapositivas 5, 6, 7: Fuente: EnerOcean, S.L. Todos los derechos reservados.

Diapositiva 10: Fuente: <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/potencia-instalada-y-generacion>

Diapositiva 11: Fuente: <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana/potencia-instalada-y-generacion>

Diapositiva 17: Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foundations_NREL.jpg. Licencia [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](#).

- Las figuras de W2Power han sido cedidas para su uso en esta presentación por EnerOcean S.L., y son de su propiedad.

Referencias citadas

- Abdullah, M. A., A. H M Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur. 2012. “A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5): 3220–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.016>.
- Cheng, Ming, and Ying Zhu. 2014. “The State of the Art of Wind Energy Conversion Systems and Technologies: A Review.” *Energy Conversion and Management* 88: 332–47.
- Jonkman, J., S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott. 2009. “Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development.” (February). <http://www.osti.gov/servlets/purl/947422-nhrlni/>.
- Leung, Dennis Y C, and Yuan Yang. 2012. “Wind Energy Development and Its Environmental Impact: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1): 1031–39.
- Sahin, Ahmet Duran. 2004. “Progress and Recent Trends in Wind Energy.” *Progress in Energy and Combustion Science* 30(5): 501–43.
- Castro-Santos, Laura, Almudena Filgueira-Vizoso, Luis Carral-Couce, and José Ángel Fraguera Formoso. 2016. “Economic Feasibility of Floating Offshore Wind Farms.” *Energy* 112: 868–82. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216309094?via%3Dihub>
- Santos, M. 2011. “Un Enfoque Aplicado Del Control Inteligente.” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 8(4): 283–96. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791211000501>

J. Jesús Fernández Lozano

Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Automática

Universidad de Málaga

jesus.fernandez@uma.es

@jesusfl

